

空间光学遥感器 SiC 反射镜连接技术综述

杨利伟, 鲍 赫

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: SiC 在空间光学遥感器光机结构当中有广阔的应用前景, SiC 反射镜连接技术是 SiC 工程应用的关键技术。本文综述了适用于 SiC 反射镜连接的各种方法, 重点介绍了它们的原理、特点、适用范围及工程应用, 为国内 SiC 反射镜的研制提供了参考。

关键词: SiC; 螺接; 焊接; 粘接; 渗硅

中图分类号: TH703

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102712.0056

Summarization of Joining Technologies of SiC Mirror of Space Optical Remote Sensor

YANG Li-Wei, BAO He

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: SiC has a wide application prospect in opto-mechanical structure of space optical remote sensor, SiC joining technologies are key to the practical application of SiC to engineer. A number of joining processes are introduced in this paper, and the emphases are placed on their principles, characteristics, limitations and applications in engineer, which provide reference to domestic research of SiC mirror.

Keywords: SiC; bolting; brazing; gluing; Si infiltration

1 引 言

SiC 具有高刚度、低线胀、高热导率、低密度以及良好的环境稳定性等优点, 在空间光学遥感器光

机结构中有广阔的应用前景, 使用 SiC 作为反射镜的材料越来越受到光机工程师的青睐。SiC 反射镜的连接技术成为了光机结构中的关键技术之一, 它可以实现 SiC 反射镜和相机本体的连接, 也可以实现多片

SiC 反射镜的拼接。由空间光学遥感器的发展趋势可知,反射镜口径越来越大,对光机结构比刚度的要求越来越高。由此带来的问题不仅是遥感器质量的增加,而且采用传统结构形式对铸造能力、加工能力的要求也大幅提高。

焊接技术和渗硅技术是最近发展起来的新技术,它们可以实现大口径 SiC 反射镜和复杂结构件的研制。焊接技术应用的一个成功例子,是 Herschel 天文望远镜主镜的研制,它将 12 片子镜片焊接成了一个口径达 3.5 m 的反射镜镜坯。而 JWST 天文望远镜 NIRSPEC 光学基板的研制,则依靠的是渗硅技术,它将两片形状几乎相同的基体,连接成一个三明治结构。

根据连接材料的性质分类, SiC 反射镜连接技术可分为 SiC-金属连接技术和 SiC-SiC 连接技术。本文根据国内外 SiC 反射镜连接技术的进展情况,研究了几种常用的 SiC-金属连接技术和 SiC-SiC 连接技术,研究成果可用于 SiC 反射镜的设计。

2 SiC-金属连接技术

在空间光学遥感器中, SiC-金属连接技术是光机系统中的关键技术之一,它可以实现 SiC 反射镜和相机本体的连接。目前常用的方法有 3 种:螺纹连接、粘接和焊接。

2.1 螺纹连接技术

螺纹连接是利用螺纹之间彼此的摩擦力而构成的一种可拆连接,由于其结构简单、连接可靠,因而在工程中广泛应用。其缺点是螺纹零件应力集中,在交变载荷作用下易产生疲劳裂纹。螺纹连接工作状态的好坏直接影响到光机部件的正常使用。钛合金紧固件具有良好的机械性能,在光机结构中能满足轻质化、电位匹配等要求。采用预紧力控制安装技术,将提高其可靠性。螺纹润滑和摩擦控制、拧紧力矩系数控制对连接结构有重要影响^[1]。

SiC-金属螺纹连接技术是光机结构中常用的技术手段之一。由于 SiC 自身较难攻螺纹,一般采用预

埋金属件的方法进行连接。它的关键因素有:螺纹大小、螺距、螺纹深度及预埋工艺水平等。为了保证连接应力不会传到镜面上,对螺钉大小、螺距、螺纹深度及拧紧力矩都有要求。SiC-金属螺纹连接技术在光机机构上的应用实例如图 1 所示,图中所示为美国 SSG 公司研制的 SiC 反射镜,为了保证连接的稳定性,在其中两个螺孔旁边,还增加了两个销孔^[2]。

