

磁电等离子体技术 用于汽车节能减排的实验研究



重庆大学硕士学位论文

学生姓名：王 勇

指导教师：冉振亚 教授

专 业：车辆工程

学科门类：工 学

重庆大学机械工程学院

二〇一〇年四月

Experimental Study of Magnetism Electric Plasma Applied to Automobile Energy Conservation and Consumption Reduction



A Thesis Submitted to Chongqing University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering

By
Wang Yong

Supervised by Prof. Ran Zhenya
Major: Vehicle Engineering

College of Mechanical Engineering of Chongqing University,
Chongqing, China

April 2010

摘 要

随着汽车保有量的不断增加，燃油消耗和汽车消费之间的矛盾将日益激化，汽车污染物排放总量也将持续攀升，为了缓解能源紧缺的形势，减少大气污染，近十几年来，内燃机研究者做了大量有益的工作，研究了多种提高内燃机热效率的新途径和控制有害气体排放的措施，但是，这些方法中均存在着节能和改善排放之间的矛盾。本文提出的利用磁电等离子体技术节油减排的方法是基于一种新的思路，它作用于发动机进气，使进气空气成为活性很强的极化激发态富氧气体，其中包含大量原子氧(O)、臭氧(O₃)以及一些氧化能力很强的自由基(OH^{*}、HO₂^{*})，在这些强活性物质的作用下，内燃机燃烧状况得到改善，燃料充分燃烧，从而达到节油减排的目标。

本文首先对梯度强磁场理论和气体放电产生等离子体的理论进行了探讨，分析了空气中顺磁性的氧气和逆磁性的氮气在梯度磁场中受到不同磁化力作用下的分离机理，以及放电等离子体对空气的极化激发作用，产生大量活性基元物质(O、O₃等)的过程，为磁电等离子体技术的节能减排应用奠定了理论基础。然后，分别通过对现有的梯度磁场氮氧分离设备和等离子体反应器进行分析，并结合实际条件设计了磁电等离子体净节能减排装置。

为了验证磁电等离子体节能减排装置的实际效果，我们在重庆大学内燃机技术研究所做了发动机的台架试验。实验表明，装置对降低汽车油耗和尾气排放有较好的效果，节油率可达 18.6%，尾气中 HC 的净化率可达 10%，CO 为 15%，但是 NO_x 的排放却有所增大，还需要尾气中的净化措施来处理。同时根据实验结果研究了各种相关因素对该装置节油减排效果的影响规律，相关因素主要包括磁化组不同类型、放电管不同类型、电源电压和放电反应管通电数目，从而，获得了该装置的最佳参数匹配。

关键词：梯度磁场，放电等离子体，实验研究，节油率，净化率

ABSTRACT

With the increasing of the amount of the automobile continuously, the contradictions of fuel burning and auto consumption is becoming more and more acute, the total amount of emission for automobile pollution is continuing rising. In recent ten years, in order to alleviate the situation of energy shortage and reduce air pollution, engine researchers have done a lot of useful work, they have studied a variety of new approaches and measures for internal combustion engine to improve the thermal efficiency, and to control harmful emissions. However, there are the conflict between improving energy efficiency and emissions in these methods. The method of this paper presents using magnetic plasma technology for fuel-efficient and emission reduction is based on a new approach. It acts on the air intake of engine, It acts on the air intake of engine, so that the intake air is becoming highly active and polarized-excited state of oxygen-enriched gas, which contains a large number of atomic oxygen (O) and ozone (O₃), as well as other strong oxidation free radical (OH *, HO₂ *), in the affection of these strong active substances, the burning condition of internal combustion engine is improved, and fuel is fully burning. Consequently, it achieve the target of energy saving and emission reduction.

In this article, firstly, the theory of gradient magnetic field and gas discharge produced plasma are discussed, and it analyses the separation mechanism of the paramagnetic oxygen and diamagnetic nitrogen which are subject to different magnetization force under the effect of gradient magnetic field, as well as the the process of discharge plasma make the intake air polarized and excited, producing a large number of active substances(O, O₃ and so all), these have laid a theoretical foundation for the technology of magnetism electric Plasma for energy-saving and emission reduction The theory of plasma generated by pulsed high voltage discharge is first discussed in this paper, and the course of chemical reaction which is generated by active ingredient in plasma and main pollutant from automobile exhaust emission is studied. Then, according to the analysis of kinds of existing gradient magnetic nitrogen-oxygen separation equipment and plasma reactors and actual conditions, we have designed an automobile energy-saving and emission-reduction device, which uses the magnetism electric plasma.

In order to verify the actual results of the energy-saving and emission-reduction

devices, we had done a engine bench test in the Internal Combustion Engine Research Institute of Chongqing University. Experiments show that the devices have good results to reduce vehicle fuel consumption and exhaust emissions, fuel saving rates up to 18.6%, and in emissions HC purification rate of up to 10%, CO 15%, but NO_x emissions is increased, it also need to deal with by other exhaust purification measures. At the same time, according to the experimental results, a variety of relevant factors that affect the fuel-saving and purifying effect of the device are also studied. The factors mainly include the different types of magnetization groups, the different types of discharge tube, supply power voltage and the number of energized discharge reaction tube, as this test, we access to the device's the best parameter matching.

Keywords: Gradient Magnetic Field, Gas-discharge Plasma, Experimental Study, Fuel Saving Ratio Purifying Rate

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
1 绪论	1
1.1 汽车能耗和排放现状	1
1.2 汽车尾气污染物的危害	1
1.2.1 一氧化碳对人体和环境的危害.....	1
1.2.2 碳氢化合物对人体和环境的危害.....	2
1.2.3 氮氧化合物对人体和环境的危害.....	2
1.2.4 可吸入微粒对人体和环境的危害.....	2
1.3 汽车尾气排放法规和燃油消耗标准	3
1.3.1 汽车尾气排放的法规.....	3
1.3.2 汽车燃油消耗标准.....	4
1.4 汽车节油技术和尾气排放控制技术	5
1.4.1 汽车节油技术.....	5
1.4.2 汽车尾气排放控制技术.....	6
1.5 本文研究的目的是主要内容	7
1.5.1 本文研究的目的.....	7
1.5.2 本文研究的主要内容.....	8
2 磁电等离子体理论研究	9
2.1 梯度强磁场理论	9
2.1.1 梯度及梯度磁场.....	10
2.1.2 物质磁性的定义.....	10
2.1.3 物质磁性的分类.....	11
2.1.4 气体的磁特性.....	11
2.1.5 顺抗磁性气体分子在梯度磁场中的受力.....	13
2.1.6 梯度磁场中氮氧的分离机理.....	15
2.2 等离子体的基本理论	16
2.2.1 气体放电特性.....	16
2.2.2 汤生放电理论.....	18
2.2.3 流柱理论.....	19
2.2.4 等离子体的产生形式.....	20

2.2.5 脉冲电晕放电	21
2.2.6 等离子体激化空气的机理分析	22
2.3 磁电等离子体极化激发空气分析	24
2.4 本章小结	25
3 磁电等离子体实验装置的设计	26
3.1 装置总体设计思路	26
3.2 磁化组	26
3.2.1 磁化组总体结构	26
3.2.2 磁化组磁路设计原则	27
3.2.3 磁化组中梯度磁铁的结构型式	28
3.3 等离子体放电反应器	31
3.3.1 放电反应器总体结构	31
3.3.2 放电反应管结构	32
3.4 电源选择	34
3.4.1 电源电压	34
3.4.2 脉冲电源	35
3.5 本章小结	36
4 实验装置与方法	37
4.1 发动机台架试验	37
4.1.1 实验仪器和设备	37
4.1.2 实验方法	39
4.2 实验步骤	41
4.3 本章小结	41
5 实验结果分析	42
5.1 实验装置对发动机油耗的影响	42
5.1.1 磁化组单独作用	42
5.1.2 磁化组和放电管共同作用	44
5.2 磁化组结构型式对发动机油耗的影响	45
5.2.1 负荷特性试验	45
5.2.2 速度特性试验	47
5.3 实验装置对发动机排放的影响	49
5.3.1 磁化组和放电管共同作用	50
5.3.2 放电管通电电压的影响	52
5.3.3 放电反应管结构型式的影响	53

5.3.4 放电反应管通电数目的影响	54
5.4 本章小结	56
6 结论与建议	57
6.1 结论	57
6.2 建议	58
致 谢	59
参考文献	60
附 录: A. 作者在攻读硕士学位期间发表的论文	63

1 绪 论

1.1 汽车能耗和排放现状

随着我国经济持续快速的发展和壮大，城市的规模不断扩大，道路里程的不断增加，汽车与人们生产和生活的关系越来越密切，汽车保有量急剧增加。据公安部交管局的数据统计显示，至 2009 年底，我国汽车保有量已达 7619.31 万辆，较 2008 年增加 1152.10 万辆，增幅达 17.81%，全年汽车产销量双双突破 1360 万辆，首次超过美国，成为世界第一大汽车生产和销售国家。

然而，伴随着汽车保有量的急剧增长，能源的消耗与汽车消费之间的矛盾将日益激化，汽车污染物排放总量也将持续攀升。有研究表明，目前我国机动车消耗了全国汽油总产量的 85%，柴油总产量的 42%。汽车将成为石油消耗增长的主要因素。而同时，以发达国家为例，空气污染中 60%多的一氧化碳、87%的碳氢化合物和 55%的氮氧化物来自汽车尾气排放^[1]，可见，汽车不仅对能源的消耗大，而且产生的空气污染量也比其他任何单一的人类活动所产生的空气污染量都大，汽车工业发展逐渐面临能源、环境等方面更大的压力。

为了应对全球的气候恶化和能源的短缺，美国联邦政府于 2010 年 4 月 1 日颁布了新的汽车条例，对汽车的温室气体排放量和单位耗油行驶里程数作出了规定，要求到 2016 年所有新车平均燃油经济标准要达到 35.5 英里/加仑（这算为 6.62 升/百公里），预计新规定将在 2012 年-2016 年间促使二氧化碳等温室气体的排放量下降 30%，据估算，到 2016 年，该计划将为每个车主在一辆汽车的正常寿命内平均节约 3000 美元汽油费，所有受到规制的汽车将总计少排放 10 亿吨温室气体。由此可见，汽车节能减排技术的开发应用仍然是各大汽车公司和专业人员研究的对象。

1.2 汽车尾气污染物的危害

汽车尾气排放污染具有流动性强、局部地区的污染物浓度高等特点，其中主要污染物有一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）和可吸入微粒（PM）等，它们会危害人体健康和生态环境。而尾气中排出的二氧化碳（CO₂）虽然对人体健康没有危害，但它会造成温室效应，破坏大气环境的温度平衡。下面分别介绍四种排放污染物的危害^[2,3,4]。

1.2.1 一氧化碳对人体和环境的危害

CO 是无色无臭无味的易燃有毒气体，CO 与血色素之间的亲和力是 O₂ 的 200 多倍，容易结合成碳氧血红蛋白（CO-Hb），使血的输氧能力降低，还使人体组

织中氧的离解能力下降，造成组织缺氧。当 CO 浓度不高时，其可以抑制人的思考，使人反应迟钝，引起睡意；当浓度比较高时，会出现头疼，昏沉的症，严重时甚至致死。暴露在高浓度的 CO 中会加剧心绞痛，增加冠心病患者发生运动性心痛的可能性。

CO是城市空气污染中数量最多、分布最广的污染物。由于汽车尾气中污染气体的排放，大城市的交叉道口和交通繁忙的道路上，常常出现高含量的一氧化碳污染。

1.2.2 碳氢化合物对人体和环境的危害

HC（也称烃）是指发动机废气中未燃的气相部分，还包括供给系统中燃料的蒸发和滴漏，由苯、醛、酮、烯、多环芳香族碳氢化合物等 200 多种复杂成分组成。其中，饱和烃的危害不大，如甲烷气体无毒性。不饱和烃的危害性则比较大，如当甲醛等醛类气体浓度超过 1ppm 时，会对眼睛、呼吸道和皮肤有很强的刺激作用；浓度超过 25ppm 时，会引起头晕、呕心和贫血；而在浓度超过 1000ppm 时会引起急性中毒。应当引起特别注意的是带更多环的多环芳香烃，如苯并花和硝基烯，它们都是强致癌物质。此外，HC 还是导致光化学烟雾的重要成分。

1.2.3 氮氧化物对人体和环境的危害

氮氧化物是发动机在负荷一定时产生的一种褐色的、有臭味的废气，是多种氮氧化物的总称，如 NO_2 , NO , N_2O_3 , N_2O_5 等。汽车尾气排放中的氮氧化物主要是 NO ，约占 95%，其次是 NO_2 ，约占 5%。 NO 是无色的气体，在空气中，一氧化氮被氧化成 NO_2 ，当其在空气中的体积比浓度超过 15×10^{-6} 时，它会和血红蛋白结合，当体积比浓度超过 20×10^{-6} 时，会影响肺的功能。 NO_2 是红褐色气体，具有强烈的刺激味，对肺和心肌等都有很强的损害作用。

NO_x 与HC受到阳光中紫外线照射后会发生化学反应，形成光化学烟雾。当光化学烟雾中的光化学氧化剂达到一定浓度时，会对人的眼结膜有明显的刺激性，引起流泪甚至导致红眼症，同时对鼻、咽、喉等器官也有刺激作用，可引起急性喘息症，使人呼吸困难、眼红喉痛、头脑昏沉，造成中毒等。此外，光化学烟雾还会对植物组织造成损害、降低大气能见度、损坏橡胶制品的危害。

1.2.4 可吸入微粒对人体和环境的危害

可吸入微粒（PM）又称碳烟，是发动机燃料不完全燃烧的产物，微粒物质中含有大量的黑色碳颗粒。其会影响道路上的能见度，并因含有少量的带有特殊气味的乙醛，容易使人恶心和头晕。汽车排出的微粒物质不仅本身对人的呼吸系统有害，而且其孔隙中往往吸附着二氧化硫和有致癌作用的多环芳香烃等。因此，包含我国在内的许多国家都规定了最大限值的烟度值，并对测量方法作了规定。

1.3 汽车尾气排放法规和燃油消耗标准

1.3.1 汽车尾气排放的法规

为了控制和减少汽车尾气排放污染，保护人类赖以生存的大气环境。世界各国纷纷采取了各种措施，制定了一系列的排放法规。对于不同的国家和地区，由于经济基础、社会状况等具体的条件不同，适宜的排放法规也是不同的。若排放法规过于严格，会导致投资和运行费用急剧增高；若排放法规过于宽松，则失去了建立法规，保护环境的意义，因此各个国家制定的法规也不尽相同。美国、日本和欧洲的排放法规形成当今世界三大汽车排放法规体系。其他许多国家都不同程度的采用了这些法规和标准。见图1.1和图1.2^[6]

等级	实施时期	CO		THC		NMHC		Nox		HC + Nox		PM				
		CI	SI	CI	SI	CI	SI	CI	SI	CI	SI	CI	SI	CI	SI	
欧1 [#]	1992.07	2.72 (3.16)		-	-	-	-	-	-	0.97 (1.13)		0.14 (0.18)			-	-
欧2	1996.01	1.0	2.2	-	-	-	-	-	-	0.7	0.5	0.08	-	-	-	
欧3	2000.01	0.64	2.3	-	0.20	-	-	0.5	0.15	0.56	-	0.05	-	-	-	
欧4	2005.01	0.50	1.0	-	0.10	-	-	0.25	0.08	0.30	-	0.025	-	-	-	
欧5	2009.09	0.500	1.000	-	0.100	-	0.068	0.180	0.060	0.230	-	0.005	0.005 ^{**}	-	-	
欧6	2014.09	0.500	1.000	-	0.100	-	0.068	0.180	0.060	0.170	-	0.005	0.005 ^{**}	-	-	

注：CI-柴油机；SI-汽油机
 * 在Euro5之前，乘用车质量大于2500kg按轻型商用车M1-I进行形式论证
 ** 仅用于缸内直喷汽油机
 *** PM数量限值（建议值 $5 \times 10^{11}/\text{km}$ ）会尽快确定并在Euro6生效
 # 括号限值用于产品一致性（COP）

图 1.1 欧盟乘用车排放标准（M*类），g/km

Fig1.1 The emission standards of passenger cars in European Union (class M*),g/km

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
阿根廷	Euro I		Euro II		Euro III					
澳大利亚(汽油)	Euro I		Euro II		Euro III					
澳大利亚(柴油)	Euro I		Euro II		Euro IV					
巴西	Euro II		Euro III		Euro III					
哥伦比亚	Euro I		Euro II		Euro III					
俄罗斯	Euro I		Euro II		Euro III		Euro III			
越南	Euro I		Euro II		Euro III					
新加坡(汽油)	Euro I		Euro II		Euro III					
新加坡(柴油)	Euro I		Euro II		Euro III					
香港	Euro III		Euro IV		Euro IV					
墨西哥	Euro II		Euro III		Euro III					
中国(汽油)	Euro I		Euro II		Euro III		Euro IV			
中国(柴油)	Euro I		Euro II		Euro III		Euro IV			
印度(国家)	Euro I		Euro II		Euro III		Euro III			
印度(10城市)	Euro I		Euro II		Euro III		Euro IV			
韩国(汽油)	Korea2000		Korea2004		CA ULEV					
韩国(柴油)	Korea2000		Korea2004		Euro IV					
泰国	Euro II		Euro III		Euro IV					

图 1.2 采用欧盟排放标准体系的国家及其排放法规实施情况

Fig1.2 The implementation of countries based on European Union emission standards and emission law

在世界三大排放标准体系中，欧洲排放法规在标准的严格程度与道路交通状况等方面相对更适合我国的实际情况，通过学习它们的成功经验制定了一条适合我国国情的汽车排放标准技术路线：对汽油车先实行“怠速法”控制，再实施“强制装置法”；对柴油车则是先实行“自由加速法”及“全负荷法”控制烟度，然后再与汽油车同步实施工况法；第三步再考虑制定柴油车颗粒物排放标准。图1.3为我国轻型车排放标准实施情况。

等级	实施日期	范围	注释
国1	2000.01	全国	GB14761-1999
国2	2002.08	北京	GB18352.2-2001
	汽油机: 2004.07 柴油机: 2003.09	全国	
国3	2005.12	北京	GB18352.3-2005; 2006.12开始带OBD OBD: Type1 2008.07; Type2 2010.07
	2007.07	全国	
国4	汽油机: 2008.03 柴油机: 2007.01	北京	GB18352.3-2005
	2010.07	全国	

图 1.3 中国轻型车排放标准实施情况

Fig1.3 The implementation of emission standards for light vehicles in china

1.3.2 汽车燃油消耗标准

随着石油资源的紧张，国家也逐渐严格了对乘用车的燃油消耗的限制，国家质检总局和国家标准化委员会在2004年联合发布了GB 19578-2004《乘用车燃料消耗量限值》，对乘用车的型式验证增加了燃油消耗量的控制，通常的测量方法依然采用排放测量的标准28工况法，燃油消耗限值如表1.1所示。

工信部《轻型汽车燃料消耗量标示管理规定》，2010年1月1日起，在中国境内销售的总质量3.5吨及以下的乘用车和轻型商用车将粘贴《汽车燃料消耗量标识》，汽车生产企业、进口汽车经销商提供的燃料消耗量（包括市区、市郊、综合三种工况的燃料消耗量）数据，必须是按照统一的检测方法（GB/T 19233-2008《轻型汽车燃料消耗量试验方法》）检测、并经工业和信息化部指定检测机构（其中进口汽车可经质检部门指定检测机构）检测确认的燃料消耗量数据。此规定将为社会各界全面、准确地了解我国轻型汽车燃料消耗量情况提供服务平台，为消费者购买低油耗汽车提供参考，对推动汽车企业开发节能新技术，促进我国汽车产业节能减排和技术进步将发挥积极作用。

表 1.1 乘用车燃料消耗量限值(1)单位为 L/100km

Table.1 The limited of fuel consumption for passenger car (1)

整车整备质量 (CM) /kg	第一阶段	第二阶段	备注
CM≤750	7.2	6.2	执行日期:
750<CM≤865	7.2	6.5	对于新认证车, 第一
865<CM≤980	7.7	7.0	阶段的执行日期为
980<CM≤1090	8.3	7.5	2005 年 7 月 1 日, 第
1090<CM≤1205	8.9	8.1	二阶段的执行日期为
1205<CM≤1320	9.5	8.6	2008 年 1 月 1 日。
1320<CM≤1430	10.1	9.2	
1430<CM≤1540	10.7	9.7	对于在生产车, 第一
1540<CM≤1660	11.3	10.2	阶段的执行日期为
1660<CM≤1770	11.9	10.7	2006 年 7 月 1 日, 第
1770<CM≤1880	12.4	11.1	二阶段的执行日期为
1880<CM≤2000	12.8	11.5	2009 年 1 月 1 日。
2000<CM≤2110	13.2	11.9	
2110<CM≤2280	13.7	12.3	
2280<CM≤2510	14.6	13.1	
2510<CM	15.5	13.9	

1.4 汽车节油技术和尾气排放控制技术

1.4.1 汽车节油技术

目前, 节油技术在汽车设计、制造以及使用方面已得到了广泛的应用, 并朝着多元化的趋势发展。主要有以下方法^[7]:

① 优化设计燃烧系统 内燃机技术的发展在很大程度上与燃烧技术的发展密切相关。燃烧室结构是影响燃烧过程的主要因素, 它涉及到活塞顶和缸盖的形状, 火花塞的位置, 进、排气门的尺寸和数量, 以及进气口的设计等一系列问题。设计者对燃烧室形状、燃烧室布置以及喷射系统进行了优化设计。

