

# 表面涂覆辅助叠轧制备 SiC/Al 层状复合材料的组织与力学性能

伟乐斯<sup>1,2</sup> 林颖菲<sup>2,3</sup> 刘丽荣<sup>1</sup> 冯 波<sup>2,4</sup> 冯晓伟<sup>2,4</sup> 王 娟<sup>2,3</sup>  
(1.沈阳工业大学材料科学与工程学院; 2.广东省科学院材料与加工研究所;  
3.广东省金属强韧化技术与应用重点实验室; 4.梅州市粤科新材料与绿色制造研究院)

**摘 要** 以硅溶胶搭载 SiC 增强体的混合浆料表面涂覆为辅助,采用层叠热轧工艺制备 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板,并对其显微组织与力学性能进行研究。结果表明,SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板界面结合良好,层间结合处 SiC 颗粒呈断续状均匀分布于铝箔基材间层,表面覆有 SiO<sub>2</sub> 和微量 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,这有利于界面载荷传递且使铝箔基材层的晶粒尺寸更细小和均匀。断裂机制为单相铝箔层韧性断裂与层间脱粘撕裂。与纯铝箔叠轧的纯 Al 层状复合板相比,其抗拉强度提高,伸长率下降。

**关键词** SiC/Al 层状复合材料;表面处理;层叠热轧;显微组织;力学性能

中图分类号 TB331;TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.006 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Microstructure and Mechanical Properties of SiC/Al Laminated Composite Fabricated by Surface Coating Assisted Roll-bonding

Wei Lesi<sup>1,2</sup>, Lin Yingfei<sup>2,3</sup>, Liu Lirong<sup>1</sup>, Feng Bo<sup>2,4</sup>, Feng Xiaowei<sup>2,4</sup>, Wang Juan<sup>2,3</sup>  
(1.School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology;  
2.Institute of Materials and Processing, Guangdong Academy of Science;  
3.Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application;  
4.Meizhou Yueke Institute of New Materials and Green Manufacturing)

**Abstract:** Assisted with the surface coating of the mixed slurry of silica sol carrying SiC reinforcement, the SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al composite sheet was fabricated by laminating hot rolling, and microstructure and mechanical properties of the composites were investigated. The results indicate that the interface in SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al composite sheet is well bonded and the surface is covered with a certain amount of SiO<sub>2</sub> and a small amount of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The introduced SiC particles are intermittently and evenly distributed in the interlayer of the aluminum foil substrate, which is conducive to interfacial load transfer and makes the grain size of the aluminum foil in SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al composite sheet more refine and uniform. The fracture mechanism is characterized by ductile fracture and delamination tearing of single-phase aluminum foil substrate layer. Compared with the pure-Al laminated plate, the tensile strength of the composite is increased and the elongation is decreased

**Key Words:** SiC/Al Laminated Composite, Surface Treatment, Laminated Hot Rolling, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2021-01-28;修改稿收到日期:2021-03-10  
基金项目:广东省重点研发计划资助项目(2019B010942001);广东省科技创新战略专项资助项目(2018dr005);广东特支计划资助项目(2017TQ04C645)  
第一作者简介:伟乐斯,男,1995 年出生,硕士研究生,沈阳(110870),E-mail: 709134371@qq.com  
通信作者:林颖菲,女,1989 年出生,工程师,广州(510650),E-mail: faye\_lim@126.com  
引用格式:伟乐斯,林颖菲,刘丽荣,等. 表面涂覆辅助叠轧制备 SiC/Al 层状复合材料的组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(6):688-693.  
WEI L S, LIN Y F, LIU L R, et al. Microstructure and mechanical properties of SiC/Al laminated composite fabricated by surface coating assisted roll-bonding[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):688-693.

[9] JORGE S, ARNE K, DAHLE E W. Magnesium solubility in primary  $\alpha$ -Al and heat treatment response of cast Al-7Si-Mg[J]. Metals, 2020, 10(5):614-636.

[10] RAVI C, WOLVERTON C. First-principles study of crystal structure and stability of Al-Mg-Si-(Cu) precipitates[J]. Acta Materialia, 2004, 52(14): 4 213-4 227.

[11] LENKA K, EVA T, MÁRIA C, et al. Investigation on microstructural and hardness evaluation in heat-treated and as-cast state of secondary AlSiMg cast alloys[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 32(2): 63-67.

