

文章编号:1000-582X(2010)02-0057-05

高压高能放电小型低速风洞的研制

陈平¹, 张钧², 何仕健², 朱本华²

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 622662)

摘要:根据高能放电腔的特点以及放电对气体流量、流速和流场的要求,提出了应用于高压强电离放电的小型低速风洞技术方案。该技术方案在满足流场、流速要求的前提下开展气动设计和结构设计,重点研究了总体结构、气流喷口和收集口的气动与结构设计、动力段气动与结构设计、流速调节控制、电机散热等关键技术。简要介绍了为某单位研制的应用于高能放电的小型风洞。现场应用表明,该小型风洞稳定可靠,是一种实用、有效的高压高能放电气流循环装置。

关键词:高压高能放电;喷气装置;风洞;流场

中图分类号:TH122

文献标志码:A

Small-scale wind tunnel for high pressure and high energy discharge

CHEN Ping¹, ZHANG Jun², HE Shi-jian², ZHU Ben-hua²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 622662, Sichuan, P. R. China)

Abstract: A kind of small-scale wind tunnel with low-velocity is proposed according to the characteristics of strong ionization discharge chamber and the demands of discharge for flux, velocity and flow fields. On the precondition that the airflow field and velocity is satisfied, aerodynamic design and structural design are carried out. Key techniques are studied including overall structure, aerodynamic and structural design of airflow vent and collection vent, aerodynamic and structural design of power section, flow rate adjustment and control, and cooling system of motor. Based on the design scheme, a small-scale wind tunnel with strong ionization discharge for an enterprise is developed. Application indicates that the small-scale wind tunnel is a practical and effective airflow loop device for high pressure and strong ionization discharge with the features of stability and reliability.

Key words: high pressure and strong ionization discharge; air-purge device; wind tunnels; flow fields

外加电场可以有效地把能量直接传递给反应体系中的气体分子,反应腔里将发生气体放电,产生非平衡等离子体,这种能量传递方法是有效、经济的^[1]。由于等离子体具有极高的能量密度,所以它可以应用于某些化学反应过程以及工业活动上。

通常,非平衡等离子体是在低气压、低质量流量条件下(1 133~1.33 kPa),由射频(13.5 MHz)、

微波(2 450 MHz)或交、直流高电压激发的辉光放电产生的。作为一种直接向反应体系施加能量的方法,已在等离子体化学合成与分解、溅射制膜、气相淀积等方面应用,取得了引人注目的效果^[1-3]。由于必须在低气压条件下电子才能取得满足化学反应所需要的激励能量,为此需要有真空系统和具有严格密封的真空罩反应器,其工艺过程复杂,反应物的收

收稿日期:2009-11-26

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(JW20 * 26017)

作者简介:陈平(1975-),男,重庆大学讲师,博士,主要从事设备故障诊断、机电一体化技术等方面的研究,(Tel)023-65112509;(E-mail)champion@126.com。

率和产率极低。然而,大多数工业活动需在常压或高压(≥ 0.1 MPa)、高质量流量条件下进行,这对气体的流量、流速和流场的稳定性提出了很高的要求。

目前,国内外(文献[2-6])关于高压高能放电的研究主要集中在理论和方法的研究上,还没有一种为高压高能放电提供特定流量、流速以及稳定流场的喷气装置。为保证高压条件下电子能从外加电场获取高能量,以使气体分子化学键断裂,本文以风洞技术^[7-12]为基础,根据高能放电腔的特点以及放电对气体流量、流速和流场的要求,进行了有关关键技术的研究,研制出了一种用于高压高能放电的小型低速风洞。

1 总体设计

用于高压高能放电腔的小型风洞主要由高能放电腔、连接放电腔的封闭管道、喷气口、收集口以及为管道内部压缩气体提供动力的动力段等组成,其示意图见图 1 所示。

该小型风洞为一个封闭的空间,工作气体介质为氮气,并维持一定的高压。下部的管道空腔内安装有风扇和电机,为气体提供流动动能,并使其在管道内循环,保证放电腔的中部气流截面维持给定流速。为使放电腔中部气流流场稳定,需根据空气动力学原理,设计合理的气流喷口和气流收集口。为了减少能量损失,需在电机的外部设计流线型整流罩。为了保证放电腔之间安装的偏差不至于影响该设备的安装,需在连接两个放电腔的管道中间设计伸缩节。整个风洞设计的 2 个最重要的目标:(1)放电腔中部(电极之间)流场稳定且气流流速为一给定值;(2)放电腔内其他部分气流流场稳定。

