

SiC_p /Al的熔化焊及高能束焊研究现状

郭绍庆 袁 鸿 谷卫华 李 艳 李晓红

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

文 摘 针对 SiC_p 增强铝基复合材料 (SiC_p /Al)的熔化焊接,尤其是高能束焊接,围绕焊缝成形、有害相 Al₄C₃生成、焊接气孔等影响该类材料焊接质量的若干问题,从形成机理、影响因素、控制措施等方面,综述了该领域的研究现状,指出了今后的研究方向。

关键词 铝基复合材料, SiC_p /Al, 熔化焊, 电子束焊, 激光焊

Current Research Situation of Welding of SiC_p /Al Composites

Guo Sh]aoqing Yuan Hong Gu Weihua Li Yan Li Xiaohong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract Current research situation of fusion welding, especially high energy density welding, of AlMMCs Reinforced with SiC_p, also known as SiC_p /Al, is reviewed Main problems associated with fusion welding, such as weld forming, formation of Al₄C₃ compounds and weld porosity, are analyzed in terms of formation mechanism, influencing factors and preventing measures Recommendations are subsequently made for future research

Key words Aluminum matrix composite, SiC_p /Al, Fusion welding, Electron beam welding, Laser beam welding

1 引言

铝基复合材料将铝合金基体的塑性和韧性同低密度陶瓷增强体的刚性相结合,具有高的比强度和比模量,是航空航天领域极具应用前景的结构材料和功能材料。其中 SiC_p /Al复合材料因制造成本相对较低而且具有各向同性的特点,正日益受到重视^[1~2]。该类材料通过改变 SiC_p 体积分数、尺寸及基体成分,可以获得不同的使用性能,因而可用于机翼蒙皮、导弹壳体、精密仪器底座等制造,还可用于电子封装^[3~6]。

SiC_p /Al在实际构件中的应用,往往受到诸如焊接等二次加工工艺性能的限制^[7]。尤其在大型件和复杂件制造时,采用一次性制备技术工艺难度较

大,能否实现优质焊接成为新材料应用与否的关键。近年来,各国学者针对 SiC_p /Al的熔化焊,尤其是高能束焊,开展了较广泛的研究,取得了一定的进展,但仍存在尚未解决的问题。本文着重围绕 SiC_p /Al 熔化焊及高能束焊缺陷的形成、影响因素、控制措施,综述该领域的研究现状。

2 SiC_p /Al熔化焊的基本问题

2.1 焊缝成形困难且易于形成非增强区

SiC_p /Al熔化焊时,基体被加热到熔点以上,而增强体仍为固体,因而导致熔池黏度过高,母材与填充金属难以充分熔合。采用富 Si铝焊丝能够提高 SiC颗粒在铝基体中的润湿性,促进母材与填充金属的熔合,但是凝固时 SiC_p 容易遭受排斥形成无

收稿日期:2004-04-13;修回日期:2004-07-26

基金项目:航空基金资助项目(00H21013)

作者简介:郭绍庆,1969年出生,高级工程师,主要从事材料焊接性和焊接工艺以及焊接过程数值模拟的研究工作

宇航材料工艺 2005年 第4期

— 19 —

SiC_p的非增强区^[7]。SiC_p与液态铝之间的润湿性差是造成初生相排斥陶瓷颗粒的主要原因^[8]。Stefanescu等人提出了凝固界面临界推移速度 v_c ,认为当凝固界面推移速度 $v_s > v_c$ 时,颗粒会被凝固界面捕捉,反之颗粒会被推移^[9]。张坤等人对SiC_p/A356的激光重熔研究表明,激光重熔的扫描速度和凝固速度分别达到30~60 mm/s和15~30 mm/s,均远大于临界速度,故颗粒不会被推移而保持重熔前的状态^[10]。P. P. Lean等人采用Al-5Mg和Al-5Si对AA6082与25% SiC/AA6092进行脉冲MIG焊异种连接时发现,当电弧对准焊缝对接线时,容易在复合材料侧与熔池之间产生未熔合,稍微改变电弧方向并使电弧偏向复合材料可避免这一问题;富Mg焊丝能提供SiC_p与液态铝之间合适的润湿性,该反应的自由能变化为:

$$G = 113\,900 - 12\,067 \ln T + 8.92 \times 10^{-3} T^2 + 7.53 \times 10^{-4} / T + 21.5T + 3RT \ln a_{[Si]} \quad (2)$$