(编辑:刘卫)

金属基复合材料以其高比强度、高比模量以及耐热、耐磨、导电、导热、抗辐射性能优良和低膨胀率等特点,被越来越广泛应用于电子、汽车工业及航空航天领域。金属基复合材料是指在金属基体中有目的地引入颗粒、晶须、纤维等兼具结构和功能特性的“增强体/功能体”,在利用材料组分本征性能的基础上,通过均匀分散和界面控制等方式调节不同组分之间的协同耦合效应、界面效应,从而提高材料的综合性能<sup>[1]</sup>。但这种制备理念下的金属基复合材料多以“均匀”的单级复合结构为特征,制得金属基复合材料在提高强度和刚度的同时,塑韧性显著下降,直到整体呈现脆性而使复合材料的应用受到限制<sup>[2,3]</sup>。近些年,研究者认识到复合构型更有利于发挥复合设计的自由度和复合材料中不同组元间的协同耦合效应,从而进一步发掘金属基复合材料的性能潜力,实现其性能指标的最优化配置<sup>[4]</sup>。研究者通过复合构型复合材料的研究,发现增强体或组元相以混杂(Hybrid)<sup>[5~7]</sup>、环状(Ring)<sup>[8]</sup>、梯度(Gradient)<sup>[9]</sup>、双连续/互穿网络(Bicontinuous/Interpenetrating Networks)<sup>[10~12]</sup>、层状(Laminate)<sup>[13~19]</sup>等分布方式能够充分发挥金属基复合材料的潜在特性。其中,增强体呈层状分布的金属复合材料由于构型相对简单、制备方法多样而备受关注。LAUNEY M E 等<sup>[13]</sup>采用冰冻铸造法(Freeze-casting),利用陶瓷浆料的定向凝固制备了陶瓷骨架,然后浸渗 Al-Si 共晶合金,制备了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al-Si 层状复合材料。通过这种有序分层设计的概念制备出的材料具有优异的损伤容限性能。LIU H S 等<sup>[14,15]</sup>通过轧制复合或叠轧法制备层状铝基或铜基复合材料,获得了高强韧性复合材料,证实层状结构设计能够避免复合材料的塑性失稳。PANG J C 等<sup>[16]</sup>通过 Ti 箔与 SiC<sub>p</sub>/Al 箔交替相叠,再轧制结合制备出 Ti-SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料,复合材料层间形成的纳米 TiAl<sub>3</sub>使材料获得良好的层间结合强度、改善了复合材料的延展性,实现了良好的强度-延展性平衡。陈超<sup>[17]</sup>运用累积叠轧法和烧结法制备了 TiCp/1060Al 多层复合材料。王志杰<sup>[18]</sup>以 Al 及 Al 基复合材料为原材料,热轧制备了 1060/Al-TiC/1060 和 1060/Al-SiC/1060 复合板,研究了材料变形量对其伸长率的影响。GRISHABE R B 等<sup>[19]</sup>将多层 SiC<sub>p</sub>/7093Al 薄板与 Al-Mn(3003Al)合金薄板复合得到叠层复合材料,其复合结构在较少损失材料强度(相对传统复合材料损失约 83 MPa)的同时,有效改善了断裂韧度(相对传统复合材料提高了约 79%)。

SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料是研究最为广泛的铝基复合材料,具有高比强度、高弹性模量、高耐磨性和低热膨胀系数等特点。因此,以 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料为研究对象,进行层状构型设计,而常见的铝基层状复合材料多为铝合

金与铝基复合材料的层叠复合,需要先制备铝基复合材料再与铝合金进行轧制复合。当前,关于在铝基金层间直接引入增强体叠轧复合制备层状复合材料的报道很少。但直接以颗粒增强体在铝基金层间进行轧制复合制备,无可避免会产生滚动、堆积或错位从而影响复合材料的整体性。因此,选择合适的粘结剂使 SiC 颗粒增强体在轧制复合时可相对固定在铝箔表面。硅溶胶是一种粒径为 7~100 nm 的 SiO<sub>2</sub> 的水溶胶分散体,内部是由 -Si-O-Si- 组成立体网状结构,通过电荷排斥作用而稳定,具有一定的粘结能力,能够均匀吸附纤维或颗粒增强体,有利于使增强体附着于金属基体上<sup>[20,21]</sup>。因此,本课题以纯 Al 为基材,借助硅溶胶搭载 SiC 增强体颗粒,利用表面涂覆辅助方式,以此在铝基金层间引入 SiC 增强体,并采用叠层热轧使其复合,以探索在铝基金层间直接引入增强体制备 SiC/Al 层状复合材料的可行性,随后对该层状复合材料进行组织性能分析,以期对增强体与 Al 直接交替叠层复合的制备方法开发及层状复合材料性能提升提供参考。