② 采用电子点火系统 一些现代新型汽油机已越来越多地采用优化的电子点火系统, 代替了传统的分电器, 最佳点火角可以根据发动机工作范围及一些附加要求(如排放、爆燃界限或驾驶性能等)计算出来, 以实现点火提前角的多维优化调节。

③ 优化供油系统 现代内燃机向着提高比功率、改善燃油经济性和符合环境保护法规的方向发展, 使供油系统有了以下几种发展趋势: 采用增压技术、采用

直喷燃烧系统、精确控制喷油过程参数

④ 汽车柴油机化, 通常柴油机的热效率要比汽油机高许多, 如能广泛地使用柴油机, 将会节约大量燃料。柴油机的优点还在于它可以使用纯度比较低、价格比汽油便宜的柴油作燃料。

开发混合动力汽车和纯电动汽车 由于混合动力和纯电动汽车突出的低能耗、小排放或零排放优点, 是以后汽车节能减排发展的方向。

为了降低汽车能耗和满足逐渐严格的法律法规限制, 汽车节油技术已经有了长足的发展和进步, 除了上面介绍的几种节油方法外, 还有很多再用或者在研的技术, 本文尝试使用梯度磁场氮氧分离技术和低温等离子技术共同对发动机进气空气作用后, 促使燃料充分燃烧, 起到节能和减排的目的。

1.4.2 汽车尾气排放控制技术

解决发动机排气污染的途径主要包括: 对现有发动机的排气污染物进行净化; 研制无污染或低污染动力源。目前主要从以下两个方面来控制尾气中污染物的排放^[2,8,9]

① 机内净化: 通过控制燃烧过程来实现相应的目标。其主要的的方法包括改进燃烧室结构, 如采用复合涡流控制燃烧, MCA-JET三门发动机; 以及改进点火系统, 如在化油器上设置断油装置和稀混合气供给装置, 采用延迟点火装置和晶体管点火装置等。目前国内外已运用的机内净化方法有^[10]: 延迟点火法、废气再循环装置(EGR){降低发动机输出功率}、控制燃烧装置(CCS)、清洁空气装置(CAP)等。随着排放法规的不断严格, 机内净化方法几乎已达到了其技术的极限, 单纯依靠机内净化技术已很难满足排放标准的要求。

② 机外净化: 是通过附加装置来净化发动机排出的废气。目前主要是加装废气催化转化器, 使汽车尾气经催化剂的催化活性将其中未燃烧及燃烧不充分产生的有害气体转化为无害物质。现在较为先进的技术是三元催化剂法, 是目前国际公认的能高效大幅度消减汽油机排放污染物的主流技术。但目前使用催化剂净化尾气仍然存在一些问题^[11]: 1) 对燃料的要求: 无铅、低硫或无硫; 2) CO、HC、NO_x排放浓度不能过高, 否则会烧坏催化剂; 3) 必须与精密的电子控制汽油喷射系统结合使用, 才能维持空燃比在 14.7 ± 0.1 ; 4) 作为催化剂的贵金属存储有限, 价格昂贵。

由机内净化和机外净化的处理措施和效果可见, 污染物的控制仍然是以机内净化为基础, 机外净化作为补充, 由于机内净化是对燃料的燃烧质量进行优化, 是治本的方法, 其除了可以降低尾气排放外, 还可以降低汽车燃油消耗, 是一举两得的措施。

近年来, 低温等离子体技术已被成功地应用于固体废弃物、废液、废气的处

理，逐渐成为环境保护领域内受人青睐的一项技术。

由文献^[12]可知，等离子体技术可以作为机内净化的一种有效手段，与以往的机内净化措施不同，其可以使空气等离子体化，促进燃料的充分燃烧，而且可以部分电离碳氢化合物燃料和空气的混合物，从而改变机内的操作条件，以至改变燃烧平衡和尾气的组成（主要是降低CO、HC和NO_x的含量）。其主要是使空气等离子化，即在空气进入内燃机燃烧室之前，使空气经过等离子体发生器被电离形成空气等离子体。空气等离子体中富含原子氧O和臭氧O₃及其它氧气的激发态，其参与燃烧反应的能力比中性的氧气分子更强，因此，可以使HC、CO得到充分氧化从而减少其生成量，同时也降低了燃料的消耗量。但是，受到等离子体发生器的限制，以及产生空气等离子体所消耗的能量较大，而且，这种方法会促进进气空气中N₂的氧化反应，产生更加严重的NO_x危害，目前，此技术仍然处于实验性研究阶段。

由文献^[13,14]可知，低温等离子技术用于汽车废气的机外净化也有大量的研究，也是使汽车尾气经催化作用后将其中未燃烧及燃烧不充分产生的有害气体转化为无害物质，其主要是在发动机排气管中加装等离子体发生器，使反应生成的废气经过等离子体作用，达到降低有害气体排放的目的，本文不对此部分进行研究。

本文主要研究磁电等离子体技术对汽车发动机进气极化激发处理后来降低汽车油耗和尾气排放。首先在发动机进气处安装梯度强磁场装置，使发动机的进气进行氮气和氧气的分离，起到在进气处富集氧气的效果，再经过等离子处理产生大量的原子氧O、臭氧O₃及其它氧气的激发态，从而使燃料在富氧下充分燃烧，降低燃料的消耗以及尾气污染的排放。

1.5 本文研究的目的是主要内容

1.5.1 本文研究的目的

目前梯度强磁场富氧技术和低温等离子体术已经在工业领域得到了广泛的关注和应用，并且已经取得了较大成果。但总的来说还存在一些问题：理论方面，梯度强磁场氮氧分离的机理和等离子体的产生机理、等离子体与被处理物间的物理化学过程还不是很清楚；技术方面，目前多数研究仍以实验摸索为主，因而对实验装置及其工艺的优化设计缺乏完善的指导依据，本课题通过对磁电等离子体技术理论的研究和论证，应用于汽车的节能减排，并在发动机台架实验中对其节能减排效果进行验证，为该技术在汽车节能减排领域的应用提供一定的理论依据和技术支持，为磁电等离子体节能减排装置结构参数的优化以及实际实用奠定一定的基础。研究磁电等离子体技术对提高汽车排放污染控制水平与保护城市大气环境都具有非常重要的现实意义，对提高我国汽车排放控制领域在国际上的竞争

力，发展我国环保产业具有巨大的影响。

1.5.2 本文研究的主要内容

本文首先对梯度磁场氮氧分离的原理和放电等离子体基本理论进行了探讨，并通过发动机台架实验验证梯度强磁场氮氧分离技术和高压脉冲放电等离子体技术用于汽车节油和尾气净化方面的效果，针对实验要求设计了几种类型的梯度强磁场磁化组和等离子体放电反应管，并通过试验效果分析和总结了各种类型的好坏，为此类技术的应用提供一定的设计依据和实验佐证。本文研究主要内容总结为下几部分：

① 对物质的磁性进行了初步的分析，阐述了顺磁性物质和逆磁性物质的性质，以及从微观角度推导出其在非均匀磁场中受到的磁化力公式和影响因素，并据此论证了顺磁性的氧气和逆磁性的氮气在梯度磁场中受到大小和方向不同的磁化力作用，从而在合适的梯度磁场中可以实现空气中氮气和氧气的分离。

② 阐述了低温等离子体的基本理论，分析了气体放电产生等离子体的理论和特性。对产生等离子体的不同形式进行了对比和研究，同时对本论文用到的脉冲电晕放电形式作了具体的介绍，分析了富氧空气在等离子化作用后产生活性基元粒子原子氧 O、臭氧 O₃ 及其它氧气的激发态的机理。

③ 通过对梯度磁场氮氧分离机理和低温等离子体激化机理的分析，设计开发了磁电等离子体节能减排进气装置。并根据实验要求，对比开发了不同结构型式的梯度磁场磁化组的等离子体放电反应管，以及对脉冲电源的电压形式和电源方案选择进行了初步的探讨。

④ 通过对加装了磁电等离子体节能减排装置的发动机进行台架试验测试，对试验所得数据进行整理，分析发动机的节油效果，以及排放中 HC、CO 和 NO_x 的净化效果。并通过发动机的节油效果考察和确定不同结构类型磁化组的设计可行性，以及由 HC、CO 和 NO_x 净化效果验证放电管通的电压、通电数目和不同结构类型的影响，确定放电反应管参数的最佳选择值。

2 磁电等离子体理论研究

2.1 梯度强磁场理论

近几十年来，随着环保要求的不断提高以及节约能源的需要，增氧燃烧作为一种新兴的燃烧技术在世界各国蓬勃发展，增氧燃烧即增加助燃空气中氧气含量而完成的燃烧过程，或称富氧燃烧，简称OEC^[15]，它是一项节能高效的燃烧技术，广泛应用于冶金炉、玻璃窑炉、陶瓷窑炉、水泥窑炉、工业锅炉，也有应用于汽车内燃机和航空发动机。目前，主要是采用低温精馏法、变压吸附法和薄膜渗透法，而磁分富氧是近年来涌现出的一种新的制氧方法，由于其可以在常温常压下从空气中富集氧气，无需将空气液化，也无需对空气加压；所需设备简单，寿命长，投资小、维护简单方便；可随产随用、方便灵活、流动性强等优点，可以设法应用于内燃机的富氧燃烧。

内燃机要实现能量转换，气缸内必须有充足的氧气，通常气缸内的氧气是直接由大气空气来提供的，若能提高进气空气中的含氧量，即富氧空气，在循环供油量不变的前提下，可促进燃料的充分燃烧，提高能量的转换效率；在过量空气系数不变的前提下，可提高内燃机的做功能力。但车辆用发动机携带氧气瓶不方便，需要在常温常压下用一种经济、简便的方法获取富氧空气。变压吸附法由于存在解吸过程而不能连续地制取富氧空气，不能满足内燃机工作的要求；薄膜渗透法虽然可连续供给内燃机富氧空气，但因富氧膜成本高，且遇水、遇油容易失效，使富氧燃烧技术的推广受到限制。周斌尝试用高梯度强磁场使空气中氧和氮分离的方法向汽缸供给富氧空气，试验结果显示，柴油机的油耗降低了3%~5%^[16]。证明了梯度强磁场富氧技术应用于内燃机是可行的。

气体在外磁场作用下的流动行为经过人们的长时间研究，1847年法拉第^[17]发现了气体运动的磁效应，指出抗磁性气体受到磁极的排斥向磁场强度降低的方向流动，顺磁性气体则受到磁极吸引而向磁场强度增加的方向流动。根据顺抗磁性气体在梯度磁场中呈现出的不同流动行为，国内外许多研究者在利用梯度磁场促进扩散火焰中的燃烧、加速呼吸、控制对流传热等方面开展了较多研究，并且取得了显著的研究进展。文献^[18]已经证实，空气中的氧气和氮气有顺磁性和逆磁性的磁性差异，其在磁场的作用下有不同的运动方向，从而，在此基础上提出了利用梯度磁场进行空气的氮氧分离，进行氧气富集，即梯度磁场分离法，该法的研究虽处于起步阶段，但研究已显示它具有成本较低、结构较简单、维护方便等优势，具有广阔的应用前景。

2.1.1 梯度及梯度磁场

梯度正如一个有坡度的路面的倾斜度，数学意义上是指斜率，在物理学上梯度定义为：在一定方向上，强度随空间的变化率，所以梯度是一个矢量，具有大小及方向性。

梯度磁场是指在一定方向上磁场强度的变化率。梯度磁场的方向是由场强低的位置指向场强高的位置，梯度磁场的大小等于在场强变化的方向上单位距离内场强之差。如果一个梯度磁场的场强随位置线性增加或减小，这个梯度磁场就是一个线性梯度场。一个 Z 方向的线性梯度磁场可用下述方程表示^[19]：

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + (\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_0)G_z \quad (2.1)$$

式 (2.1) 中， \mathbf{B}_0 是线性梯度场中心位置 \mathbf{Z}_0 处的磁场强度，或者，未迭加梯度场时的均匀恒定磁场的强度； G_z 是 Z 方向梯度的大小， $G_z = \Delta B / \Delta Z$ ，对线性梯度场 G_z 是个常数。

磁场梯度的单位是高斯/厘米 (G/cm) 或特斯拉/米 (T/m)。

2.1.2 物质磁性的定义

一般来说，物质磁性是利用该物质在磁场中受到的力的作用来定义的。严格地说，具有磁性的物质在不均匀的具有梯度的磁场中受到力的作用，可以采用下列公式来决定物质的磁性^[20]：

$$F_z = \frac{1}{\mu_0} \chi_m m B_x \frac{\partial B_x}{\partial z} \quad (2.2)$$

式中， B_x 为磁通量密度在 x 方向的数值，而磁通量密度梯度 ($\partial B_x / \partial z$) 表示 B_x 在 z 轴方向的梯度； m 为该物质的质量； μ_0 为真空磁导率，亦称磁常数，其数值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ； χ_m 为该物质的单位质量磁化率。除了单位质量磁化率外，还经常使用体积磁化率 χ (一般简称磁化率，以后若不作特殊说明，均指该磁化率)、摩尔磁化率 (也叫分子磁化率)，原子磁化率 χ_A ，它们和质量磁化率的关系为^[21,22]：

$$\chi = \rho \chi_m \quad (2.3)$$

$$\chi_{mol} = M \frac{\chi}{\rho} = M \chi_m \quad (2.4)$$

$$\chi_A = A \chi_m \quad (2.5)$$

式中， ρ 为物质的量， M 为摩尔质量， A 为原子量。

χ 的正负和大小表示磁性的类别和强弱， χ 为负值时为抗磁性物质，也叫逆磁性物质； χ 为正值且 $\ll 1$ 时为顺磁性物质； $\chi > 1$ 时为强磁性物质。任何物质都具有磁性，也就是说任何物质都具有磁化率，即任何物质在不均匀梯度磁场中都会受到力的作用，该力被称为磁化力。

2.1.3 物质磁性的分类

物理学家把物质的磁性分为抗磁性、顺磁性和铁磁性三类，通过实验观察到，一些受到的磁力很弱，而且受力方向是在磁场强度减弱的方向，好像是对抗磁场的作用，因此把这种磁性成为抗磁性；另一些物质受到的磁力虽也很弱，但受力的方向却是在磁场强度增强的方向，好像是顺着磁场的作用，因此把这种磁性成为顺磁性；只有少数物质，如铁、钴、镍和它们的一些合金才在磁场中受到很强的磁力吸引作用，由于这类物质的强磁性首先是在铁和含铁合金中观测到的，因此称这种磁性为铁磁性。

① 物质的顺磁性

顺磁性并不是一切物质都具有，只有物质中含有带原子磁矩或分子磁矩的原子或分子系统时，才有顺磁性^[23]。顺磁性物质的磁化率为正值，一般为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ ；大部分顺磁性物质的磁化率 χ 随温度T增加而降低

② 物质的抗磁性

抗磁性属于弱磁性，抗磁性物质的磁化率为负数，其绝对值远小于1，表示抗磁性物质在外加磁场中产生的合磁化方向与外加磁场方向相反。抗磁性是一切物质都具有的，但当物质中的其他磁性如顺磁性和铁磁性超过其中的抗磁性时，这些物质便表现为其他磁性。物质抗磁性来自于构成该物质的原子或离子的抗磁性，原子或离子的抗磁性则是由原子或离子中的原子核外的电子轨道运动产生的^[23]。

2.1.4 气体的磁特性

任何物质都具有一定的磁性，气体也不例外，而且不同的气体所具有的磁性是不同的，不同气体的磁性以体积磁化率来表示，见表 2.1。几种彼此不进行化学反应的气体组成混合气体时，该混合气体的体积磁化率可粗略地认为各种气体体积磁化率的算术平均值，即：

$$\chi_{mixture} = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \chi_i \quad (2.6)$$

式中， c_i 为第*i*种气体的百分含量； χ_i 为第*i*种气体的体积磁化率； $\chi_{mixture}$ 为混合气体的体积磁化率。

氧气作为顺磁性气体，其体积磁化率为正值，并且比其他气体的体积磁化率要高，因此在计算空气的磁化率时，可以忽略其他气体的体积磁化率，式（2.6）变为：

$$\chi_{mixture} \approx c_{O_2} \chi_{O_2} \quad (2.7)$$

式中， c_{O_2} 为混合气体中氧气的百分含量， χ_{O_2} 为氧气的体积磁化率。

顺磁性气体的磁化率也符合顺磁性物质的特点，即磁化率会随气体温度的升高而降低，具体遵从下面的关系：

$$\chi = \frac{C\rho}{T} \quad (2.8)$$

式(2.8)被称为居里定律,其中C为居里常数; ρ 为气体密度; T为气体的热力学温度。

根据理想气体状态方程,有:

$$pV = nRT \quad (2.9)$$

式中, p 为气体压力; V 为气体体积; n 为气体的摩尔数; R 为摩尔气体常数。气体密度 ρ 为:

$$\rho = \frac{nM}{V} \quad (2.10)$$

式中, M为气体的分子量。将式(2.9)代入(2.10),得到:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (2.11)$$

再将式(2.11)代入式(2.8),得到顺磁性气体的体积磁化率 χ 为:

$$\chi = \frac{CpM}{RT^2} \quad (2.12)$$

如果设 χ_0 为标准状态下 ($T=T_0=273K$, $p=p_0=101.325kPa$) 的气体体积磁化率,则式(2.12)可写成:

$$\chi = \chi_0 \frac{pT_0^2}{p_0T^2} \quad (2.13)$$

从式(2.13)可以看出,顺磁性气体的体积磁化率与气体的压力成正比,与气体的热力学温度的平方成反比。顺磁性气体在外磁场中所受磁化力与体积磁化率的关系为: χ 的值越大,气体受到的磁化力就越大,或者说气体所受磁场的吸引力就越大;反之,气体所受磁场的吸引力就越小。

表 2.1 一些常见气体在 0°C 时的体积磁化率^[24]

气体名称	化学符号	$\chi \times 10^{-6}$	气体名称	化学符号	$\chi \times 10^{-6}$
氧	O ₂	+146	氢	H ₂	-0.164
一氧化氮	NO	+53	氮	N ₂	-0.58
空气	—	+30.8	水蒸气	H ₂ O	-0.58
二氧化氮	NO ₂	+9	二氧化碳	CO ₂	-0.84
甲烷	CH ₄	-1.8	氦	He	-0.083

2.1.5 顺抗磁性气体分子在梯度磁场中的受力

史特恩·盖拉赫实验表明，具有磁矩的磁性物质在纵向（沿磁场强度方向）不均匀磁场中会感受到力^[25]。其实具有固有磁矩的分子在横向（垂直磁场方向）不均匀磁场中同样会感受到力，该力的方向指向横向磁场强度增大的方向^[26]。

在图 2.1 所示的 xyz 坐标系中，假设外磁场 B 的方向为 z 轴方向（垂直纸面向外），外磁场的感应强度梯度为： $dB/dy = 0$ ， $dB/dx = q > 0$ ， $dB/dz = 0$ 。根据分子环流说，假设分子电流为 I ，且为圆形环流。由磁介质的微观化机制^[27]，当把该分子环流置于上述外磁场后，分子的固有磁矩要受到磁场力矩的作用，使分子磁矩的方向转向于外磁场方向一致。根据右手定则，分子环流的方向应该为逆时针方向。

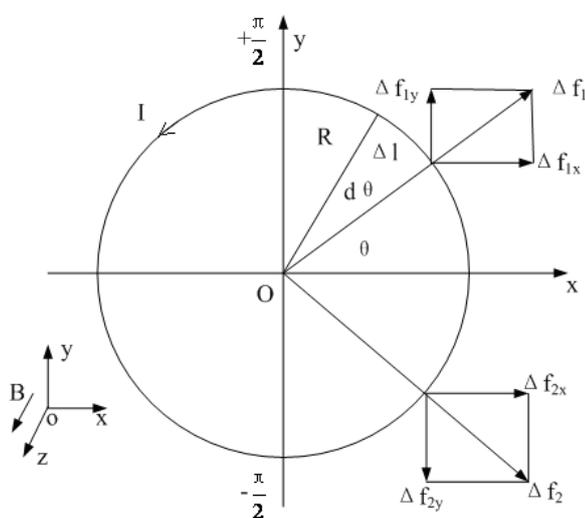


图 2.1 顺磁性气体分子在梯度磁场中的受力分析

Fig2.1 The force analysis of paramagnetic gas molecules in gradient magnetic field

将分子环流分为若干段，按左手定则每段电流元均受到径向力 $\Delta f = IB \Delta l$ 。在匀强磁场中各处径向力均相等且合力为零，即 $\Sigma \Delta f = 0$ ，而在横向非均匀磁场中，径向力 Δf 可分解为 Δf_x 和 Δf_y ，由于 $dB/dy = 0$ ，则在 y 轴方向的合力为零，即 $\Sigma \Delta f_y = 0$ 。由于分子环流为逆时针方向，按左手定则在 $-\pi/2$ 至 $+\pi/2$ 的右半面环流所受合力 $\Sigma \Delta f_{右}$ 指向 x 轴方向，而在 $+\pi/2$ 至 $-\pi/2$ 的左半面环流所受合力指向 x 轴负方向，由于横向磁场梯度 $dB/dx = q > 0$ ，因此对于顺磁性分子，因分子环流产生的磁矩方向与磁场方向一致，所受合力指向磁感应强度增大的地方；而对于抗磁性分子，因在磁场中产生的感应磁矩与外磁场方向相反，图 2.1 中的分子环流 I 应为顺时针方向，所以所受合力的方向指向磁感应强度减小的方向。

