

SiC_p/Al 复合材料的研究方法现状

平延磊* 贾成厂 曲选辉 周成

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: SiC 颗粒(SiC_p)增强铝基复合材料因其制备工艺灵活, 热物理性能优异及可设计性等许多独特的优点而具有很好的应用前景。本文综述了 SiC_p 增强铝基复合材料的研究和进展, 阐述并比较了几种该复合材料的制备工艺, 包括搅拌铸造法、压力铸造法、无压渗透法、喷雾沉积法、离心铸造法和粉末冶金法等。

关键词: SiC 颗粒; 铝基复合材料; 研究方法

Present state of research methods for the SiC_p/Al composites

Ping Yanlei, Jia Chengchang, Qu Xuanhui, Zhou Cheng

(School of Materials Science and Engineering, University of Science
and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The research and development of SiC particle (SiC_p) reinforced aluminium matrix composite are summarized. Several manufacturing methods of this kind of composite, such as stir casting method, pressure casting method, pressureless infiltration method, spray deposition method, centrifugal casting method and powder metallurgy method, are discussed.

Key words: SiC particle (SiC_p); aluminium matrix composite; research methods

1 前言

近年来在金属基复合材料中, 以颗粒、短纤维、晶须等非连续相增强的铝基复合材料(SiC Reinforced Aluminium Matrix Composite)因其良好的可再加工性和各向同性而倍受重视。由于其具有高的比强度、比刚度、导热性, 优良的摩擦性能, 与铝合金密度相当, 以及可调配的热膨胀系数等优点而成为目前国内外专家学者研究的热点之一。而 SiC_p 价格低廉, 来源广泛, 用它作为增强相, 可以改善铝基或铝合金基体的高、低温强度, 提高其弹性模量, 增强其耐磨性能^[1~3]。所以铝基复合材料受到人们越来越广泛的关注, 国内外已对其进行了大量的研究报道。

2 SiC_p 增强铝基复合材料的制备工艺

目前生产 SiC_p/Al 复合材料的方法主要有搅拌铸造法、压力铸造法、无压渗透法、喷雾沉积法、离心铸造法和粉末冶金法等。

2.1 搅拌铸造法

搅拌铸造法突出的优点是对设备要求低、工艺简单、易于实现, 是制造铝基颗粒增强复合材料最常用的方法。图 1 为其示意图。

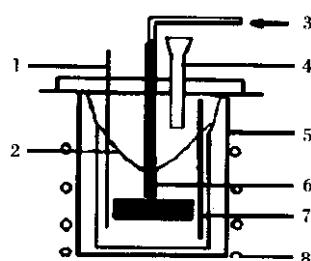
搅拌铸造法分为液相法和半固态法两类。

液相法是利用电磁或机械搅拌, 在基体金属完全是液相的状态时向旋涡中逐渐投入颗粒, 使其分散, 待颗粒等增强物得到润湿、分散均匀后浇入金属模型中(或再进行挤压), 制成复合材料^[4~6]。文

* 平延磊, 硕士研究生, 主要从事复合材料的研究

收稿日期 2003-06-19

通讯联系人: 贾成厂, 博士, 教授。E-mail: jcc@mater.ustb.edu.cn
万方数据



1 热电偶 ; 2 液面 ; 3 保护气 ; 4 加 SiC_p 装置 ;
5 炉体 ; 6 搅拌装置 ; 7 石墨挡板 ; 8 感应线圈

图 1 搅拌铸造法示意图

文献^[7]中用搅拌铸法制备 SiC_p 增强铝基复合材料是先将铝锭放入坩埚, 待其熔化后加入镁块, 急速搅拌使之形成快速流动的旋涡。在旋涡中心投入 SiC_p (SiC_p 的质量分数为 12% ~ 20%), 继续搅拌 10 ~ 20 min(搅拌速度为 950 r/min, 熔体温度约 730 °C), 然后迅速倒入通水激冷的铸模, 得到复合材料。文献^[8]对处于熔点以上的铝液及 SiC_p 施加一定时间的电脉冲, 由此制得的复合材料, 增强相颗粒分布均匀, 基体合金晶粒细小, 致密度、强度、耐磨性均较高。