## 1 试验材料及方法

采用的 SiC 颗粒平均粒径为 5 μm,图 1 为 SiC 的 SEM 形貌和 XRD 图谱。采用 SiO<sub>2</sub> 含量为 40% 的硅溶胶作为 SiC 增强体的搭载介质, SiO<sub>2</sub> 胶体粒径为 8~15 nm,粘度约为 30 mPa·s(20 ℃)。采用厚度为 0.6 mm 的商业纯铝箔作为层叠热轧用铝基体。

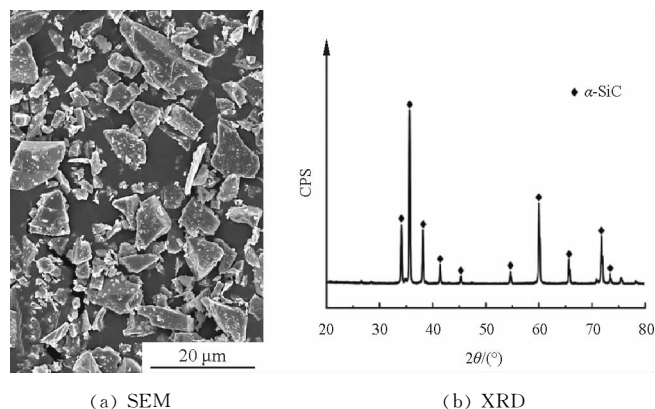


图 1 SiC 增强体形貌及 XRD 图谱  
Fig.1 Morphology and XRD pattern of SiC reinforcement

层状复合材料制备方法:将 SiC 颗粒酸洗除杂,随后与硅溶胶进行 1:3 质量比混合,均匀搅拌形成浆料;对纯铝箔进行去油、碱洗除杂与粗糙化处理;采用空气喷涂方式将 SiC/硅溶胶混合浆料均匀涂覆于铝箔表面;将表面涂覆浆料的铝箔组合层叠,边角用铝铆钉固定,将铆固好的层合坯体在 370 ℃ 下保温 10 min 后放入轧机进行轧制,共轧制 4 道次,退火温度为 370 ℃。复合板的轧制厚度通过调节机器上下轧辊的间隙参数

决定,第一道次压下量约为层合坯体的 50% 左右,而后面 3 道次约为初始层合坯体的 5% 左右,最终压下量为 67%,得到厚度约为 2 mm 的 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板。在同样的操作步骤和热轧工艺下,制备纯铝箔叠轧的纯 Al 层状复合板与只有硅溶胶涂覆叠轧的 SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板作对比。

采用 DMI3000M 金相显微镜(OM)和 SU8220 场发射扫描电镜(SEM)观察复合材料的显微组织;采用 Zeiss Auriga 背散射电子衍射(EBSD)分析层状复合材料中的取向信息;采用 JXA-8100 电子探针(EPMA)观察复合材料界面的元素分布;对复合板表面铝箔层进行稀盐酸酸洗,待暴露界面层后进行清洗,采用 Rigaku SmartLab9kw-X 射线衍射仪(XRD)对界面层进行物相分析。沿复合板轧制方向(RD)和垂直于轧制方向(TD)取样,采用 DNS200 型万能试验机进行拉伸试验,随后采用扫描电镜进行断口分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 SiC/Al 层状复合材料物相与显微组织

图 2 为纯 Al 复合板、SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板的界面层 XRD 分析。可以看出,纯 Al 和 SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板的界面层主要为 Al 相, SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状板界面层检测到少量的 SiC 相。由于

添加的硅溶胶较少,因此在相应的 SiO<sub>2</sub> sol-Al 和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板界面处的 SiO<sub>2</sub> 胶体物相难以测定。

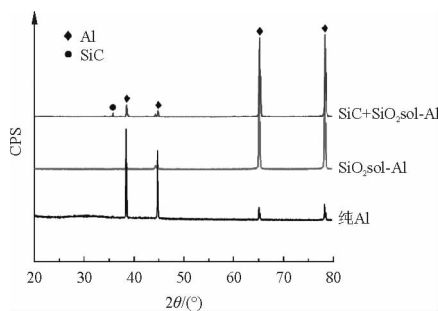
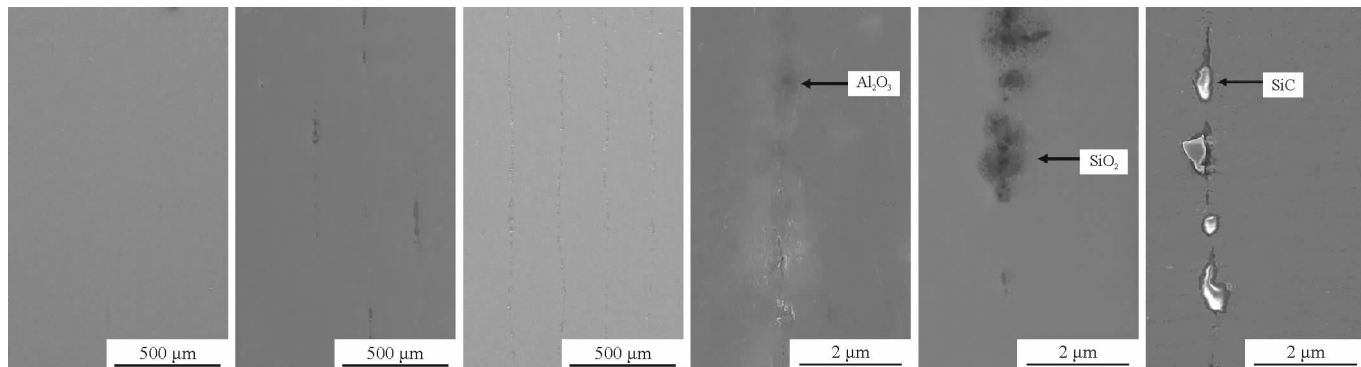