假设 $x = 0$ 处的磁感应强度为 B_0 ， x 处的磁感应强度为 $B_x = B_0 + qx$ ，对于顺磁性分子，分子环流为逆时针方向，分子磁矩方向与外磁场 B 方向一致，环流中 x 处 Δl 段受力为：

$$\Delta f_{\Delta l} = IB\Delta l = I(B_0 + qx)\Delta l \quad (2.14)$$

在 x 轴上的分量为：

$$\Delta f_{\Delta l x} = I(B_0 + qR \cos \theta)R \cos \theta d\theta \quad (2.15)$$

式中， $\Delta l = R d\theta$ ， $x = R \cos \theta$ ，所以在 $-\pi/2$ 至 $+\pi/2$ 的右半轨道分子环流在 x 方向受到的力为：

$$f_{xR} = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} df_{\Delta l x} = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} I(B_0 + qR \cos \theta)R \cos \theta d\theta = 2IB_0R + \frac{1}{2}qI\pi R^2 \quad (2.16)$$

左半电子轨道环流受力为：

$$f_{xL} = \int_{+\pi/2}^{-\pi/2} df_{\Delta l x} = \int_{+\pi/2}^{-\pi/2} I(B_0 + qR \cos \theta)R \cos \theta d\theta = -2IB_0R + \frac{1}{2}qI\pi R^2 \quad (2.17)$$

则整个分子环流所受合力为：

$$f = f_{xR} + f_{xL} = qI\pi R^2 \quad (2.18)$$

抗磁性分子的固有磁矩为零，置入磁场后，将产生感应磁矩，其方向与外磁场方向相反，所以在图 2.1 中，分子环流为顺时针方向。按左手定则，在 $-\pi/2$ 至 $+\pi/2$ 的右半环流所受合力指向-x 轴方向， $+\pi/2$ 至 $-\pi/2$ 的左半环流所受合力指向+x 轴方向。由于 $dB/dx = q > 0$ ，同样可以推导出抗磁性分子所受合力为： $f_x = -qI\pi R^2$ ，负号表示受力指向-x 轴方向。

式 (2.18) 中 $I\pi R^2$ 为分子磁矩 P_m ，因此式 (2.18) 变为：

$$f = qP_m \quad (2.19)$$

式中，f 为分子受到的沿磁场梯度方向的磁化力。对于单位体积的分子而言，其受到的合力为：

$$F = \sum_i f_i = q \sum_i P_{mi} \quad (2.20)$$

根据物质磁化强度的定义可知 $J = \sum_i P_{mi}$ ，所以式 (2.20) 可写为：

$$F = qJ \quad (2.21)$$

磁化强度、磁场强度以及磁感应强度之间有如下关系[13p]

$$J = \chi H, \quad H = \frac{B}{\mu_0} \quad (2.22)$$

把式 (2.22) 代入式 (2.21)，得：

$$F = \frac{1}{\mu_0} \chi B q = \frac{1}{\mu_0} \rho \chi_m B \frac{dB}{dx} \quad (2.23)$$

式中，F 为单位体积分子受到的沿磁场梯度方向的磁化力，单位为 N； μ_0 为真空磁导率，单位为 H/m； χ 为体积磁化率，无量纲物理量； χ_m 为单位质量磁化率，单位为 m^3/kg ； ρ 为物质密度，单位为 kg/m^3 ； dB/dx 为非均匀磁场的磁感应强度梯度，单位为 T/m；B 为磁感应强度，单位为 T。

2.1.6 梯度磁场中氮氧的分离机理

空气中的主要成份是顺磁性的氧气和抗磁性的氮气，在常温常压下，假设有一横向梯度磁场，磁场力线方向垂直于纸面向外，横向磁场强度梯度 $\frac{dB}{dx} > 0$ ，且磁场强度从左到右逐渐增大，如图 2.2，将空气由下方以匀速 V 注入。

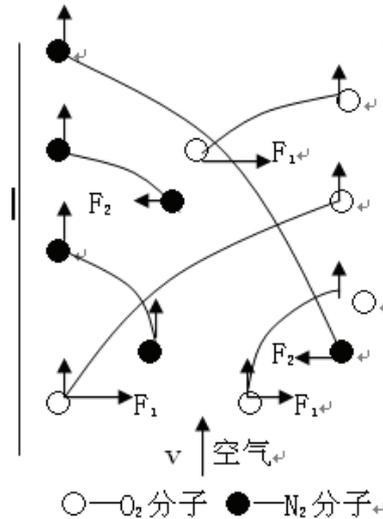


图 2.2 O_2 和 N_2 在横向梯度磁场中受力分离过程^[28]

Fig2.2 The mechanical analysis process of O_2 and N_2 in lateral gradient magnetic field

根据公式 (2.23) 可知， F 为磁介质受到的 x 方向的磁场力； μ_0 为真空磁导率，其数值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ； χ_m 为磁介质的体积磁化率，为无量纲的纯数，顺磁性的氧气的体积磁化率为 146×10^{-6} ，抗磁性的氮气的体积磁化率为 -0.58×10^{-6} 。在标准状况下，任何气体的分子数密度 ρ 均为^[29]：

$$\rho = \frac{6.02 \times 10^{23}}{22.4 \times 10^{-3}} = 2.69 \times 10^{25} (\text{m}^{-3}) \quad (2.24)$$

根据式 (2.23) 和 (2.24)，并带入已知数据，可得标准状态下氧分子和氮分子受到的磁场力 F_{O_2} 和 F_{N_2} 分别为：

$$F_{O_2} = 4.32 \times 10^{-24} B \cdot \frac{dB}{dx} \quad (2.25)$$

$$F_{N_2} = -1.72 \times 10^{-26} B \cdot \frac{dB}{dx} \quad (2.26)$$

$$F_{O_2} = 251 F_{N_2} \quad (2.27)$$

可见，在相同条件下，氧分子所受的磁场力远大于氮分子所受的磁场力，氧分子所受的力指向磁场增强的方向，而氮分子所受的力指向磁场减弱的方向。再通过一定的压力差和热力差，形成空气流和磁风将氧、氮分离开来，从而可实现

氧氮的磁化分离。

由分子轨道理论，空气中的氧分子在反键轨道中有2个单个的P电子，形成所谓的安培分子环流，才使氧分子 O_2 具有磁性，而且2个P电子具有较高的能量，很不稳定。从正负电中心重合角度来看，氧分子是典型的极性分子，而氮分子 N_2 在轨道能级图上没有成单的电子，而且电子对又存在于较低能级的分子轨道上，比较稳定。因此在磁场的作用下，氧分子不仅本身正电中心和负电中心位移加大，而且整个氧介质也取向极化，这样氧在磁场中必然受到一种洛伦兹力而驱向磁场强的方向。正是由于氧、氮的电子层结构不同，从而可以实现氧氮的分离。

2.2 等离子体的基本理论

“等离子体(plasma)”一词是19世纪初期由Langmuir引入到物理文献中去的，人类也是从这时开始对等离子体进行研究的，其表示气体放电中正负电荷相等而呈电中性的区域。后来Sir William Crooks把等离子体称为物质第四态，并沿用至今。当对某一物质从低温开始加热，其由固态逐渐融化成液态，进而蒸发成气态，如果对气体物质进一步继续加热，构成分子的原子就获得了足够大的动能，开始彼此分离，这一过程称为离解，在此基础上进一步提高温度，原子的外层电子将摆脱原子核的束缚而成为自由电子，失去电子的原子变成了带电的离子，这个过程称为电离，这种电离气体就是物质第四态——等离子体^[30]。它由带电的正粒子、负粒子（其中包括正离子、负离子、电子、自由基和各种活性基团等）组成的集合体，其中正电荷和负电荷电量相等故称等离子体，它们在宏观上是呈电中性的电离态气体。等离子体有着许多独特的物理、化学性质：①化学性质活泼，容易发生化学反应，因为等离子体中的离子、电子、激发态原子都是极活泼的反应性物种，使通常条件下的反应进行得十分快速；②作为带电粒子的集合体，具有类似金属的导电性能；③发光特性，等离子体可以用作光源，比如夜晚街头绚丽多彩的霓虹灯，就是生活中常见的等离子体发光现象。

2.2.1 气体放电特性

气体放电一般是指在电场作用下或其他激活方法使气体电离，形成能导电的电离气体，气体放电是当前工业上生成等离子体的主要方法和措施。气体放电应用较广的形式有电晕放电、辉光放电、无声放电（又称介质阻挡放电）、微波放电和射频放电等，气体放电性质和采用的电场种类及施加的电场参数有关。下面以一个典型的气体放电实验为例来说明放电特性^[32]。

如图 2.3 所示为直流放电管电路示意，放电管是一个低压玻璃管，两端接有直流高压电源的圆形电极，图中 R 是可调式镇流电阻，用以测量电流—电压特性，亦称放电伏—安特性， V_a 为直流电源，V 是放电管的极间电压，I 是放电电流。

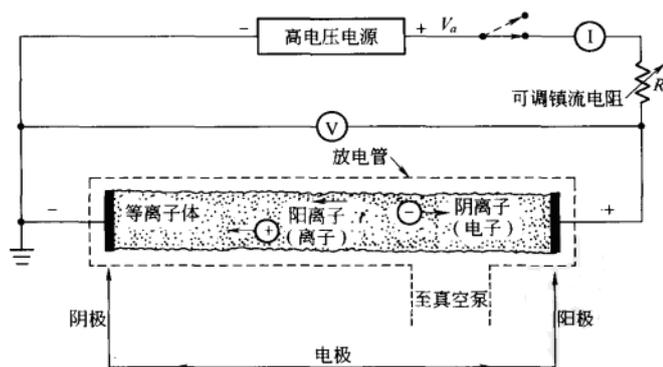


图 2.3 直流放电管电路示意图

Fig2.3 The electric diagram of direct-current discharge tube

在电极两端施加电压时，通过调节电阻 R 值可得到气体放电的伏安特性，如图 2.4 所示。由气体放电的伏安特性曲线可看出，开始在 A、B 点间电流随电压的增加而增加，但此时电流上升变化得较缓慢，表明放电管中气体电离度很小，继续提高电压，电流不再增加，呈本底电离区的饱和状态，继续提高电压，电流会迅速地呈指数关系上升，从 C 到 E 区间，这时电压较高但电流不大，放电管中也无明亮的电光，自 E 点起，再继续提高电压，发生了新的变化，此时电压不但不增高反而下降，同时在放电管内气体发生了电击穿，观测到耀眼的电光，这时因电离而电阻减小，但电流开始增长，在 E 点处对应的电压 V_B 称为气体的击穿电压。放电转变为辉光放电，电流开始上升而电压一直下降到 F 点，然后电流继续上升但电压恒定不变直到 G 点，而后电压随电流的增加而增加到 H 点，放电转入较强电流的弧光放电区。I 和 J 之间是非热弧光区，电流增加电压下降，在 J 和 K 之间是热弧光区，等离子体接近热力学、动力学平衡，从 J 到 X 的弧光放电区属于热等离子体特性，在等离子体化学中很少应用。在外加电场保持一定时，如果需要外界辐射源才能持续放电时，放电为非自持放电；当不需要外界辐射源就能保持持续放电则为自持放电。

图中，AB 段为非自持放电本底电离区；BC 段为非自持放电饱和区；CE 段为汤森放电区；DE 段为电晕放电区；EF 段为前期辉光放电区；FG 段为正常辉光放电区；GH 段为异常辉光放电区；HK 段为弧光放电区。

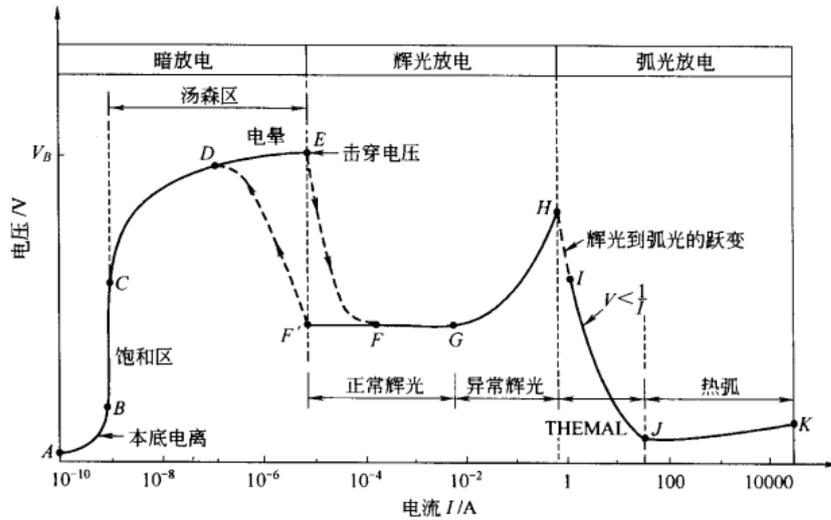


图 2.4 气体放电伏安特性曲线

Fig2.4 The volt-ampere characteristics of gaseous discharge

2.2.2 汤生放电理论

上个世纪初，汤生建立了气体击穿理论，至今一直被公认为气体导电的基础理论之一，目前工业上应用的一些等离子过程多发生在汤森放电区。汤森放电理论主要考虑了电子与气体质点碰撞导致的电子雪崩效应、正离子和气体质点与阴极表面碰撞产生自由电子这三种过程。汤森放电理论是在气压较低（小于大气压）、放电间隙较小的条件下进行放电实验的基础上建立起来的，放电间隙较大时，放电机理将发生根本性的变化，汤森理论就不再适用了^[33]。

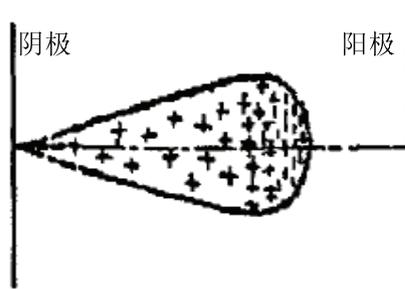


图 2.5 电子雪崩示意图

Fig2.5 The schematic diagram of an electron avalanche

如图 2.5，假设两电极板是平板的，当两电极板上加上一定的电压后，空间有均匀电场分布。初始电子由阴极表面发射，在电场作用下向阳极运动，不断与气体分子碰撞。当电场强度足够大时，电子速度也被加速到足够大，其在运行中的碰撞将引起电离。若一次碰撞电离多出一个电子，如这两个电子继续向阳极运动时能发生二次碰撞，那么这两个电子就变成了四个，照此发展下去，电子的数目

不断增加，这种现象称为电子雪崩。

汤生放电理论认为^[34]：由于电子雪崩的倍增作用，初始电流 i_0 在距离阴极 x 处的时增加到 i ：

$$i = i_0 e^{\alpha x} = i_0 e^{\eta V} \quad (2.28)$$

式中： η 是一个电子经过 1 伏电位差所产生的电子数目， V 为电位差。理论表明，非自持放电电流密度公式为：

$$j = j_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.29)$$

式中： d 为电极间距， j_0 为初始电流密度。由式 (2.29) 可知，如果初始电流为零，放电电流也不为零，则放电可以自持了。得到自持放电的条件：

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.30)$$

式中： α 为体积电离系数； γ 为正离子轰击表面的二次电子发射系数。

该式的物理意义为：如果从阴极发射一个电子，经过电子雪崩作用，产生 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个新电子，同时也产生同样多的正离子。这些正离子轰击阴极时，在阴极产生二次电子。那么只有从阴极发射 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 个新电子来代替阳极上消失的那些原始电子时，放电才可以自持。

2.2.3 流柱理论

建立在稳定放电基础上的汤生放电理论不能用来解释火花放电这种不稳定放电现象。Meek 和 Loob 于 1940 年提出流柱理论（也称流光理论），其可以用来解释火花放电这种不稳定现象^[35]，其可以解释电晕放电以及高压电器的空气击穿问题。由于流柱理论的形成涉及复杂的数学推导，本文只做定性说明。

实验表明，气体放电击穿过程中，空间带电粒子的形成除了电子雪崩外，还有其它形式的电离过程，其可以使空间电离度大大增强，并伴随强烈的光辐射，这就是流柱。

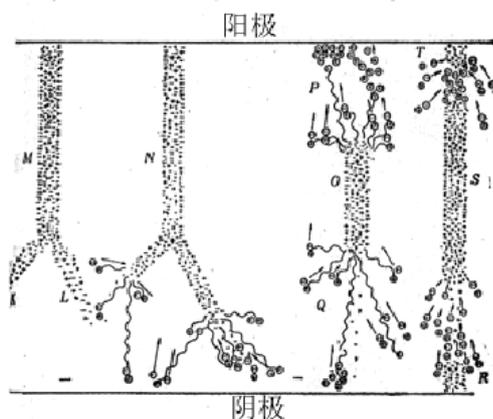


图 2.6 正、负流柱形成示意图

Fig2.6 The schematic diagram of positive and negative streamer forming

由流注理论可知，由阳极向阴极扩展的流柱称为正流柱，由阴极向阳极扩展的流柱称为负流柱。图 2.6 描述了正、负流柱的形成过程。如阴极发射出的初始电子在形成电子雪崩过程中会产生激发态的原子，其会辐射出大量光子，图中波纹线表示光子的辐射路线，而这些光电子使气体电离过程中再次形成大量的次级电子雪崩。当主电子雪崩和次级电子雪崩汇合时便形成流柱，即当大量次级电子相互汇合时就形成迅速向阳极扩展的负流柱。

若放电空间初始电子出现在阳极附近，则在阳极空间首先形成主电子雪崩，同时辐射出大量光电子，当主电子雪崩头部的电子接触阳极时，由于离子运动速度比较慢，还来不及离开原来的空间时，阳极前就积累了大量正离子电荷，使空间电场畸变，随之导致靠近阴极空间的电场增强，光电子产生次电子流柱向阳极方向扩展和累积，流柱迅速扩展到阴极，这种流柱称为正流柱。

可见，在流柱形成的过程中，光电离有决定性的作用，而光电离可以产生在任意地点，次级电子雪崩的形成位置也是随机的，因此，流柱的扩展路径是曲折分叉的。

2.2.4 等离子体的产生形式

由文献可知，气体放电产生等离子体主要有以下几种形式^[36]：辉光放电、介质阻挡放电、射频放电、微波放电、脉冲电晕放电。

① 辉光放电 (Glow Discharge)

辉光放电是一种稳定的自持放电，其放电电流的大小为毫安数量级，主要靠正离子轰击阴极所产生的二次电子发射来维持。辉光放电是等离子体领域广泛采用的放电形式，但其在常温常压下不宜使用。

② 射频放电 (RF Discharge)

射频放电通常在低气压下操作，特点是放电气体不接触电极。射频放电利用高频电场 (2-60MHz) 通过电感耦合或电容耦合，使反应器中的气体放电产生等离子体。

③ 微波放电 (Microwave Discharge)

微波放电是一种无电极放电，避免了放电材料对反应的影响。其可以在较宽的频率范围和气压范围内进行，可以生成均匀的较大体积的非平衡等离子体。微波放电频率范围是 0.3~10GHz，最常用的是 2.45GHz。

④ 介质阻挡放电 DBD (Dielectric Barrier Discharge)

介质阻挡放电又称无声放电^[31]，它是一个有绝缘电介质插入放电空间进行非平衡放电的过程。在放电装置中，至少有一层绝缘电介质覆盖在电极上或者悬挂在放电空间里，绝缘电介质可以避免产生火花放电或电弧放电。介质阻挡放电是一种灵活可靠的非平衡等离子体放电方式，非常适合用来生成较大体积的等离子

体。

⑤ 脉冲电晕放电 PCD (Pulse Corona Discharge);

电晕放电技术主要是利用电晕放电所产生的离子和高能电子，电晕放电一般采用脉冲电源，这样可以避免电极间的流注形式的放电演变成火花放电或者电弧。脉冲周期一般在 10ns 的量级，这样，在脉冲电场作用下，只有电子被大大加速，而重离子基本保持不动，从而避免了加速重离子的能量损失。

通过比较以上几种放电形式的特点可知：辉光放电虽然能产生大体积强激发态的等离子体，但需要在很低气压下进行；射频放电和微波放电属无电极放电，可避免电极污染，获得较纯净的等离子体，但也需要在低气压下发生。介质阻挡放电是一种灵活可靠的非平衡等离子体放电方式，非常适合用来生成较大体积的等离子体。但鉴于实际条件的限制，并与梯度磁场匹配，安装在发动机进气滤清器上，且电晕放电可以在常压下利用非对称电极放电产生等离子体；本文采用脉冲电晕放电产生等离子体。

2.2.5 脉冲电晕放电

由 2.2.1 节所述的图 2.4 所示放电特征可知，当气体击穿后绝缘破坏，其内阻降低，放电迅速越过自持电流区后便立即出现极间电压减小的现象，并同时电极周围产生昏暗辉光，称为电晕 (corona) 放电。对应为图 2.4 所示的伏安特性曲线中 DE 曲线段。电晕放电电压降比辉光放电大 (千伏数量级)，但放电电流较小 (微安数量级)，往往发生在电极间电场分布不均匀的条件下 (若电场分布均匀，放电电流又大，则发生辉光放电)。电晕放电的电流强度取决于加在电极之间的电压大小、电极形状、极间距离、气体性质和密度等。电晕放电的电压降不取决于外电路中的电阻，而是取决于放电迁移区 (电离区之外的区域) 的电导。电晕放电的极性取决于具有小曲率半径的电极的极性，如果小曲率半径电极带正电位，发生的电晕称正电晕，反之称负电晕。如果电场足够不均匀，并且对于一定的阳极，间隙有足够的长度，将出现放电流柱。这种流柱是电晕放电的，且有明显的、比较亮而长的电晕光形式，并发出大量噪声。