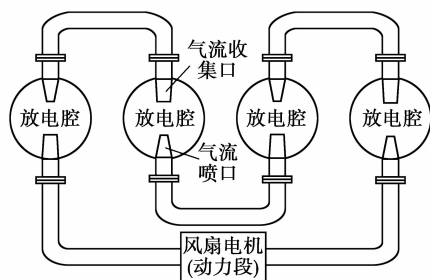


图 1 高能放电腔喷气示意图

2 关键技术研究

2.1 气流喷口气动与结构设计

放电腔气流喷口的作用是加速气流,使放电腔

中部气流达到给定的流速,且流场稳定。为了满足这些要求,气流喷口应满足:(1)气流沿气流喷口流动时,管壁上不出现气流分离;(2)气流喷口的出口气流要求均匀、垂直且稳定;(3)气流喷口不宜太长,以免增加能量损失。

气流喷口的性能主要取决于两个因素,一是收缩比,二是收缩曲线。提高收缩比对放电腔中部气流的均匀性和降低紊流度是很有好处的,也即是尽可能缩小气流喷口直径。收缩曲线的形状对放电腔中部的气流均匀性有很大影响。如果收缩曲线设计不当,就得不到均匀的气流。有关收缩曲线设计的理论方法比较多,根据放电腔喷气装置的特点,选用根据理想不可压轴对称流动的结果推出的公式^[10]:

$$R = \frac{R_2}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2\right] \frac{(1 - 3x^2/a^2)^2}{(1 + x^2/a^2)^3}}}. \quad (1)$$

式中 R_1 、 R_2 和 R 分别为喷气口进口、出口以及任意 x 处的截面半径, L 为喷气口长度,一般取 $L = 1 \sim 2$ 倍的 R_1 。

2.2 气流收集口气动与结构设计

气流经喷气口喷出来形成一股射流,其扩散角大约为 $3 \sim 5^\circ$ 。扩散角决定了气流收集口喇叭口的尺寸,由于射流边界上的气体混合,使射流区中的紊流度除起始的一个区域内保持不变外,以后将逐渐增加,而速度可在长达 4.5 倍喷口直径尖拱形区域内保持不变。结合放电腔本身的结构特点,可取喷气口的出口距收集口的入口为 $1 \sim 4.5$ 倍的喷口直径,气流扩散角取 5° 。

从喷气口喷出的射流与周围的空气发生混合,其结果是气流截面不断扩大,一部分周围的空气被带进收集口,这就造成流量的不平衡,多余的流量带进去会使收集口内部的压力提高,结果形成一个反流,空气从收集口倒流出来。为了解决这个问题,在收集口入口处的四周开缝,使多余的流量能顺利流出。采用这种方法,可避免放电腔中的气流脉动。

对于收集口的扩散角,为了避免气流分离减少损失,按照经验可取为 6° 。

2.3 动力段气动与结构设计

动力段由动力段外壳、风扇、驱动风扇的电机、整流罩、预扭片和反旋片等组成。电机安装在整流罩内部。风扇的作用是向管道内部的气流补充能量,以保证气流保持一定的速度。气流在管道内流动时,由于摩擦、分离等原因,气流的能量是有损失的,气流每循环一周都有一定的压强降落,必须不断地向气流补充能量,管道内的气流才有可能恒稳地

运转。风扇变电机输出的机械能为气流的压力能,同时也增加了气流的旋转能量。预扭片位于风扇上游,用来改善风扇的工作状态,提高风扇的效率。反旋片位于风扇下游,反旋片将风扇后气流的旋转能转变为气流的压力能。整流罩包罩了电机和传动系统,可改善气流通过风扇前后的流动条件,减少气流的能量损失。预扭片和反旋片兼作整流罩的支撑。