图 2 SiC/Al 层状复合材料 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of SiC/Al laminated composites

图 3 为纯 Al、SiO<sub>2</sub> sol-Al 和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板的横截面显微形貌。纯铝轧制的纯 Al 层状复合板整体结合良好,见图 3a,但在部分界面结合处发现有微小点状物,见图 3d。从图 3b 和图 3e 看出,界面结合处隐约观察到线型结合区,结合区内大部分区域为铝箔基材的粘合,部分区域存在颗粒相,呈不连续分布,无脱粘或剥离现象,分析发现存在 SiO<sub>2</sub>。从图 3c 和图 3f 可观察到 SiC 颗粒以单个颗粒形式嵌于铝箔材层间界面结合处,呈断续式分布, SiC 颗粒无团聚现象, SiC 颗粒附近的铝箔界面结合良好,无气孔、脱粘或剥离等缺陷。

为进一步了解 SiC/Al 层状复合材料界面层物相的



(a) 纯 Al 复合板 (b) SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板 (c) SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板 (d) a 图局部放大 (e) b 图局部放大 (f) c 图局部放大

图 3 3 种 SiC/Al 层状复合材料横截面微观形貌

Fig.3 Micro-morphology of SiC/Al laminated composites

分布情况,分别对纯 Al、SiO<sub>2</sub> Sol-Al 和 SiC+SiO<sub>2</sub> Sol-Al 层状复合板界面层中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 和 SiC 物相相应元素进行 EPMA 分析,见图 4。结果表明,在纯 Al 层状复合板界面结合处的微小点状物分布有 Al 元素和 O 元素,说明其物相主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,表明纯 Al 层状复合板层间存在少量的 O,铝箔基材表面局部区域形成了一定的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化层,而随着叠轧过程中铝箔基材的延展和粘合,形成的微量 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 铺展于界面结合区处;从图 4d~图 4g 观察到界面结合区的颗粒相从心部至

外延主要分布有 Si 和 O 元素,其含量逐渐减少,其中 O 元素的分布区域比 Si 元素的分布区域大,与外部的 Al 元素有重合,说明该颗粒相主要为 SiO<sub>2</sub>,且 SiO<sub>2</sub> 外延覆有一定的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。从图 4h~图 4l 可以看到,嵌入界面结合区的颗粒主要分布有 Si 元素和 C 元素,其中 Si 元素含量沿颗粒心部至外延逐渐减少,颗粒两侧分布有一定的 O 元素集中区,与 Al 元素有一定的重合,说明嵌入的个体颗粒物相主要为 SiC,且 SiC 颗粒表面包覆有 SiO<sub>2</sub>,附近附有一定的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