因此，产生电晕放电的条件是：电场分布很不均匀，并有几千伏以上的电压加到电极上。一个电极或两个电极的曲率半径很小，就会形成不均匀的电场。细的尖端与平面、点与点、金属丝与同轴圆筒、两条平行导线之间以及轴电缆内部都会形成不均匀的电场，在这些电极之间都有可能形成电晕^[32]。

电晕放电是一种自持放电，在具有强电场的电极表面附近有强烈的激发和电离，并伴有明显的亮光，此处称为电晕层。在电晕层外，由于电场强度较低，不足以引起电离，故呈现暗区，称为电晕外区。图2.7为本实验中的等离子体放电反

应管放电时的发光现象。



图 2.7 等离子体反应管发光现象
Fig2.7 the phenomenon of plasma reaction tube lighting

通常认为，高压脉冲放电是由高压电场中电子雪崩产生的流柱在电场中的运动现象，流柱理论认为，在流柱头部包含大量由电场加速的高能电子，它们碰撞气体分子而使得气体分子化学键断裂，使这些气体分子的化学性质变的非常活泼。高频率的脉冲电压能够在不发生火花和弧光放电的前提下，达到更高的脉冲峰值电压，同时，在时间上产生更多的流柱，从而提供更多的高能电子。这些高能量的电子高速碰撞气体分子，打开更多气体分子的化学键，产生大量的活性粒子，使气体中的气体成分发生改变。由于脉冲电晕是以非连续和非均匀的方式将能量注入反应器中，所以这种反应在时间上是不连续，在空间上是不均匀的反应，其中的具体过程尚不清楚，还有待深入的研究。

由于电晕放电可在常温常压条件下工作，电极不需要封装屏蔽，功率及能耗较低。鉴于电晕放电的极性特点和区域特点，在很多处理过程中得到了广泛的研究和利用。目前在气体污染物治理方面应用研究较多的是直流电晕放电和脉冲电晕放电。高压窄脉冲放电产生的电子平均能量、电子浓度和电场强度都要高于直流高压电晕放电，其在烟气脱硫脱硝、汽车尾气治理领域的应用研究已经取得了很多成果，是气体污染物治理的一条有效途径。

2.2.6 等离子体激化空气的机理分析

空气经过等离子体作用之后，会产生大量活性物质，具体包括氧化能力很强的自由基（ OH^* 、 HO_2^* ）、原子氧（ O^* ）和臭氧（ O_3^* ）等。由文献^[37]可知，臭氧助燃具有改善内燃机燃烧和降低碳烟、碳氢化合物及一氧化碳排放的效果。

文献^[38,39,40]研究结果表明，臭氧在加速燃烧反应中起着重要作用。臭氧 O_3 是氧气 O_2 的同素异构体， O_3 分子呈对称三角模型，常温下氧化能力强于氧气，有强氧化剂之称。由于氧气分子的分解能量为 5.11eV ，而臭氧仅为 1.09eV ，当温度高于 473K 时，臭氧会立即分解为氧气和氧原子。这种新生态的氧原子除具有极强的氧化能力外，还是诱发燃油进行链式反应的活化中心，在某种意义上，充当了加

速燃油燃烧反应的催化剂。通常认为臭氧从以下两方面强化了燃油的燃烧反应：一方面是臭氧分子冲击燃料分子，从而产生初始的游离子，而离子与离子之间的化学反应是较易进行的；同时，臭氧热分解出的鲜活氧原子冲击燃料分子，主要是冲击燃料分子的碳氢键，从而使环状结构的芳香烃氧化成直链烃，使直链烃从双键部位断开，变成容易分解的小分子烃。另一方面，也可以认为臭氧加速燃烧反应是由于臭氧化混合物的活化能降低，致使燃烧反应更加容易进行^[41]。

放电过程中臭氧的形成是一个极为复杂的过程，包括由电场导致的放电电离过程及发生在放电通道中的一系列化学过程，主要包括 4 个主要步骤：

① 电场使气体电离，放电产生，放电通道中产生一定能量的电子；

② 电子碰撞引起氧气分子解离，产生氧原子；



③ 氧原子和氧气结合产生臭氧；



式中 M 表示参与反应的中间物质。

④ 臭氧分子和其他粒子发生碰撞，发生分解反应：



进气空气中的水蒸气 H_2O 在等离子体的作用下也发生一系列反应，生成少量氧化能力很强的自由基 OH^* 、 HO_2^* ，如下^[42]：



O_2 、 H_2O 分子电离、离解产生的 O、H 可与 O_2 发生复合反应，生成 O_3 和 HO_2^* 。



同时，进气等离子体反应器中产生大量的自由基等活性基元也会促进内燃机的燃烧效率，同时会直接使内燃机燃烧过程中产生的有害物质被转化，由于活性基元以及臭氧使进气空气具有强氧化性，燃烧反应过程中生成的 CO 和 HC 气体被及时氧化分解，使其排出量降低。各种基元的反应过程如下列所述：

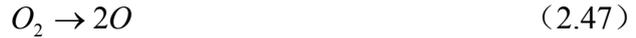
CO 的氧化反应：



HC 的氧化反应：



由于在气体放电作用下，使空气中的 N_2 和 O_2 发生反应，生成了大量的 NO。NO 的生成机理主要反应式为：



因此当低温等离子体作用于进气空气之后，产生的活性基元与活性氧会导致 NO 的生成，加剧了氮氧化物的生成。但从理论上分析，基于强磁场的分离作用，使进气空气氮气浓度降低，可以从另一角度抑制 NO 的生成，若同时将低温等离子体作用于发动机排气，能够使排出的 NO 被分解净化，在此就不做研究。

关于内燃机燃烧过程中产生的各种物质与活性基元的具体反应过程十分复杂，需要在以后实验中作进一步的研究。

2.3 磁电等离子体极化激发空气分析

基于对梯度磁场氮氧分离技术和等离子体激化特性的研究，可以做以下尝试和实验验证。首先，让发动机进气空气经过梯度磁场，使空气中占大部分的氧气和氮气的比例发生变化，形成富氧空气；然后，使富氧空气经过等离子化处理，产生大量原子氧 O、臭氧 O_3 以及一些氧化能力很强的自由基 (OH^* 、 HO_2^*)，在这些强活性物质的作用下，燃料能够得到充分的燃烧，从而起到节能减排的作用。如图 2.8 为空气经过等离子体极化激发处理流程图

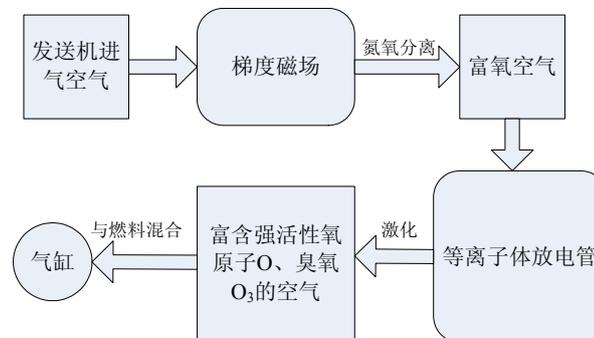


图 2.8 磁电等离子体极化激发空气流程图

Fig.2.8 The flow diagram of magnetism-electric plasma polarized and induced air

2.4 本章小结

本章在国内外相关研究成果的基础上，对梯度磁场氮氧分离理论进行了探讨，并对等离子体的基本理论进行了阐述，以及其极化激发空气的机理做了相应研究。

① 对物质的磁性进行了初步的分析，阐述了顺磁性物质和逆磁性物质的性质，以及从微观角度推导出其在非均匀磁场中受到的磁化力公式和影响因素，并据此论证了顺磁性的氧气和逆磁性的氮气在梯度磁场中受到大小和方向不同的磁化力作用，从而在合适的梯度磁场中可以实现空气中氮气和氧气的分离。

② 阐述了低温等离子体的基本理论，分析了气体放电产生等离子体的理论和特性。对产生等离子体的不同形式进行了对比了和研究，同时对本论文用到的脉冲电晕放电形式作了具体的介绍，分析了富氧空气在等离子化作用后产生活性基元粒子原子氧 O、臭氧 O₃ 及其它氧气的激发态的机理。

③ 分析了磁电等离子体极化激发空气的流程，阐明了磁电等离子体节能减排的机理。

3 磁电等离子体实验装置的设计

3.1 装置总体设计思路

本文研究的磁电等离子体极化激发态进气装置通过改变发动机进气状态，使空气成为富氧的极化激发态气体，其可以与燃料充分燃烧，达到节能减排的目标。该反应装置由三个主要部件组成，分别是梯度强磁场磁化组、等离子体放电反应器和高压电源，如图 3.1 所示。

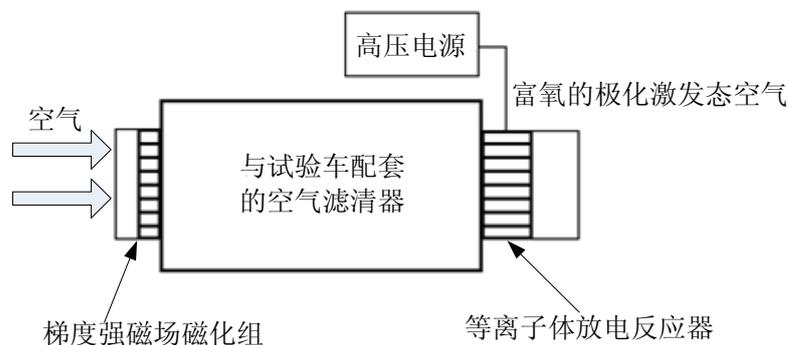


图 3.1 安装于空气滤清器内的反应装置示意图

Fig3.1 The schematic diagram of reactor which installed in air cleaner

为了保证试验的可行性和可靠性，梯度强磁场磁化组和等离子体放电反应器安装于试验发动机的空气滤清器内部。其中磁化组安装于空气滤清器的进口处，使进气空气能够完全从中经过；等离子体放电反应器安装于空气滤清器的出口处，使进气富氧空气通过放电反应器内的反应管通道，最终进入气缸；高压电源用于给等离子体放电反应器提供高压电。

3.2 磁化组

3.2.1 磁化组总体结构

氮氧分离的磁场设计可以采用4种方案：单一的“永磁体”、单一的“电磁体”、永磁体和电磁体的组合以及最先进的超导体产生磁场，对于实际用于发动机上产生富氧空气的磁分离装置，考虑到不消耗能量并且使用方便，本装置的磁化组采用牌号为N35的稀土钕铁硼永磁体来形成梯度强磁场。钕铁硼（NdFeB）具有极高的磁能积BH、很强的矫顽力Hc和剩磁Br，钕铁硼在室温下剩余磁感应强度Br可达992kA/m，最大磁能积（BH）_{max}为397.9kJ/m³[43]。通过设计磁体磁极间的夹角为θ来实现一定的磁场梯度，据文献[22]知，磁场间夹角θ对O₂浓度影响很大，θ的取值64°~78°时，梯度磁场对氧气的富集效果最佳，不宜过小或过大。

磁化组的总体结构如图 3.2，它由与空气滤清器进口形状相吻合的塑料板和许多具有强磁性的梯度磁铁组成，在塑料板上钻出孔，将梯度磁铁镶入其中，使进气空气从梯度磁铁空隙中通过。本实验中用到的梯度磁铁有两种类型，包括梯度磁环和梯度磁瓦。图 3.3 是安装了磁化组的空气滤清器实物图。

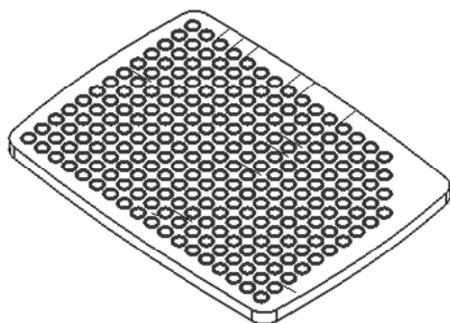


图 3.2 磁化组总体结构图

Fig3.2 The structure of the magnetization group



图 3.3 安装了磁化组的空气滤清器实物图

Fig3.3 The picture of air cleaner installed magnetization group

3.2.2 磁化组磁路设计原则

根据梯度强磁场理论，通过特殊的设计可以实现氮氧分离。磁路设计主要解决的问题是，如何充分利用磁性材料的磁能来满足使用要求，磁路主要由软磁材料、永磁材料和空气间隙三部分组成。需要确定的参数有两个：一是由磁路结构确定空气间隙中磁通量 Φ （韦伯）的大小，或以相反顺序由 Φ 值确定磁路结构。二是由磁路计算选择相应的磁材料及其尺寸；由永磁体和空气间隙组成的磁路应满足欧姆定律^[56]：

$$H_e L_c = L_i H_i \quad (3.1)$$

式中： L_c 为空气间隙长度； H_e 为空气间隙内磁场强度； L_i 为永磁体长度； H_i 为退磁场强度。此处忽略磁通的泄露，根据磁通连续性原理有：

$$B_e S_e = B_i S_i \quad (3.2)$$

式中： B_e 为空气间隙内磁感应强度； S_e 为空隙内截面积； B_i 为永磁体内磁感应强度； S_i 为永磁体内截面积。

将式（3.1）和式（3.2）相乘，可得：

$$H_e L_e B_e S_e = B_i L_i H_i S_i \quad (3.3)$$

根据空气间隙的体积： $V_b = L_e S_e$ ；永磁体的体积 $V_m = L_i S_i$ ，代入式（3.3）得：

$$H_e B_e V_b = H_i B_i V_m \quad (3.4)$$

$H_i B_i$ 值表示单位体积永磁体所储存的能量。

由于空气间隙内磁场强度正比于该间隙内的磁感应强度，由式 $B_e = \mu_0 H_e$ 可知，

而空气的磁导率 $\mu_0 = 1$ ，则有 $B_e = H_e$ ，所以使 (3.4) 可转换为式 (3.5)：

$$B_e^2 V_b = B_i H_i V_m \quad (3.5)$$

则有 $B_e = [B_i H_i / V_b]^{1/2}$ ，如知永磁体体积 V_m 、空气间隙尺寸和永磁体单位的磁能积，即可根据式 (3.5) 确定空气间隙内的磁感应强度值 B_e 。

然后用 $B_{最佳}$ 和 $H_{最佳}$ 来标志此材料的 $B_i H_i$ 最大值，并代入式 (3.5) 得：

$$H_{最佳} L_i = H_e L_e \quad (3.6)$$

$$B_{最佳} S_i = B_e S_e \quad (3.7)$$

将式 (3.6) 与式 (3.7) 相除，且知 $B_e / H_e = \mu$ ，对空气 $\mu = 1$ ，可得：

$$\frac{B_{最佳} S_i}{H_{最佳} L_i} = \frac{S_e}{L_e} \quad (3.8)$$

最后得到永磁体设计尺寸最合理的比例为：

$$\frac{L_{i最佳}}{S_{i最佳}} = \frac{L_e B_{最佳}}{S_e H_{最佳}} \quad (3.9)$$

式 (3.9) 可知，永磁体尺寸最佳比例取决于空气间隙 L_e / S_e 性状，永磁性材料的特性取决于固有的磁能积所对应的 $B_{最佳}$ 和 $H_{最佳}$ 值^[57]。并根据已有文献资料，本文中磁化组的磁场强度应大于 3.5kGS 或大于 2.5KGS，工作温度在 $-40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 的范围内；由于本设计已经申请专利，磁化组中梯度磁体尺寸参数在此略去。

3.2.3 磁化组中梯度磁铁的结构型式

本文中用到两种类型的梯度磁铁，一种为磁环型，一种为磁瓦型。磁环型磁铁外形为圆柱形，内部做成具有梯度角度的磁环通道，磁铁的顶部为 N 级，底部为 S 级，图 3.4 为磁环型磁铁示意图

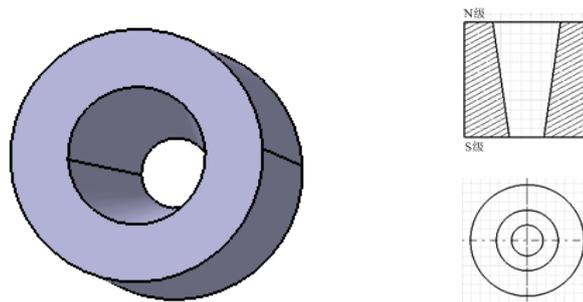


图 3.4 磁环型磁铁示意图

Fig3.4 The diagram of ring-shaped magnet

本实验装置中对两种型式的磁环进行验证试验，分别为单层梯度磁环和双层

梯度磁环。单层梯度磁环是在磁化组塑料板上只安装一层的磁环型磁铁，而双梯度磁环则是在磁化组塑料板上安装相互叠加在一起的两层磁环型磁铁，下层磁铁的N级与上层磁铁的S级相连，如图 3.5 为双层梯度磁环型磁铁实物图和示意图，图 3.6 为安装了双层梯度磁铁的磁环型磁化组示意图，图 3.7 为单层梯度磁铁实物图和示意图。

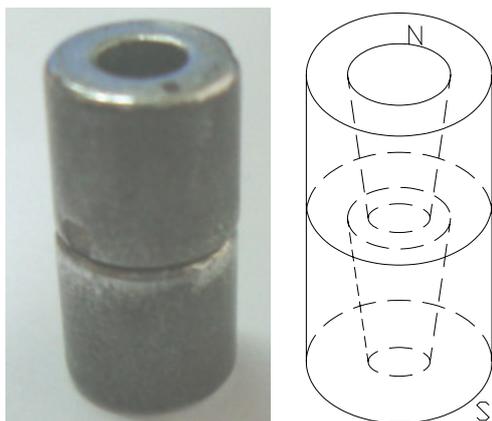


图 3.5 双层梯度磁铁

Fig3.5 Dual-layer gradient magnet

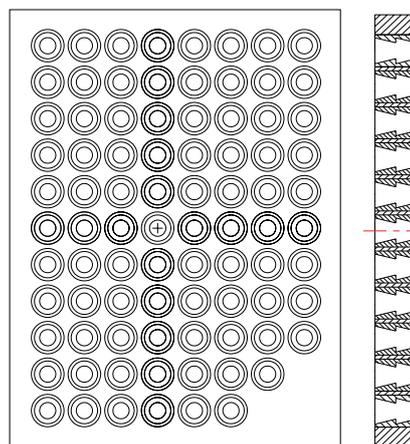


图 3.6 双层梯度磁环型磁化组

Fig3.6 Magnetization group of Dual-layer gradient magnet



图 3.7 单层梯度磁铁

Fig3.7 Single-layer gradient magnet

而磁瓦型磁铁为一半圆瓦状形，把相对的两块瓦状形磁铁装到磁化组相对应的圆柱孔内，即组成双梯度磁瓦型磁化组“NSNS”，图 3.8 为双梯度磁瓦型磁铁示意图

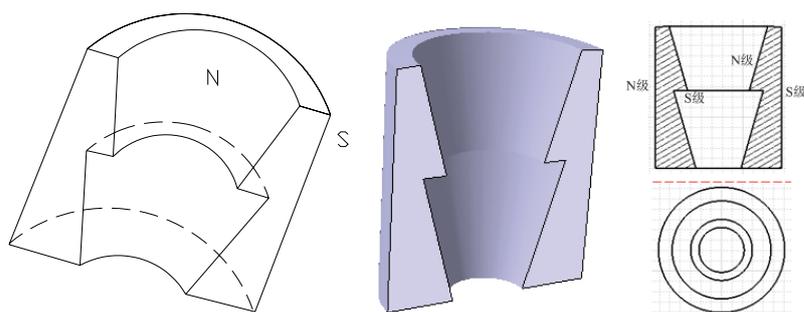


图 3.8 双梯度磁瓦型磁铁示意图

Fig3.8 The diagram of Dual-gradient tile-shaped magnet

本实验装置中用到的双梯度磁瓦型磁化组“NSNS”的磁瓦分布形式有两种类型，一种为磁瓦在磁化组中按规则排列，磁化组每个圆孔中相对的两个磁瓦在塑料板上排列方向一致，见图 3.9；另一种为磁瓦在磁化组中无规则排列，磁化组每个圆孔中相对的两个磁瓦在塑料板上排列方向杂乱无章，没有规律，见图 3.10。

