

·结构与工艺·

## 气体放电灯封接技术研究

梁凯斌<sup>1</sup>, 胡心<sup>2</sup>

(1.东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000; 2.陆航驻哈尔滨地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**对石英玻璃等非金属材料与金属材料的几种封接技术进行了介绍。初步分析了封接过程中的重要环节应当采用的工艺手段, 列举了各种封接方式的优缺点, 介绍了帽罩封接方式新工艺和钼箔封接方式等的改进方法。以期在现有技术基础上, 进一步完善光源的封接技术, 逐步提高产品的真空气密性、热稳定性、机械强度等可靠性指标和使用寿命。

**关键词:**气体放电灯; 膨胀系数; 非匹配封接

中图分类号: TM923.32

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)04-0075-04

## Research on Sealing-in Technology of Gas Discharge Lamp

LIANG Kai-bin<sup>1</sup>, HU Xin<sup>2</sup>

(1. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China;

2. Military Representative Office of Army Aviation in Harbin, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** Several sealing-in technologies about nonmetal materials such as quartz glass etc. and metal materials are introduced. The process used in the important sealing-in process is preliminarily analyzed, merits and demerits of various kinds of sealing-in modes are listed and the new process of calotte sealing-in mode and improvement method of molybdenum foil sealing-in mode are introduced. So on the basis of present technology, the sealing-in technology of light source is improved and relative reliability specifications of products such as vacuum-tightness, heat stability and mechanism strength etc. and operation lifetime are improved gradually.

**Key words:** gas discharge lamp; expansion coefficient; non-matched sealing-in

一般的气体放电灯由充填金属或金属卤化物并抽真空的石英玻璃泡壳、放电电极以及电源输入端子等主要部件组成, 设计和制造气体放电灯的关键技术之一就是石英玻璃与金属的非匹配封接<sup>[1]</sup>。气体放电灯的基本工作原理是气体脉冲放电发光, 属于凝聚火花放电, 是一种非稳态气体放电<sup>[2]</sup>, 电极放电会产生很高的瞬时温度和等离子体冲击, 因此灯内的真空密封性很大程度上决定了发光特性和使用寿命。非匹配封接是指石英玻璃和金属或其他待封接的两种材料的膨胀系数相差很远而彼此封接的形式。

要使两种材料的膨胀系数曲线完全一致是不可

能的, 金属的膨胀系数在没有物相变化的情况下接近于常数, 石英玻璃的膨胀系数在超过退火温度后会急剧上升。当温度超过软化点后, 石英玻璃因处于粘滞状态, 应力会自动消失<sup>[3]</sup>, 而使膨胀系数显得无关紧要。如果石英玻璃和金属的膨胀系数在整个温度范围内其差值不超过10%, 应力就可以控制在安全范围内, 不会产生炸裂<sup>[4]</sup>。

气体放电灯封接技术种类较多, 在不同特性和使用条件下采用的封接方式也各有不同。在石英玻璃与金属的封接方面, 比较有代表性的主要包括: 石英与钨的直接封接法、过渡玻璃封接法、钎焊封接法(帽罩封接方法)、钼箔封接法等。这几种封接方式

各有特点,适用于不同技术要求、不同工作条件的产品。钼箔封接技术适合制造尺寸适中的产品,封接处可承受较高的温度而不炸裂,适合在低电流密度、振动冲击性能要求严格及较高的重复频率状态下工作<sup>[5]</sup>;过渡玻璃封接技术适合制造小尺寸产品,结构紧凑,但承受的电流密度较小<sup>[6]</sup>。金属帽罩封接技术适合制造大尺寸产品,可以承受很大的电流密度,适合在注入能量很大,振动、冲击不强,重复频率较低条件下工作。金属帽罩封接对石英玻璃表面的金属化技术提出更高的要求。

## 1 石英与钨直接封接

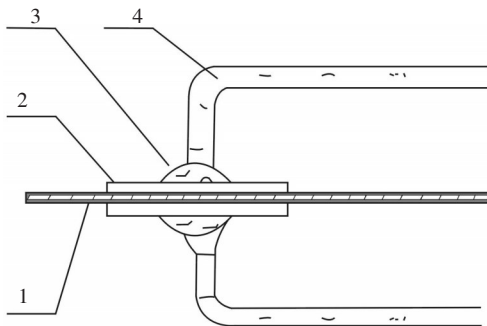
将钨杆制备成 $\varnothing 1\text{ mm}$ 和 $\varnothing 2\text{ mm}$ 的圆棒,与石英玻璃进行直接的封接,可以解决石英玻璃与金属封接中存在的几何尺寸大、冷端效应严重、允许通过的电流小、工作温度不够高等缺点。

