

不同基体对连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料纤维损伤的影响

聂明明¹ 徐志锋² 汪莹¹ 刘逸众¹

(1.空军航空维修技术学院航空机电设备维修学院; 2.南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 采用真空气压浸渗法制备了增强体为 Al₂O₃ 纤维,基体合金分别为 1A99、ZL210A、ZL301 及 7075 铝合金的连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料,并用 NaOH 溶液提取出 Al₂O₃ 纤维,研究了不同基体对 Al₂O_{3f}/Al 复合材料纤维损伤的影响。结果表明,在同样的制备工艺下,不同的基体对 Al₂O₃ 纤维的损伤程度不同。Al₂O₃ 纤维与纯铝及 ZL210A 基体界面反应程度微弱,纤维表面光滑,未发现界面反应产物,纤维剩余强度分别为 1 746 MPa 和 1 658 MPa;Al₂O₃ 纤维与 ZL301 发生界面反应生成了 MgAl₂O₄ (镁铝尖晶石),纤维表面较为粗糙,剩余强度为 1 584 MPa;Al₂O₃ 纤维与 7075 基体发生了严重的界面反应生成了 Al₂(SiO₄)O (蓝晶石)和 ZnAl₂O₄ (锌铝尖晶石),纤维表面非常粗糙,剩余强度仅为 980 MPa。表明不同基体与 Al₂O₃ 纤维之间的界面反应程度造成了纤维不同程度损伤。

关键词 连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料; 基体合金; 纤维损伤; 界面反应

中图分类号 TB331 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Matrix on Fiber Damage of Continuous Al₂O_{3f}/Al Composite

Nie Mingming¹, Xu Zhifeng², Wang Ying¹, Liu Yizhong¹

(1.Aviation Electromechanical Equipment Maintenance Department, Airforce Aviation Repair Institute of Technology College; 2.National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The continuous Al₂O_{3f}/Al composites were performed by vacuum gas pressure infiltration, with reinforced material of Al₂O₃ fiber and 1A99, ZL210A, ZL301 and 7075 alloys as the matrix. Al₂O₃ fibers were extracted using NaOH solution, and the effects of matrix alloy on the fiber damage of continuous Al₂O_{3f}/Al composites were investigated. The results indicate that under the same preparation process, damage degrees of Al₂O₃ fibers are different in different matrices. The degree of interfacial reaction between Al₂O₃ fiber and pure aluminum or ZL210A matrix becomes weak, and the fiber surface is smooth with absence of interfacial reaction products, where the residual strength of the fiber is 1 746 MPa and 1 658 MPa, respectively. Al₂O₃ fiber reacts with ZL301 to generate MgAl₂O₄, and the fiber surface is slightly rough with fiber residual strength of 1 584 MPa. The Al₂O₃ fiber undergoes a severe interfacial reaction with 7075 matrix to generate Al₂(SiO₄) O and ZnAl₂O₄, and the fiber surface is extremely rough, where the residual strength is only 980 MPa. In conclusion, the interfacial reaction degrees between different matrix and Al₂O₃ fiber are different result in different degrees of fiber damage.

Key Words: Continuous Al₂O_{3f}/Al Composite, Matrix Alloy, Fiber Damage, Interfacial Reaction

连续 Al₂O₃ 纤维具有较高的强度和模量^[1],优异的耐高温、耐腐蚀性,以及热导率低和可编织等特点^[2-3],广泛用于增强铝、钛、碳化硅和其他氧化物陶瓷基体^[4-6]。其中连续氧化铝纤维增强铝基(Al₂O_{3f}/Al)复合材料具有高的比强度、比模量及优异的热稳定性、抗疲劳性、耐磨性、抗老化性能和可设计性,成为现代航天、航空、国防和电力等尖端技术领域最具战略性的材

料之一^[7-8]。

目前,连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料的制备方法有热压扩散法、挤压法及真空气压浸渗法等^[9-11],其中真空气压浸渗法制备工艺简单、过程平稳且工艺参数易控可调,是实现连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料近净成型的主要方法^[12],也是连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料最可能实际工程化的材料与成形一体的制备技术。