式中 $a_{[Si]}$ 是液态Al中Si的活度, R 是气体常数, T 是绝对温度。

根据(2)式,直到温度超过727,自由能才变为负值,因此焊接SiC_p/Al的关键是尽可能减小焊接过热和Al与SiC_p之间的接触时间。

在一定温度下,随熔池中Si含量增加,其活度 $a_{[Si]}$ 提高,反应(1)减缓。因此通过填充金属或基体材料向熔池添加Si到饱和状态,可以抑制SiC_p/Al界面上Al₄C₃的生成水平^[7]。

Reynolds在采用转移等离子弧工艺焊接30% SiC_p/6061Al时,使用Al(Zn)-Al₃Zr和Al(Ti)-Al₃Ti基填充金属,有效地抑制了Al₄C₃的生成,改善了接头的塑性^[13]。

2.3 焊接气孔问题

对于粉末冶金制备的SiC_p/Al,在熔化焊温度下闭塞气体的含量很高,极易造成气孔和裂纹^[7]。M. B. D. Ellis等认为气孔是由氢引起的,对MMCs真空脱气能减少气孔。在制备MMCs前对粉末进行脱气也能减少气孔。

R. Y. Huang将20% SiC_p/6061Al电子束焊和激光焊熔合区和部分熔化HAZ的球形气孔和伸长气孔的生成归因于Mg元素的挥发。采用电子探针显

进一步的EPMA分析表明,熔池中的Mg与Al的Al₂O₃保护膜反应,生成MgO和MgAl₂O₄,因此改善润湿性^[11]。R. Y. Huang等对SiC_p/6061Al的焊接研究发现,随着SiC_p含量由0增加到20%,焊缝成形困难增加,容易形成V形缺口。激光焊比电子束焊获得的焊缝成形好^[12]。

2.2 生成Al₄C₃脆性相

提高熔池温度可以增加熔池的流动性,但会引起增强体和基体间的有害反应。Al和SiC_p反应生成Al₄C₃片状析出,同时容易生成块状Si₃片状Al₄C₃很脆,会降低焊缝的断裂韧性,而且它在湿环境中极易腐蚀,显著降低接头的使用寿命。

焊接时Al和SiC_p之间发生置换反应:



微分析(EPMA)测量20% SiC_p/6061Al接头区域Mg元素含量线分布,发现熔合区和HAZ确有Mg元素的损失^[12]。

W. B. Busch将电子束焊接时气孔的形成归因于增强体的分解,认为电子束与陶瓷间的相互作用使增强体分解从而导致焊缝凝固时形成气孔。采用非增强中间层并使电子束直接作用于该中间层,可以减少气孔的生成^[14]。

3 SiC_p/Al高能束焊

高能密度焊,包括激光焊和电子束焊,具有快速热循环和低热输入的特点,对母材的影响较小,且有助于减少熔化焊所引发的缺陷,因此近年来在这方面开展的研究较多。

3.1 焊缝显微组织的特点

Lienert等采用各种分析手段研究了15% SiC_p/A356电子束焊和激光焊时的显微组织变化,并提出了显微组织变化的直观模型。研究发现,采用相同功率密度和焊接速度的激光焊,比电子束焊更有助于抑制SiC_p的分解和Al₄C₃的生成^[15]。

3.1.1 激光焊

熔合区展示出三个不同的区域:上部中心区、部分反应区(PRZ)和未反应区(URZ)^[15]。

上部中心区呈尖钉状,占焊缝截面积的25%以
宇航材料工艺 2005年 第4期

下,在铝合金基体中含有大量 Al_4C_3 和 Si ,只有少量 SiC_p 保留下来。 Al_4C_3 呈针状,很容易识别。该区 Al_4C_3 较长,并且与任何 SiC_p 都不连续。针状 Al_4C_3 有一定弯曲,且随机取向,这意味着该区 Al_4C_3 是在冷却过程中从液体中形核长大的。随着到焊缝上表面距离的增大,针状 Al_4C_3 数目减少,尺寸减小。该区结晶方式为过共晶,有块状 Si 在 Al_4C_3 片上形核。

