

气体放电对金属平板强化传热作用的研究

岳永刚, 丁兆军, 王科, 艾忠良, 杨兰均, 张乔根

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西省 西安市 710049)

Study on Heat Transfer Enhancement of a Heated Metal Plate with Gas Discharges

YUE Yong-gang, DING Zhao-jun, WANG Ke, AI Zhong-liang, YANG Lan-jun, ZHANG Qiao-gen

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: The effects of corona, dielectric barrier discharge and glow discharge on the heat transfer coefficients with a heated copperplate are compared. Heat transfer coefficients for the heated copperplate under free convection conditions with and without gas discharges are obtained by measuring the temperature and the heating power of copperplate. It has been proved that the convection heat transfer coefficients increased by several times with gas discharges. With uniform DC glow discharge at atmosphere pressure, the heat transfer coefficient with the heated copperplate is farthest enhanced compared with those with corona discharge or dielectric barrier discharge. And with the use of dielectric barrier discharge, breakdown voltage is increased largely by the increase of heat transfer rate, which is helpful to avoid breakdown in application.

KEY WORDS: Heat transfer enhancement; Corona discharge; Dielectric barrier discharge; DC glow discharge

摘要: 文中对比研究了电晕、介质阻挡以及辉光放电对空气-金属之间对流传热系数的影响作用。通过对加热器功率以及铜板电极温度测量,计算获得在自然对流以及电极间发生放电两种情况下对流传热系数。在气体放电强化传热的作用下对流传热系数获得数倍的增加。在直流电晕放电实验中,当均匀的直流辉光放电产生时,空气-金属之间传热速率获得最大幅度的提高。采用介质阻挡放电在提高空气-金属之间传热速率的同时,放电间隙击穿电压发生显著提高,也使放电在实际应用中更易于控制。

关键词: 强化传热; 电晕放电; 介质阻挡放电; 辉光放电

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477027)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50477027).

1 引言

随着等离子体技术的发展,人们越来越多地把该技术用于合成新材料、表面改性、强化传热、治理污染、工艺改进等各方面^[1-5]。其在能源、环境、材料、军事等领域所具有广阔的应用前景,已引起世界各国生产部门、科研部门以及各大高等院校的广泛关注。

气体放电在强化空气-金属表面传热应用的最早研究可追溯到1959年^[6],在此之后,由于该强化传热技术在制冷领域具有潜在应用,如:静电冷却干切^[7]、电子元件冷却^[8]等,各国学者主要针对不同电极形式对气体放电强化传热进行了一定的研究。如针-板电极结构形式^[9-10]、线-板电极结构形式^[11-13]、线-管电极结构形式^[14-16]等。研究发现气体放电使加热电极对流传热速率获得大幅度的提高,其值大小与极间电压、电极结构有很大关系。大量研究认为“离子风”与气体放电强化传热具有直接的关系^[11,16-17]。但由于气体放电强化传热机理的复杂性以及人们对于离子风认识的局限性,离子风影响强化传热的机理还不够透彻,相关研究也一直在进行。

“离子风”主要是由相对曲率半径较小电极附近所产生大量离子射流运动引起的,这种离子射流对周围流体流动产生强烈的扰动,形成附加的由曲率半径较小电极到曲率半径较大电极方向的流体运动,即“电诱导二次流”^[18-19]。很多文章认为离子风为电晕放电过程中所特有的现象,被“电晕风”所代替,这也使过去大量的气体放电强化传热研究主要集中在电晕放电这种放电形式下进行,但实际上任何放电形式都伴有“二次流”现象的发生,电

晕风只是离子风在电晕放电时的一种形式。不同放电形式其放电空间电场、离子密度以及放电电流密度也各不相同,而这些参数对于离子风的均匀性、强度等特性具有重要的影响,这在大量的研究中常被忽略。

不同放电形式对强化传热影响作用在国内外研究甚少。部分文章仅仅对比研究正、负极性对强化传热影响,同时不同学者获得结论不尽相同,如 Owsenek^[10]认为与相同电压负极性相比,正极性可获得更大的对流传热速率,而 Kalman^[13]则认为正极性可产生更大速离子风,产生更大的强化传热效果。本文在大量实验及计算基础上,对比研究了电晕、介质阻挡以及辉光放电对空气-金属之间对流传热系数的影响作用,同时对比研究了相同电压下正、负极性以及工频交流电晕放电强化传热的效果。