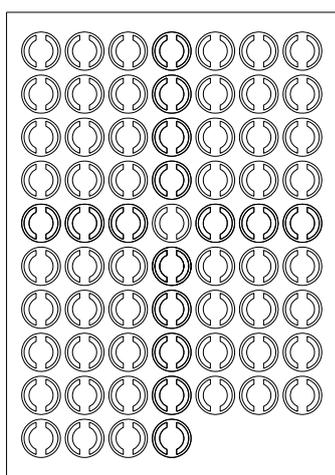


图 3.9 磁瓦规则排列磁化组

Fig3.9 Magnetization group of regular arranged tile-type magnet

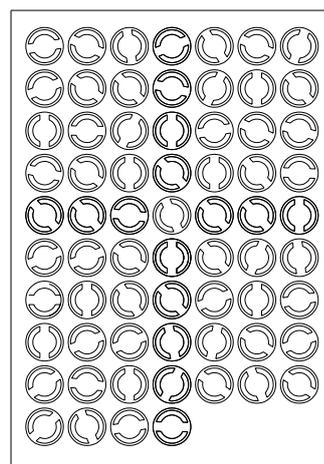
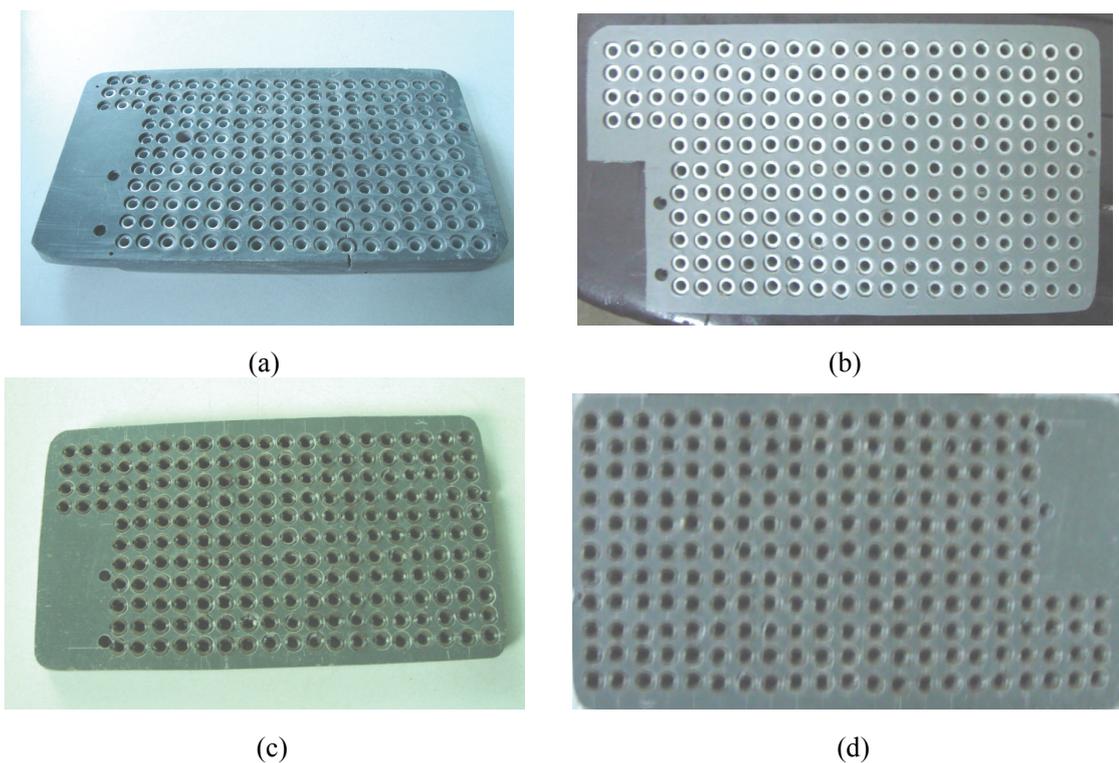


图 3.10 磁瓦不规则排列磁化组

Fig3.10 Magnetization group of irregular arranged tile-type magnet

本实验中用到四种类型的磁化组，图 3.11 为各类型磁化组实物图，图中（a）为双层梯度磁环型磁化组，图中（b）为单层梯度磁环型磁化组，图中（c）为双梯度规则排列磁瓦型磁化组，图中（d）为双梯度不规则排列磁瓦型磁化组。



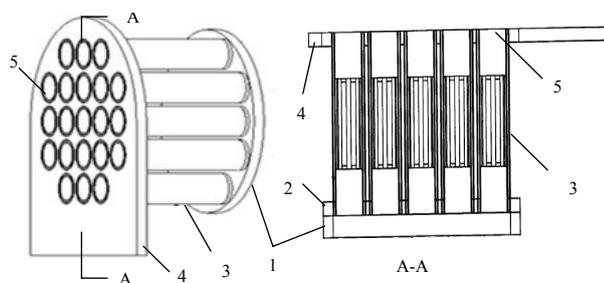
(a) 双层梯度磁环型 (b) 单层梯度磁环型 (c) 规则排列磁瓦型 (d) 不规则排列磁瓦型
图 3.11 各类型磁化组实物图

Fig3.11 The physical picture of all types of magnetization group

3.3 等离子体放电反应器

3.3.1 放电反应器总体结构

如图 3.12 所示，是等离子体放电反应器的总体结构图和 A-A 剖视图。其由若干只放电反应管以及放电反应管上下的两块固定板组成。放电反应器安装于空气滤清器的出口处，因此固定板的尺寸可以根据空滤器出口大小确定。具体由上圆盘 2 和下圆盘 4，作为固定支架、固定在上圆盘 2 和下圆盘 4 之间的等离子体反应管 3、还包括上圆盘 2 上面的导气引线环 1。放电反应器实物如图 3.13 所示。



1.导气引线环 2.上圆盘 3.等离子体反应管 4.下圆盘 5.与圆盘相对应的圆孔

图 3.12 等离子体放电反应器结构示意图

Fig3.12 The diagram of construction of discharge reactor plasmas

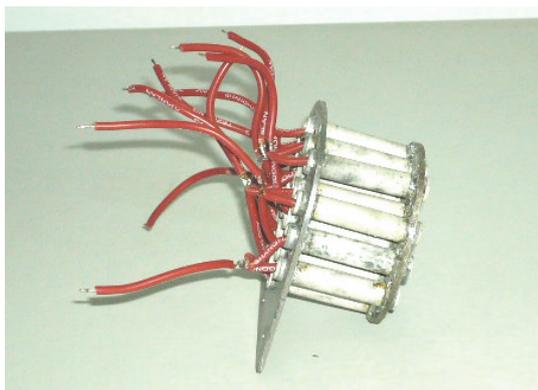


图 3.13 等离子体放电反应器实物图

Fig3.13 The physical picture of discharge reactor plasmas

3.3.2 放电反应管结构

放电反应管的基本结构如图3.14所示,其为 $\Phi 4\sim 15\text{mm}$ 的圆筒形电子陶瓷管,壁厚为 $0.5\sim 1.2\text{mm}$ 。它由中心金属电极、外壳金属电极以及中间介质层组成。圆筒形陶瓷管内或管外有金属电极,作为等离子体反应器的高压电极;反应管外壁两端有一金属层,作为等离子体反应器接地电极,并在两端引出两级,接到高压电源控制箱中;两电极之间及外壁以电子陶瓷作为中间介质层。

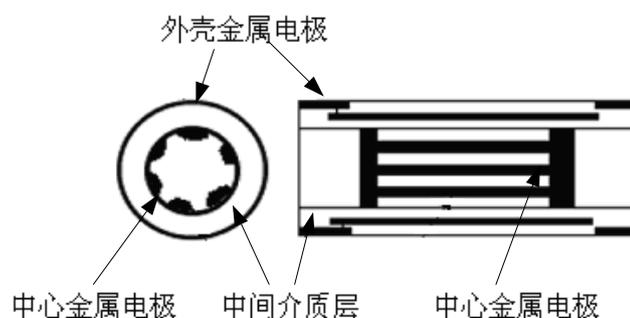


图 3.14 放电反应管的结构示意图

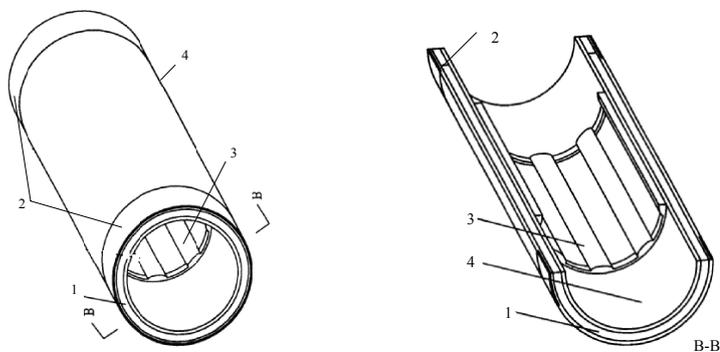
Fig3.14 The schematic diagram of construction of discharge reaction tube

本文设计了三种结构型式不同的放电反应管,它们均为圆筒式结构,三种放电反应管均由陶瓷管构成,具体如下:

① 内侧电极式放电反应管,如图 3.15 所示。其构造是在陶瓷管内壁设计圆环型金属套作为中心高压电极,因此管壁内侧即为放电极,并在反应管内壁产生放电现象。

② 两侧电极式放电反应管,如图 3.16 所示。其构造是在陶瓷管内壁和外壁均设计圆环型金属套电极条作为高压电极,因此管壁内侧和管壁外侧均为放电极,放电现象也发生在管壁内外两侧。

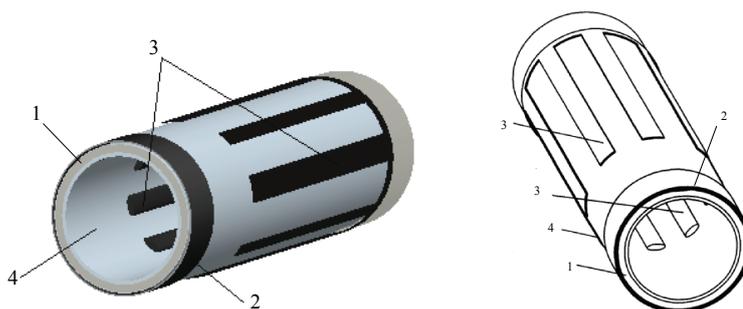
③ 两侧螺旋式放电反应管，如图 3.17 所示。其构造是在陶瓷管内壁和外壁均设计螺旋式金属细条作为高压级，因此管壁内侧和管壁外侧均为放电级，放电现象也发生在管壁内外两侧。



1.中间介质层 2.接地电极 3.内侧电极式金属电极 4.陶瓷管

图 3.15 内侧电极式放电反应管结构图

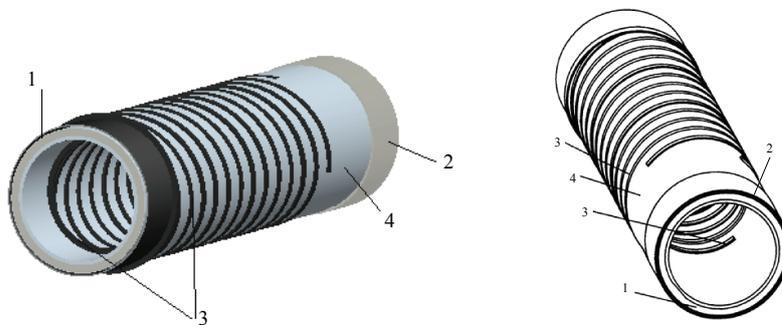
Fig3.15 The structure of pole discharge reaction tube in inside



1.中间介质层 2.接地电极 3.两侧电极式金属电极 4.陶瓷管

图 3.16 两侧电极式放电反应管结构图

Fig3.16 The structure of pole discharge reaction tube in two sides



1.中间介质层 2.接地电极 3.两侧螺旋式金属电极 4.陶瓷管

图 3.17 两侧螺旋式放电反应管的结构图

Fig3.17 The structure of spire discharge reaction tube in two sides

由于放电反应器固定板的尺寸大小已由试验发动机空滤器出口尺寸确定，本文根据实验需要，设计两种型号的放电反应器，一种可以在固定板上放置 7 支放电反应管，另一种可以在固定板上放置 21 支放电反应管。图 3.18 是放电反应器安装于发动机空气滤清器内的实物图。



图 3.18 安装了放电反应器的空气滤清器实物图

Fig3.18 The picture of air cleaner that installed discharge reactor

3.4 电源选择

3.4.1 电源电压

电源系统是实现等离子体污染治理产业化的关键技术之一，高压供电设备供电质量的好坏直接影响到净化的效果，不同的高压供电形式对净化效率具有重要的影响。等离子体放电反应器的电源电压形式主要有直流、交流和脉冲三种型式，

Tomio^[44]等人研究了直流电晕去除 NO_x 的效果。试验表明，正电晕对 NO_x 的去除效率比负电晕高；直流电源结构简单，造价也很低，但缺点是放电不稳定，容易发生火花放电，净化效率不高。

Takaki^[45]在相同的反应器上进行了脉冲电压和交流电压放电试验，试验表明，如图 3.19 所示的外加电压、放电电流以及能耗的波形关系，脉冲电压放电的电压值高于交流电压放电，且电流前者小于后者，则有脉冲电压放电的能耗小于交流电压放电，由此，可以看出脉冲电压是综合效果最好的电压形式。

文献^[46]试验表明，脉冲电压的去除效率比正弦交流电压高。

理论和实践已经证明，脉冲供电可提高电场的击穿电压，空间电荷产生的电晕控制作用较小，电晕电流分布较均匀，可提高峰值电场强度，减小平均电场强度。而且，脉冲电源的净化效果要优于直流电源，脉冲电压供电已成为当今研究等离子体技术的主要发展方向。

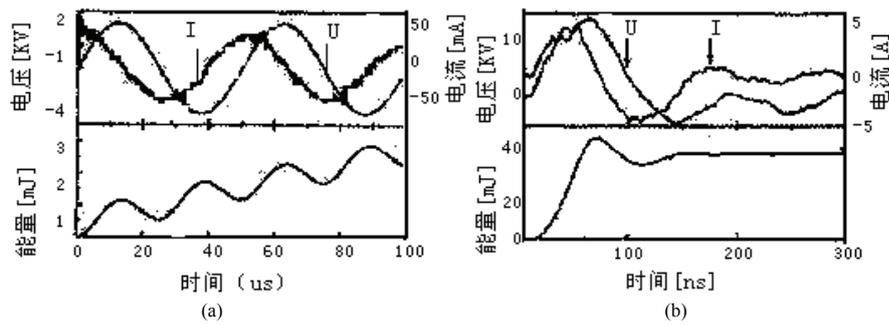


图 3.19 两种电源的特性 (a) 正弦交流电压 (b) 脉冲电压

Fig3.19 Characteristics of two types of power supply

3.4.2 脉冲电源

在探讨等离子体的产生机理时，我们知道对等离子体的产生质量有直接影响的是电极间形成的电场强度的大小，而电场强度的大小是由极板间电压与极板间距共同确定的，所以我们选用脉冲电压时必须考虑其与设计的等离子体反应器相匹配。

文献^[47]中，对等离子体技术应用于净化空气污染物的研究发现，放电间隙间电场强度一般集中在 5~30KV/cm 这个范围内，由电场强度公式 $E=U/d$ ，可以估算出电源电压应该在 10~80KV 之间。

由于活性物质产量与高能电子数量和能量有密切关系，而高能电子能量有脉冲电源提供，所以脉冲电源的性能和脉冲电参数（幅值、宽度、前沿）将直接决定反应器内等离子体状态（电子密度和密度分布等），并最终影响脱除效果。脉冲上升时间是脉冲电源的一个主要参数，上升时间对净化效率的影响比脉宽的影响大，增加脉冲电压上升时间和减小脉宽，都将降低净化率。脉冲宽度应根据反应器放电空间结构（极间距及流光速度）而定，以避免二次流光通过反应空间造成能量浪费。目前等离子体净化中，对脉冲电源的基本要求是上升时间 10~100ns，拖尾时间 100~500ns，峰值电压 10kV~100kV，频率 20~200Hz

根据文献^[48]可知，虽然高压脉冲电源技术的研究很多，但目前问题还很多，由于磁压缩技术还不成熟，固态开关的价格、能量受限，因此，目前只能通过改善火花隙脉冲开关和优化电路设计来弥补火花隙脉冲电源的不足。

因此，本文采用间隙开关式脉冲电源，它由控制台、高压直流电源和旋转火花开关构成，能够产生连续高压窄脉冲。电源设备结构如图 3.20 所示。图 3.21 为电源设备安装到试验台架发动机空气滤清器中的放电反应管上。

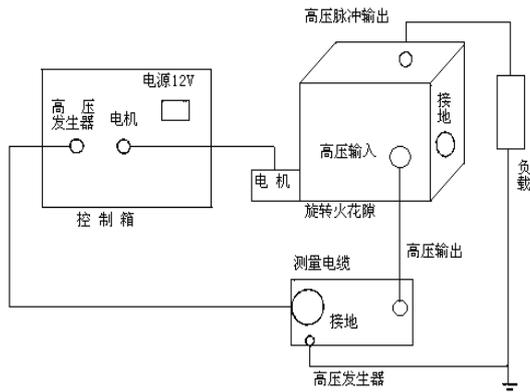


图 3.20 脉冲高压电源结构图

Fig3.20 Sketch of high voltage pulsed power



图 3.21 高压电源装置实物图

Fig3.21 The picture of high voltage power

3.5 本章小结

本章在国内外学者对磁分氮氧装置和等离子体放电装置的研究基础上,提出了磁电等离子体节能减排装置各组成部分的具体方案与形式。

① 磁化组由若干环形梯度磁铁和瓦型梯度磁铁组成,从结构和磁场分布上比较了磁环型磁化组和磁瓦型磁化组的不同,同时还介绍了磁环型型磁铁的两种不同布置形式:双层梯度磁环型和单层梯度磁环型;以及磁瓦型磁铁的两种不同布置形式:双梯度规则排列磁瓦型和双梯度不规则排列磁瓦型。

② 介绍了放电反应器的总体结构,其由多只放电反应管构成,以提高净化效率。并分析了三种放电反应管的结构形式。

③ 电源采用高压脉冲电压,分析比较了不同电压类型的优缺点,并选择本文的电压取值在 10~60kV 之间,脉冲频率在 10~100Hz 之间,脉冲上升前沿<100ns,脉冲宽度<500ns 的间隙开关式脉冲电源。

4 实验装置与方法

4.1 发动机台架试验

通过上面几章对梯度强磁场和放电等离子体理论的研究, 可知在梯度磁场和等离子体反应器的作用下, 进入发动机的空气由常规的空气, 即“死气”, 不导电的平衡态空气分子变为大量磁极性活泼的气体分子和大量的自由基、活性粒子、臭氧、富氧的等离子极化激发态气体分子, 即“活气”, 其与燃料混合能够激发燃料极充分的燃烧, 实现节约燃料、提高功率、消除污染物排放的目的。

本章根据以上理论把本实验设计的磁化组和放电反应器安装到发动机空气滤清器上, 在实验室的发动机台架上进行试验, 并根据实验要求测定发动机的速度特性、负荷特性和尾气排放量, 研究磁分氮氧技术和放电等离子体电激化技术优化配合使用对发动机燃料经济性和污染排放的效果。

4.1.1 实验仪器和设备

图 4.1 为发动机台架测试系统, 其由北方车辆研究所研究开发; 图 4.2 为给发动机滤清器加装节能减排实验装置; 试验用发动机是由宗申渝汇汽车发动机有限公司生产的宗申牌汽油发动机, 各项参数见表 4.1; 排气分析系统是由佛山分析仪厂生产的 FGA-4100 汽油机废气五组分排气分析仪, 其各项参数见表 4.2, 图 4.3 为发动机台架控制系统和五组份尾气分析仪, 其能够实时地记录发动机试验运行的各项指标参数; 电源采用重庆市无线电厂生产的 L40 系列高压脉冲电源, 其电压最大为 45KV, 脉冲频率为 70Hz, 电压可调。

表 4.1 试验用发动机的基本参数

Tabel4.1 The main parameters of test engine

型号	YH465Q-1E	最大扭矩 (N.m)	83
型式	直列、四缸、电喷	净质量 (Kg)	128.8
排量 (L)	1.05	外形尺寸(L×W×H)	1061.7×613.2×435.9
额定转速 (r/min)	5200	冷却方式	水冷
怠速转速 (r/min)	850±50	启动方式	电启动
怠速排放	CO≤0.5%,HC≤50ppm	额定功率 (KW)	38.5

(国 II 排放标准)

表 4.2 FGA-4100 排气分析仪技术参数

Tab.4.2 The technique parameter of FGA-4100 emission analyzer

电源	AC 220V±10% 50Hz±1%	消耗功率	约 50W
测量范围	HC: 0~10000ppm; CO: 0~10% CO ₂ : 0~20%; NO: 0~4000ppm O ₂ : 0~25%; λ: 0.5~3.0 油温: 0~150℃; 转速: 250~10000r/min	分辨率	HC: 1ppm; CO: 0.01% CO ₂ : 0.1%; O ₂ : 0.1% NO: 1ppm; 油温: 0.1℃ 转速: 1r/min
相应时间	HC/CO/CO ₂ : 10 秒以内 O ₂ /NO: 15 秒以内	外形尺寸	310mm×170mm×400mm (宽×高×深)
精度	HC: ±12ppmvol (绝对误差) 或±5% (相对误差) CO: ±0.06%vol (绝对误差) 或±5% (相对误差) CO ₂ : ±0.5%vol (绝对误差) 或±5% (相对误差) O ₂ : ±0.1%vol (绝对误差) 或±5% (相对误差) NO: ±25ppmvol (绝对误差) 或±4% (相对误差)		



图 4.1 发动机台架测试系统

Fig4.1 Engine-scaffolding test system



图 4.2 加装实验装置

Fig4.2 Installing the experimental apparatus



图 4.3 发动机台架控制系统

Fig4.3 Control-system of engine-scaffolding

4.1.2 实验方法

磁电等离子体节能减排装置各组件在发动机台架试验中的示意图如图 4.4 所示。从图中可以看出，空气进入空气滤清器后，首先经过磁化组通道，再经过等离子体放电反应器中的放电反应管通道，然后进入发动机气缸，此过程即为磁电等离子体节能减排装置降低发动机燃料消耗和排放进行作用的全过程。

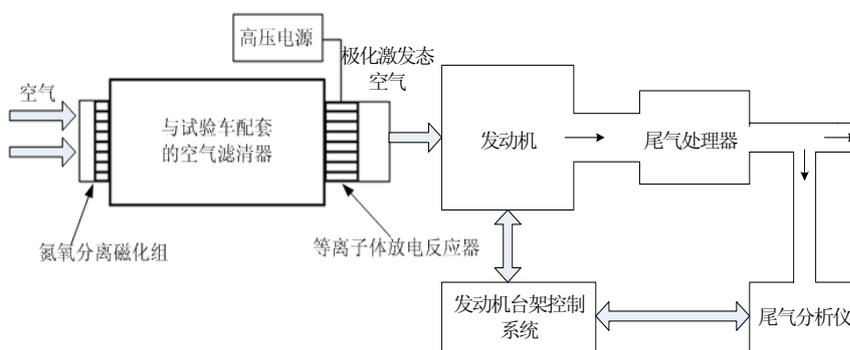


图 4.3 磁电等离子体节能减排装置整体布置图

Fig4.3 The overall layout of energy conservation and emission reduction device used by magnetoelectricity plasma

