石墨加热器电极放电特性试验研究

刘志民，成竹，蒋军亮
（中国飞机强度研究所，西安 710065）

摘要：采用试验方法研究了电极着火电压与表面温度、压强、距离、材料、环境气体成分的关系。结果表明，着火电压随电极表面温度升高而下降；在压强为10^{-2}～10^{3} Pa之间，着火电压先下降后升高，最小值为$U_{b,min}$；$U_{b,min}$右侧着火电压随电极间距的增大而增大，$U_{b,min}$左侧着火电压随电极间距的增大而减小；氮气环境相较于空气环境，电极着火电压更低；对于材料为石墨、钼和铜的电极，着火电压依次降低。

关键词：放电特性；着火电压；真空；石墨加热器
DOI：10.7643/issn.1672-9242.2013.03.009
中图分类号：V216.8　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2013)03－0036-03

Experimental Investigation of Discharge Characteristic of Graphite Heater Electrode

LIU Zhi-min, *CHENG Zhu*, *JIANG Jun-liang*
(Aircraft Strength Research Institute, Xi′an 710065, China)

Abstract: Experiments were conducted to study the relation of firing voltage to the surface temperature, pressure, distance, material, and gas component in environment. The result showed that the firing voltage decreases obviously with the increasing of surface temperature; the firing voltage firstly decreases then increases in the pressure range of 10^{-2} ~ 10^{3} Pa with a minimum firing voltage of $U_{b,min}$; at the right side of $U_{b,min}$, the firing voltage increases with increasing distance; at the other side, the firing voltage decreases with increasing distance; the firing voltage of electrodes in air is higher than it in N_2; the firing voltage of electrodes made in graphite, molybdenum or copper decreases in turn.

Key words: discharge characteristic; firing voltage; vacuum; graphite heater

一般材料在2000 ℃以上早已化为气体或熔融状态，即使一些难熔金属在2500 ℃左右也会软化而失去强度。多数材料在高温下强度逐渐降低。

石墨具有一定的强度，熔点为3250 ℃，升华温度为3900 ℃，在1800～2500 ℃时的强度反而大大增强。石墨制品在加热到2000 ℃时其强度较常温时提高1倍；随温度变化，电阻率变化很小；石墨的热导性能很好，线膨胀系数小[1]；石墨作为发热体在高

收稿日期：2013-01-19
作者简介：刘志民(1983—)，男，陕西西安人，硕士，工程师，主要从事结构热强度研究。

温和真空环境中氧化速率小,并且升温速度快。这种性能优于所有金属及其它氧化物,因此在作为高温发热体方面具有明显优势。

以石墨为发热体的石墨加热器,广泛应用于冶金、结构热试验等[2—4]。在结构热试验中,往往要求加热器的辐射热流或试验件升温速率很高,这样加热器必须在高功率、高电压状态下工作。

石墨发热体引出棒即导电接头,多数称水冷电极。在结构热试验过程中,水冷电极如果设计不合理则有可能出现放电现象,特别是使用U形石墨发热体时,水冷电极受到发热体尺寸限制导致间距小。已有文献仅仅关注水冷电极的耐温、绝缘、密封等设计[5—8],未考虑真空环境下水冷电极的放电问题,即着火电压[9]未得到足够重视。

采用试验方法分别研究了石墨电极材料着火电压与温度、真空度、电极距离、环境气体成分、材料的关系,为石墨加热器电极结构的设计和使用环境提供依据。

1　试验设备及方法

试验设备如图1所示,采用真空腔可以控制气体环境及气体压强,用发热体给试验电极进行加热并控制温度,采用TM6801B型点温计测量电极表面温度,测温点选取电极顶面边缘处;试验电极两端外接可控硅直流电源,电源输出电压最高为572 V,而一般结构热试验加热器所用电源为400 V。通过可控硅电压反馈可测得电极两端电压。测试电极着火电压时,逐渐增加两电极间的电压值,当两电极之间充入的气体突然点亮,辉光出现时,所对应的电压即为着火电压。