部分反应区 (PRZ) 很窄,在上部中心区外围,有部分 SiC_p 按式 (1) 生成 Al_4C_3 和 Si , 该区不含有块状单质 Si , 基体凝固是 $\text{Al}-\text{Si}$ 合金亚共晶, Si 含量略高于基体名义成分。细小的 Al_4C_3 很明显是从 SiC_p 上形核长大的, 这些 Al_4C_3 直而短, 并且与 SiC_p 有一定取向关系。

未反应区 (URZ) 是指 SiC_p 未反应区, 它在部分反应区 (PRZ) 外围, 占焊缝总体积的 70% 左右, 由于没有因 SiC_p 分解或溶解而生成额外的 Si , 该区按基体 Si 含量发生亚共晶。

3.1.2 电子束焊

电子束焊没有像激光焊那样展示出不同的区域^[11]。所有的电子束焊缝都含有一定量的 Al_4C_3 , 主要局限于熔合区的上部中心区, 焊缝外围的大部分区域无 Al_4C_3 。一般而言, 单独的针状 Al_4C_3 的数目和尺寸随着到焊缝上部中心距离的增大而减小。

聚焦方式和焊接速度对电子束焊缝 Al_4C_3 生成有较大影响。锐聚焦电子束焊缝的熔合区 Al_4C_3 极少。熔合区为非常细的胞状凝固子结构, 冷却速度快导致胞间距小 (3~4 μm), 胞间为富 Si 共晶和 SiC_p 。 Al_4C_3 呈细小针状 (<5 μm), 周围 SiC_p 溶解极少。 Al_4C_3 总体积很小, 并且未形成相互连接的网络。

散焦电子束焊 Al_4C_3 生成量增加, 单独的针状 Al_4C_3 的数目和尺寸随焦点扩散而增大。而且 SiC_p 尺寸减小, Al_4C_3 形状与激光焊焊缝上部中心区的相似。降低焊接速度, 锐聚焦焊缝中 Al_4C_3 的生成也增加。

值得注意的是, 散焦电子束焊缝和低速锐聚焦焊缝沿 Al_4C_3 无单质 Si 块, 这可能是由于电子束焊在真空室中进行, Si 容易挥发, 也可能是由于 SiC_p 分解少使焊缝以亚共晶方式凝固。

3.2 不同高能束焊接的焊缝对比

宇航材料工艺 2005年 第4期

SiC_p/Al 激光焊和电子束焊焊缝组织的不同归因于基体材料对能量吸收机理的差异^[15]。

3.2.1 激光焊

由于金属表面反射掉大部分的入射激光能, 而上部中心区的 SiC_p 能够吸收大部分激光能, 因此小孔周围的液态铝合金只吸收少量激光能, 而行进中的小孔气液相界面处的 SiC_p 优先吸收了大部分激光能。于是 SiC_p 被快速加热, 温度高于铝基体, 热量则通过界面传向基体。尽管熔池的平均温度低于铝合金的气化温度, 由于 SiC_p/Al 界面局部温度很高, 根据三元相图足够使 SiC_p 溶解。这样就在小孔周围形成 Al-Si-C 的均匀液态熔体。在随后的冷却过程析出 Al_4C_3 和游离 Si , 该区焊接时完全是液体, 和其它小孔焊接一样, 容易发生对流换热。

部分反应区和未反应区离开小孔一定距离, 没有激光束的直接加热, 有更多的 SiC_p 保留下来。熔池高黏度和铝基体的高热导率决定了熔池的主要导热方式是热传导, 任意一点处发生 SiC_p 置换反应生成 Al_4C_3 的程度取决于该点在临界反应温度以上的驻留时间。部分反应区 (PRZ) 经受的焊接热循环有足够高的温度和足够长的驻留时间促使 Al_4C_3 生成, 而未反应区 (URZ) 所经受的热循环不足以促使 Al_4C_3 生成。

因此, 激光焊时 Al_4C_3 有两种生成机理, 上部中心区 Al_4C_3 由 SiC_p 饱和溶液冷却析出, 而部分反应区 (PRZ) 的 Al_4C_3 由 SiC_p 按置换反应形核长大。张德库等人对 $\text{SiC}_p/\text{LD2}$ 激光焊的研究发现, 由液态直接析出的 Al_4C_3 取向随机, 并有一部分 Al_4C_3 呈弯曲状, 而置换反应生成的 Al_4C_3 细且直, 并与 SiC_p 有一定的取向关系^[16]。