2.3.1 管道能量比

度量风洞内部流动效率的参数为能量比。对于本小型风洞,能量比的定义为放电腔内气流的动能流率(单位时间通过的动能)与风扇输给气流的功率之比,该能量比为管道损失系数的倒数。气流在管道内流动时必然有能量损失,这种损失来自于几个方面:①气流与管道内壁的摩擦;②物体表面的气流分离,引起漩涡、紊流等;③放电腔内部射流的损失。

在气动设计时一般需事先估算能量比,并以此检验设计的质量和确定运行功率,从而确定电机。

2.3.2 整流罩设计

整流罩分为3部分,即头罩、柱段和尾罩。头罩用来均匀加速气流,以免引起气流分离。柱段的部分的长度根据轮毂、预扭片和反旋片的长度决定。气流通过头罩的流动相当于通过一个扩张的管道,会产生比较大的分离损失,因此需精心设计头罩形状和长细比。

由于电机安装在尾罩中,因此电机的尺寸直接决定了整流罩的外径。从该装置的气动上考虑,应尽可能减小电机尺寸。如果采用专门研制的电机,可将电机的尺寸缩小,但将会大大提高研制成本,也将会大大提高后期设备维护保养、检修的成本。综合考虑这些因素,电机仍选用成熟的商用产品,但尽可能选取尺寸较小的电机。

对头罩段,气流截面积不断增大,为气流扩散。合理的扩散角应该尽可能降低摩擦损失和扩压损失,根据相关资料和风洞设计经验^[10-11],扩散角取 6° 。

尾罩段面积逐渐较小,为气流收缩。该段设计的方法与放电腔气流喷口设计相同。为了提高尾罩段出口气流的均匀性和提高能量比,并降低出口气流的紊流度,可通过优化收缩曲线。

2.3.3 风扇设计

气流在风扇桨叶的作用下提高总压,同时也会消耗能量。气流的总压升高与叶剖面的升力直接有关,损失与剖面阻力有关,而效率则与剖面的升阻比有关。所以,为了提高总压升高量,应尽可能提高剖面的升力。为提高升力,可以从以下方面着手:增大

气流的相对速度、增大弦长、增大剖面弯度、以及增大剖面迎角。增大气流的相对速度,可通过增加风扇来流速度和提高气流的相对旋转速度两个方面来实现。由于来流速度已经确定,只能通过提高风扇转速来实现。因此,应尽量选用额定转速高的电机。

根据经验,桨毂和风扇直径之比一般取 $0.3\sim 0.7$ 。考虑到要尽可能减小动力段的外形尺寸,将桨毂和风扇直径之比取为 0.7 ,通过相关资料可得出风扇叶片数^[10-15]。

经计算,即使电机以 $6\ 000\ \text{rpm}$ 转动时,叶片桨尖速度也不会超过音速的一半,因此不会出现明显的噪音。

2.3.4 导流片设计

导流片包括预扭片和反旋片,预扭片位于风扇上游,反旋片位于风扇下游。预扭片和反旋片除满足管道内的气动要求外还兼作整流罩的支撑。

为了避免与预扭片、反旋片和 N 个桨叶的风扇之间的振动,不采用 N 、 $3N/2$ 、或 $2N$ 个预扭片和反旋片。

2.3.5 动力段轮廓设计

动力段外壳由前过渡段、前等直段、后等直段和后过渡段等组成,各段之间通过螺钉连接。为了保证风扇、电机的装配,前等直段由两个半圆环柱组成,两个之间通过螺钉连接。整流罩分为头罩、柱段和尾罩等组成。风扇通过两个“背靠背”的角接触球轴承由头罩和过渡环支撑,轴承在风扇轴上通过圆螺母和止推环轴向固定。过渡环与柱段螺钉联结,柱段和尾罩通过螺钉联结。电机固定在柱段上,其输出轴通过弹性联轴器与风扇相连。柱段上有两个安装工艺孔,用于锁紧联轴器螺钉。

动力段的前过渡段与整流罩头罩通过预扭片焊接成一体,动力段的后直段与整流罩的柱段通过反旋片焊接成一体。

2.4 流速调节控制

风扇电机采用伺服控制系统进行稳转速控制,由电机、驱动器、转速调节电位器、转速显示屏、控制柜等组成。转速显示、转速调节旋钮和启动开关安装在控制柜面板上,通过转速调节旋钮实现平滑的转速控制。驱动器、变压器、接线端子等放在控制柜内部,硬件拓扑结构如图2所示。