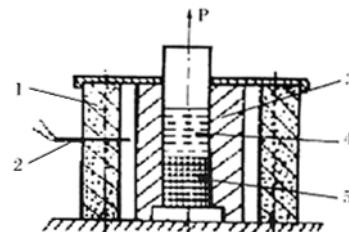
半固态铸造法是金属在熔点附近, 液相及非枝晶固相共存状态下, 把增强物加入到剧烈搅动的含有一定组分固相粒子的金属液中。这时, 即使增强物和金属液润湿不好, 但由于金属液中固相粒子的作用, 也可使之得到较好的分散, 然后铸造成近终形复合材料^[9]。文献^[10]是使铝在 760 °C 熔化后, 降温至固相线与液相线之间, 搅拌熔体, 并加入 SiC_p 。因 SiC_p 的加入, 会使熔体的粘度上升, 随着粘度的上升再适当提高温度。待 SiC_p 加完后, 再升温至 760 °C, 短时间急速搅拌使颗粒均匀地分布在熔体中, 然后浇铸成型。

该方法制得的材料凝固组织晶粒细小、均匀, 没有粗大的树枝晶, 可以消除颗粒在熔体中的偏析。由于金属温度接近固相线温度, 因此能消除金属从液相到固相凝固收缩引起的收缩缺陷, 以及避免熔体因剧烈翻腾而大量吸人气体, 但残留在半固态金属液中的气体和夹杂物不易排除^[11]。

2.2 压力铸造法

压力铸造法被认为是适合大规模生产铝基复合材料的主要工艺之一。近年来得到了很快的发展, 在颗粒、晶须或短纤维增强的实用铝基复合材料的制

造中应用最多, 且最为成功。图 2 为压力铸造法示意图。



1 电阻炉 ; 2 热电偶 ; 3 压铸模具 ; 4 金属液体 ; 5 增强颗粒

图 2 压力铸造法示意图

压力铸造法制备 SiC_p 、晶须或短纤维增强铝基复合材料的工艺过程是首先把 SiC_p 制成预制块, 让铝或铝合金液在压力作用下渗入到预制块内制成复合材料^[12~15]。文献^[16]是将 SiC_p 与水及粘结剂充分搅拌混合后放入模具内加压至 5 MPa, 随后在 80 °C 恒温箱内烘 48 h 出模, 获得具有一定强度的预制块, 其孔隙度为 60%。压铸模和预制块预热至 500 °C, 铝液加热至 800 °C 浇注, 然后立即加压使铝液渗入预制块, 在 125 MPa 的压力下保压 3 min, 除去压力待其自然冷却后出模。制得的复合材料中含 SiC_p 的体积分数为 40%。文献^[17]是向预热的 750 °C 模具中加入 800 °C 的 SiC_p 后, 在 50 MPa 的压力下保压 30 s 使铝液渗入, 再在 1 100 °C 烘烧 4 h, 制得 SiC 体积分数为 50% ~ 71%, 热导率为 102 ~ 170 W/(m·K), 热膨胀系数为 $(6 \sim 10) \times 10^{-6}/\text{K}$ 的铝基复合材料。

压力铸造法制备复合材料工艺难度相对较大, 主要是制备 SiC_p 或粉末预成形坯块比较困难, 强度不高, 预制块在压渗过程中易崩溃, 而且金属熔体不易充分地渗入到颗粒或粉末预成形坯内, 最近的研究表明^[12, 14]通过增大压力的方法可以实现熔铝在粉末或颗粒预成形坯中的渗透。

2.3 无压渗透法

无压渗透法是预先把增强体用适当的粘结剂粘结, 做成所需形状的预制坯, 然后将预制坯放在金属模具型腔内的适当位置, 浇注金属液, 利用金属液体的自重压力和表面张力, 使其渗透到有增强体的预制坯中, 凝固后即成所要求的金属基复合材料^[18, 19]。这种方法主要适用于颗粒增强体和金属基材料的界面润湿性良好的金属基复合材料的制备。图 3 为无压渗透法示意图。