通过控制连续和脉冲 CO_2 激光器的占空比与热输入, 可以控制 Al_4C_3 的生成量^[17]。

3.2.2 电子束焊

与激光焊不同, 电子束焊靠高速电子撞击母材将动能转化成热能, 实现对母材的加热。与激光焊相同, 母材的蒸发导致小孔形成。在 SiC_p/Al 电子束焊接时, 能量不会被铝合金基体或 SiC_p 选择吸收, 因此加热比激光焊均匀。由于两种相都不优先选择吸收能量, 而铝基体的体积比远大于 SiC_p , 所以大部分能量用于加热铝基体。电子束焊热循环快, SiC_p/Al 界面高温停留时间短, 因此 SiC_p 的溶解和

分解都受到限制。由于熔体中含 SiC_p 黏度高,并且铝基体的热导率大,整个熔池的传热方式与激光焊中 PRZ和 URZ相似,受热传导控制。于是热量由作用区迅速传到熔池的其他部位, Al_4C_3 生成的程度主要取决于温度和驻留时间。

锐聚焦高焊速焊缝只在上部中心区有少量 Al_4C_3 生成,这是由于该区靠近电子束直接作用的高温区。减小焊接速度,焊接热循环慢,在 SiC_p 溶解温度以上的驻留时间增加,因此 Al_4C_3 生成增多。散焦焊束斑有效尺寸增大,导致温度梯度变缓,熔池变宽变长,焊缝中每一点在 SiC_p 溶解温度以上的驻留时间增加, Al_4C_3 生成也要增多。

4 解决焊接问题的措施

为解决 SiC_p/Al 焊接时的成形、气孔,尤其是脆性相生成问题,除了选取合适的工艺参数,还可借助特殊的辅助工艺。

4.1 采用非增强中间层

J. Pan等进行了 $\text{SiC}_p/\text{LF2}$ 与 LF2 之间的电子束焊接研究^[18]。发现当束电流和焊接速度被控制在 3.6~3.4 mA和大约 400 mm/min,而且电子束从焊缝中心偏向铝合金一侧 0.2 mm时,可得到较好的焊缝,其强度达到基体的 76%。

Busch等认为,电子束焊接 SiC_p/Al 的关键是使材料熔化但不能使陶瓷相分解。因此可以采用非增强的中间层,通过熔化该中间层来间接熔化增强材料的边缘,借此实现熔合连接。该过程中会有一些颗粒增强物进入熔池中,提高焊缝的强度。为获得足够高的力学性能应尽可能减少中间层厚度^[14]。

4.2 原位焊接-合金化

为防止在焊缝中形成有害的针状 Al_4C_3 ,H. M. Wang等采用钛作合金化元素进行原位焊接-合金化,实现 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 的激光焊接。该方法也是采用中间层工艺。研究表明,针状 Al_4C_3 完全消除,焊接接头因含有快速凝固形成的 TiC 、 Ti_3Si_3 和 Al_3Ti 而得到强化,但是在部分熔化区形成大的气孔^[19]。

根据 Al_4C_3 、 TiC 和 SiC_p 生成自由能随温度的变化曲线,分析了钛的作用机理。高于 800 时 TiC 的生成自由能远比 Al_4C_3 低,即 Ti 对 C 的亲合力更大。因此在原位合金化焊接熔池的凝固过程中 TiC 优先形成,完全抑制了焊缝中心区 Al_4C_3 的生成。但是在焊缝熔合区和部分熔化区之间的过渡区, Ti

元素含量较低,仍有少量 Al_4SiC_4 生成。增加中间层厚度,提高焊缝中 Ti 元素含量,焊缝中除 TiC 、 Ti_3AlC 和初始 Si 外,还有 Ti_3Si_3 和 Al_3Ti 等新相生成。

陈彦宾等人采用高强钛合金,对 $\text{SiC}_p/6063\text{Al}$ 进行脉冲激光焊,不仅完全抑制了焊缝中心区的 Al_4C_3 生成,而且明显改善了熔池的流动性,减少了焊缝中孔洞、气孔、未熔合等缺陷^[20]。