2.5 电机散热

电机置于整流罩内部,除了其自身发热外,高能放电也使气流温度急剧上升,为了保证电机正常运转,采用水冷方案解决其散热问题。

由于市场上没有小尺寸、小功率的水冷电机,本

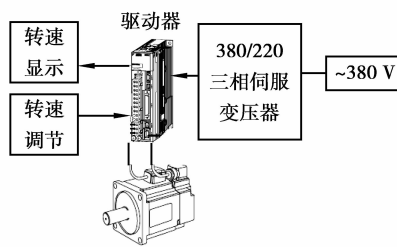


图 2 转速调节硬件拓扑结构

文利用整流罩柱段和电机之间的空腔设计了一个水箱,将生活用水通过管道注入水箱,然后再由管道将温度升高的水排出。送水管位于整流罩下方,出水管位于整流罩上方,水箱与电机壳体之间紧密接触,并填充导热硅胶。

3 仿真及应用

根据以上技术方案,结合某单位的对高气压高能放电喷气装置的技术要求:①工作气体介质: N_2 ;②设计压力:0.5 MPa(相对压力),正常工作压力: ≤ 0.4 MPa(相对压力);③管道截面 $\Phi 69$ mm,放电腔中部气流截面 50~60 mm,气流流速 $v \geq 10$ m/s,流场稳定,流速无级可调。设计的高气压高能放电小型低速风洞如图 3 所示,气流喷口、气流收集口和动力段分别如图 4、5 所示。

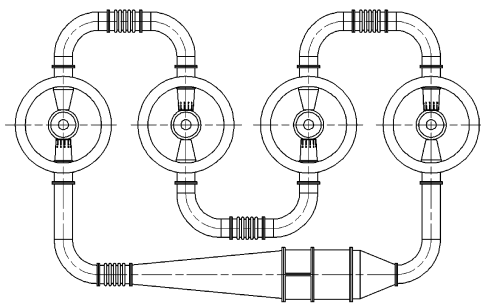


图 3 高能放电喷气小型低速风洞

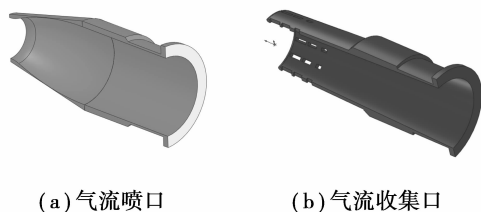


图 4 气流喷口和气流收集口

电机选用安川电机 SGM4V-10A3A21,额定转速为 3 000 r/min,最大转速为 6 000 r/min。伺服驱动器为 SGD7-120A,驱动器采用免调整功能,强化了抑振功能,可有效抑制负载波动,能轻松实现平滑

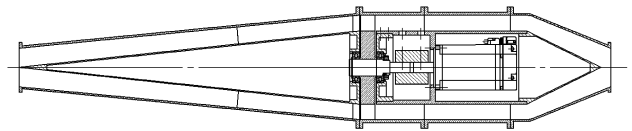


图 5 动力段设计图

的风扇转速控制。为避免放电腔中的气流脉动,在收集口入口处的四周开有三处环缝。风扇叶片数为 14,风扇轮毂厚度为 30 mm,预扭片数量取为 11,反扭片数量取为 8。

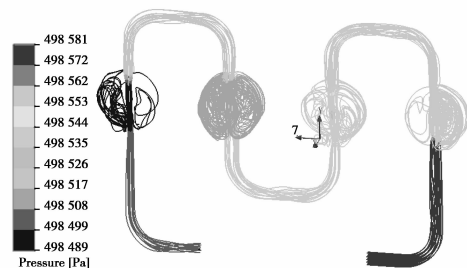


图 6 没有收集口的仿真结果

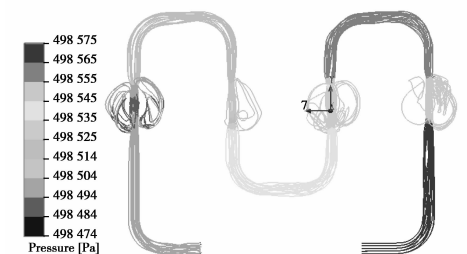


图 7 风洞仿真分析结果

采用 SolidWorks Flow Simulation 对设计的高能放电小型低速风洞进行气流仿真分析,结果如图 6、图 7 所示。可见,本方案设计的小型风洞能有效保证放电腔内的流场、流速稳定。现场应用进一步表明本文所提出的一种用于高气压高能放电喷气的小型风洞基本原理和技术方案是合理的、有效的。