可见，本实验装置对发动机节能和减排效果的影响因素包括磁化组部分、放电反应器部分以及高压电源部分。由于经本实验装置极化激发后的空气在气缸内与燃料燃烧的过程很复杂，以及发动机其它条件对降低燃料消耗率和污染排放都有影响，不能全部考虑。本实验根据具体条件，主要研究以下几个方面的影响因素：

① 磁化组对进气空气的磁极化效果

磁化组中梯度磁场对发动机进气空气的磁极化效果决定了气缸中燃料燃烧质

量的好坏，进而对发动机的能耗和排放产生影响，本实验中磁化组梯度磁场的建立型式有两种：磁环型和双梯度磁瓦型。

② 放电反应管型式

放电反应管的结构决定了放电情况，是产生等离子体的重要因素，本文设计了三种结构型式的放电反应管，分别为内侧电极式，两侧电极式和两侧螺旋式；

③ 放电反应管的通电数量

放电反应管通电数量决定了气体的放电程度，也是影响燃料燃烧质量好坏的一个因素。本实验取 7 支和 21 支反应管两种情况，用电源控制箱控制放电反应管的通电数目。

④ 电源电压值

电源电压决定了等离子体放电反应器的放电情况，考虑到放电反应器的材料以及电源可以达到的实际工作范围，本实验电源电压可以有以下调整值（单位 kV）20，25，30，35，40；

由以上几个方面的影响因素来设计和优化本次试验的实验步骤，记录各实验条件下发动机的油耗率数据，以及尾气排放中 CO、HC 和 NO_x 三种有害气体的排放量数据。通过对各实验条件下所得数据的对比，来验证本实验中节能减排装置的实际效果。

发动机排放的有害气体主要为 CO、HC 和 NO_x。因此在实验中主要测试进气空气受磁电等离子体节能减排装置处理后对这三种气体的净化情况和发动机的节油效果。根据文献可知，NO_x 中主要成分为 NO 和 NO₂，而其它氮氧化物的浓度太低，忽略不计。磁电等离子体节能减排装置对有害气体的净化率可以通过对发动机加装该装置前后有害气体排放浓度相对减少量来计算，而其对发动机的节油率则是通过加装与不加装该装置下发动机的燃油消耗率相对减少量来计算，例如 HC 净化率的公式为：

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (4.1)$$

式中：C₁ 表示没有加装节能减排装置前原发动机 HC 的排放浓度；C₂ 表示加装了节能减排装置后发动机 HC 的排放浓度

同理，节油率也由公式 4.1 来计算，只是计算节油率时，C₁ 表示没有加装节能减排装置前原发动机燃油消耗率；C₂ 表示加装了节能减排装置后发动机的燃油消耗率。

4.2 实验步骤

根据试验目的和该节能减排装置的作用原理及安装要求，按国家标准 GB/T 18297-2001《汽车发动机性能试验方法》的规定进行控制，测量仪表精度及测量部位应符合 GB/T 18297-2001 的规定，在 YH465Q-1E 型汽油机上进行 2500r/min（最大转矩转速）负荷特性对比试验，以及转速在 1000~5000r/min 的速度特性对比试验，分别测录每个测试点的油耗和排放。实验步骤如下：

① 检查对照组发动机安装是否正确、安全、可靠。打开燃油开关、冷却水阀门及各测试系统开关，如发动机测控仪等，起动发动机，检查运转时有无明显的不稳定现象。无问题则进行发动机预热，等机油温度达到 60℃左右时，调节台架控制系统，使发动机转速稳定在 2500r/min 左右，通过改变节气门位置改变发动机负荷，由最低转矩值开始，依次升高，直至节气门位置最大，记录其在不同转矩下的燃油消耗率数据，即发动机的负荷特性；另外，调节台架控制系统，保持发动机的节气门开度为 80%，调节转速在 1000~5000r/min 范围内逐渐增大，记录各转速点下的油耗率数据和排放数据，即为速度特性。

② 在发动机空气滤清器上加装磁化组，但不加装等离子体放电反应管，磁化组磁铁类型分别安装单层梯度磁环型、双层梯度磁环型、双梯度规则排列的磁瓦型和双梯度不规则排列的磁瓦型，按步骤 1 中的方法只记录燃油消耗率数据，并与步骤 1 中的燃料消耗率数据相比较，间接地验证磁化组的富氧效果。

③ 加装等离子体放电反应管，但不加装磁化组，在反应管其他参数为定值下，调节电源控制箱给放电反应管提供不同电压值的电压，本实验中分别测试 20KV、25KV、30KV、35KV 和 40KV 的高压电下的尾气排放；确定一个最佳的电源电压值后，再分别在放电反应管的三种不同结构型式和不同通电数目情况下进行试验，按步骤 1 的方法只记录尾气排放数据，并与步骤 1 中的排放数据相比较，间接地验证放电等离子体管对进气空气的激化效果磁化组对氮氧的分离效果。

④ 同时加装磁化组和等离子体放电反应管，通过步骤 2 和步骤 3 的试验结果使磁化组和放电反应管的各项参数都选择最佳类型和最佳值，按步骤 1 的方法记录发动机的燃油消耗率和尾气排放数据，验证其整体的节能减排效果

4.3 本章小结

本章阐述了实验所需的设备及其使用参数，依据实验的科学合理性原则，制定了具体的实验方案。

5 实验结果分析

5.1 实验装置对发动机油耗的影响

由第四章实验步骤 1 可得对照组发动机（没有加装任何附加装置）的油耗率数据，图 5.1 为原发动机转速为 2500r/min 时的负荷特性试验数据记录表。

重庆大学内燃机技术研究所										
发动机负荷特性试验记录表										
发动机生产厂：宗申渝汇汽车发动机有限公司						共 页 第 页				
发动机型号	YH465Q-1E	汽油牌号	93#	环境温度	10℃	试验时间	08-12-3			
发动机编号	0702708	汽油比重	0.75g/ml	大气压力	102kPa	试验地点	内燃机实验室			
化油器型号	电控、电喷	汽油温度	19℃	相对湿度	74%	试验名称	负荷特性			
转动比	1:1	机油牌号	长 城	测功器型号	CW55G	试 验	胡朝龙			
传动效率	100%		15w/40SE	修正系数	1.022		人 员	黄日晖		
试验数据										
序号	发动机转速	发动机扭矩	发动机功率	机油压力	机油温度	回水温度	排气温度	耗油量	燃油消耗率	修正消耗率
	r/min	N.m	Kw	Kpa	℃	℃	℃	Kg/h	g/kw.h	g/kw.h
1	2477	5.80	1.5	155	69	56.0	451	1.54	1026	1009.0
2	2514	10.40	2.7	153	70	56.0	464	1.56	569	559.0
3	2511	14.40	3.8	150	71	58.0	480	1.81	478	470.0
4	2512	20.50	5.4	163	72	57.0	503	2.07	383	376.0
5	2523	24.70	6.5	159	73	59.0	513	2.24	344	338.0

图 5.1 发动机转速为 2500r/min 时的负荷特性

Fig5.1 The load performance at the engine speed of 2500r/min

5.1.1 磁化组单独作用

按照第四章实验步骤 1 的方法，在发动机空气滤清器上只加装配套的磁化组，但不加装等离子体放电反应管，此处磁化组为双层梯度磁环型，对发动机进行负荷特性试验，记录油耗率数据，并整理，数据如表 5.1

表 5.1 只加装磁化组发动机的负荷特性数据

Tab5.1 The data of engine load performance only installing magnetization group

序 号	发动机 转 速 r/min	发动机 扭 矩 N.m	发动机 功 率 kW	机 油 温 度 ℃	回 水 温 度 ℃	排 气 温 度 ℃	耗 油 量 Kg/h	燃 油 消 耗 率 g/kW.h
1	2500	5.80	1.5	70	56.0	425	1.26	830
2	2500	10.30	2.7	70	56.0	446	1.53	564
3	2500	14.40	3.8	71	57.0	446	1.64	433
4	2500	20.30	5.4	72	57.0	492	1.92	358
5	2500	24.90	6.5	73	59.0	517	2.20	336

与图 5.1 中对照组发动机的油耗率数据相比较，可以做出两者的转矩与燃油消耗率关系曲线，图 5.2 为发动机只加装磁化组时转矩和燃油消耗率的关系曲线，图 5.3 为加装磁化组后转矩和节油率的关系曲线。由曲线可知，发动机的油耗率总是随着转矩的增大而降低，转矩从 5.8N.m 增大到 10.3N.m 之间，油耗率急剧降低，而后趋于平稳。在加装磁化组后，燃油消耗率较原发动机在各转矩下都有降低，从转矩为 5.8N.m 时的最大节油率 20.6%，到转矩为 10.3N.m 时，节油率陡然下降到 2.8%，对于转矩为 10.3N.m 时的节油率这一数据，我们有理由认为它是一个干扰数据。正确的变化趋势应当是：节油率随转矩的增大而逐渐地降低。可见，在加装磁化组后，发动机的平均节油率只能达到 9.4%，效果有限。

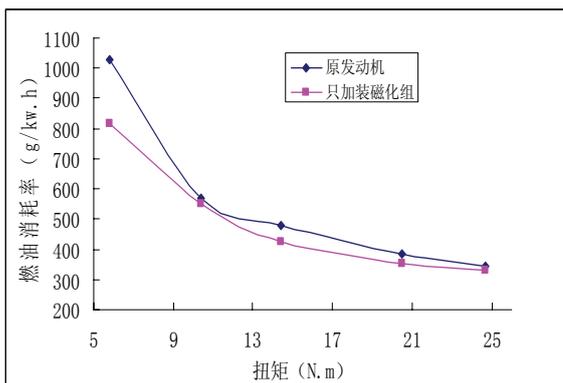


图 5.2 发动机油耗率与转矩的关系

Fig5.2 The relationship of engine fuel consumption ratio and torque

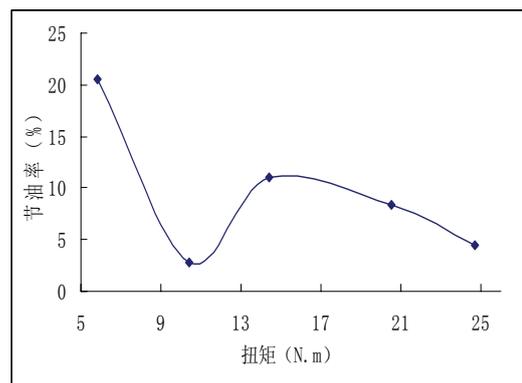


图 5.3 节油率随转矩的变化曲线

Fig5.3 The curve of fuel saving ratio and torque

可以总结以上试验结论的原因为：

① 发动机在低转矩时，节气门开度小，进入气缸内的空气量有限，混合气中氧气的比例不能满足燃料的完全燃烧，而通过此实验中的磁化组梯度磁场对进气空气处理后，在相同量的空气进入气缸时氧的含量有一定的增加，从而使更多量的燃料能够完全燃烧，也即富氧燃烧，提高了能量的转换效率，进而验证了其在低转矩时的油耗率较原发动机有明显的下降。

② 随着转矩的增大，为了维持发动机的转速在 2500r/min，节气门开度逐渐增大，而此时通过磁化组的空气量也增大，从而使作用在空气中单位氮气和氧气分子上的磁化力变的非常微弱，氮氧的分离效果有限，以及气体分子之间的不规则运动、频繁的碰撞、气体湍流作用和分子扩散等因素都会对氮氧分子的分离过程产生影响，从而在转矩逐渐增大时节油率逐渐下降。

5.1.2 磁化组和放电管共同作用

按照第四章实验步骤 1 的方法，在发动机空气滤清器上同时加装与之相配套的磁化组和等离子体放电反应管，此处磁化组类型为双层梯度磁环型，等离子体放电反应管结构型式采用两侧螺旋式，反应管通电数目为 21 支，给反应管通电的电源电压为 30KV，对发动机进行负荷特性试验，记录油耗率数据，并整理，数据如表 5.2。

表 5.2 磁化组和放电管共同作用时发动机的负荷特性数据

Tab5.2 The data of engine load performance with magnetization group and discharge reactor

序 号	发动机 转 速 r/min	发动机 扭 矩 N.m	发动机 功 率 kW	机 油 温 度 ℃	回 水 温 度 ℃	排 气 温 度 ℃	耗 油 量 Kg/h	燃 油 消 耗 率 g/kW.h
1	2500	5.80	1.5	71	57.0	464	1.12	731
2	2500	10.30	2.7	72	58.0	463	1.25	458
3	2500	14.30	3.8	74	59.0	479	1.54	409
4	2500	20.80	5.4	75	60.0	502	1.76	324
5	2500	24.80	6.5	76	60.0	514	1.91	292

与图 5.1 中原发动机的油耗率数据相比较，做出两者的转矩与燃油消耗率关系曲线，图 5.4 为发动机同时加装磁化组和等离子体放电反应管时转矩和燃油消耗率的关系曲线，图 5.5 为同时加装磁化组和放电反应管后节油率与转矩的关系曲线。由曲线可知，发动机的油耗率也是随着转矩的增大而降低，转矩从 5.8N.m 增大到 10.3N.m 之间，油耗率急剧降低，而后油耗率的降低趋于平缓。由图 5.5 可见，在同时加装磁化组和等离子体放电反应管后，燃油消耗率较原发动机有明显的降低，

在转矩为 5.8N.m 时，节油率达到 28.8%；随着转矩的增大，节油率也逐渐的降低，当转矩超过 14.3N.m 以后，节油率基本趋于 15% 保持不变。此种情况下，发动机的平均节油率可达 18.6%，效果可观。

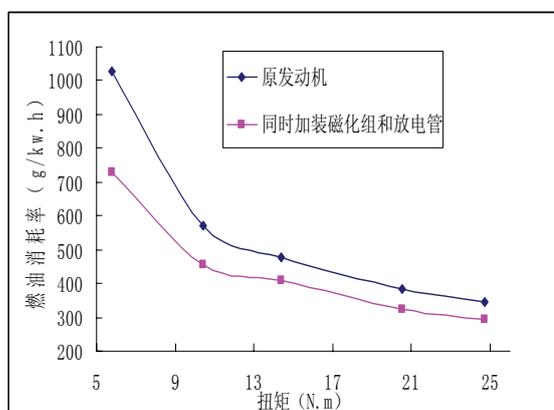


图 5.4 转矩与燃油消耗率关系

Fig5.4 The relationship of engine fuel consumption ratio and torque

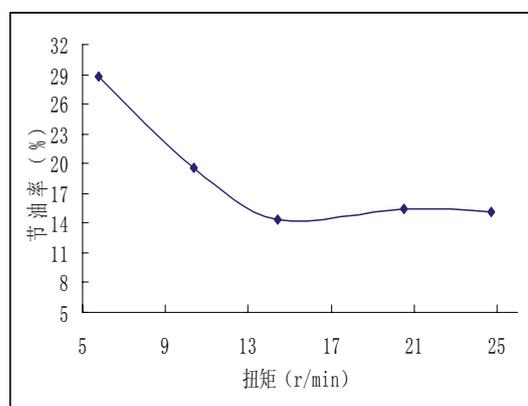


图 5.5 转矩与节油率关系

Fig5.5 The relationship of fuel saving ratio and torque

总结以上试验结论的原因可以分析为：

发动机进气空气在经过磁化组和等离子体放电反应管节能减排装置的处理后，首先获得富氧的进气空气，随后富氧的空气在等离子体管内受高压电场的作用，一部分氧分子转化成臭氧等活性很强的基元粒子，臭氧可以作为催化剂以提高 O_2 的氧化能力，还可以使环状结构的芳香烃氧化成直链烃，可以把大量的直链烯烃从双键部位断开，变成易于分解的小分子量的烃^[49]，进一步促进了燃料在气缸内的充分燃烧，从而使发动机的节油率有可观的效果。

5.2 磁化组结构型式对发动机油耗的影响

5.2.1 负荷特性试验

为了验证本论文中设计的不同结构型式的磁化组对氮氧分离效果，按照第四章实验步骤 1 的方法，在发动机空气滤清器上加装配套的磁化组，不加装等离子体放电反应管，磁化组分别选用单层梯度磁环型、双层梯度磁环型、双梯度规则排列的磁瓦型和双梯度不规则排列的磁瓦型，对发动机进行负荷特性试验，记录油耗率数据，参照图 5.1 中原发动机的燃油消耗率数据，做出图 5.6 双层梯度和单层梯度磁环型的转矩与燃油消耗率关系曲线和图 5.7 单层梯度和双层梯度磁环型的转矩与节油率关系曲线。由图 5.6 可知，加装单层梯度磁环型磁化组的发动机燃油消耗率曲线间于加装双层梯度磁环型磁化组和原发动机燃油消耗率曲线之

间，都是随着转矩的增大而先急剧的降低而后缓慢地减小；由图 5.7 可知，单层梯度磁环型磁化组的节油率明显低于双层梯度磁环型磁化组的节油率，其最大节油率只有 9.16%，最小节油率为 0.88%，平均节油率为 3.88%，接近于双层梯度磁环型磁化组平均节油率 9.4% 的一半，可见，单层梯度磁环型磁化组的节油效果更加不客观。

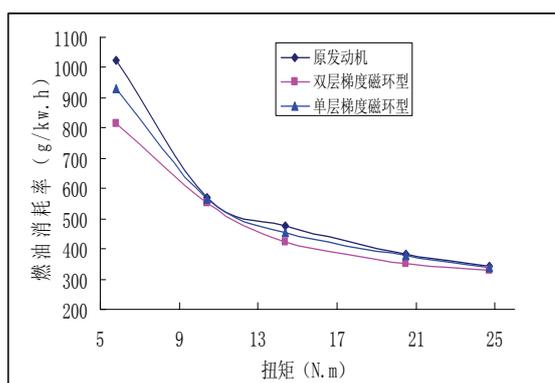


图 5.6 转矩和燃油消耗率关系

Fig5.6 The relationship of fuel consumption ratio and torque

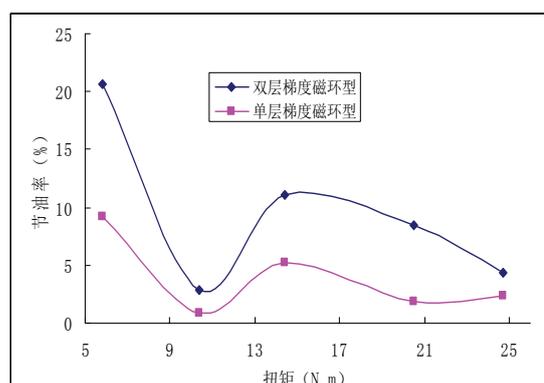


图 5.7 转矩与节油率关系

Fig5.7 The relationship of fuel saving ratio and torque

以上结论可以总结为：

① 磁环型磁化组中梯度磁场的磁感线方向由 N 级到 S 级，由 3.2.2 节中图 3.4 磁环型磁铁的结构示意图可知，磁环中空气通道从上到下有一个梯度角度，使磁环中的磁感线密度从上到下也逐渐变大，而进气空气流过磁环组时刚好是顺着磁感线方向，由于氧气的顺磁性和氮气的抗磁性，氧气在磁环中顺着梯度磁场强度逐渐增大的方向加速运动，而氮气则受到阻碍作用，从而起到一定的富氧作用，使其有比较好的节油效果。

② 由 3.2.2 节中图 3.5 和图 3.7 的双层和单层梯度磁环型磁铁实物图可知，双层梯度磁环型磁铁是由两个单层梯度磁环型磁铁叠加而成的，使磁化组的磁环通道加长了，进气空气在磁化组中受处理的路径变长，从而使空气中的氮氧能够更加有效地分离，也验证了前者的节油率大约等于后者的 2 倍。

参照图 5.1 中原发动机的燃油消耗率数据，做出图 5.8 双梯度规则排列和不规则排列的磁瓦型磁化组的转矩与燃油消耗率关系曲线和图 5.9 双梯度规则排列和不规则排列磁瓦型磁化组的转矩与节油率关系曲线。由图 5.8 可知，加装了双梯度磁瓦型的两种磁化组，其燃油消耗率与原发动机相比降低很不明显，只有在低转矩时有一定的降低，而在大转矩下基本没有变化，甚至比不加装任何附加装置的

原动机的油耗率都高；由图 5.9 可知，规则排列的磁瓦型磁化组较不规则排列的磁瓦型磁化组的节油率更高些，前者最大能到 12.3%，平均为 2.59%，而后者最大只有 7.4%，平均节油率也只有 0.97%，随着转矩的增大，两者的节油率都有降低到负值，可见在大转矩下两者除了没有节油，甚至会加剧燃油油耗。