收稿日期:2023-04-23;修改稿收到日期:2023-06-07
基金项目:湖南省自然科学基金科教联合基金资助项目(2020JJ7078,2020JJ7076)
第一作者简介:聂明明,男,1993 年出生,讲师,长沙(410124),E-mail:nmmjxgz@foxmail.com
通信作者:徐志锋,男,1968 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:xu_zhf@163.com
引用格式:聂明明,徐志锋,汪莹,等. 不同基体对连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料纤维损伤的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 414-1 420.
NIE M M, XU Z F, WANG Y, et al. Effects of matrix on fiber damage of continuous Al₂O_{3f}/Al composite[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 414-1 420.

除 Al₂O₃ 纤维与铝基体本身的性能外,连续 Al₂O₃/Al复合材料的性能在很大程度上取决于复合材料的制备完整性以及 Al₂O₃纤维/铝基体的界面性能。LI S L等^[13]通过化学气相沉积(CVD)在 T700 碳纤维表面沉积热解碳涂层,采用液态浸渗挤压工艺制备了 2D-C_f/AE44 复合材料,通过透射电镜(TEM)研究复合材料的界面反应,发现颗粒状 Al₂RE 相和片状 Al₁₁RE₃在界面处析出,抑制了 Mg-Al 相的形成,同时热解碳涂层有效地保护了纤维。SEONG H G 等^[14]通过压力浸渗制备了碳纤维(C_f/2014)以及石墨纤维(GR_f/2014)增强铝基复合材料,采用 TEM 对两种复合材料的界面进行研究,发现两种复合材料界面处有少量的 Al₂₀Cu₂Mn₃、AlSiMnFe 和 Al₂Cu 相,同时 C_f/2014 复合材料界面发现了 Cu-Si 尖晶石,而 GR_f/2014 复合材料界面发现了无定形 Al-C-O 层,两种复合材料界面处都发现了 Al₄C₃相,但 Al₄C₃相出现的几率很低,且 GR_f/2014 复合材料更低。LANCIN M 等^[15]制备了纤维有热解碳涂层的 M40J/A357 复合材料,通过 TEM 观察到复合材料界面有 Si 和 Mg₂Si 相形成,由于多微孔及片层状的热解碳涂层使得复合材料具有更好的界面结合,使得纤维有热解碳涂层的 M40J/A357 复合材料比无涂层的 M40J/A357 复合材料获得了更高的强度。目前国内外对纤维增强铝基复合材料界面反应和界面形貌的研究主要是基于透射电镜(TEM)技术,但透射电镜对复合材料界面的研究局限性于对界面反应产物及界面形貌进行定性表征。可以预测的是,在连续 Al₂O₃/Al 复合材料的制备过程中,不同程度的界面反应势必会对 Al₂O₃纤维产生不同程度的损伤,作为主要承载体的 Al₂O₃纤维受到不同程度的损伤后又将直接影响复合材料的性能。因此对纤维损伤进行研究也是一种衡量界面反应的有效方法。本研究选用 Al₂O₃纤维作为增强体,以及纯铝、ZL210A、ZL301 及 7075 合金作为基体合金,采用真空气压浸渗法制备纤维体积分数为 40%的连续 Al₂O₃/Al 复合材料,并用 NaOH 溶液提取复合材料中的纤维进行测试分析,研究基体合金对连续 Al₂O₃/Al 复合材料纤维损伤的影响。

1 试验方法

1.1 试验材料

选用 Nextel610 型连续 Al₂O₃纤维作为增强体材料,其 Al₂O₃质量分数≥99%,是一种细晶 α-Al₂O₃纤维,参数见表 1。基体为 1A99、ZL210A、ZL301 及 7075 铝合金,主要化学成分见表 2。

表 1 Nextel610 型 Al₂O₃纤维的性能指标

Tab.1 Property index of Nextel610 Al ₂ O ₃ fiber					
纤维型号	密度/(g·cm ⁻³)	纤维直径/μm	抗拉强度/GPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
Nextel610	3.75	10~12	3.2~3.5	380~400	0.5