4 结语

阐述了一种用于高气压高能放电的小型风洞研制的有关技术和方法,根据高能放电腔的特点以及放电对气流量、流速和流场的要求,提出了相应的技术方案,并对总体结构、气流喷口和收集口的气动与结构设计、动力段气动与结构设计、流速调节控制、电机散热等关键技术进行了详细分析。该方案利用风洞设计原理和技术,实现了高气压高能放电的稳定、匀速喷气。以上研究成果在为国内某大型企业设计的高能放电腔喷气装置上得到了成功的应用。现场应用情况表明,该低速小型风洞稳定可靠,

是一种实用、有效的高气压高能放电气流循环装置。

参考文献:

- [1] 白希尧, 张芝涛, 白敏冬, 等. 高气压强电离放电等离子体学科的形成及应用展望 [J]. 自然杂志, 2000, 22(3):156-161.
BAI XI-YAO, ZHANG ZHI-TAO, BAI MIN-DONG, et al. Strong ionization discharge plasma chemistry at high pressure and its application [J]. Chinese Journal of Nature, 2000, 22(3):156-161.
- [2] 张芝涛, 鲜于泽, 白敏冬, 等. 强电离放电研究 [J]. 东北大学学报:自然科学版, 2002, 23(5):507-510.
ZHANG ZHI-TAO, XIAN YU-ZE, BAI MIN-DONG, et al. Studies of strong ionization discharge [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2002, 23(5): 507-510.
- [3] BARDOS L, BARANKOVA H. Plasma processes at atmospheric and low pressures [J]. Vacuum, 2009, 83(3):522-527.
- [4] TENDERO C, TIXIER C, TRISTANT P, et al. Atmospheric pressure plasmas: A review [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2006, 61(1):2-30.
- [5] 王华博, 孙文廷, 李和平, 等. 大气压下氦/氮射频放电冷等离子体特性 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(3): 389-392.
WANG HUA-BO, SUN WEN-TING, LI HE-PING, et al. Characteristics of radio-frequency glow discharge plasmas at atmospheric pressure with helium/nitrogen [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2007, 47(3): 389-392.
- [6] CHOQUET I, DEGOND P, LUCQUIN-DESREUX B. A strong ionization model in plasma physics [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 49(1/2):88-113.
- [7] WITTEWER A R, MILLER S V. Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(3):307-320.
- [8] SARRADJ E, FRITZSCHE C, GEYER T, et al. Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel [J]. Applied Acoustics, 2009, 70(8): 1073-1080.
- [9] CERMAK J E. Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(3):355-370.
- [10] 伍荣林, 王振羽. 风洞设计原理 [M]. 北京:北京航空学院出版社, 1985.
- [11] 程厚梅. 风洞实验干扰与修正 [M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
- [12] ALBAYRAK K. Low turbulence wind tunnel design [J]. Modelling, Measurement and Control B, 2000, 69(12): 61-72.
- [13] MOONEN P, BLOCKEN B, ROELS S, et al. Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(10):699-723.
- [14] 王文奎, 石柏军. 低速风洞洞体设计 [J]. 机床与液压, 2008, 36(5):93-95.
WANG WEN-KUI, SHI BAI-JUN. The design of low speed wind tunnel [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(5): 93-95.
- [15] 李强, 丁珏, 翁培奋. 上海大学低湍流度低速风洞及气动设计 [J]. 上海大学学报:自然科学版, 2007, 13(2): 203-207.
LI QIANG, DING JUE, WENG PEI-FEN. Aerodynamic and structural design of low-velocity and low-turbulence wind tunnel [J]. Journal of Shanghai University: Natural Science, 2007, 13(2):203-207.

(编辑 张小强)