陈永来等人还研究了 Ni 对 $\text{SiC}_p/6061\text{Al}$ 激光焊缝显微组织的影响,发现采用 Ni 片进行焊缝原位合金化,可以提高 C 的活度,促进石墨析出,从而部分地抑制脆性相 Al_4C_3 的形成,并获得以 Al_3Ni 等相为增强相的复合材料焊缝组织。但是因合金元素 C 的严重烧损,在焊缝心部形成了粗大气孔^[21]。

4.3 对 SiC_p 和 Al 基体改性,控制界面行为

SiC_p/Al 界面行为在两个方面影响焊接过程和接头性能。一是液态铝基体对 SiC_p 的润湿性,二是 SiC_p/Al 界面之间生成脆性相 Al_4C_3 的反应。

4.3.1 润湿行为的改善

温度低于 950 时, $\text{Al}-\text{SiC}_p$ 系呈现出非润湿性(接触角 $\ll 90^\circ$)。温度达到 950 时出现液态铝对 SiC_p 的润湿转变($>90^\circ$),这归因于高真空下氧化层对液态铝表面性能的影响在 950 消失。低温(700~900)反应研究表明,在仔细控制的条件下,在液态 Al 和固态 SiC_p 之间形成一个氧化膜界面,该界面引起接触角的变化^[22~23]。

向 Al 中添加 Mg 、 Ca 、 Ti 或 Zr 能够降低液态金属表面张力、减小液态金属的固-液界面能或者通过化学反应引起润湿转变,从而提高润湿性。在 SiC_p 表面制备可润湿的金属涂层,如 Ni-Cu 以及 Ag-Cu-Cr 涂层,尤其是 Ni 涂层可以获得良好的润湿^[24]。B. S. Murty等人采用浸润动力学的动态润湿性测量技术,研究了 Al-Al-Li 和 Mg 对 SiC_p 的润湿,发现浸渗动力按 Al-Al-Li 和 Mg 的顺序增加,表明熔融的 Al-Li 和 Mg 对 SiC_p 的润湿性优于 Al ;在 SiC_p 上涂 Cu 和 Ni 在一定程度上改善了 Al 的浸渗动力^[25]。

另外,在 SiC_p 表面沉积 Si 薄层也能促进液态铝在 SiC_p 基片上的铺展。M. I. Pech-Canul等人的研究表明, SiC_p 表面自由 Si 显著减小接触角,其有利影响归因于 SiC_p 和 Al 参与的化学反应;铝合金中

Mg的存在对总的润湿驱动力有利^[26]。

通过对 SiC 氧化或在 SiC 表面制备 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 涂层,也能改善液态铝对 SiC_p 的润湿^[27~28]。B. S Murty等发现,在高温下 SiC_p 氧化可以获得比金属涂层更优的浸渗动力^[25]。

4.3.2 抑制 Al_4C_3 相的生成

抑制 Al_4C_3 生成的方法包括向铝基体中添加 Si 在 SiC_p 表面制备涂层以及对 SiC_p 进行钝化氧化。向 Al 基体中添加 Si 是迄今为止最成功的方法,其缺点是 Si 含量过高会降低强度和塑性。在 SiC_p 表面制备金属涂层的方法成本高且不能保证在高温下界面结构的稳定性。对 SiC_p 进行钝化氧化并配合对基体的改进,这种方法近来得到了广泛重视。Jae-Chul Lee 等人的研究表明,对 SiC_p 的钝化氧化导致 SiC_p 上 SiO_2 非晶层的形成。 SiO_2 层通过与 Al 基体中的 Mg 反应,转变成 MgO 或 MgAl_2O_4 ,这取决于 Mg 含量和温度。具有 MgAl_2O_4 或 MgO 界面的复合材料不含 Al_4C_3 ,即使在 720 以上长期暴露也是如此。这种界面足以使 SiC_p 和 Al 基体分开,于是避免 Al_4C_3 的生成,即使在低 Si 的 $\text{SiC}_{\text{OX}}/\text{Al}$ 复合材料中也会起到这种作用^[29~30]。