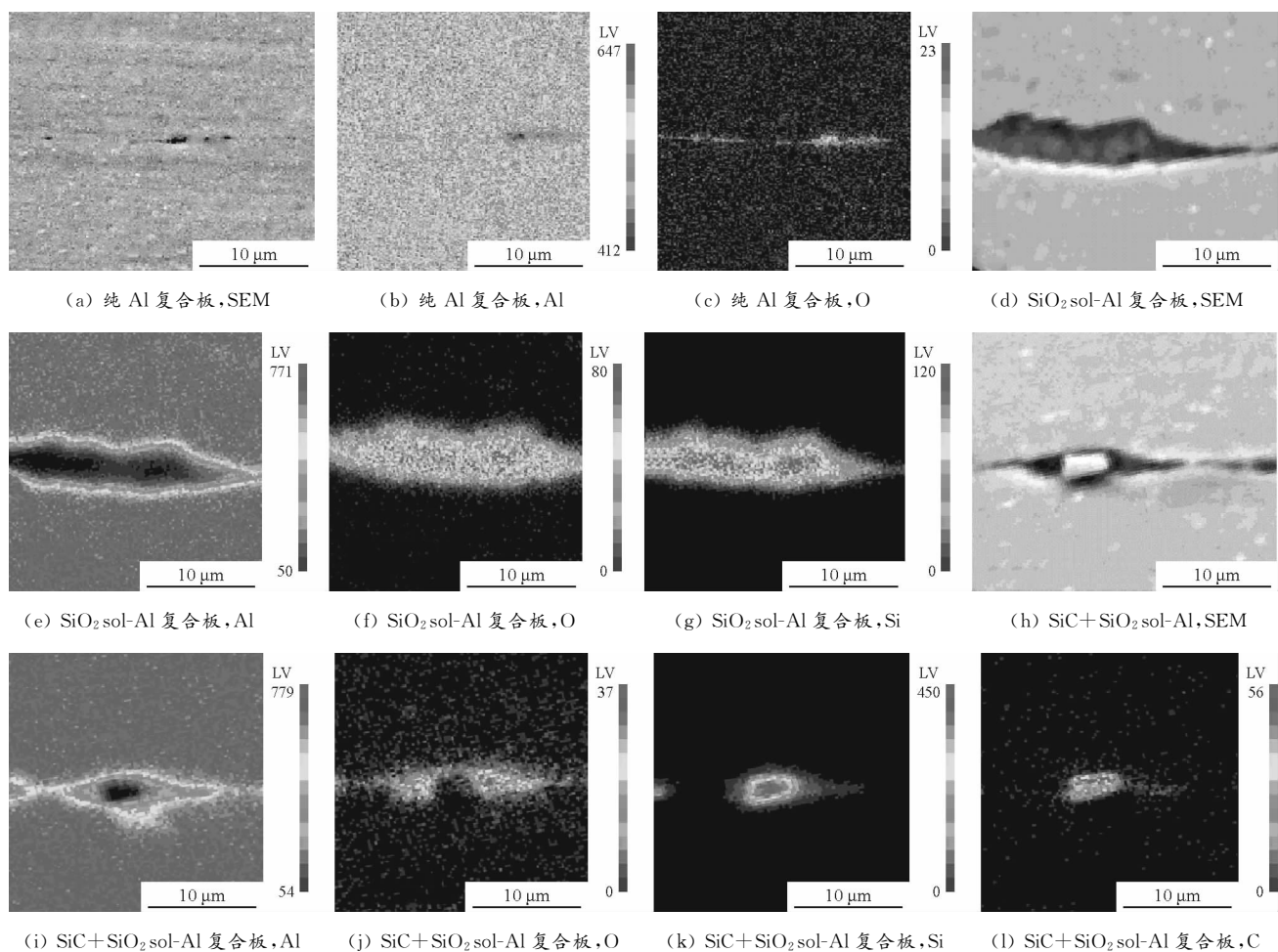


图 4 SiC/Al 层状复合材料电子探针面扫描结果

Fig.4 Electron probe scanning analysis of SiC/Al laminated composite

从 SiO<sub>2</sub> Sol-Al 层状复合板界面结合区内多为铝箔基材的粘合现象,可推测 SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板在前期涂覆过程时,铝箔基材表面即存在 O 或形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,涂覆硅溶胶后,硅溶胶中的 SiO<sub>2</sub> 胶体平铺附着于铝箔基材表面,然而硅溶胶的成膜收缩体积较大,在层合坯体热轧前处理时,硅溶胶的成膜应在铝箔基材表面形成网状结构。因此,保留了一定的 Al-Al 结合区,在层叠热轧时,硅溶胶膜层中的 SiO<sub>2</sub> 逐渐铺展,铝箔基材表面形成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆 SiO<sub>2</sub>,而 Al-Al 结合区的铝箔基材发生轧制延展和粘合,因此 SiO<sub>2</sub> 最终呈颗粒状断续分布于复合界面处,且 SiO<sub>2</sub> 覆有微量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。从 SiC 颗粒在铝箔材层间界面结合处呈断续式分布,可推测,在 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板的制备 SiC/硅溶胶混合浆料步骤时,硅溶胶对 SiC 颗粒进行了较好的包覆而粘附于铝箔基材表面。在层叠热轧时, SiC 颗粒由于其表面硅溶胶的阻隔未发生多颗粒的团聚现象,而且 SiC 颗粒表面包覆的硅溶胶起到了一定的润滑作用,使 SiC 颗粒在法向轧制力的作用下能实现较好的铺展而均匀分布于铝箔基材界面处。同时,铝箔基材在热轧过程中发生层间粘合。因此,最终 SiC 颗粒较好地嵌入铝基复合