2 实验装置与实验方法

本实验装置包括高压电源、放电电极以及测量控制回路三部分组成。图1为直流电晕放电实验装置图。电晕放电采用50Hz工频、直流电压,直流电压调节范围为0~80kV,50Hz工频电压范围为0~50kV。辉光放电采用直流高压,介质阻挡放电采用50Hz交流电压。放电电极采用针-板电极形式,针电极结构如图2所示。

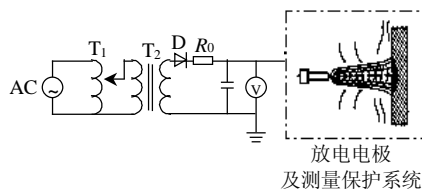
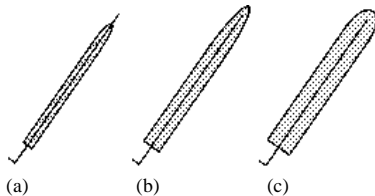


图1 电晕放电实验装置图
Fig.1 Schematic diagram of corona discharge



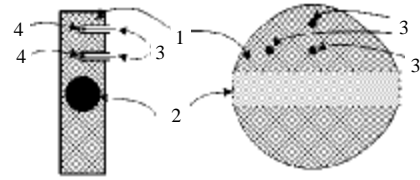
注：(a)电晕放电使用电极；(b)、(c)介质阻挡放电使用电极（电极(尖)端曲率半径小于电极(c)；0.5mm直径钢针周围由环氧树脂包裹

图2 三种针电极结构

Fig.2 Configuration of three types of needle electrodes

实验所使用铜板电极的直径为50mm,厚度为20mm。在实验过程中铜电极被柱状加热器加热,加热器最大输入功率为50W。铜电极温度由埋设于铜电极不同位置的热电偶进行测量,热电偶与铜电

极间采用直径2mm,厚度0.5mm,长12mm高电绝缘、良导热材料的套管进行隔离,如图3所示。



注：1—铜板电极；2—柱状加热器；3—温度测量用热电偶及其所埋设的位置；4—使铜电极与温度测量系统绝缘所使用的一端开口一端封闭套管

图3 铜板电极及其加热与温度测量示意图
Fig.3 Diagrammatic drawing of plate electrode with heat and temperature measuring systems

实验中铜电极温度由胜利仪器生产的型号为DM6801A数字温度表进行测量,温度信号由所埋设在铜电极中的配套热电偶获得,当铜板电极达到热平衡时,温度取几个热电偶所测温度的平均值,如图3所示。实验过程中同时监测环境温度、放电电压和电流,环境温度测量使用普通室内温度计,放电电压、电流分别由静电电压表与接地极串接的200kΩ电阻来测量。

3 对流传热计算模型

铜板电极经电阻加热器加热,经过足够长的热平衡时间,铜电极与环境温度差稳定为 ΔT 。在自然散热条件下,铜电极与空气间的自然传热速率为 Q_{co} 。当发生气体放电时,铜电极表面传热系数的增大,调节加热器输出功率使铜电极与周围环境温度差值保持 ΔT 不变,所增加功率 ΔQ ,强化传热速率为 Q_c 。测量两种情况下加热器输出回路电流 I ,电阻大小为 R ,有方程

$$\Delta Q = Q_c - Q_{co} = R\Delta(I^2) \quad (1)$$

铜板电极受到加热器加热,同时与周围空气发生热传导、热对流、热辐射三种热能交换作用。此时假设极间发生气体放电时,加热电极周围空气物性只随温度发生变化。其热平衡方程可表示为^[20]

$$Q_{in} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (2)$$

金属铜是良导热体,因此可将埋入铜电极的棒状加热器看作为均匀分布式热源,热传导方程可表示为

$$Q_{cond} = g(\Delta T) \quad (3)$$

铜电极与周围空气对流传热方程、热辐射方程分别为^[11,14]

$$\begin{cases} Q_{conv} = F(h, \Delta T) \\ Q_{rad} = AF_A F_e S (T_w^4 - T_a^4) \end{cases} \quad (4)$$