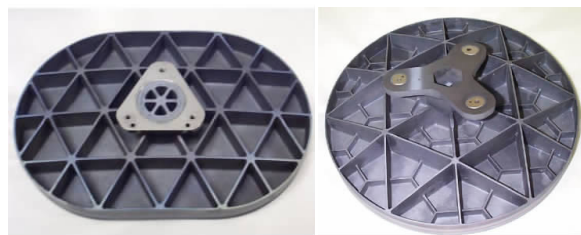


图 1 美国 SSG 公司研制的 SiC 反射镜

2.2 粘接技术

粘接技术广泛应用在光机结构当中。和螺纹连接方法相比,使用粘接技术的主要优点是能够减轻结构质量,同时操作方便。缺点是大部分粘接剂在固化期间存在收缩现象,粘接剂的收缩以及机械特性的变化会导致内应力出现。只要方法得当,大部分粘接应力是可以避免的。

SiC-金属粘接技术的关键因素有:粘接剂本身的性质、粘接层的厚度、被粘接表面的清洁度、被粘接材料线胀系数的匹配性、粘接面积、粘接部件的工作环境以及完成粘接的工艺水平。

由于固化体缩和温度变化影响,粘接层的尺寸变化正比于粘接面积,所以,粘接面积不要太大。一般来说,最小的粘接面积 Q_{\min} 由下式确定:

$$Q_{\min}=W a_c f_s / J \quad (1)$$

其中, W 是光学零件的质量, a_c 是最恶劣条件下的加速度系数, f_s 是安全系数, J 是粘接区的抗剪强度或抗拉强度。安全系数至少应当是 2,考虑到一些没有计划到的非理想工作条件等因素的影响,安全系数可能要 >4 ^[3]。

几种常用的 SiC 反射镜粘接方式见图 2。图 2(a)所示为美国 EO-1 相机的次镜,它采用最简单的粘接

方式,即 SiC 和金属对粘,这种粘接方式操作方便,粘接应力最小,但只适用于小反射镜的粘接。图 2(b)所示为美国 SSG 公司研制的扫描镜,它采用侧面粘接方式,这种粘接方式操作方便,粘接应力较小,适用于中小型反射镜的粘接。图 2(c)为日本的 AKARI 望远镜主镜,它采用背部嵌入式粘接方式,这种方式粘接强度高,但粘接应力大,适用于大型反射镜的粘接^[4-6]。

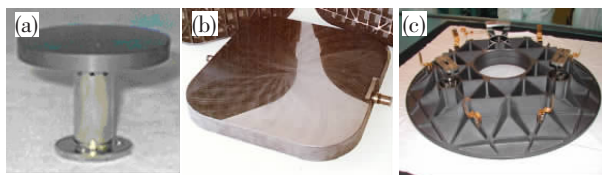


图2 几种常见的反射镜粘接方式

2.3 焊接技术

SiC-金属的焊接技术有很多,主要焊接方法有扩散焊法、钎焊法、摩擦焊法和熔化焊法等。以上连接方法中,扩散焊和活性金属钎焊研究最多,应用最广。

扩散焊包括没有中间层扩散焊和有中间层扩散焊两种。由于 SiC 的晶体类型、物理化学特性和金属差异较大,不用中间层较难实现 SiC 与金属的连接,所以,目前普遍使用有中间层的扩散焊法。按中间层的不同,可分为贵金属法、软金属法和热膨胀系数法。使用中间层可以降低接头的热应力、防止裂纹的产生,同时还可以降低焊接温度和压力。SiC 与耐热合金的代表——Ni 基、Fe 基合金的扩散焊成为研究工作者关注的一个热点。其关键问题是开发抗氧化性强且能控制两者反应的中间层材料^[7]。

钎焊是一种利用被称之为钎料的外加金属或合金来实现 SiC 与金属连接的方法。按照工艺过程的不同,钎焊可分为间接钎焊法和直接钎焊法两种类型。间接钎焊法是在 SiC 表面预金属化,然后再用常规钎料进行钎焊。预金属化的目的就是要解决常规钎料不能润湿 SiC 的问题,间接通过 SiC 表面的预金属层和钎料将 SiC 与金属连接在一起。直接钎焊法是利用钎料直接进行 SiC 与金属的钎焊,但采用的钎料必

须是活性钎料。因此,直接钎焊法又称活性钎焊法。活性钎料通常是在常规钎料中添加 Ti、Zr 或 Hf 等活性元素得到的,如 Ag-Cu-Ti 活性钎料就是在 Ag-Cu 共晶钎料基础上添加活性元素 Ti 的产物^[8]。

目前, SiC-金属钎焊技术在光机结构领域应用较少,从研究现状和发展趋势来看,钎焊将成为 SiC 反射镜和金属连接的方法之一。

3 SiC-SiC 连接技术

随着空间技术的发展,反射镜尺寸越来越大,光学系统对光机结构的要求越来越高。以下几种情况进行 SiC-SiC 连接:

- (1) 整机采用全 SiC 结构,反射镜和支撑结构需要进行连接;
- (2) 反射镜尺寸太大,无法进行整体加工,需要进行拼接;
- (3) 某些 SiC 反射镜具有复杂结构,常规方法很难加工。

SiC 和 SiC 进行连接主要有以下 3 种手段:螺纹连接、焊接、渗硅。

3.1 螺纹连接技术

SiC-SiC 的螺纹连接技术一般是指在 SiC 反射镜上面攻螺纹,利用 SiC 螺钉将结构件连接起来。SiC-SiC 的螺纹连接技术的关键因素有:材料本身的力学性能、螺纹大小、螺距、连接强度、连接刚度、螺纹加工技术等。

小尺寸或中等尺寸 SiC 反射镜和 SiC 结构装配时,通常使用螺纹连接。图 3 为某一卡塞格林望远镜的结构件。该望远镜的口径为 250 mm,结构件全部采用 SiC 材料制成,各结构件之间也是采用 SiC 螺钉连接的。图 4(a)给出了一个 1/4-20 的带帽螺钉,图 4(b)给

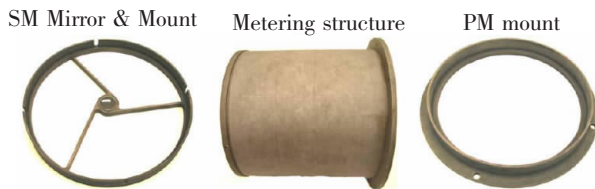


图3 卡塞格林望远镜SiC结构件

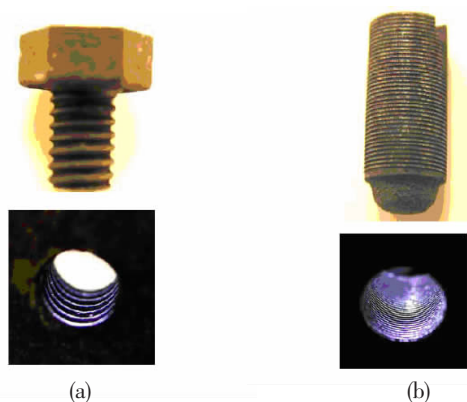


图4 SiC螺钉和与之配套的螺纹孔

出了一个1/4-80的调节螺钉，每个视图同时给出了结构件上与之配套的螺纹孔。这种材料固有的高断裂应力允许使用接近5 000 N的较大张力装配该螺钉。由于螺钉和被紧固件具有相同的热膨胀系数，所以在连接处不会产生热效应^[9]。

3.2 焊接技术

目前，世界上单片SiC反射镜的最大加工尺寸是1 m×1.6 m，这样的加工能力能够满足大多数任务的需要，但对于更大尺寸的反射镜来说，则需要更加经济、有效和安全的方法。焊接技术是不错的选择。SiC-SiC焊接技术是一种在两片SiC镜片之间加入焊接材料，通过焊接材料将两片SiC镜片连接在一起的技术。ASTRIUM公司的焊接技术是一种高温焊接技术，目前已比较成熟，它的技术特征如下：

- (1) 焊接材料的线胀和SiC基体相匹配，误差在 $0.1e-6/K$ 以内；
- (2) 焊缝很薄，可以达到微米级甚至亚微米级，焊接强度大于或等于SiC基体的强度；
- (3) 焊接过程中，焊接材料和SiC基体不发生反应；因此，焊接过程不会对基体产生破坏^[10]。

Herschel天文望远镜的主镜是SiC焊接技术最典型的例子。Herschel主镜口径为3.5 m，总重为300 kg。由于尺寸较大，整体研制的难度很大，但将其分解后就简单多了。法国的Boostec公司将其分解成12部分，每一部分看起来就像一片花瓣，如图5(a)所示。每一片“花瓣”研制完成之后，利用夹具将其拼接