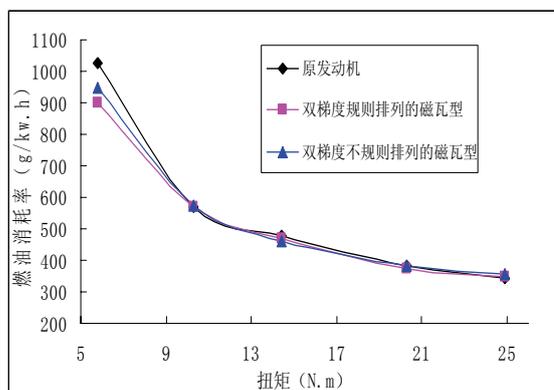


图 5.8 转矩与燃油消耗率关系

Fig5.8 The relationship of engine fuel consumption ratio and torque

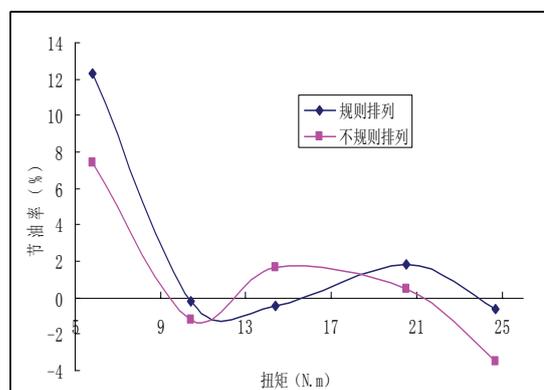


图 5.9 转矩与节油率关系

Fig5.9 The relationship of fuel saving ratio and torque

以上可以总结为：

① 由 3.2.2 节中图 3.8 可知，磁瓦型磁化组中的磁感线方向与空气流过的方向正好相互垂直，顺磁性的氧气和逆磁性的氮气在经过磁瓦通道时受到指向气流方向的磁力作用相差比较小，氮氧的分离效果不是很明显，具体的机理还待深入的研究。

② 由 3.2.2 节中图 3.9 和图 3.10 可知，磁瓦规则排列在磁化组中时，磁感应线方向一致，而磁瓦不规则排列在磁化组中时，磁感应线方向相互交错，可能导致空气中氮氧分子经过磁化组时受到的磁化力有一定的降低，氮氧分离效果不明显，从而可以解释其节油率较低。

5.2.2 速度特性试验

为了验证不同结构型式的磁化组对节油效果的影响，同样按照第四章实验步骤 1 的方法，在发动机空气滤清器上只加装配套的磁化组，不加装等离子体放电反应管。磁化组分别选用双层梯度磁环型、双梯度规则排列的磁瓦型。对发动机进行速度特性试验，记录油耗率数据。见图 5.10，表中记录了发动机转速从 1500~5000r/min 时分别在原发动机上、加装双层梯度磁环型磁化组和双梯度规则排列磁瓦型磁化组后的燃料消耗率，同时根据式 (4.1) 计算出两种情况下的节油

率。

由表 5.3 中数据可知，试验用发动机加装双层梯度磁环型磁化组后的平均燃油消耗率最小，为 289.6g/kW.h，且其平均节油率也可以达到 3.78%；而加装双梯度规则排列的磁瓦型磁化组后的平均燃油消耗率较原发动机降低很小，平均节油率只有 0.80%。

序号	转速 r/min	燃料消耗率			节油率	
		原机	双磁环	磁瓦	双磁环	磁瓦
空滤器						
1	1500	300.4	302.2	307.0	-0.61	-2.20
2	2000	283.1	276.7	283.2	2.27	-0.03
3	2500	275.5	274.7	272.9	0.31	0.96
4	3000	285.0	272.7	280.7	4.32	1.51
5	3500	300.9	283.8	293.2	5.69	2.56
6	4000	312.8	291.0	304.7	6.98	2.60
7	4500	322.7	305.9	320.6	5.21	0.65
8	5000	327.3	309.8	326.3	5.36	0.32
平均值		301.0	289.6	298.6	3.78	0.80

图 5.10 速度特性试验数据

Tab5.10 The test data of engine speed performance

根据图 5.10 作出转速与燃油消耗率关系曲线，见图 5.11。由图可知，试验发动机在三种实验条件下的燃油消耗率都是随着转速的增大而先减低，然后逐渐增大，当转速在 2500r/min 时，三种情况下的发动机燃油消耗率基本都降到最小值。另外，根据图 5.10 作出在加装双磁环和磁瓦下转速与节油率的关系曲线，见图 5.12。由图可知，加装双磁环型磁化组后发动机的节油率明显大于加装磁瓦型的节油率，且两种情况下的发动机节油率都随转速的增大而先增大，当转速增大到 4000r/min 时节油率最大，而后逐渐减低，最后趋于不变。

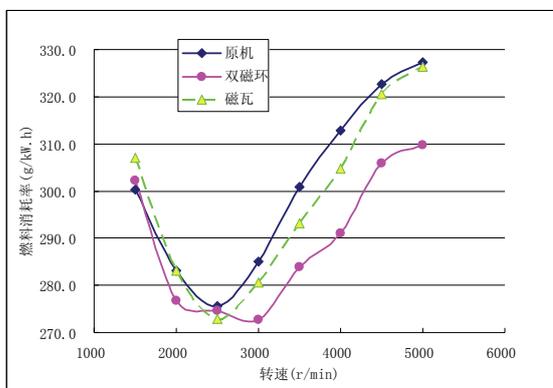


图 5.11 燃油消耗率比较图

Fig5.11 The comparison chart of fuel consumption

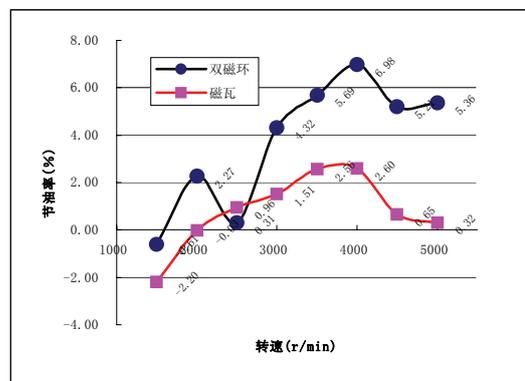


图 5.12 节油率比较图

Fig5.12 The comparison chart of fuel saving ratio

以上结论可以总结为：

① 由图 5.12 可见，在转速为 2500r/min 时，加装双磁环型磁化组的节油率值较其前后数据都有较不规律的变化，此处可以认为其为一个实验误差点。可以认为曲线在此点处有较规律的变化。

② 由图 5.12 可知，当转速较小时，在 1500~2000r/min 的范围内，节油率值为负数，说明发动机由于在空滤器上加装了磁化组，进气受阻，燃料不能够充分的燃烧，从而出现其较原发动机的燃油消耗率大的现象。

③ 根据上一节的解释，空气在磁环型磁化组中的流动方向正好是顺着磁化组中磁铁的磁感应线方向，空气流过后，由于氮气的逆磁性而受到一定的阻碍，使空气中氧气的浓度较之前有一定的增加，从而使燃料富氧燃烧，油耗率降低；而磁瓦型磁化组中的磁感线方向正好与空气流过的方向相垂直，氮氧分离的效果有限。

5.3 实验装置对发动机排放的影响

由第四章实验步骤 1，进行对照组发动机（没有加装任何附加装置）的速度特性试验，保持发动机在一定节气门开度下，稳定转速，测取不同工况下油耗率和有害气体排放数据。图 5.13 为对照组发动机节气门（油门）开度为 80%时的速度特性试验数据记录表，表中只记录排放数据，不记录油耗数据。

重庆大学内燃机技术研究所										
发动机速度特性试验记录表										
发动机生产厂：宗申渝汇汽车发动机有限公司							共 页 第 页			
发动机型号	YH465Q-1E	汽油牌号	93#	环境温度	10℃	试验时间	08-12-3			
发动机编号	0702708	汽油比重	0.75g/ml	大气压力	102kPa	试验地点	内燃机实验室			
化油器型号	电控、电喷	汽油温度	19℃	相对湿度	74%	试验名称	负荷特性			
转动比	1:1	机油牌号	长 城	测功器型号	CW55G	试 验	胡朝龙			
传动效率	100%			修正系数	1.022	人 员	黄日晖			
试验数据										
序号	发动机转速	发动机扭矩	发动机功率	机油压力	机油温度	回水温度	排气温度	HC	CO	NOx
	r/min	N.m	Kw	Kpa	℃	℃	℃	ppm	%	ppm
1	3508	51.90	19.1	133	77	62.0	600	261	0.19	2957
2	3016	57.70	18.2	124	79	63.0	600	259	0.40	2733
3	2499	59.10	15.5	148	64	57.0	600	312	0.11	2477
4	2013	57.00	12.0	143	58	56.0	600	327	0.12	2044
5	1504	60.90	9.6	141	53	53.0	473	446	0.54	2197
6	1001	58.90	6.2	111	49	54.0	409	510	0.78	2080

图 5.13 发动机节气门开度一定时的速度特性

Fig5.13 The picture of engine speed performance at fixed throttle percentage

5.3.1 磁化组和放电管共同作用

根据本实验要求，给发动机空气滤清器同时加装与之相配套的磁化组和等离子体放电管节能减排装置。此处磁化组类型采用双层梯度磁环型，等离子体放电管采用两侧螺旋式，放电管通电数目 21 支，通电电源电压为 30KV。按实验步骤做发动机节气门（油门）在 80%时的速度特性试验，记录尾气排放数据并整理，见表 5.3 节能减排装置共同作用时的速度特性实验记录表

表 5.3 发动机的速度特性参数

Tab5.3 The data of engine speed performance

序	发动机 转 速	发动机 扭 矩	发动机 功 率	机油 温 度	回水 温 度	排气 温 度	HC	CO	NOx
号	r/min	N.m	kW	℃	℃	℃	ppm	%	ppm
1	1006	62.50	6.6	77	64.0	476	437	0.63	2225
2	1520	62.50	9.9	68	57.0	441	413	0.43	2279
3	2010	58.90	12.4	68	57.0	563	308	0.10	2263
4	2502	62.10	16.3	73	60.0	600	308	0.09	3687
5	3012	63.20	19.9	81	63.0	600	258	0.33	3072
6	3529	58.80	21.7	79	62.0	600	261	0.49	3681

与图 5.13 中原发动机的排放数据相比较，做出两者排放中 HC、CO 和 NOx 浓度的关系曲线。图 5.14 为加装与不加装节能减排装置的转速和 HC 排放浓度关系曲线，图 5.15 为加装与不加装节能减排装置的转速和 CO 排放浓度关系曲线，图 5.16 为加装与不加装节能减排装置的转速和 NOx 排放浓度关系曲线，图 5.17 为加装与不加装节能减排装置三种排放物的转速与净化率关系曲线。由以下几图可见，HC 的排放浓度整体上是随转速的增大而降低，其净化率也从最大 13% 逐渐降低到 0；CO 的排放浓度随转速的增大而先降低到一个很小的值然后又有小幅的增大，其净化率基本保持在 18% 左右，当转速大于 3000r/min 后，其净化率急剧下降；而 NOx 的排放浓度随转速的增大而逐渐增大，且由图 5.17 可知，NOx 的净化率与 HC 和 CO 相比是负值，而且随着转速的增大其绝对值也是逐渐增大。

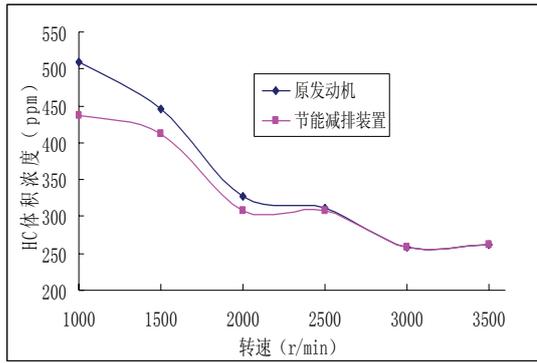


图 5.14 转速与 HC 排放浓度关系

Fig5.13 The relationship of engine speed and emission concentration of HC

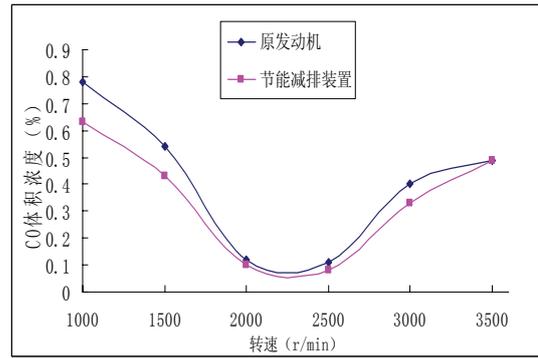


图 5.15 转速与 CO 排放浓度关系

Fig5.14 The relationship of engine speed and emission concentration of CO

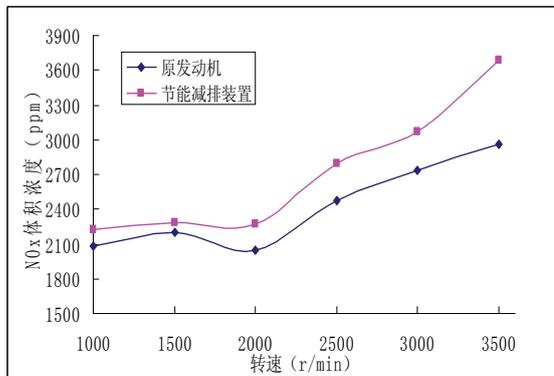


图 5.16 转速与 NO_x 排放浓度关系

Fig5.15 The relationship of engine speed and emission concentration of NO_x

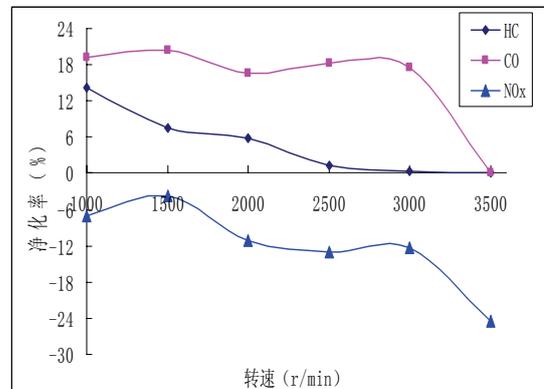


图 5.17 转速与净化率关系

Fig5.16 The relationship of engine speed and purifying rate

以上试验结论可以总结为:

① 发动机在低转速或者怠速时候, 燃烧环境温度比较低, 缸内残余废气量比较大, 混合气较浓, 致使燃烧恶化, HC 排放浓度较大, 随着转速的增大, 汽缸中的扰流混合与涡流扩散增加, 以及激冷层的后氧化反应也有增加, 从而促进了汽缸内燃料的燃烧, HC 排放浓度逐渐降低。在低转速时, 空气进入滤清器的流速比较低, 能够受到磁化组和等离子体放电管的充分处理, 使活性较大且氧含量高的空气与燃料混合燃烧, 促使此时更多的残余气体都能够燃烧, 节油效果较好; 在转速增大以后, 节能减排装置对进气空气的处理时间缩短, 从而导致了节油效果的降低。

② 由 CO 的生成机理可知, 其生成的浓度受混合气浓度的影响, 在发动机转速比较低的时候, 进气量有限, 过量空气系数小于 1, 混合气较浓, 没有足够的氧

使燃油中的碳完全燃烧成 CO_2 而大量生成 CO ，可见其排放浓度较高，此时，加装本实验装置后，首先有进气空气氧含量有所增大，燃烧变的更加充分，同时在进气空气中产生大量的活性基元物质，使不能充分燃烧产物中的 CO 被氧化成 CO_2 ，可见其净化率有很好的效果；随着转速的增大，进气充足，燃料中的碳能够完全燃烧直接生成 CO_2 ，使 CO 的排放浓度降低；当转速继续增大时，混合器浓度逐渐变稀，过量空气系数大于 1，燃烧产物中的 CO_2 和 H_2O 会发生高温离解反应，会生成一部分 CO ，从而使 CO 排放浓度有一定的升高。

③ 发动机在转速增大时，燃料的燃烧剧烈，温度和压强都增大，这些都促进了 N_2 和 O_2 的离解反应，生成更多的 NO_x ，而在加装本实验装置后，又促进了氧浓度的增加，以及生成一定量的臭氧，这些又促进了 N 和 O 的反应生成 NO_x ，从而加剧了尾气中 NO_x 的排放。

5.3.2 放电管通电电压的影响

为了单独的验证放电反应器的效果，给发动机只安装等离子体放电反应管及与其配套的高压电源和电源控制箱，但不加装磁化组。分别对放电反应管所用电源的电压、反应管类型、通电数目等参数进行发动机的排放特性试验验证。为了有针对性地验证实验装置的效果，实验只记录发动机的排放数据，并与图 5.12 原发动机的排放数据相比较，选择最佳的放电反应管参数。

高压电源的频率为 60Hz，给放电反应管接通电压分别为 20KV、25KV、30KV、35KV 和 40KV 的高压电源，放电反应管的通电管数目 21 只。图 5.18 为电源电压与 HC 和 CO 的净化率关系曲线，图 5.19 为电源电压与 NO_x 排出浓度的关系曲线。

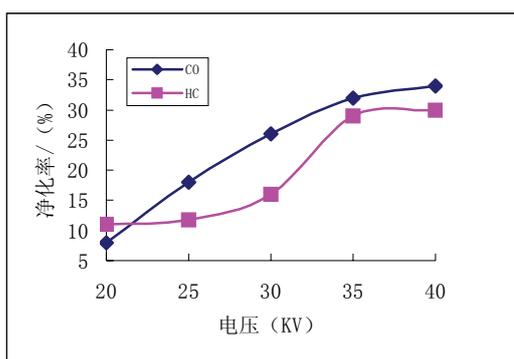


图 5.18 电源电压与 HC 和 CO 的净化率关系
Fig5.18 The relationship of power voltage and purify rate of HC and CO

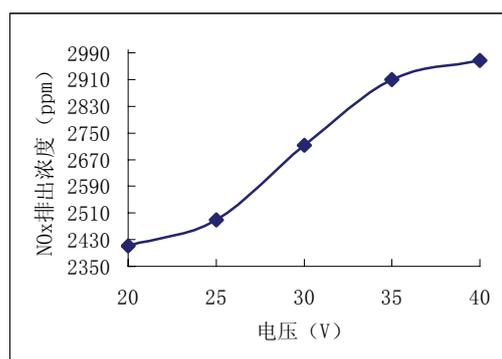


图 5.19 电源电压与 NO_x 排出浓度关系
Fig5.19 The relationship of power voltage and concentration of NO_x

从图 5.18 可以看出，随着电源电压的增加，CO 的净化率相应地升高。电压在 20kV 时，CO 的净化率为 8%，当电压增加至 40kV 时，CO 的净化率升高到 38%，

在电压达到 35KV 以后，CO 的净化率趋于平稳；HC 的净化率同样随着电源电压的增加而升高。电压在 20kV 时，HC 的净化率为 11%，当电压增加至 40kV 时，HC 的净化率升高到 30%。从图 5.19 可以看出，与 CO 和 HC 相反，NO_x 的排出浓度是随着电压的增大而增大，当电压在 20kV 的时候，NO_x 的排出浓度为 2412ppm 左右，但电压增加到 40kV 的时候，NO_x 的排出浓度也增大到 2967ppm 左右。

总结以上试验结论的原因为：

① 当电源电压提高时，供给反应管的能量越来越高，放电反应管内的沿面放电程度更加的激烈，产生的等离子体的浓度越高，进气空气被强烈激化作用之后，产生更多活性基元粒子，其进入气缸使燃料的燃烧更加充分，气缸中燃烧的中间产物 CO 大部分被氧化成 CO₂，使得发动机排出的 CO 降低。但当电压达到一定值后，燃料在燃烧过程中产生的 CO 被氧化成 CO₂，而 H₂O 也会部分分解成 O₂ 和 H₂，生成的 H₂ 使 CO₂ 还原成 CO，这整个反应过程在外加电压为 35kV 时便达到一个平衡状态，此时继续增加电压值，并不能使余下的 CO 进一步被氧化成 CO₂，因此 CO 的排出浓度便保持平衡状态。

② 电源电压决定了反应管内的放电质量，当增大电压即增大了电场强度，使电子的平均动能增加，这使放电反应管内的气体发生裂解和电离更加剧烈，产生更多的活性基元。当电压小于 30kV 时，活性粒子还不足以使气缸燃烧时产生的 HC 被分解转化，而随着外加电压大于 30kV，活性粒子达到一定浓度，使气缸内燃烧产生的 HC 能够被有效的转化，此时 HC 的净化率表现出明显的提高。

③ 随着外加电压的提高，使放电反应管内产生许多活性基元的同时，N₂ 也在电场的作用下被部分分解，再加上在反应管内产生在高温下极不稳定的臭氧，臭氧又立即分解为具有极强氧化能力的氧原子，使分解的氮原子被氧化形成 NO_x，同时在气缸燃烧反应中，由于活性氧的作用，又生成一定量的 NO_x，从而使发动机排放出较强浓度的 NO_x。

因此考虑到电压值增加时，NO_x 排放浓度增加与 CO 和 HC 净化率也增大相矛盾，需要控制电压值在合理的范围内，结合对 CO 和 HC 的实验分析，为了使反应器对 CO 和 HC 表现出较好的净化效果，同时 NO_x 排放浓度也相对较少，选择放电反应管电源电压为 30kV。

5.3.3 放电反应管结构型式的影响

图 5.20 是三种放电反应管结构型式对 CO、HC 和 NO_x 三种气体排放浓度的影响关系曲线，其为发动机在大负荷下不同转速运行后的平均排放浓度。其中 A 代表内侧电极式结构，B 代表两侧电极式结构，C 代表两侧螺旋式结构。此时电源电压为 30kV，电源频率为 60Hz，放电反应管全部通电。