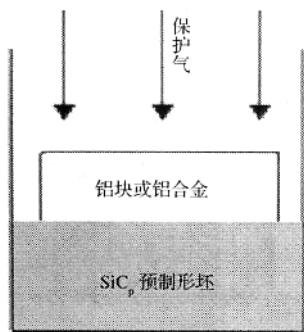


图 3 无压渗透法示意图

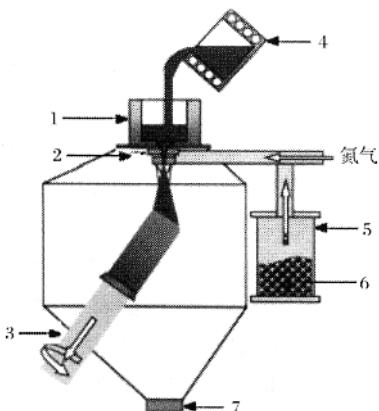
文献 [19] 研究并对比了在 900 ℃、N₂ 中 , 不同的渗透时间内 , 不同镁含量对铝液和 SiC_p 间润湿性的影响 , 发现镁的质量分数大于 8% , 渗透时间在 5 min 以上时 , 两者之间的润湿角可小于 90°。

文献 [20] 在 850~950 ℃、空气中、常压下 , 通过助渗剂作用 , 使铝合金液自动地渗入 SiC_p 间的孔隙 , 制备电子封装用复合材料。

由于此方法中的金属液体能较好地浸润增强相的表面 , 为获得良好的界面结合创造了条件 , 且工艺相对压力铸造法简单 , 便于操作。但这种方法的关键是解决渗透气氛和颗粒之间润湿性的问题。同时还存在预制坯预热临界温度不好控制 , 浸渗时压力和金属液温度也不易掌握等问题。

2.4 喷射沉积法

喷射沉积法是将液态金属在高压下雾化 , 当液态金属从漏斗中流出的同时 , 将增强体粒子喷入金属液流中 , 两相混合的雾化液滴沉积在容器中形成复合材料^[21, 22]。图 4 为喷射沉积法示意图。



1 漏斗 ; 2 气体喷雾器 ; 3 底层驱动系统 ;
4 氮气 ; 5 喷嘴 ; 6 增强体粒子 ; 7 收集器

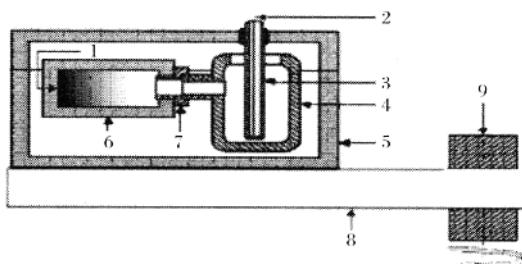
万方数据

文献 [23] 采用工业纯铝(纯度为 99.9%)与平均粒度为 2~3 μm 的 SiC_p 喷射沉积制得 SiC_p 的体积分数为 35% 的 SiC_p/6066 铝基复合材料。材料中 , 孔隙数量少、尺寸小 , SiC_p 分布均匀。

此法因在喷射沉积过程中冷却速度很快 , 界面反应受到抑制 , 使 SiC 和铝界面之间有害的化学反应来不及完全进行 , 所以强化颗粒分布均匀。由于增强体粒子在气流推动下高速射入熔体 , 所以对界面的润湿性要求不高 , 还可以消除颗粒偏析等不良组织。但 SiC_p 与基体金属是机械结合 , 使得材料的抗拉强度有限。另外还有孔洞 , 不适宜制备近终形产品。

2.5 离心铸造法

离心铸造法是在高速旋转的 SiC_p 多孔预制形体中均匀浇铸金属铝熔体 , 使其在离心压力作用下渗入粒子的间隙 , 凝固后得到被 SiC 粒子化的陶瓷颗粒增强铝基复合材料^[24~26]。图 5 为离心铸造法示意图。



1 SiC_p; 2 热电偶 ; 3 铝管 ; 4 坩埚 ;
5 真空室 ; 6 模具 ; 7 喷口 ; 8 旋转轴 ; 9 旋转轴

图 5 离心铸造法示意图

文献 [27] 中用离心铸造法制备了 SiC_p/Al 复合材料。在浇铸温度为 750 ℃ , 模具温度为 20 ℃ 下制备了 SiC 体积分数为 10% 的铝基复合材料 , 其中 SiC_p 的平均粒度为 37.5 μm。

目前 , 国内外学者对用离心铸造法制备 SiC_p/Al 复合材料还研究较少 , 但该方法可能会成为研制优质 SiC_p 增强铝基复合材料最有成效的技术之一。

2.6 粉末冶金法

粉末冶金法制备 SiC_p/Al 复合材料是先将 SiC_p 、铝粉和成形剂混合后压制而成形 , 经过脱脂、烧结成为近终形成品^[28, 29]。

在文献 [30] 中用粉末冶金法制备 SiC_p/Al 复合材料。按设计成分 , 以酒精作分散剂进行球磨。混

合 14 h 后烘干、除气, 再冷压成坯, 然后在自动化热压炉中热压, 压力为 23 MPa。热压时, 采用流动高纯氩气保护。为了便于脱模, 先在 400 ℃ 保温 20 min, 再升温 600 ℃。