5 结语

对 SiC_p/Al 采用快速热循环和低热输入的电子束焊和激光焊,有助于克服熔化焊温度过高所引发的缺陷。激光焊的焊缝成形能力优于电子束焊,而电子束焊在抑制有害相 Al_4C_3 的生成方面具有明显优势,二者都便于采用非增强中间层和原位合金化工艺改善焊缝成形、抑制有害相生成并在一定程度上使焊缝得到强化,但焊缝气孔问题仍未得到有效解决。从界面控制(包括润湿和反应)的角度,研发特殊成分填充材料、对铝基体成分体系加以改进、对增强体 SiC_p 表面进行改性处理,有可能改善焊缝成形和接头性能。

参考文献

- 1 Lienert T J et al Microstructural development in laser and electron beam welds on A356/SiC/15P. In: Processing, properties and applications of cast metal matrix composites Cincinnati, Ohio, USA, 1996: 33 ~ 54
- 2 夏德顺. 铝基复合材料焊接研究述评. 导弹与航天运载技术, 1999; (6): 38 ~ 46
- 3 Thaw C. MMC microwave packaging components 宇航材料工艺 2005年 第4期

SAMPE Journal, 1987; 23(11): 40 ~ 43

4 苏世民. 高密度、高性能 IC 封装的现状未来发展趋势及今后的对策. 半导体技术, 1994; (4): 64

5 Zveben Carl Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging JOM, 1998; 50(6): 47 ~ 51

6 饶勤. 从 F-22 看第四代战斗机机载设备制造技术. 航空周刊, 1996; 30: 1 ~ 3

7 Ellis M B D. Joining of aluminum based metal matrix composites International Materials Reviews, 1996; 41(2): 41 ~ 58

8 隋贤栋, 罗承萍, 欧阳柳章, 骆灼旋. $\text{SiC}_p/\text{ZL109}$ 复合材料中 SiC 的界面行为. 复合材料学报, 2000; 17(1): 65 ~ 70

9 Stefanescu D M, Dhindaw B K, Kacar A S et al Behavior of ceramic particles at the solid-liquid metal interface in metal matrix composite Metall Trans, 1988; 19A(11): 2 847 ~ 2 855

10 张坤, 陈光南. 激光作用下 $\text{SiC}_p/\text{A356}$ 复合材料的快凝组织形成. 复合材料学报, 2000; 17(1): 115 ~ 118

11 Lean P P, Gil L, Urena A. Dissimilar welds between unreinforced AA6082 and AA6092/SiC/25p composites by pulsed MIG arc welding using unreinforced filler alloys (Al-5Mg and Al-5Si). Journal of Materials Processing Technology, 2003; (143/144): 846 ~ 850

12 Huang R Y, Chen S C, Huang J C. Electron and laser beam welding of high strain rate superplastic Al-6061/SiC composites Metallurgical and Materials Transactions A, 2001; 32A(10): 2 575 ~ 2 584

13 Reynolds G H et al Plasma joining of metal matrix composites Rep. ARO - 22817, 6 - MS - S, Army Research Office, Triangle Park, NC, 1988

14 Busch W B et al Electron beam and friction welding of metal matrix composites In: 6th european conference on composite materials (ECCM6), Bordeaux, France, Woodhead Publishing, CB16AH, UK, 1993: 545 ~ 551

15 Lienert T J et al Laser and electron beam welding of SiC_p reinforced aluminum A-356 metal matrix composites Scripta Metallurgica et Materialia, 1993; 28(11): 1 341 ~ 1 346

16 Zhang Deku, Chen Yanbin, Niu Jitai, Ji Guojuan Mechanism of laser welding of SiC reinforced LD2 aluminum metal matrix composites China Welding, 2001; 10(2): 37 ~ 41

17 American Welding Society Welding Handbook Vol 3. Materials and Applications-Part I. Eighth Edition, 1996: 377 ~ 378

18 Pan J et al An analysis for welding processing and properties of SiC/Al composites Pittsburgh, P A. In: MRS international meeting on advanced materials, 1st, Tokyo, Japan, Materials Research Society, 1998; A90 - 33959: 14 ~ 23

19 Wang H M, Chen Y L, Yu L G In-situ weld-alloying/laser beam welding of /6061AlMMC. Materials Science and Engineering, 2000; A293: 1 ~ 6

20 陈彦宾, 张德库, 牛济泰, 冀国娟. 激光焊接铝基复合材料钛的原位增强作用. 应用激光, 2002; 22 (3): 320 ~ 322, 338

21 陈永来, 于利根, 王华明. 合金化填充材料 Ni对 SiC_p/6061Al复合材料激光焊接焊缝显微组织的影响. 复合材料学报, 2000; 17 (4): 63 ~ 65