即

$$Q_{rad} = G(\Delta T) \quad (5)$$

由式(1)~(5), 可认为在实验过程中铜电极与空气之间热传导、热辐射在加热电极热平衡稳定状态下保持不变。

铜电极温度在 $T_0 + \Delta T$ 时自然对流传热系数为 h_0 , 自然传热速率 Q_{convo} 为

$$Q_{convo} = h_0 A \Delta T \quad (6)$$

对于柱状物体自然对流传热系数可由式(7)获得

$$h_0 = c(G_r P_r)^n l / d \quad (7)$$

其中, $G_r = r^2 g b \Delta T d^3 / m^2$, $P_r = C_p m / l$ 中系数 c 与 n 值可根据 G_r 取值范围由表 1 进行选取。

表 1 式(7)中常数 c 与 n 的取值

Tab. 1 Calculation of constant c and n in formula (7)

状态	c	n	G_r
层流	0.53	1/4	$10^4 \sim 3 \times 10^9$
过度	0.0292	0.39	$3 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{10}$
湍流	0.11	1/3	$> 2 \times 10^{10}$

在气体放电强化传热作用下, 铜电极表面对流传热速率为

$$Q_{conv} = Q_{convo} + \Delta Q = h A \Delta T \quad (8)$$

由式(1)、(6)、(8)可得在温差 ΔT 一定时, 电极间发生气体放电情况下铜电极与空气对流传热系数与自然对流传热系数比为

$$h/h_0 = 1 + R\Delta(I^2)/Q_{convo} \quad (9)$$

4 实验结果及分析

对于直流电晕放电, 随着电压的升高放电经刷状放电, 均匀直流辉光放电, 到最后的放电间隙的击穿。在实验环境下测得铜板电极表面自然对流传热系数为 $12.4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, 这与文献^[8,13]所获计算结果是一致的 ($9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 、 $12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)。实验发现气体放电强化传热可使铜电极表面对流传热系数增大 10 倍之多, 加热电极表面对流传热系数与极间电压以及极间距有很大关系, 其值随着极间电压的升高而逐渐增大。当极间距大于 10mm 时, 随着极间距的增加而减小, 如图 4~6 所示。实验发现当极间距小于一定值时, 由于放电所引起二次流区域范围小于铜电极表面积, 虽然在相同放电条件在小范围内可获得更大强度的二次流, 但铜电极表面对流传热系数却很小, 在本实验条件下该临界值略小于 10mm。这也是引起图 4、5 中在相同电压下 10mm 与 20mm 间距对流传热系数增加幅度相对小的原因。

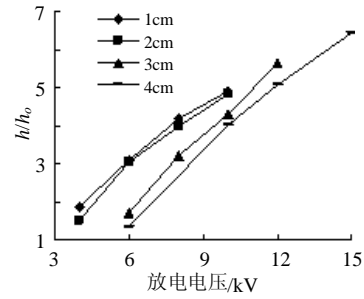


图 4 放电电压与极间距对传热系数的影响 (工频交流)
Fig.4 Effect of emitter voltage and spacing on heat transfer rate(a-c, 50Hz)

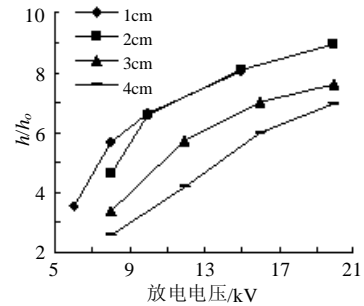


图 5 放电电压与极间距对传热系数的影响 (负极性)
Fig.5 Effect of emitter voltage and spacing on heat transfer rate(negative corona)

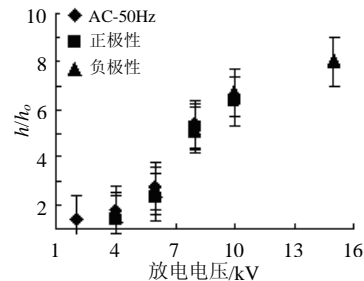


图 6 针电极电压与电晕放电形式对传热系数的影响(15mm 间距)
Fig.6 Effect of emitter voltage and the types of corona discharge on heat transfer rate(15mm spacing)