从图中可以看出，当采用两侧螺旋式放电反应管时，CO 和 HC 两种尾气排出浓度最低，分别为 1692ppm 和 201ppm，而当采用两侧电极式的放电反应管时，CO 和 HC 两种尾气排出浓度略有增加，分别为 1798ppm 和 227ppm，但当采用单侧电极式的放电反应管时，CO 和 HC 两种尾气排出浓度大大增加，分别为 2100ppm 和 305ppm，两侧螺旋式结构与内侧电极式结构相比，CO 和 HC 的排出浓度分别减少了 19.4%和 34%；对于 NO_x 的排放，却表现出与 CO 和 HC 相反效果，当采用两侧螺旋式的放电反应管时，NO_x 的排出浓度最多，相对于采用单侧栅格式的反应管，排出浓度增加了 11.8%。

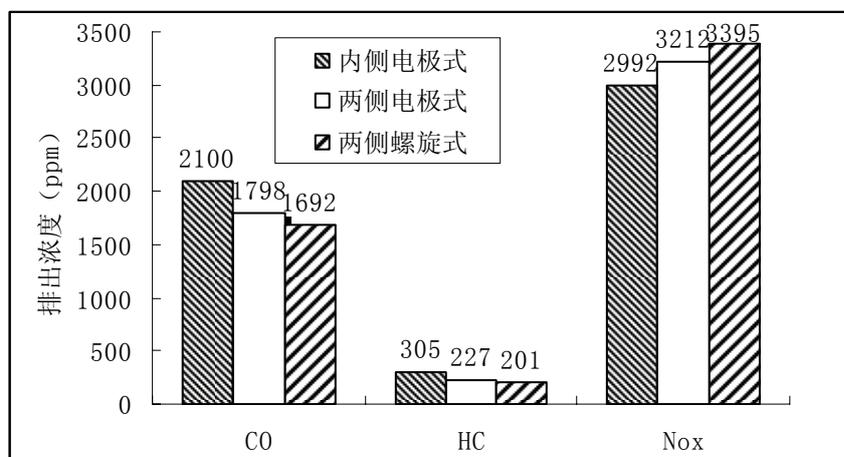


图 5.20 反应管结构型式与 CO、HC 和 NO_x 排出浓度的关系

Fig5.20 The relationship of construction of reaction tube and concentration of CO, HC and NO_x

其原因为：

① 双侧螺旋式结构的反应管在放电时放电面积更大，放电效果更好，产生浓度更高的低温等离子体，使装置的净化作用更明显。

② 由于两侧螺旋式结构使放电反应管放电效果提高，使部分的 N₂ 又转化成了 NO_x，导致其排放浓度的增加。

由此，说明对于 CO 和 HC 两种尾气的排放，两侧螺旋式的放电反应管是最有效果的一种反应管，但是 NO_x 的排放却很不理想。

5.3.4 放电反应管通电数目的影响

分别给放电反应器安装 7 支和 21 支反应管，反应管通电电压为 30kV，电源频率为 60Hz，放电反应管长度为 80mm，内径为 14mm。图 5.21 为两种放电反应管通电数目下发动机转速与 HC 排放浓度的关系曲线，图 5.22 为两种放电反应管通电数目下发动机转速与 CO 排放浓度的关系曲线，图 5.23 为两种放电反应管通电数目下发动机转速与 NO_x 排放浓度的关系曲线。

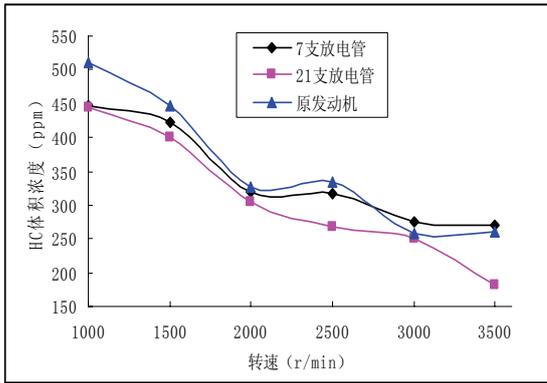


图 5.21 转速与 HC 排放浓度关系

Fig5.20 The relationship of engine speed and concentration of HC

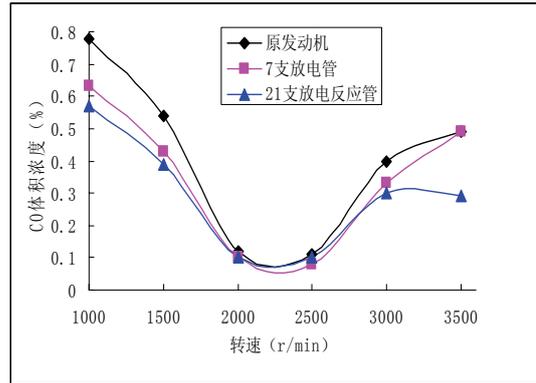


图 5.22 转速与 CO 排放浓度关系

Fig5.21 The relationship of engine speed and concentration of CO

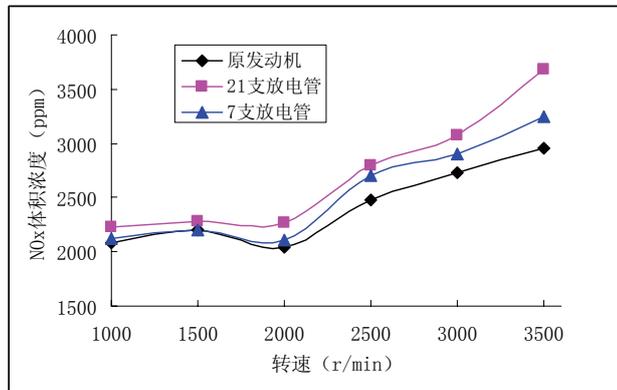


图 5.23 转速与 NO_x 排放浓度关系

Fig5.23 The relationship of engine speed and concentration of NO_x

从图 5.21 可以看出，与原发动机相比，加装 7 支和 21 支等离子体放电管的 HC 排放浓度都有下降，但 21 支放电管的 HC 排放浓度下降比较明显，较 7 支反应管的 HC 排放浓度最大下降了 16%。

由图 5.22 可知，与原发动机相比，加装 7 支和 21 支等离子体放电管的 CO 排放浓度都有下降，且加装 21 支反应管的 CO 排放浓度较加装 7 支反应管降低的多，但是两者相差很小，尤其是发动机转速在 1500r/min 到 2500r/min 之间，两者相差几乎为零。

由图 5.23 可知，与 HC 和 CO 的排放相反，加装 7 支和 21 支等离子体放电管的 NO_x 排放浓度较原发动机的排放都是增大的，且加装 21 支反应管的 NO_x 排放浓度较加装 7 支反应管有明显的增大，较 7 支反应管的 NO_x 排放浓度最大增大了 11.8%，最小也增大了 3.5%。另外由图可知，发动机 NO_x 的排放浓度随转速的增大而逐渐增大。

以上结论可以总结原因为：

① 等离子体放电反应管的数目增加时，反应管内产生的等离子体浓度增大，活性基元粒子数增加，促进了燃料的充分燃烧，同时使气缸内燃料燃烧生成的 CO 和 HC 进一步的转化成无害的气体，从而使 HC 和 CO 的排放浓度降低。

② 放电反应管内产生许多活性基元的同时， N_2 也在电场的作用下被部分分解，再加上在反应管内产生在高温下极不稳定的臭氧，臭氧又立即分解为具有极强氧化能力的氧原子，使分解的氮原子被氧化形成 NO_x ，同时在气缸燃烧反应中，由于活性氧的作用，又生成一定量的 NO_x ，从而使发动机排放出较大浓度的 NO_x 。

5.4 本章小结

本章通过发动机台架实验，对磁电等离子体节能减排装置节油和净化 NO_x 、CO、HC 三种有害气体的效果进行了深入的研究。并验证了不同类型磁化组的节油效果，以及不同放电反应管参数对排放的影响，经实验研究发现：同时加装磁化组和等离子体放电反应管后，发动机的燃油消耗率与 CO 和 HC 二种有害尾气的排放较原发动机都有比较明显的降低，平均节油率可以达到 18.6%，尾气中 HC 的净化率可达到 10%，CO 的平均净化率能达到 15%，但是 NO_x 的排放却有所增大，还需要尾气中的净化措施来处理。

通过试验发现，磁化组类型为双层梯度磁环型时，进气空气在经过磁场时氮氧分离的效果较好，但具体理论方面的计算还需要更加深入的研究，本文只是从实验的角度验证了梯度磁场中氮氧分离的可行性。等离子体放电反应管的影响参数比较多，本实验只对通电电压、反应管结构类型和反应管通电数目这三个对放电质量好坏影响比较大的参数进行了实验验证，并综合考虑各方面的因素，反应管的通电电压选择 30KV，结构型式采用两侧螺旋式，通电数目为 21 支时整体的节能和减排效果更加可观。

6 结论与建议

6.1 结论

本文通过研究低温等离子体理论和强磁场理论，分析磁电等离子体对发动机进气空气极化激发后降低发动机油耗和尾气排放的机理，研制出一种新型的磁电等离子体节能减排装置。该装置作用于发动机进气端，通过改变发动机进气状态，并使进气空气内产生大量强活性原子氧、臭氧等基元粒子，提高内燃机燃烧效率，达到降低发动机油耗和尾气排放的目的。通过对发动机负荷特性和速度特性的试验研究，分析出该节能减排装置的节油净化规律，以及相关因素的影响规律。得到以下结论：

① 由磁化组和等离子放电管共同组成的节能减排装置能够有效地降低发动机的油耗和尾气中 CO、HC 和 NO_x 的排放量。在各种影响因素为最佳情况的实验条件下，发动机的节油率最大可达到 28.8%，转矩在 5.8~24.8N.m 的测试范围内，平均节油率为 18.6%；而三种有害气体在转速为 1000~3500r/min 的范围内，平均净化率分别能够达到 HC 10%、CO 15%和 NO_x -12%，可见，该装置具有比较显著的节能减排效果。而 NO_x 的净化率与其它两种有害物质相比为负数，说明装置促进了尾气中 NO_x 的生成，与理论分析的结论相符，是本装置的不足之处。

② 该装置中磁化组单独作用时，双层梯度磁环的平均节油率为 9.4%，大于单层梯度磁环的平均节油率 3.88%，而且前者约为后者的两倍；磁瓦规则排列的平均节油率为 2.59%，明显大于磁瓦不规则排列的平均节油率 0.97%。可见，磁化组中梯度磁铁的型式选用双层梯度磁环型时，其对氮氧的分离效果比较明显，是以后在理论方面研究的重点。

③ 该装置中放电反应管单独作用时，放电反应器的相关参数直接决定三种有害气体的净化效果。其中，考虑到脉冲电源电压值增加时，NO_x 排放浓度增加与 CO 和 HC 净化率增大相矛盾，需要控制电压值在合理的范围内，结合对 CO 和 HC 的实验分析，为了使反应器对 CO 和 HC 表现出较好的净化效果，同时 NO_x 排放浓度也相对较少，选择脉冲电源电压为 30kV；反应管结构型式选用两侧螺旋式时 CO 和 HC 的排出浓度相对于效果最差的内侧电极式分别减少了 19.4%和 34%，NO_x 排出浓度却增大了 11.8%；反应管通电数目为 21 支时较 7 支时的 HC 排放浓度最大下降了 16%，CO 排放浓度下降几乎为零，而 NO_x 排放浓度也是有一定的增大，综合考虑各方面的因素，反应管的通电电压选择 30KV，结构型式采用两侧螺旋式，通电数目为 21 支时整体的减排效果更加可观。

总之，高压脉冲等离子体和梯度强磁场的相结合对发动机节油效果较好，但

净化率还有待提高，尤其是对 NO_x 的控制。因此，磁电等离子体技术在汽车油耗控制和尾气治理方面具有很大的研究价值和应用前景。

6.2 建议

通过对磁电等离子体技术用于汽车节能减排的实验研究以及综合以前的研究结论，建议如下：

① 本文利用梯度磁场对氮氧分子产生的相反方向磁化力改变氧气和氮气的行进轨迹，从而实现进气空气的富氧化，实际上，受客观条件的限制，气体分子在梯度磁场中受到的磁化力有限，而且受到发动机进气过程中气体湍流和浓度差导致的分子扩散等影响，氮氧分离的效果有限。因此，对于梯度磁场的形成、磁场的各项参数和氮氧分离过程中氮气如何有效排出的结构因素等，都需要不断的更深入的研究。

② 放电反应器需要进一步改进。通过进一步深入研究放电反应器中各种参数的影响规律以及其它可能的影响因素，不断改进反应器的结构，进一步提高装置对发动机尾气的净化效果，同时使装置的结构更加紧凑。

③ 进一步提高电源的性能和使用便捷性。电源对净化装置的净化效果极其重要，改善电源的性能，提高电压值，使放电更均匀，更稳定；考虑到装置能够便捷地安装到汽车上，同时将来能够应用于实际，电源方案还需要不断的优化。

④ 本文只做了发动机转速为 2500r/min 时的负荷特性试验和一个负荷下的速度特性试验，所得装置的节油率和净化率可能不够全面，应该在此基础上，再做几种条件下的负荷特性和速度特性试验，综合分析和验证装置的效果。

⑤ 考虑将高压脉冲等离子体技术同时应用于发动机进排气系统，并与梯度强磁场技术相结合，使尾气中的有害成分直接受等离子体作用，促进和催化有害成分相互反应，充分提高磁电等离子体技术对发动机尾气的净化效果。

⑥ 综合考虑磁电等离子体技术在汽车节能减排方面的可行性，为磁电等离子体技术运用于实际打下基础。

致 谢

本论文是在导师冉振亚教授的悉心指导和严格要求下完成的。导师严谨的治学态度和工作作风，以及对问题深入的洞察力，使我受益匪浅。在此，谨向冉老师表示最真挚的感谢。

感谢重庆师范大学黄日晖教授在课题理论论证方面的点拨和帮助，使自己很受启发，在此表示衷心的感谢。

在课题的发动机台架试验过程中得到了高级工程师刘世荣和重庆大学内燃机技术研究所胡朝龙老师的指导和帮助，深表感谢。

感谢师兄汪仁志和同学司向云在论文调研方面给予很大帮助，感谢王江平、杨军广、刘伟刚和林丽在平时的学习与生活中对我的帮助。借此机会向他们以及关心和支持我的各位老师和朋友表示衷心的感谢。

在此，还要向一贯支持和理解我的父母表示由衷的感谢，是他们的不断鼓励和帮助让我能够顺利地完成学业。

衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

王勇

二〇一〇年四月 于重庆

参 考 文 献

- [1] 郝吉明,傅立新,贺克斌等. 城市机动车排放污染控制—国际经验分析与中国的研究成果[J]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [2] 秦文新. 汽车排气净化[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 1~15.
- [3] 钱耀义. 汽车发动机排气污染与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987. 1~10.
- [4] 杨志平, 蒋志家, 张智奎. 浅论汽车排放与净化措施[J]. 黑龙江交通科技, 2001, 4.
- [5] 董敬, 庄志等. 汽车拖拉机发动机(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 刘峥, 王建昕. 汽车发动机原理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.9.
- [7] 冉振亚. 绿色汽车[M]. 香港社会科学出版社, 2002.
- [8] 克劳斯 WH, 安格林 DL. 汽车有害排放物的控制(梁恩忠, 王丽梅, 黄伟, 等译)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989: 1~5.
- [9] 龚金科. 汽车排放污染及控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [10] 时双喜, 杨义飞, 李萌. 汽车尾气污染的危害及控制[M]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(2): 36~39.
- [11] 郭春文. 低温等离子体法净化汽车尾气[M]. 重庆三峡学院学报, 2003, 6(19): 113~115.
- [12] 李新, 资新运等. 汽车尾气排放低温等离子体净化技术[M]. 内燃机, 2005, 1: 35~37.
- [13] 龚大国. 等离子体汽车尾气治理技术[M]. 重庆环境科学, 2003, 2: 28~31.
- [14] 吴福堂. 低温等离子体净化装置对降低汽油机尾气排放污染的实验研究[D]. 重庆大学硕士学位论文. 2008.
- [15] 王维妍. 变压吸附法富氧实验装置的研制及空分过程实验[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [16] 周斌. 内燃机富氧节能的研究—富氧空气的获取[J]. 西南交通大学学报, 1995(3): 312-316.
- [17] Faraday M. On the diamagnetic conditions of flame and gases[J]. Philos. Mag., Series 3, 1847, 31(210): 401-421.
- [18] WAKAYAMAN I. Behavior of gas flow under gradient magnetic fields[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(4): 2734-2736.
- [19] 黄继英, 梁星原. 磁共振成像原理[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998: 31-35.
- [20] 周文生. 磁性测量原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988.
- [21] Weast, R. C. (Ed). CRC Handbook of chemistry and physics. West Palm Beach, CRC Press Inc., 1978.
- [22] 孙校开, 耿殿雨, 白良愈. 磁学基础讲座(2). 磁能应用技术. 1993(2).
- [23] 李国栋. 当代磁学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999.
- [24] 张乃燕. 氧分析器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.

- [25] 褚圣麟. 原子物理学[M]. 北京人民教育出版社, 1979:170-191.
- [26] 朱重光. 横向非均匀磁场对原子的作用[J]. 淮北煤师学报, 1996: 30-32.
- [27] 张三慧, 臧庚媛, 华基美. 大学物理学(电磁学)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [28] 朱重光. 磁分制氧机理[J]. 淮北煤师学报, 1997: 22—25.
- [29] 项敬岩, 王喜魁, 李源. 磁场参数与富氧效果的关系[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2008, 31(2).
- [30] 许根慧, 姜恩永, 盛京等. 等离子体技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [31] 陈杰璐, 诸定昌, 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [32] J R 罗斯. 工业等离子体工程[M]. 第一卷. 吴坚强等译. 北京: 科学出版社, 1998.
- [33] 高树香, 陈宗柱. 气体导电(上)[M]. 江苏: 南京工学院出版利 1988. 167~191.
- [34] 杨津基. 气体放电[M]. 科学出版社, 1983.
- [35] B Eliasson and U Kogelschatz. No equilibrium volume plasma chemical processing [J]. IEEE Tran Plasma Sci, 1991(8), 19(5): 1063~1076.
- [36] Chang J S, et al. Transactions on plasma science[J]. IEEE. 1991, 19(6): 1152.
- [37] 白敏丽. 臭氧助燃内燃机的燃烧及排放性能研究[J]. 小型内燃机, 1997, 26(6).
- [38] Tachibana T, et al. Effect of ozone on combustion of compression ignition engines [J]. Combustion and Flame, 1991, (85): 515~519.
- [39] Rotzoll G. Mass spectrometric investigation and computer modeling of the $\text{CH}_4\text{-O}_2\text{-O}_3$ reaction from 480 to 830k [J]. Journal Physical Chemistry, 1986, 90: 677~683.
- [40] Caprio V, et al. Ozone activated low temperature combustion of propane in a C. S. T. R.[J], Combustion Science and Technology, 1984, 35: 215~224.
- [41] Eliasson M Hirth, Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges [J]. Journal Physics D: Application Physics, 1987, 20(11): 1421~1437.
- [42] 吴晓东. 强电离放电调控模拟内燃机尾气中 NO_x 实验研究[D]. 大连海事大学硕士论文, 2005.
- [43] 王会宗. 磁性材料及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [44] Tomio Fujii, et al. Removal of NO_x by DC corona reactor with water [C]. 9th International conference on electrosatics, Journal of Electrosatics, Koscielisko Zakopane Poland, May29~Jun02, 2001, 51: 8-14.
- [45] Koichi Takaki, Tamiya Fujiwara. Multipoint Barrier Discharge Process for Removal of NO_x from Diesel Engine Exhaust [J]. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 29, NO. 3, JUNE 2001.
- [46] Lee, Seung-Yo, et al. Analysis of pulse power convertor for plasama application[C]. 34th Annual conference of the IEEE-industrial-electronics-society, Olando, FL, NOV 10-13, pp.

- 505-509, 2008.
- [47] J.-O. Chae. Non-thermal plasma for diesel exhausts treatment [J]. *Journal of Electrostatics* 57, 2003, 251-262.
- [48] 张武. 非平衡等离子体改善柴油机排放的研究[D]. 大连理工大学硕士学位论文.
- [49] 尹仕任, 韩立燕. 臭氧在内燃机领域中的应用[J]. *内燃机*, 1994,1: 39~45.
- [50] 杨立军, 任建勋等. 不同磁场布置对空气自然对流的影响[J]. *太阳能学报*, 2003, 24 (3): 413~420.
- [51] Ueno S, Iwasaka M, et al. Dynamics behavior of gas flow in gradient magnetic fields [J]. *IEEE Trans. Magn.*, 1993, 29(6): 3264~3266.
- [52] Wakayama N I. Magnetic promotion of combustion in diffusion flames [J]. *Combust. Flame*, 1993, 93: 207~214.
- [53] Wakayama N I. Magnetic acceleration and deceleration of O₂ gas streams injected into air [J]. *IEEE Trans. Magn.* , 1995, 31(1): 897~901.
- [54] Asako Y. Oxygen separation/enrichment from atmospheric air using magnetizing force [J]. *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division-2004*, 2004, (publication) HTD, 375(1): 281~286.
- [55] Ohara T, Ichida T, et al. Experiment on oxygen enrichment of air using superconducting high intensity magnetic field. [J]. *Bulletion of the Electrotechnical Laboratory*, 1984, 48(12): 928~935 (in Japanese).
- [56] 邹继斌. 磁路与磁场[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [57] 王喜魁, 陈正举等. 磁分离聚氧聚氮原理性实验装置研究[J]. *华北电力大学学报*, 2008,35(4).

附 录

A. 作者在攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 冉振亚, 王勇等.梯度磁场氮氧分离技术在汽车排放控制中的应用[M]. 重庆工学院学报. 2009 (10): 1-4.