22 Warren R, Anderson C H. Silicon carbide fibers and their potential for use in composite materials, Part . Composites, 1984; 15: 101 ~ 111

23 Laurent V, Chatain D, Eustathopoulos N J. Wettability of SiC by aluminum and Al - Si alloys Mater Sci , 1987; 22 (1): 244 ~ 250

24 Hashin J, Looney L, Hashin M S J. The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy. Journal of Materials Pro-

cessing Technology, 2001; 119: 324 ~ 328

25 Murty B S, Thakur S K, Dhindaw B K On the infiltration behavior of Al, Al - Li, and Mg melts through SiC_p bed Metallurgical and Materials Transactions A, 2000; 31A: 319 ~ 324

26 Pech-Canul M I, Katz R N, Makhlof M M. Optimum parameters for wetting silicon carbide by aluminum alloys Metallurgical and Materials Transactions A, 2000; 31A: 565 ~ 573

27 Kelly A, Mileiko S T Handbook of Composites Vol 4. Elsevier Science Publishers, 1984

28 Laurent V, Chatain D, Eustathopoulos N. Wettability of SiO₂ and oxidized SiC by aluminum. Mater Sci Eng A, 1991; 135: 89 ~ 94

29 Jae-chul Lee, Jae - pyoung Ahn, Zhongliang Shi et al Methodology to design the interfaces in SiC/Al composites Metallurgical, Materials Transactions A, 2001; 32A: 1 541 ~ 1 550

30 Jae-chul Lee, Jae-pyoung Ahn, Zhongliang Shi et al Modification of the interfaces in SiC/Al composites Metallurgical and Materials Transactions A, 2000; 31A: 2 361 ~ 2 368

(编辑 吴坚)

(上接第 11 页)

31 黄玮, 傅依备, 王朝阳等. 甲基乙烯基硅橡胶泡沫的辐射效应. 辐射研究与辐射工艺学报, 2001; 19 (2): 99 ~ 104

32 张丽新, 刘海, 杨士勤等. 航天器太阳能电池用硅橡胶粘结剂的低温性能. 合成橡胶工业, 2002; 25 (1): 9 ~ 11

33 Pollard H E, Barton W R. Technical aspects of the intelsat V solar assay. Conference Record of the Sixteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference Moscow, 1982: 31 ~ 35

34 Koch J. RTV - S695 a new adhesive for solar cell cover-glasses In: Proceeding of an international symposium on spacecraft materials in space environment, ESA - SP - 178, 1982: 3 ~ 7

35 郭勇, 杨立明. 空间级有机硅橡胶. 高分子通报, 2000; (2): 79 ~ 83

36 杨始燕, 汪倩, 谢择民. 空间级加成型室温硫化硅橡胶粘结剂的研究. 宇航材料工艺, 2000; 30 (1): 42 ~ 45

37 杨始燕, 谢择民. 系列空间级室温硫化硅橡胶. 有机硅材料, 2000; 14 (3): 3 ~ 6

38 杨始燕, 谢择民, 高伟等. 高性能多功能硅橡胶的研究. 橡胶工业, 2000; 47 (12): 716 ~ 719

39 曾一兵, 张廉正, 胡连成. 俄罗斯空间有机热控涂层发展的现状及动向. 宇航材料工艺, 1999; 29 (6): 57 ~ 59

40 江经善. 卫星控制技术. 北京: 宇航出版社, 1991: 147

41 谭必恩, 郝志永, 曾一兵等. 低太阳吸收率加成型有机硅热控涂层的研制. 中国空间科学技术, 2001; 21 (3): 16 ~ 22

42 曾一兵, 熊春晓, 王慧等. 防静电白色热控涂层的空间环境性能试验. 中国空间科学技术, 2002; 22 (2): 63 ~ 66

43 张开. 硅烷偶联剂对硅橡胶粘结性的影响. 粘合剂, 1991; (3): 2 ~ 6

44 吴国庭. 密封材料空间环境失效分析. 中国空间科学技术, 1997; 17 (6): 40 ~ 43

45 王金亭, 谢择民. 硅氮化合物对硅橡胶压缩变形的影响. 特种橡胶制品, 1981; (6): 17

(编辑 吴坚)