大量实验发现在相同电极、极间距、极间电压放电条件下, 无论采用 50Hz 交流电压, 还是正、负极性直流电压, 电晕放电强化传热实验所获传热系数受电源电压类型改变的影响很小, 呈小幅度的摆动, 存在很小的不确定的增减, 如图 6 所示。这也是有学者^[10,13]在研究该问题的结论存在一定矛盾的原因所在。对于负极性, 由于其击穿电压比正极性的高, 而电晕放电起始电压比正极性的低, 负极性下电晕放电可以充分发展, 使传热系数获得更大幅度的提高。

实验中, 当均匀直流辉光放电产生时, 放电电流密度达到该放电条件下最大值, 同时形成较大范围且分布均匀的二次流, 此时在“离子风”强化传

热作用下加热电极表面对流传热系数达到最大值。极间电压为 35kV、极间距为 20mm 时辉光放电产生过程如图 7 所示,对流传热系数为 $127 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, 约为自然对流传热系数 12 倍。

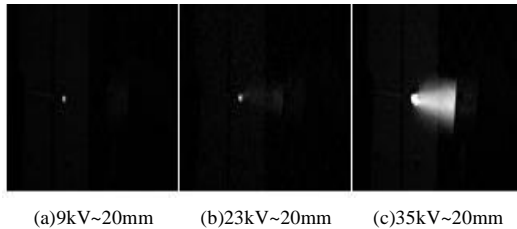


图 7 一个大气压下直流辉光放电产生过程

Fig.7 An atmospheric pressure DC glow discharge generation

对于介质阻挡放电,在放电间隙发生击穿前放电整个过程只经历微放电形式。放电在击穿前的瞬间放电空间内产生大量微放电细丝通道,此时放电获得最大强化传热效果。介质阻挡放电强化传热实验中获得对流传热系数为 $20\sim 30 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, 是自然对流传热系数的 2~3 倍。对于相同放电电压,对流传热系数随着极间距的增加而变小,同时实验发现介质阻挡放电采用曲率半径较大的针电极在低压下几乎对空气-金属表面传热系数无任何促进作用。相同放电电压、极间距,传热系数随着针电极曲率半径的减小而增大。

在气体放电强化传热作用下,金属-空气表面对流传热系数得到大幅度的提高。放电间距、放电电压对金属-空气表面对流传热系数有着重要的影响。随着放电间距的增加电极间迁移区域的增大以及迁移区域电场梯度减小,这使电子崩以及放电空间内大量电子、离子运动路程加大,同时也使大量带电离子所获动能不同程度的减小^[21-23],大量带电离子以及被加速的中性分子在到达铜电极从宏观效果来看表现为运动速度的下降,这使放电引起的“二次流”对铜电极与空气间热阻层扰动减小,边界层厚度也相对变厚,表现为对流传热系数的降低。随着电压的升高,针电极附近电场强度进一步加强,满足自持放电的临界体积增大,电晕放电范围也进一步增大,被诱导的二次流做更大速度的定向运动并形成对加热电极表面更为剧烈的扰动,这使铜电极表面传热系数随着电压的升高而增大。

5 结论及研究展望

不同放电形式对所产生离子风的特性有重要

的影响,强化传热效果也不尽相同。实验发现辉光放电可产生均匀稳定且强度更大的离子风,此时将获得更好的强化传热效果。离子风是气体放电强化传热的主要原因。在相同电极形式、极间距以及极间电压条件下,采用 50Hz 交流以及正、负极性电压产生几乎相同对流传热速率。由于负极性具有较高击穿电压特性,使其在相同电极形式及极间距下,可以进一步提高放电工作电压,从而产生更好的强化传热效果。负极性辉光放电在强化传热中的应用将成为以后气体放电强化传热重要方向。介质阻挡放电在促进传热速率的应用,可以提高间隙击穿电压,同时随着频率、介质材料、电极形状的改变能进一步优化气体放电的强化传热作用,相关研究值得继续深入。对于电晕放电,放电应用中的控制以及大量带电离子、电子崩对整个放电间隙流体驱动作用的进一步研究也待深入。