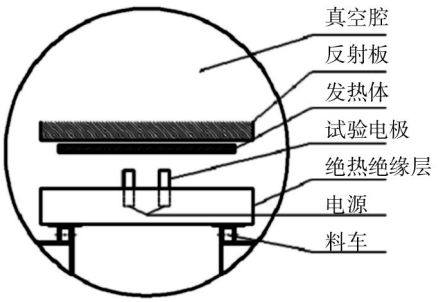


图1　试验装置

Fig. 1　The schematic diagram of test equipment

2　结果和讨论

2.1　着火电压与电极表面温度的关系

电极采用石墨电极,间距为6 mm,真空炉内气压为0.1 Pa,气体环境为空气,电极温度恒定后进行试验。着火电压随温度的变化曲线如图2所示。由图2可以看出,着火电压随温度升高而下降,温度在1350 ~ 1750 ℃内比较平坦,温度小于1350 ℃及大于1750 ℃时,着火电压下降较为迅速,此结果表明石墨加热器在高温大功率情况下必须考虑温度对着火电压的影响。

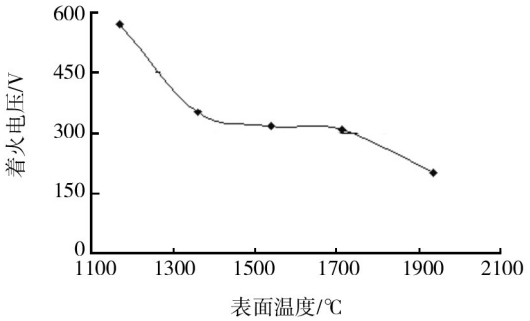


图2　着火电压随温度的变化曲线

Fig. 2　Changes of firing voltage with temperature

2.2　着火电压与压强的关系

电极采用石墨电极,电极间距为6 mm,温度为常温,气体环境为氮气。着火电压随压强变化曲线如图3所示。由图3可以看出,曲线首先下降然后上升,具有一个最小值 $U_{b,min}$;在最小值的左侧曲线很陡,而右侧则比较平坦。此结果符合巴邢定律[10]。

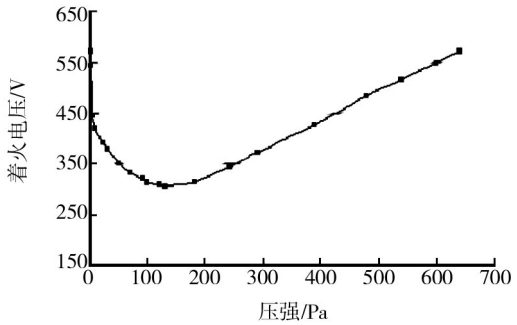


图3　着火电压随压强变化曲线

Fig. 3　Changes of firing voltage with pressure

2.3 着火电压与电极间距的关系

电极采用石墨电极，电极间距为6，8，10 mm共3种情况，温度为常温，气体环境为氮气。不同间距下着火电压随压强变化曲线如图4所示。图4中可以看出，在着火电压最小值$U_{b,min}$右侧着火电压随电极间距的增高而增高；着火电压取最小值时，压强随间距的增大而减小。结果符合巴邢定律，着火电压仅仅是压强(p)和电极间距(d)之积的函数，当电极间距增大时候，保持$p \cdot d$不变，压强必须减小，所以曲线向左偏移。如果将压强(p)和电极间距(d)之积作为横坐标，结果如图5所示，不同间距曲线基本重合，但有一定的误差。分析认为误差主要来源于真空腔内压强的测量误差与着火电压的测量误差。