表 2 基体的化学成分

Tab.2 Chemical composition of matrix							%
合金	w _B						
	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	
1A99	0.003	0.003	-	-	-	-	余量
ZL210A	0.2	4.5~5.1	0.35~0.8	0.05	0.1	0.15~0.35	余量
ZL301	0.3	0.1	0.15	9.8~11.0	0.15	0.15	余量
7075	0.4	1.2~2.0	0.3	2.1~2.9	5.1~6.1	0.2	余量

1.2 试验方法

用 2 层纯铝箔将连续 Al₂O₃纤维束包裹后放入陶瓷管内,制成纤维体积分数为 40%的单向排布 Al₂O₃纤维预制体,见图 1,试样尺寸为 ϕ8 mm×100 mm。采用真空气压浸渗法制备连续 Al₂O₃/Al 复合材料,在纯氩气保护气氛中将铝合金熔炼至 720 ℃,纤维预热温度为 530 ℃,浸渗过程使用氮气进行持续加压,压力为 7 MPa,保压时间为 5 min。将制得的复合材料放入 10%的 NaOH 溶液中浸泡,待铝基体完全腐蚀后将纤维取出并烘干,整个试验过程应避免冲击。为了方便对比,设置了经随炉预热以及经同等时间 NaOH 溶液(质量分数为 10%)浸泡的两个对照组。

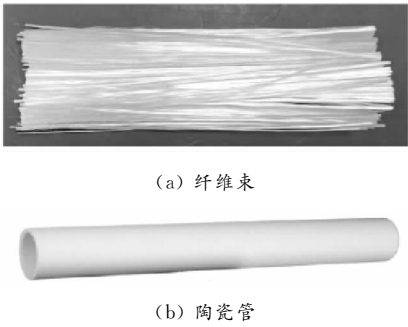


图 1 连续 Al₂O₃纤维束及封装用陶瓷管
Fig.1 Continuous Al₂O₃ fiber bundle and ceramic tubes for packaging

真空气压浸渗法根据反重力成形原理来实现复合材料的近净成形,其原理见图 2。采用 ZYQ250/400 型真空气压浸渗设备,上、下罐温度和压力等都可通过控制系统全程自动控制。真空度<210 Pa,最高设定温度为 1 000 ℃,最大充型压力为 10 MPa;气体的充填与卸压过程平稳,最小速度可调节至 100 kPa/s,压力可在 0~10 MPa内任意调节。采用双热电偶分别对金属液和炉膛进行实时温度控制,温度误差范围可控制在±5 ℃。

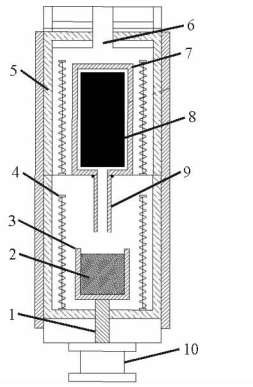


图 2 真空气压浸渗装置与模具示意图

Fig.2 Schematic diagram of vacuum pressure infiltration device and mold

- 1.顶杆 2.熔体 3.坩埚 4.炉丝 5.水冷套管 6.上真空腔
7.不锈钢模具 8.预制体 9.升液管 10.汽缸

1.3 性能测试

根据 GB/T228-2010 进行连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料的力学性能试验,将连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料中提取出来的纤维制成束丝拉伸试样,见图 3,结果取 5 个平行试样的平均值。采用 Instron5543 型单立拉伸材料试验机进行抗拉强度测试。用 BrukerD8 型 X 射线衍射分析仪(XRD)分析复合材料的相组成,采用 Nova NanoSEM450 型场发射扫描电镜(SEM)结合能谱仪(EDS)对复合材料微观组织、元素分布及断口形貌进行分析。

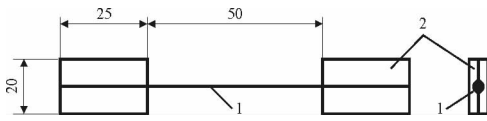


图 3 纤维拉伸试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of tensile specimens of fiber