板的间层界面区域,实现良好的界面结合。

2.2 SiC/Al 层状复合材料的力学性能

图 5 为纯 Al、SiO<sub>2</sub> sol-Al 和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板在 RD 方向和 TD 方向的应力-应变曲线。可以看出,纯 Al、SiO<sub>2</sub> sol-Al 和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板 RD 方向抗拉强度分别为 109、142、150 MPa,TD 方向的抗拉强度分别为 121、149、158 MPa。整体而言, SiO<sub>2</sub> sol-Al 和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板抗拉强度高

于纯 Al 层状复合板,但伸长率低于纯 Al 层状复合板,

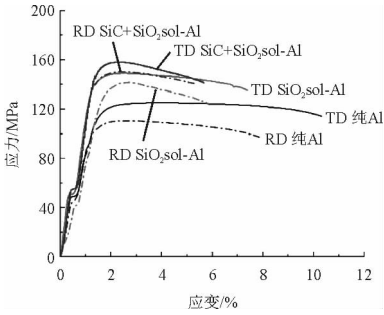


图 5 SiC/Al 层状复合材料的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-stain curves of SiC/Al laminated composite

SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板抗拉强度略高于 SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板。纯 Al、SiO<sub>2</sub> sol-Al、SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 拉伸性能存在一定的各向异性,TD 方向的抗拉强度均稍大于 RD 方向的。

图 6 与图 7 分别是纯 Al 层状复合板和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板界面结合区附近区域的电子背散射衍射分析结果。从图 6a 和图 7a 可以看出,经层叠热轧后纯 Al 层状复合板和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板的铝箔基材层均发生动态再结晶,界面结合区晶粒延续,无明显分界现象,说明复合板层间界面结合良好。从图 6b 和图 7b 可以看出,两类层状复合板的铝箔基材层呈现典型的铝板轧制织构,<001> 和 <111> 晶向平行于轧板法向方向(ND)。从图 6c 和图 7c 对比可知,

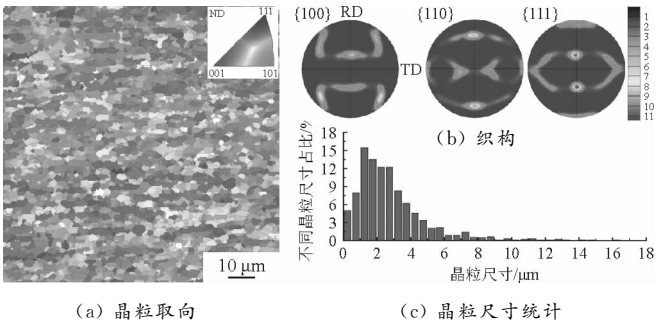


图 6 纯 Al 层状复合板电子背散射衍射分析  
Fig.6 EBSD analysis of pure-Al laminated composite sheet

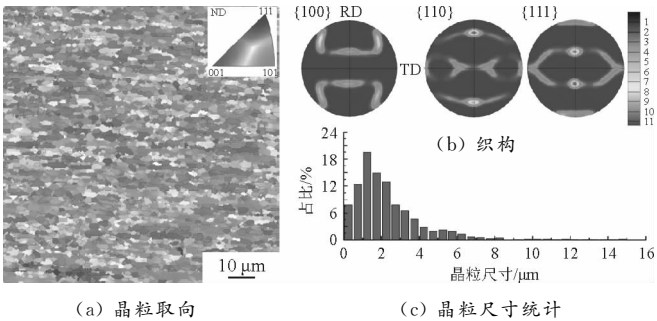


图 7 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板电子背散射衍射分析  
Fig.7 EBSD analysis of SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al laminated composite sheet

SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板铝箔基材层的晶粒尺寸更为细化且集中。SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板抗拉强度的提高除了由于铝箔基材层间引入 SiC 增强体的强化作用外,由于引入的 SiC 颗粒为硬质颗粒,与铝基体之间变形具有不相容性,导致铝箔基材层在热轧复合过程中的变形加剧,因此与纯 Al 层状复合板相比,获得的晶粒尺寸更为细化和均匀,从而使相应的铝箔基材层表现出一定的细晶强化作用。