粉末冶金法的最大优点在于成分的自由度宽。这种方法可以很好地控制复合材料的成分, 从理论上讲是可以任意的配比, 而且粉末冶金工艺也比较成熟。用粉末冶金方法制备 SiC 增强铝基复合材料时, SiC_p 与铝基体可以良好地融合成一体, 在 SiC 含量不同层间没有明显的界面。可将不同配比的粉末填铺模具中, 冷压成形后再进行热压。当疲劳裂纹从 SiC_p 的高含量层向低含量层扩展时会发生偏折和分枝, 从而出现裂纹延滞现象。但国内外学者用粉末冶金法来制备 SiC_p/Al 复合材料的不太多。其原因是烧结过程不易控制, 造成材料中孔隙多, 而且在后续处理过程也不易消除, 工业化成本较高。但粉末冶金法生产 SiC_p/Al 复合材料的前景十分广阔, 很值得探索。

粉末冶金方法的优点还体现于在其他工艺中所起的作用。例如在电子材料的封装壳体中所使用的 SiC_p/Al 复合材料。为了与基片材料的热膨胀系数的匹配, 往往需要 SiC 的体积分数达 60% ~ 70%, 而且, 为了得到高的密度与性能, 一般需要采用压力熔浸法来制造。但是由于 SiC 的含量多, 所制备的材料往往难以进行后续加工。这就需要预先将 SiC_p 制备成近终使形的预制坯, 再将 Al 熔浸入预制坯内的孔隙, 形成致密的复合材料。而预制坯的制备采用的就是粉末冶金方法^[31]。为了精确地控制预制坯在成形与预烧结过程中尺寸的变化、预制坯的微观组织及孔隙的分布, 以得到符合外观、形状、组织与性能要求的复合材料, 都需要相应的粉末冶金的知识。

3 展望

现代科学技术的发展对材料的要求越来越高, 特别在电子封装领域。随着电子器件和电子装置中元器件日益复杂性和密集, 开发低膨胀、高导热及其他性能也都满足要求的电子元器件封装材料已成为当务之急^[32~34]。SiC_p 增强铝基复合材料, 由于制备工艺灵活、热物理性能优异及可设计性等许多独特的优点, 在航空航天、先进武器系统、光学精密仪器、电子器件、汽车工业和体育用品等领域将得到了更加广泛的应用。
万方数据