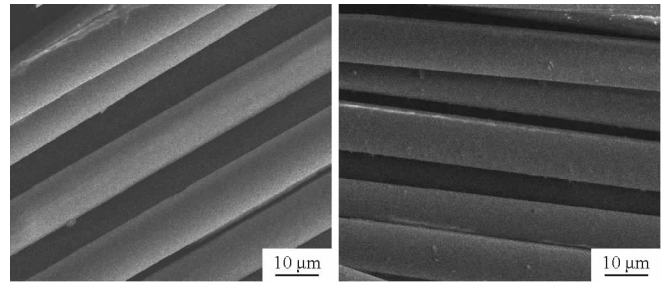
- 1.纤维束丝 2.加强片

2 试验结果与分析

2.1 Al_2O_3 纤维的表面形貌及成分

图 4 为浸渗前的 Al_2O_3 纤维的表面形貌。可以发

现, Al_2O_3 纤维原丝表面光滑平整,经 500 $^{\circ}\text{C}$ 预热处理后,纤维表面较粗糙,并有较多的颗粒物附着在其表面。



(a) 纤维原丝

(b) 500 $^{\circ}\text{C}$ 预热

图 4 纤维原丝及 500 $^{\circ}\text{C}$ 预热后的纤维表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of fiber precursor and fiber pre-heated at 500 $^{\circ}\text{C}$

图 5 为 Al_2O_3 纤维原丝的差热分析结果,测试温度范围为 25~950 $^{\circ}\text{C}$ 。可以发现, Al_2O_3 纤维在 237~345 $^{\circ}\text{C}$ 范围内经历了较为快速的失重阶段,并在相应的阶段出现了明显的放热峰,放热量约为 36.96 J/g。

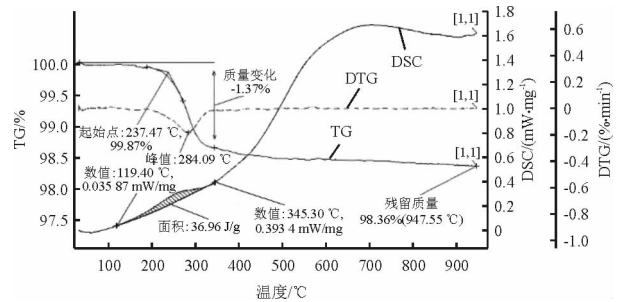
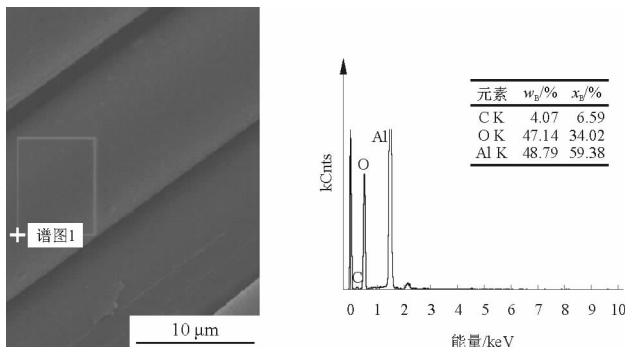


图 5 Al_2O_3 纤维的差热分析结果

Fig.5 DSC curves of Al_2O_3 fiber

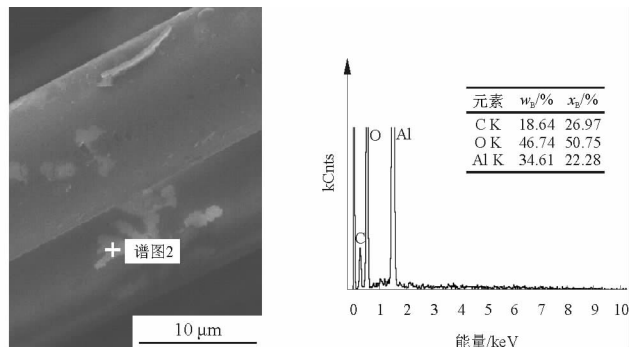
对 Al_2O_3 纤维原丝及经 500 $^{\circ}\text{C}$ 预热的 Al_2O_3 纤维的 EDS 分析结果见图 6。可以看出,纤维原丝表面含有 C、Al 和 O 元素。经 500 $^{\circ}\text{C}$ 预热的 Al_2O_3 纤维的表面除了 Al 和 O 元素之外,也含有较多的 C 元素,这是 Al_2O_3 纤维表面的有机胶质层在惰性气氛和高温条件下裂解产生的残留物质,最后附着在纤维表面。