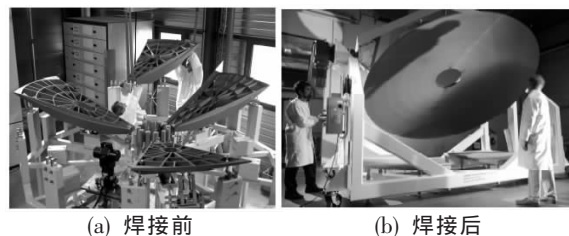


图5 Herschel天文望远镜主镜

在一起，进行焊接。焊接完成的镜坯如图5(b)所示。测试结果表明，焊接后的镜坯没有出现变形，机械特性也没有降低^[11]。

3.3 渗硅技术

已经知道的SiC-SiC连接技术包括直接粘接、金属焊接、无机材料焊接以及反应成型连接等。但是，这些连接技术多少会存在些问题，例如热稳定性、连接强度等。有时连接材料的特性低于基体材料的特性，有时连接的尺寸和形状会受到限制。另外，由于基体和连接材料的线胀系数不匹配会导致热应力产生。渗硅技术是为了获得良好的热稳定性和较高的连接强度发展起来的。它的关键因素包括：连接层材料成分、连接层厚度、连接层大小、Si和C的比例、反应时的温度、真空度以及连接强度等。

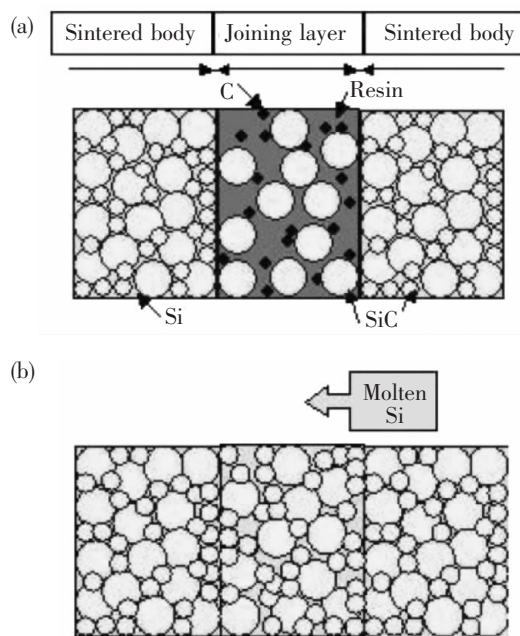


图6 SiC渗硅技术示意图



图7 采用渗硅技术连接起来的SiC反射镜

渗硅技术的最新工艺流程如图6所示。图6(a)中连接层(Joining layer)包括粘接剂、C粉末和SiC粉末,高强度反应烧结的SiC结构件(Sintered body)被粘接剂粘接在一起,粘接厚度一般为 $20\mu\text{m}$,在室温条

件下固化,C粉末和SiC粉末散布在粘接剂当中。图6(b)为在真空和高温条件下,熔融的Si被注入胶层当中,和胶层中的C粉末发生反应,生成SiC。经测试,渗硅技术形成的连接层的平均强度达到了 $586\text{MPa}^{[12]}$ 。

渗硅技术主要应用于形状复杂的反射镜及结构件的研制。使用渗硅技术的一个例子,就是德国IB-COL公司研制的三明治结构的反射镜,如图7所示。

4 结 论

空间光学遥感器的SiC反射镜连接技术包括两个方面:SiC-金属连接技术和SiC-SiC连接技术。SiC-金属连接技术包括螺纹连接技术、粘接技术、焊接技术等;SiC-SiC连接技术包括螺纹连接技术、焊接技术、渗硅技术等。针对每一种技术,本文从关键因素、技术状态及应用等方面进行了讨论。在进行连接方法的选择时,一定要从实际出发,保证连接质量和稳定性,并力争降低生产成本。从国内外对SiC反射镜连接技术的研究及发展趋势来看,SiC-金属粘接技术及SiC-SiC焊接技术,被认为是较好的SiC反射镜连接方法,已经在工程中得到了成功的应用。