钨杆与石英玻璃封接也需要使用过渡料涂层,过渡材料的选择有以下几个要求:(1)膨胀系数需介于钨杆与石英玻璃之间;(2)钨杆的润湿性与石英玻璃的粘结度及互溶性要合适。过渡材料的组成见表1。

表1 石英玻璃与钨直接封接的过渡材料组成<sup>[7]</sup>

氧化物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BO	W <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
质量/(%)	84	6	适量	7	1	适量

石英与钨的直接封接对钨杆有较高的要求,见图1。首先,钨杆本身无轴向裂纹,此外,钨杆必须进行抛光处理,然后再清洗干净。



1—钨杆; 2、3—过渡料; 4—石英玻璃管

图1 石英与钨直接封接<sup>[8]</sup>

这种石英玻璃与钨杆的直接封接法,优点是工艺简单,可承受较大的工作电流;不足之处在于封接处抗机械振动的能力比较弱,使灯的使用寿命受到影响。

## 2 过渡玻璃封接法

这种封接方式就是避免石英玻璃与金属直接封接,而是将石英玻璃管一次次地与相应的玻璃管封接,每次封接的玻璃的线膨胀系数都比上一次高一些,经过数次的对接,最后对接的玻璃管线膨胀系数与钨钼等金属的线膨胀系数相同<sup>[9]</sup>。这样,石英玻璃与金属的封接就转换成了金属与同组玻璃之间的匹配封接。

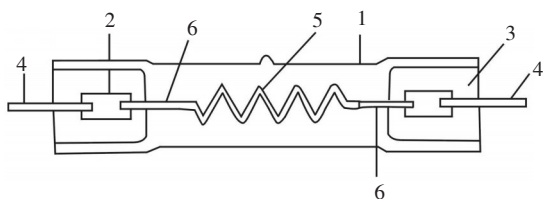
玻璃—金属封接前,需要对金属进行预热处理,使金属表面形成氧化物层,一定厚度的氧化膜对于整个封接过程极为重要。氧化膜作为玻璃和金属或合金封接时的过渡层,它溶于玻璃和金属或合金中,封接时,紧密附着于金属或合金表面的氧化物与玻璃间会发生结构的逐步改变,形成一种过渡层结构。在此结构中,与玻璃封接的氧化物晶格结点上的金属离子越靠近玻璃时也就越多地被玻璃中的Si离子所取代,使封接效果逐渐加强。氧化膜还可以消除停留在玻璃与金属或合金界面的气泡,如果封接接合部存在气泡,将大大降低封接件的真空气密性和耐压强度,从而降低封接件的质量。氧化膜的厚度对封接件的透气率、强度等有着至关重要的作用,当氧化膜过薄时,造成玻璃与金属基体表面没有过渡,使封接强度下降;当氧化层过厚时,造成金属表面残留较厚的氧化膜,封接件易发生漏气现象,影响其气密性<sup>[10]</sup>。

金属基体表面的氧化膜从化学键类型来看,它接近于金属,因此能与金属牢固地结合;而氧化程度较高的外表层氧化物的化学键与玻璃相似,又能与玻璃结合,所以说这一过渡层对玻璃—金属封接至关重要。金属的氧化程度要掌握适中,即不能过分,又不能不足。所谓氧化过度是指金属表面层中近似玻璃的化学键过多,封接时很容易全部溶解到玻璃体中去;氧化不足是指金属表面层中近似金属的化学键过多,造成这两者间的润湿性很差;不可能形成良好的封接<sup>[11]</sup>。