图 7 为不同状态下的 Al_2O_3 纤维的表面形貌。由图 7a 和图 7b 可见,两种纤维的表面都有一些细小的颗



(a) Al_2O_3 纤维原丝, SEM

(b) 谱图 1, EDS



(c) 500 $^{\circ}\text{C}$ 预热的 Al_2O_3 纤维, SEM

(d) 谱图 2, EDS

图 6 Al_2O_3 纤维原丝及预热后的纤维 EDS 结果

Fig.6 EDS results of Al_2O_3 fiber and pre-heated fiber

粒状物质,两者之间没有明显的差异,这体现出 Al₂O₃ 纤维优异的耐腐蚀性。

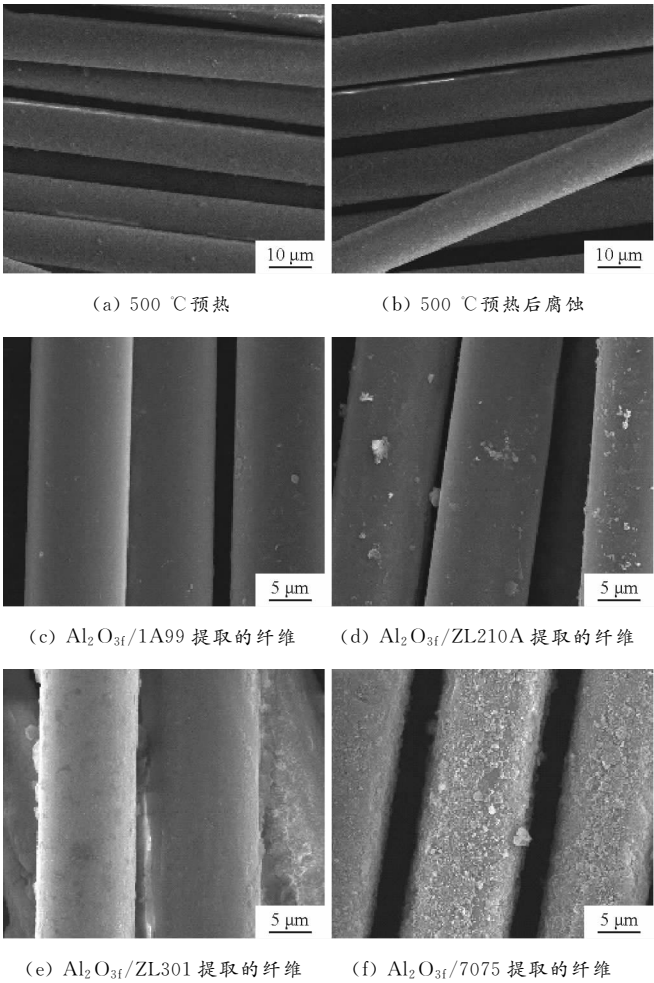


图 7 不同状态下 Al₂O₃ 纤维的表面形貌

Fig.7 Surface morphologies of Al₂O₃ fibers at different states

由图 7c~图 7f 可知,从连续 Al₂O_{3f}/1A99 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维的表面比较光滑,有少量附着物,但其颗粒感较预热及腐蚀后的纤维较弱,这可能是由于高温的纯铝液对 Al₂O₃ 纤维浸渗后使得 Al₂O₃ 纤维表面的颗粒物与铝液反应或者被冲刷脱落。从纤维形貌来看,纯铝液对 Al₂O₃ 纤维的浸渗并没有对纤维表面形貌造成明显的影响,这也从侧面反应出 Al₂O₃ 纤维