参考文献

- [1] 许世森. 静电场对移动颗粒层过滤高温除尘效率促进作用的探讨[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 60-64.
Xu Shisen. Analyzing the effect of the static electric field to enhance the efficiency of the moving granular bed filter for hot gas cleanup[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 60-64.
- [2] 方亮, 付海金, 吕亮, 等. 等离子表面处理聚乙烯中空间电荷分布[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 151-154.
Fang Liang, Fu Haijin, Lu Liang, et al. Space charge distribution of polyethylene after surface treatment by plasma, 2003, 23(8): 151-154.
- [3] 刘振华, 王经. 均匀高压电场强化圆管和套管内油的层流强制对流换热的综合效应[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 71-74.
Liu Zhenhua, Wang Jing. Experimental study on electro-hydrodynamical enhancement of laminar forced convection heat transfer of oil in circular tube and annular tube[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 71-74.
- [4] 刘钟阳, 吴彦, 王宁会. DBD 型中高频臭氧发生器的动态负载特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 61-64.
Liu Zhongyang, Wu Yan, Wang Ninghui. Dynamic load characteristics of a DBD medium/high frequency ozonizer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 61-64.
- [5] 王洋, 王宁会. 基于 Prony 算法的静电除尘器放电信号分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 141-144.
Wang Yang, Wang Ninghui. Study on analyzing electrostatic precipitator discharge signal based on the prony method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 141-144.
- [6] Otmar M S. Ion drag pressure generation[J]. Journal of Applied Physics, 1959, 30 (7): 984-995.
- [7] 么炳唐. 静电冷却干切技术[J]. 制造技术与机床, 2003, (1): 66-68.
Yao Bingtang. Technology of dry cutting with static cooling from russian[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2003, (1): 66-68.
- [8] Rashkovan A, Sher E, Kalman H. Experimental optimization of an electric blower by corona wind[J]. Applied Thermal Engineering,

- 2002, 22(14): 1587-1599.
- [9] Kilber K G, Carter Jr. H G. Electrocooling in gases[J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(10): 4436-4440.
- [10] Owsenek B L, Seyed-Yagoobi J, Page R H. Experimental investigation of corona wind heat transfer enhancement with a heated horizontal flat plate[J]. Journal of Heat Transfer, 1995, 117: 309-315.
- [11] Sadek S E, Fax R G, Hurwitz M. The influence of electric fields on convective heat and mass transfer from a horizontal surface under forced convection[J]. Journal of Heat Transfer, 1972, 94(2): 144-148.
- [12] Wintle H J. Unipolar wire-to-plane corona-a definitive computation [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 298-308.
- [13] Kalman H, Sher E. Enhancement of heat transfer by means of a corona wind created by a wire electrode and confined wings assembly [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(3), 265-282.
- [14] Franke M E, Hutson K E. Effects of corona discharge on free-convection heat transfer inside a vertical hollow cylinder[J]. Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, 1984, 106(5): 346-351.
- [15] Amir S, Michael O, Francis H R F. Experimental and numerical analysis of electrohydrodynamic enhancement of heat transfer in air laminar channel flow[C]. 19th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Jose, USA, 2003.
- [16] Franke M E, Hogue L E. Electrostatic cooling of a horizontal cylinder[J]. Journal of Heat Transfer Transaction of ASME, 1991, 113: 544-548.
- [17] Robinson M. Movement of air in the electric wind of the corona discharge[J]. AIEE Transactions, 1961, 80 (54): 143-150.
- [18] Kagiwada Y, Hirata T, Nakane T, et al. Behavior of ionic wind of corona discharge in ultrasonic field[C]. Ultrasonics Symposium. Proceedings., IEEE, Orlando, FL, USA, 1991, 2: 1015-1018.
- [19] Leger L, Moreau E, Touchard G. Control of low velocity airflow along a flat plate with a DC electrical discharge[C]. Industry Applications Conference Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Chicago, USA, 2001.
- [20] 姜为珩. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [21] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [22] 林赫, 高翔, 骆仲浚, 等. 直流电晕自由基簇射脱除烟气中的NO_x[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 150-155.
- Lin He, Gao Xiang, Luo Zhongyang, et al. Removing NO_x from flue gas by means of radical showering incuded by DC corona [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 150-155.
- [23] 朱德恒, 严璋. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.

收稿日期: 2005-10-08。

作者简介:

岳永刚 (1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向高电压及绝缘技术和放电等离子体应用;

丁兆军 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向高电压及绝缘技术和放电等离子体应用;

杨兰均 (1968-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向电力设备绝缘在线检测、脉冲功率技术及放电等离子体应用。

(责任编辑 韩 蕾)