### 3 钼箔封接法

钼箔—石英玻璃的非匹配封接工艺简单、成本低廉,可在很高的温度下反复使用,已广泛用于生产中。

在钼箔两端分别点焊上电极和外导丝,把点焊好的钼箔放入石英玻璃管内,在保护气体中将它们加热至石英玻璃的软化温度以上,然后加压成形,石英玻璃和钼箔粘合在一起,形成气密封接。在封接后,封接件渐渐冷却。当封接件温度在石英玻璃的退火温度以上时(大于1400℃),虽然钼箔与石英玻璃的膨胀系数有很大差别,但因石英玻璃的粘滞性还较小,有一定的流动性,在冷却速度较慢条件下,一般不会产生永久性的应力。当封接件温度下降到转换温度以下时,石英玻璃已失去塑性变形能力。由于钼箔的膨胀系数远大于石英,钼箔收缩远大于石英玻璃,于是在界面上产生了张应力,幸而钼箔是很柔性金属,又很薄,在此应力作用下发生塑性变形,使应力充分释放,石英玻璃和钼箔仍粘合在一起而不会炸裂,使封接保持气密<sup>[5]</sup>。



1—玻壳;2—钼箔;3—封接夹扁区;4、6—钼丝;5—灯丝

图2 钼箔封接<sup>[12]</sup>

钼箔—石英玻璃封接的应力能否充分释放,主要取决于钼箔的形状。只有在钼箔很薄,即钼箔的宽度和厚度之比很大时,应力才能够充分释放。表2是在钼箔的截面相同(0.078 mm<sup>2</sup>)时,宽/厚比与石英玻璃中应力之间的关系。

表2 钼箔宽/厚比与石英玻璃应力的关系

(宽/厚)比	应力/(MPa)
1	440
10	6.7
115	2.2

由表2可见,当宽/厚比为1时,应力高达440 MPa,远大于石英玻璃的耐受能力。当宽/厚比增大到115时,应力降低到2.2 MPa,减小了约200倍,使钼箔—石英玻璃封接不会炸裂。

熔化状态的石英玻璃(2000℃)与钼表面的浸润性,对粘着力起重要的作用,浸润性越好,粘着力越大,封接件的质量越好。因为良好的浸润性有利于石英玻璃熔化后在钼表面的渗透,增强机械附着力。浸润性主要来自于钼箔和熔化石英之间的表面化学亲和力。通常用金属表面和石英玻璃边缘的夹角—浸润角来衡量浸润性:浸润角越小,浸润性越好。为了改善石英玻璃在钼箔表面的浸润性,可在钼中掺杂少量氧化钇和氧化铈,在2000℃条件下,石英玻璃在纯钼箔上的浸润角为97.2±6.5°,而在掺杂氧化钇和氧化铈的钼箔上,浸润角降低为79.7±8.5°。这是因为这些氧化物能与二氧化硅作用,生成硅酸盐,后者能溶于石英玻璃中。同时,由于钼箔与熔化石英玻璃之间的电化学反应,氧化钇和氧化铈微粒周围的钼箔表面,有微量的腐蚀,熔化石英玻璃包围着氧化物微粒,增强了机械附着力。

上面提到的是单钼箔的封接,但是由于钼箔的横截面积很小,不能允许较大的电流负载,也可采用双层钼箔封接或气泡封接法来弥补这一缺陷。双层钼箔的封接工艺与单钼箔封接工艺以及各种材料的准备基本相似,其机械强度、成品率、外形均优于单钼箔的封接,操作技术也易于掌握。此外研究表明,石英玻璃与双刃状钼箔能进行很好的气密封接<sup>[13]</sup>。

### 4 金属帽罩钎焊封接技术

该种封接技术是用于大尺寸产品封接的一种技术,与传统的钼箔和过渡玻璃封接方式相比,在承载更大电流密度方面,具有相当大的优势。采用活性金属法,在石英表面形成混合化合键的金属化涂层,经过高温真空烧结后具有相当大的结合力。这样石英玻璃壳就可以与金属帽罩之间形成非匹配封接,因为有金属化过渡层,所以能承受热胀冷缩带来的巨大破坏力,而且这种方法能够把金属和非金属的封接转化为金属之间的封接,具有良好的气密性、抗冲击振动性能。

金属化涂层的质量直接影响着光源的封接质量,如果金属化工艺表现的不稳定,则会导致漏气,成品率低。可以采用活性金属化方法,将混合粉调制成药剂,用涂膏设备涂于石英表面,在高真空氛围中实现涂层的烧结。