参考文献

- 1 Byung-Chul Ko, Gyeong-Su Park, Yeon-Yoo. The effects of SiC particle volume fraction on the micro-structure and hot workability of SiC_p/AA2024 composites. *J Mat Pro Tec*, 1999, 95: 210~215
- 2 Liu Cheng, Qin Shuyi, Zhan Guoding, et al. Micromechanical properties of high fracture performance SiC_p-6061Al/6061Al composite. *Mat Sci Eng* 2002, A332: 203~209
- 3 张强, 陈国钦, 姜龙涛等. 高体积分数 SiC_p/Al 热膨胀系数与 SiC 含量的相关性. 第十二届全国复合材料学术会议论文集: 复合材料·生命·环境与高技术. 天津 天津大学出版社, 2002: 478~480
- 4 Gu Mingyuan, Mei Zhi, Jin Yanping, et al. Structure and amorphization of the oxide on the silicon carbide surface in a SiC_p/Al composite. *Scripta Materialia*, 1999, 40(9): 985~991
- 5 Hashim J, Looney L, Hashmi M S J. The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites. *J Mat Pro Tec* 2001, 119: 329~335
- 6 Seo Young-Ho, Kang Chung-Gil, et al. The effect of applied pressure on particle-dispersion characteristics and mechanical properties in melt-stirring squeeze cast SiC_p/Al composites. *J Mat Pro Tec*, 1995, 55: 370~379
- 7 任德亮, 齐海波, 丁占来等. SiC_p/Al 复合材料搅拌铸造制备工艺的研究. *铸造技术*, 1999, (2): 41~43
- 8 刘兴江, 曹丽云, 王建中. 脉冲电场作用下 SiC_p2014 颗粒增强铝基复合材料的制备. *轻合金加工技术*, 2002, 30(4): 45~46
- 9 郝远, 陈体军, 马颖. SiC_p/ZA27 复合材料的制备及其力学性能. *特种铸造及有色合金*, 1997, (2): 25~28
- 10 孟宪云, 张峻巍, 陈彦博等. 半固态复合熔铸过程中 SiC 与 2A11 合金的润湿性. *中国有色金属学报*, 2001, 11(2): 77~80
- 11 裴清祥, 郑伯欧, 卢震. 金属半固态铸造形成技术. *冶金设备*, 1996, (4): 21~25
- 12 Candan E, Ahlatci H. Abrasive wear behaviour of Al-SiC composites produced by pressure infiltration technique. *Wear* 2001, 247: 133~138
- 13 Careeno-Morelli E, Cutard T, Schalle R. Processing and characterization of aluminium based MMCs produced by gas pressure infiltration. *Mat Sci Eng*, 1998, A251: 48~57
- 14 祝要民, 谢敬佩, 李晓辉等. SiC_p/ZA27 复合材料界面微结构分析及高温蠕变性能. *复合材料学报*, 2002, 19(4): 42~45
- 15 喻学斌, 张国定, 吴人洁. 真空压渗铸造铝基电子封装复合材料研究. *材料工程*, 1994, 6(4): 9~12
- 16 李志林, 杨艳, 刘伟. SiC_p/Al 复合材料的压铸法制造工艺的研究. *辽宁工学院学报*, 1995, 15(4): 15~17
- 17 Hyo S. Lee, Kyung Y. Jeon et al. Fabrication process and thermal properties of SiC_p/Al metal matrix composites for electronic packaging applications. *J Mat Sci*, 2000, 35: 6231~6236
- 18 Pech-Canul M I, Katz R N, Makhlof M M. The role of silicon in wetting and pressureless infiltration of SiC_p performed by aluminum alloys. *J Mat Sci*, 2000, 35: 2167~2173
- 19 Zulfia A, Hand R J. The production of Al-Mg alloy/SiC metal matrix composites by pressureless infiltration. *J Mat Sci*, 2002, 37:

955~961

- 20 钟涛兴,毛卫民,吉元. SiC_p/Al 复合材料无压自渗透工艺. 北京工业大学学报,1995,21(3):43~44
- 21 刘兴江,崔华,张济山. 雾化沉积 $\text{SiC}_p/2014$ 复合材料的时效. 金属热处理,1997(4):28~29
- 22 甘永学. 铸造铝基复合材料的研究的进展. 轻合金加工技术,1994,20(12):6~12.
- 23 张丽英,吴成义,林耀军等. 喷射共沉积 SiC_p/Al 复合材料的组织与力学性能. 粉末冶金技术,1997(3):203~207
- 24 胡国新,田芬蔚,王明磊等. 离心渗铸工艺中铝熔体在 SiC 多孔介质内的渗流传热过程. 复合材料学报,2002,19(6):25~30
- 25 Sui Xiadong, Luo Chengping, Luo Zhuoxuan, et al. The Fabrication and Properties of Particle Reinforced Cast Metal Matrix Composites. J Mat Pro Tec,1997,63:426~431
- 26 Smiles D E. Centrifugal filtration of particulate systems. Chemical Engineering Science. 1999,54:215~224
- 27 Velhinho A, Sequerra P D, Martins R, et al. X-ray tomographic imaging of Al/SiC_p functionally graded composites fabricated by

centrifugal casting. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 2003, B200:295~302

- 28 黄泽文. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料在高速机械中的应用. 首届海内外中华青年学者材料科学技术研讨会论文摘要集. 1995:64
- 29 王治海. 碳化硅颗粒增强铝合金复合材料特性. 中国有色金属学报,1995,5(3):123~125
- 30 许富民,齐民,朱世杰等. SiC 颗粒增强铝合金复合材料. 金属学报,2002,38(9):998~1001
- 31 平延磊,贾成厂,曲选辉等. SiC_p/Al 电子封装复合材料预成形坯的制备. 北京科技大学学报,2004,26(3):301
- 32 吴人洁. 金属基复合材料的现状与展望. 金属学报,1997,33(1):78~84
- 33 Barrett J. Electronic systems packaging future reliability challenges. Microelectronics Reliability,1998,38:1227~1286
- 34 Zwben C. Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging. Jom,1998,50(6):47~51