图 8 为纯 Al、SiO<sub>2</sub> sol-Al 和 SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板的拉伸断口形貌。可以看出,纯 Al 复合板的各层铝箔基材发生明显的颈缩,界面结合区有层间撕裂棱,见图 8a,这是由于在拉伸过程中各层铝箔基材各自发生延展颈缩,以致于层间脱粘造成的。从图 8b 观察到铝箔基材发生一定程度的颈缩,但颈缩程度小于纯 Al 层状复合板,界面结合区有较多的未脱粘区域,层间存在尺寸较大的孔洞,孔洞中分布有颗粒物,EDS 分析可知颗粒为 SiO<sub>2</sub>,在未脱粘区域分布有韧窝,连带着层间撕裂棱。SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板在拉伸过程中,由于层间界面结合区存在着 SiO<sub>2</sub> 颗粒,拉伸过程中在 SiO<sub>2</sub> 颗粒周围易发生应力集中而导致裂纹萌生,当裂纹在层间界面结合区扩展,则使层间形成脱粘孔洞,且裂纹也会向铝箔基材扩展,因此铝箔基材为达到颈缩极限即发生断裂,相应的表现为 SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板的伸长率小于纯 Al 层状复合板,另外,在界面结合处的韧窝为 SiO<sub>2</sub> 颗粒与铝箔基材的脱粘而形成。从图 8c 看出,断口形貌与 SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板类似,但层间孔洞较小,间隙分布着韧窝,韧窝中有 SiC 颗粒,表明是由于 SiC 颗粒与铝箔基材脱粘形成。从断口形貌可看出,SiC+SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板中的 SiC 颗粒相较于 SiO<sub>2</sub> sol-Al 复合板的 SiO<sub>2</sub> 颗粒,更好的铺展分布于铝箔基材层间,使各层受力更为均衡,增强体强化作用得到更好的发挥。

综合而言,纯 Al 层状复合板的断裂机制应为单相金属层的韧性断裂与层间脱粘撕裂共同作用。SiO<sub>2</sub> sol-Al 层状复合板的断裂模式除了单相金属层的

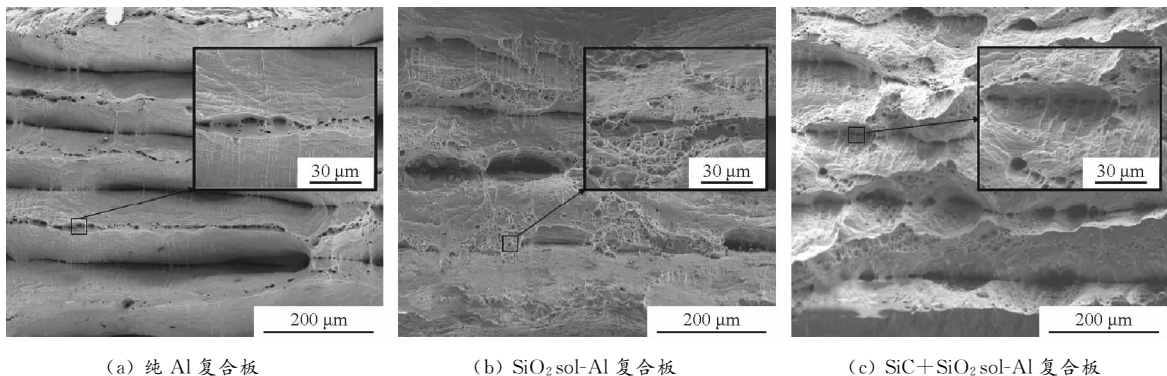


图 8 SiC/Al 层状复合材料拉伸试样断口形貌

Fig.8 Fracture morphology of tensile specimen of SiC/Al laminated composites

韧性断裂外,更有由于层间  $\text{SiO}_2$  颗粒与铝箔基材脱粘引起的层间裂纹萌生和扩展,此断裂过程对单相金属层的韧性有一定的消极影响。 $\text{SiC} + \text{SiO}_2$  sol-Al 层状复合板的断裂行为与  $\text{SiO}_2$  sol-Al 层状复合板的类似,有层间 SiC 颗粒与铝箔基材脱粘引起的层间裂纹萌生和扩展,最终形成脱粘孔洞,但  $\text{SiC} + \text{SiO}_2$  sol-Al 复合板中的 SiC 颗粒更为均匀分布于铝箔基材层间,有利于界面载荷传递,复合板中增强体强化作用发挥更为稳定。

### 3 结 论

(1)以硅溶胶搭载 SiC 增强体的混合浆料表面涂覆为辅助,采用层叠热轧复合技术成功制备出厚度为 2 mm 的  $\text{SiC} + \text{SiO}_2$  sol-Al 层状复合板, SiC 颗粒在硅溶胶粘结作用下附于铝箔基材表面,随后在法向轧制力的作用下实现较好的铺展而均匀分布于铝箔基材间层,复合板中的 SiC 颗粒表面覆有一定的  $\text{SiO}_2$  和微量  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 界面结合良好。