参考文献

- [1] 李至广. 钛合金螺纹连接结构预紧力、应力、可靠性分析[D]. 长沙:国防科学技术大学硕士学位论文,2004:86.
- [2] Robichaud J. Recent silicon carbide optical performance results at SSG/Tinsley [EB/OL]. 2004. http://optics.nasa.gov/tech_days/tech_days_2003/docs/38SSGSiCDevelopments.pdf
- [3] Yoder P R. 光机系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008:396-399.
- [4] Robichaud J. ALI optical subsystem technology [EB/OL]. 2001. <http://eo1.gsfc.nasa.gov/miscPages/TechForum3Pres/02-Optical.pdf>
- [5] Casstevens J M. POCO superSiC SiC mirror for cryo-characterization [EB/OL]. 2002. http://optics.nasa.gov/tech_days/tech_days_2002/docs/32POCOSuperSiCSiCMirrorforCryo__MACVer.pdf
- [6] Kaneda H. Development of lightweight SiC mirrors for the space infrared telescope for cosmology and astrophysics (SPICA) mission[J]. *SPIE*, 2007, 6666: 666607-1-666607-9.
- [7] 吴铭方. SiC陶瓷与金属连接[J]. 华东船舶工业学院学报,1999(13):54-57.
- [8] 刘会杰. 陶瓷与金属的连接方法及应用[J]. 焊接,1999(6):5-9.
- [9] Goodman W A. Lightweight athermal SLMSTM innovative telescope[J]. *SPIE*, 2004, 5528: 72-82.
- [10] Sein E. A $\phi 3.5\text{m}$ SiC telescope for HERSCHEL mission[J]. *SPIE*, 2003, 4850: 606-618.

- [11] Deny P. Lightweight athermal SLMSTM innovative telescope capabilities[J]. *SPIE*, 2005, 5868: 58680G-1-58680G-11.
- [12] Suyama S. Development of joining technology of high-strength reaction-sintered silicon carbide for optical mirror, Poster-Technologies in telescope[EB/OL]. 2006. <http://www.icsconference2008.com/cd/pdf/Poster%20-%20Technologies%20in%20Telescopes%20-%20Tsuno.pdf>

作者简介: 杨利伟(1980-), 男, 汉族, 河南开封人, 硕士, 助理研究员, 2009年于中科院长春光机所获得硕士学位, 主要从事空间光学遥感器光机结构设计。E-mail: yanglw2006@yahoo.com.cn.

超低压双电层晶体管研究获进展

膜晶体管 (Thin-film transistors, TFTs) 是一类重要的半导体器件, 在平板显示、传感器等领域具有广泛的应用价值。最近几年, 宽带隙氧化物半导体由于其具有低温成膜、高电子迁移率、可见光透明等优点, 在薄膜晶体管领域引起了人们广泛的研究兴趣。由于常规 SiO_2 栅介质电容耦合较弱, 当前薄膜晶体管的典型工作电压一般 $>10\text{ V}$, 大大限制了其在便携式领域的应用。研究表明, 离子液、离子凝胶 (Ion gels) 具有高达 $10\text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 的低频双电层电容。研究人员采用该类双电层栅介质制作了工作电压仅为 $1.0\sim 2.0\text{ V}$ 有机薄膜晶体管。但到目前为止, 该类栅介质很少用于无机氧化物半导体晶体管器件研制。

2009年开始, 中科院宁波材料技术与工程研究所万青课题组在纳米 SiO_2 颗粒组成的微孔薄膜体系中观测到了巨大的双电层电容, 并用该介质薄膜作为栅介质, 成功研制了高性能、低压透明薄膜晶体管, 其工作电压 $<1.5\text{ V}$ (*Appl. Phys. Lett.* 95, 152114 (2009); *Appl. Phys. Lett.* 96, 043114 (2010))。该论文被*Nature Asia Materials*作了题为Transparent transistors: low power, high performance的Highlight专题报道。在此基础上, 课题组又成功在纸张衬底上, 采用全室温工艺, 成功研制了高性能纸张晶体管, 并通过氧压调控技术, 实现了晶体管增强型和耗尽型调控 (*IEEE Trans. on Electron Devices*, 57, 2258 (2010))。另外, 课题组还通过简单浸泡的途径在 SiO_2 纳米颗粒膜中引入Li、H等离子, 明显增强了栅介质的双电层电容值。接着又成功研制了具有垂直结构的超低压氧化物双电层薄膜晶体管 (*IEEE Electron Device Letters*, 31, 1263 (2010); *Appl. Phys. Lett.* 97, 052104 (2010))。

最近, 课题组又自主开发了一种自组装工艺, 仅仅采用一个掩膜版, 一次磁控溅射就在双电层栅介质上沉积了ITO沟道、ITO源/漏电极, 完成了晶体管制作 (*IEEE Electron Device Letters*, 31, 1137 (2010))。另外, 课题组还用单根 SnO_2 纳米线作为晶体管沟道, 成功研制了超低压、全透明纳米线双电层晶体管 (*Journal of Materials Chemistry*, 20, 8010 (2010))。

上述基于氧化物半导体的超低压双电层晶体管在低成本、便携式传感、显示器件领域具有广泛的应用价值。