封接技术的关键问题是封接工艺,整个封接过程是在真空设备中进行的,为了能总结出合理的封

接工艺曲线,必须通过大量的实验来研究对流、传导、辐射三种因素及温度的控制对钎焊质量的影响。

## 5 分析与改进研究

### (1) 钼箔氧化问题

上述石英玻璃与金属的封接技术中,从制造技术、工艺难度、生产速度和操作简便等方面考虑,在电光源生产中用得最多的仍是石英—钼箔封接法,虽然该方法较成熟,但也存在一些问题。因为封接使用的钼箔非常薄,所以钼箔与石英玻璃紧密接合时不会产生很大的拉伸应力,但与之连接的钼杆(或钨杆),由于石英玻璃的粘度大,不能沿钼杆的形状充分流动,且钼杆与石英玻璃热膨胀系数相差较大,所以钼杆和石英玻璃之间不能完全紧密接合而形成空隙,这种空隙在石英—钼箔封接工艺中是很难消除的。当钼箔和钼杆温度上升到350℃时,进入空隙内的空气使钼箔和钼杆氧化,容易使钼箔和钼杆体积膨胀,在密封处产生裂纹,导致灯损坏。这种现象对有内管的高压气体放电灯就不存在问题,因为内管所处的空间内没有氧气存在,不会产生氧化,但体积小但输出能量较大的单层泡壳脉冲灯则无法避免。如果采用环形钼箔加石英气泡复合方式封接,则可以部分解决封接中连接空隙的技术难点,并且能够使产品耐振动抗冲击,提高性能可靠性。

### (2) 石英与钨封接时的可靠过渡问题

石英玻璃与钨杆的直接封接方式简便易操作,但因借助氧化层进行过渡,封接处的机械强度和热冲击性能等可靠性指标不够理想,虽然能达到一定程度的气密性,但不能保证长时间气密,只能应用于功率较低灯的制做。如果用焊料玻璃进行过渡,则制备工艺麻烦、外观质量差、密封不稳,影响灯的使用寿命。若在原有过渡玻璃基础上添加少量表面活性剂,降低玻璃的高温粘度,增加玻璃与钨的浸润,有利于钨杆与石英玻璃的过渡封接<sup>[13]</sup>。

### (3) 过渡玻璃制作工艺比较复杂的问题

采用过渡玻璃封接方法,需要烧制并拉出从石英玻璃—硬料玻璃之间的不同线膨胀系数的玻璃管并以不同的标号保存,工序过多,且过渡玻璃接头,精度低,强度差,物理长度长,工艺繁杂难于掌握。目前的封接工艺制作的过渡接头,耐高温及高真空的性能较差,因此在气体放电灯中应用不是很广泛。

### (4) 钎焊封接的塑性变形问题

当在石英的表面获得金属化层以后,石英与金属的封接就变成了钎焊的问题。石英在还原性气氛中不能长时间承受1000℃以上的高温,否则会产生再结晶,使强度下降,以至于发生龟裂<sup>[14]</sup>。采用活性金属化后的石英玻璃可以与金属在大大低于再结晶温度的环境下进行钎焊封接。基金属的选择应是塑性良好的金属,这样金属的塑性变形就可以用来缓冲石英与金属由于膨胀系数不一致而产生的应力。应当注意的是选择的基金属不能与金属化层生成合金,否则将破坏金属化层,增加基金属的非可塑性,使石英炸裂或降低封接件的热冲击性能。这样即使部件封接成功,当其受到较高温度的热冲击时,基金属和金属化层的膨胀比石英大,石英会受到很大的张应力而炸裂。

## 6 结束语

使用合理的封接技术制作气体放电灯,能够在解决真空气密性、热稳定性、机械强度等寿命指标方面发挥重要作用,满足使用要求,提高光电产品的性能,促进光源产品的升级换代。以上介绍的几种封接方式已在气体放电灯生产中得到了广泛的应用,并取得了一定的成果,但还存在着某些局限性,可以通过工艺研究和革新,进一步提高封接质量。随着真空电子领域的不断发展,对金属与非金属之间的封接提出了越来越高的要求,在非匹配封接过程中材料的选择,特性分析以及预处理方法等,对封接后的技术指标稳定性和产品的耐腐蚀性等方面起着重要的作用。

## 参考文献

- [1] 周天明.光源原理与设计[M].上海:复旦大学出版社,1993.
- [2] 孙晓光,吴永强.小功率脉冲氙灯工艺和材料的研究[J].真空电子技术,2007(2):41-44.
- [3] 马英仁.封接玻璃-玻璃封接的分类、条件及金属的氧化[J].玻璃与搪瓷,1992.
- [4] 罗英环,陈品志,陈剑德,等.低熔点玻璃非匹配封接[J].华南工学院学报,1982,6(2):161-163.
- [5] 朱绍龙.高强度气体放电灯的钼片-石英玻璃封接[J].灯与照明,2002,12(6):17-19.