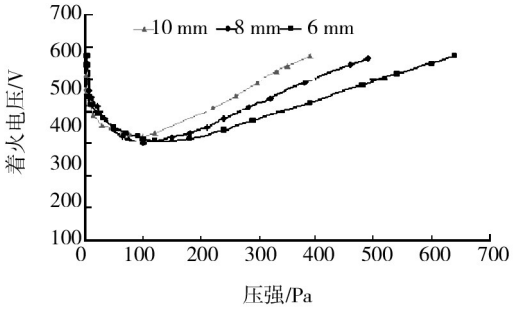


图4　不同间距下着火电压随压强变化曲线

Fig. 4　Changes of firing voltage with pressure in different distances

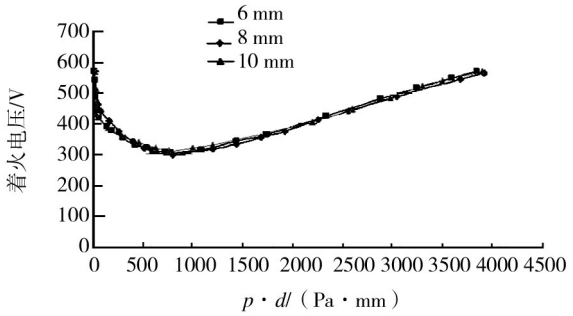


图5　不同间距下着火电压随$p \cdot d$变化曲线

Fig. 5　Changes of firing voltage with $p \cdot d$ in different distances

2.4 着火电压与气体环境的关系

电极采用石墨电极，电极间距为6 mm，温度为常温，气体环境分别为氮气和空气。对比两种气体对着火电压的影响，着火电压随压强变化曲线如图6所示。由图6可以看出，氮气环境相对于空气环境，电极更容易放电。

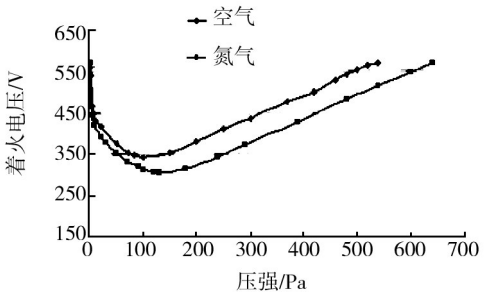


图6　不同气体环境下着火电压随压强变化曲线

Fig. 6　Changes of firing voltage with pressure in different gases environment

2.5 着火电压与电极材料的关系

电极分别采用铜、钼、石墨材料，电极间距为6 mm，气体环境为氮气，对比不同电极材料对着火电压的影响。不同电极材料下着火电压随压强变化曲线如图7所示。由图7中可以看出电极材料不同，着火电压也不同，石墨>钼>铜，越耐高温的材料着火电压越高。

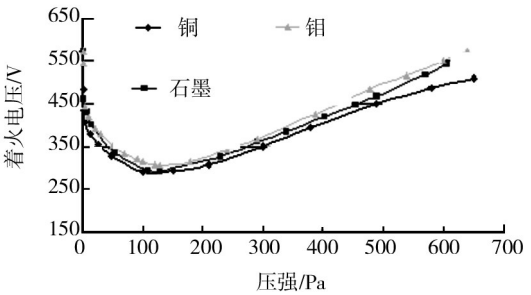


图7　不同电极材料下着火电压随压强变化曲线

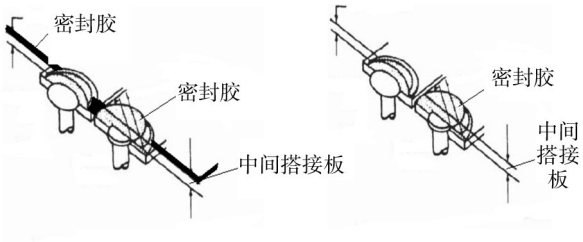
Fig. 7　Changes of firing voltage with pressure for different electrode materials