(2) $\text{SiC} + \text{SiO}_2$  sol-Al 层状复合板与纯铝箔叠轧得到的纯 Al 层状复合板相比,抗拉强度明显提高,从 110 MPa 提高至 150 MPa,但伸长率略有下降,各向异性特征明显减小。SiC 颗粒的引入使铝箔基材层的晶粒尺寸更为细化和均匀,因此,  $\text{SiC} + \text{SiO}_2$  sol-Al 层状复合板抗拉强度的提高是 SiC 增强体强化与铝箔基材层中细晶强化共同作用的结果。

(3) $\text{SiC} + \text{SiO}_2$  sol-Al 层状复合板拉伸作用下的断裂行为包括单相铝箔基材层的韧性断裂与层间脱粘撕裂,层间脱粘首先是 SiC 颗粒与铝箔基材的脱粘引发的层间裂纹萌生和扩展,形成脱粘孔洞,随后作用于 Al-Al 结合区的脱粘撕裂。该复合板的伸长率较纯 Al 的有所下降。

### 参 考 文 献

- [1] 郭强,李志强,赵蕾,等.金属材料的构型复合化[J].中国材料进展, 2016,35(9): 641-650.
- [2] MORTENSEN A, LLORCA J. Metal matrix composites[J]. Annual Review of Materials Research, 2010, 40: 243-270.
- [3] ZHANG D, ZHANG G D, LI Z Q. The current state and trend of mental matrix on composites[J]. Materials China, 2010, 29: 1-7.
- [4] 耿林,范国华.金属基复合材料的构型强韧化研究进展[J].中国材料进展, 2016, 35(9): 686-693.
- [5] MOLINA J, RHÈME M, CARRO J, et al. Thermal conductivity of aluminum matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5): 393-396.
- [6] 卢德宏,顾明元,施忠良,等. SiC 和 Gr 颗粒混杂增强 Al 基复合材料的摩擦磨损特性的研究[J]. 复合材料学报, 2000(1): 60-64.
- [7] 龙飞,贾淑果,等.碳纳米管和  $\text{TiB}_2$  混杂增强铜复合材料的电弧侵蚀行为[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2 869-2 877.
- [8] WONG J C, PARAMSOTHY M, GUPTA M. Using Mg and Mg-

nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$  concentric alternating macro-ring material design to enhance the properties of magnesium[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3): 438-444.

- [9] WU X L, JIANG P, CHEN L, et al. Extraordinary strain hardening by gradient structure[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(20): 7 197-7 201.
- [10] PENG H X, FAN Z, EVANS J R G. Microstructures and mechanical properties of engineered short fibre reinforced aluminium matrix composites[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A303(1-2): 37-45.
- [11] MOON R J, HOFFMAN M, ROEDEL J, et al. Evaluation of crack-tip stress fields on microstructural-scale fracture in Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  interpenetrating network composites[J]. Acta Materialia, 2009, 57(2): 570-581.
- [12] 王天驰,范同祥,张获,等.植物结构铝基复合材料的制备及热学性能[J].南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(6): 809-813.
- [13] LAUNEY M E, MUNCH E, ALSEM D H, et al. A novel biomimetic approach to the design of high-performance ceramic-metal composites[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2010, 46(7): 741-753.
- [14] LIU H S, ZHANG B, ZHANG G P. Enhanced toughness and fatigue strength of cold roll bonded Cu/Cu laminated composites with mechanical contrast[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(10): 891-894.
- [15] LIU H S, ZHANG B, ZHANG G P. Delaying premature local necking of high-strength Cu: A potential way to enhance plasticity[J]. Scripta Materialia, 2010, 64(1): 13-16.
- [16] PANG J C, FAN G H, CUI X P, et al. Mechanical properties of Ti-( $\text{SiC}_p$ /Al) laminated composite with nano-sized  $\text{TiAl}_3$  interfacial layer synthesized by roll bonding[J]. Materials Science & Engineering, 2013, A582: 294-298.
- [17] 陈超. 纳米  $\text{TiC}_p$ ,  $\text{SiC}_p$  增强 2014Al 复合材料制备与复合构型设计[D]. 长春:吉林大学, 2015.
- [18] 王志杰. 铝合金/铝基复合材料复合板组织与力学性能的研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学, 2019.
- [19] GRISHABE R B, SERGUEEVA A V, MISHRA R S, et al. Laminated metal composites-High temperature deformation behavior[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A403(1-2): 17-24.
- [20] 岑浩,杨洪斌,傅雅琴.硅溶胶改性纤维/环氧树脂复合材料界面性能影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 32-36.
- [21] 朱迎松,罗发,张标,等.浸渗法制备  $\text{SiC}_f/\text{SiO}_2$  复合材料的力学性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2011(1): 85-87.

(编辑:刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 [www.special-cast.com](http://www.special-cast.com)