(下转第82页)

## 参考文献

- [1] 袁任光,林由娟.柴油发电机组选用与安装维护[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 魏存海.系统配装小功率低噪声电站的结构分析[J].移动电源与车辆,2011(1):8-10.
- [3] 邱成梯,赵惇旻,蒋全兴.电子设备结构设计原理[M].南京:东南大学出版社,2001.
- [4] 容江峰,魏存海,汪雅红.低噪声风冷小功率电站风道设计[J].移动电源与车辆,2007(1):15-16.
- [5] 张芳,达棣.低噪声双机组电站风道设计[J].移动电源与车辆,2010(2):6-8.
- [6] 王中华,孙亚平,贾一兵.厢式风冷型电站的散热结构设计[J].移动电源与车辆,2009(3):12-15.
- [7] 韩恺,赵长禄,张付军.装甲车辆冷却风道的一维CFD仿真[J].车辆与动力技术,2010(1):46-50.

## (上接第74页)

- [7] Y Y Hung, W D Luo, et al. NDT of joined surfaces using digital time-integrated shearography with multiple-frequency sweep[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000,33:369-382.
- [8] 陈华平.散斑干涉技术及其图像处理系统的研究[D].广州:广东工业大学,2004.
- [9] 郑文.相移数字散斑干涉计量及其在热变形测量中的应用[J].光子学报,1993,22(2):172-177.
- [10] 金观昌.电子散斑错位散斑干涉术用于无损检测的探讨[J].实验力学,1992,7(2):181-187.
- [11] 吴震.光干涉测量技术[M].北京:中国计量出版社,1995.
- [12] 何玉明.线性相关算法形成数字剪切散斑相关条纹图[J].光子学报,1995,25(1):12-17.
- [13] 陈家璧,周维祯.剪切散斑干涉术的统计分析[J].光学学报,1989,9(4):333-340.
- [14] 朱中儒,张国平.数字散斑剪切干涉光学测距[J].华中师范大学学报(自然科学版),2001,8(3):177-179.
- [15] 刘龙.混凝土结构无损检测中的激光散斑干涉计量术[D].南京:东南大学,2003.
- [16] 于光,王树国.数字散斑干涉技术及应用[J].激光技术,2002,26(3):237-240.
- [17] B H Liu, Y W Qin, et al. Non-Destructive test of multiply plywood using ESSPI with wide audio-frequency driving vibration[C]// Optical Technology and Processing For Fluids and Solids Diagnostics, (Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering), Beijing, CHINA, 2002,5058:307-311.

## (上接第78页)

- [6] 周治洲.石英-钨封接玻璃制备工艺研究[J].中国建材科技,1998(6).
- [7] 莫纯昌,陈国平.电真空工艺[M].北京:国防工业出版社,1980.
- [8] 邵力为.耐超高气压钨杆与石英的封接技术[J].中国照明电器,1997(5):13-14.
- [9] 向在奎,王玉芬,隋梅,等.石英-钨过渡封接玻璃的改进及封接工艺研究[J].灯与照明,2006,3(1):54-56.
- [10] 赵书华,宋春玲.金属与玻璃封接工艺的研究[J].吉林师范大学学报,2005,2(1):85-87.
- [11] 张永爱,刘浩,袁坚,等.玻璃焊料与金属封接技术[J].玻璃与搪瓷,2004,12(6):35-37.
- [12] 严增翟.石英玻璃与金属封接技术进展[J].光源与照明,2005,12(4):14-18.
- [13] 杨宇锋,唐元春.特种光源用封接钨窄带的研究[J].中国照明电器,2006(11):4-6.
- [14] 李朝木,王奇,朱宝元,等.石英玻璃与金属封接工艺的研究[J].真空与低温,1993,3(1):4-7.