3 结论

1）着火电压随温度升高而下降，在1350～1750 ℃内比较平坦，温度小于1350 ℃或大于1750 ℃时，着火电压下降较为迅速，此结果表明石

（下转第50页）

3）更改结构密封设计，将原设计的搭接面板全部刷涂一层密封剂，更改为仅在紧固件头部刷涂密封剂（如图6所示），考察密封设计的合理性。



a 全密封　　b 局部密封

图6　全密封和局部密封形式

Fig. 6　The forms of local and entire sealing

3　结论

1）某型飞机连接部位的“底漆+密封剂+面漆”防护体系在低温低气压及热冲击环境下易发生开裂。

2）防护体系开裂的影响因素包括试验件结构形式、防护体系的类型、密封剂与底漆及面漆的相容性等。

3）针对现在设计方案中密封剂的失效问题，可以采用快速简便的局部修理和全局修理方法解决。

4）后续研究中将针对密封剂种类、性能和密封结构设计形式开展对比试验研究，确定最终密封剂失效原因，改进设计或者选用其它密封材料。

参考文献：

[1]　陈跃良，于继真. 某型飞机结构腐蚀失效分析[J]. 飞机设计，2002(3)：12—15.

[2]　刘文珽，李玉海，陈群志，等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报，2002，28(1)：109—112.

[3]　穆志韬. 飞机服役环境当量加速腐蚀折算方法研究[J]. 海军航空工程学院学报，2007，22(3)：301—304.

[4]　郑德强，张正平，李海波，等. 加速退化试验技术研究应用与发展[J]. 装备环境工程，2011，8(2)：100—104.

[5]　刘海燕，李喜明，王红斌，等. 航空有机玻璃加速老化试验技术研究[J]. 装备环境工程，2011，8(6)：83—87.

（上接第38页）

墨加热器在高温大功率情况下必须考虑着火电压的影响。

2）电极材料、间距、表面温度不变的情况下，着火电压与压强的关系曲线首先下降然后上升，具有一个最小值 $U_{b,min}$；在 $U_{b,min}$ 左侧曲线很陡，而右侧则比较平坦。

3）$U_{b,min}$ 右侧着火电压随电极间距的增大而增大，而左侧相反；$U_{b,min}$ 时，压强随间距的增大而减小；$U_{b,min}$ 对应压强在100～200 Pa内，说明在这一区间内，电极容易放电。

4）电极在氮气环境比空气环境中着火电压更低；对于3种不同材料的电极，石墨、钼和铜，着火电压依次降低。

5）石墨材料在高温真空环境下易挥发，有氧条件下易氧化，所以在抽真空后需要补充氮气，使真空腔内部压力维持在500～1000 Pa，既能提高石墨材料寿命，又能防止电极间的放电。

参考文献：

[1]　STROE D E. Linear Thermal Expansion of a Very Fine Grain Graphite[C]// The 26th International Thermal Conductivity Conference (ITCC) and The 14th International Thermal Expansion Symposium (ITES). 2005: 510—517.（余不详）

[2]　杭满福. 空间环境模拟设备大热流内仿行模拟器设计[J]. 真空与低温，2011(1)：45—47.

[3]　肖俊明. SiC陶瓷高温真空电阻炉的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2007(2)：50—52.

[4]　王乐善. 辐射加热方法在结构热试验中的作用与地位[J]. 强度与环境，2010(5)：60—63.

[5]　李平. 碳素材料在发热体方面的应用与开发[J]. 碳素，1999(2)：24—27.

[6]　高雪梅. 石墨在高温高真空电阻炉中的应用[J]. 工业加热，2005(1)：34—39.

[7]　江尧忠. 工业电炉[M]. 北京：清华大学出版社，1992：12—16.

[8]　王天泉. 电阻炉的设计[M]. 北京：航空工业出版社，2000：10—22.

[9]　阎承沛. 真空热处理工艺与设备设计[M]. 北京：机械工业出版社，1998：10—16.

[10]　杨津基. 气体放电[M]. 北京：北京科学出版社，1983：22—25.