与纯铝之间的界面反应程度微弱。

从连续 Al₂O_{3f}/ZL210A 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维的表面也比较光滑,但有较多的附着物,且附着物尺寸较大,结合 XRD 测试结果,判断可能是附着在纤维表面的 Al₂Cu 相。可以发现,除了附着物以外,基体 ZL210A 对 Al₂O₃ 纤维的浸渗也没有对纤维表面产生明显的影响,表明 ZL210A 与 Al₂O₃ 纤维之间的界面反应程度也较弱,但 Al₂Cu 相聚集并附着在纤维表面可能会对连续 Al₂O_{3f}/ZL210A 复合材料的界面结合强度造成一定影响。

从连续 Al₂O_{3f}/ZL301 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维的表面不如前两种纤维光滑,可以发现纤维表面存在凹凸不平,也发现了少量的附着物,ZL301 对 Al₂O₃ 纤维的浸渗使得纤维表面产生了明显的改变。这主要是由于 ZL301 与 Al₂O₃ 纤维在高温浸渗过程中发生了界面反应,在腐蚀提取过程中,大部分界面反应产物剥落,使纤维表面变得粗糙。

从连续 Al₂O_{3f}/7075 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维的表面非常粗糙,纤维表面绝大部分区域都凹凸不平,有大量附着物在纤维表面。很明显,7075 铝合金对 Al₂O₃ 纤维的高温浸渗严重损伤了纤维,这是由于在连续 Al₂O_{3f}/7075 复合材料浸渗过程中 7075 基体与 Al₂O₃ 纤维发生了严重的界面反应,界面反应产物剥落后在纤维表面就形成了大量的凹坑。这会大幅削弱 Al₂O₃ 纤维的承载能力,直接影响复合材料的性能。

图 8 为从不同基体的连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维的表面形貌。可以看出,从连续 Al₂O_{3f}/1A99 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维表面较光滑洁净,还可观察到多晶氧化铝纤维的表面纹路,但纤维表面也可以发现一些细小的附着物,见图 8a。从连续 Al₂O_{3f}/ZL210A 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维表面存在数量较多、尺寸较大的附着物,见图 8b,这是由于基体 ZL210A 中含有的大量合金元素聚集在纤维表面形成的。从连续 Al₂O_{3f}/ZL301 复合材料中提取的 Al₂O₃ 纤维表面有些粗糙的区域、表面也有一些附着物,见

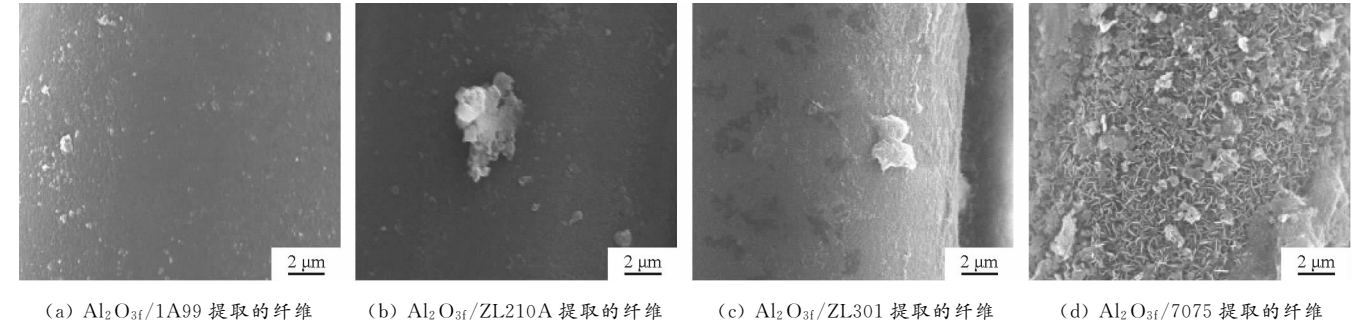


图 8 不同基体中提取的纤维表面形貌

Fig.8 Surface morphologies of fibers extracted from different matrix

图 8c。从连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{7075}$ 复合材料中提取的 Al_2O_3 纤维表面非常粗糙,并且出现了一些呈“花瓣”状的结构以及较多的表面附着物,见图 8d,这是由于 Al_2O_3 纤维与 7075 基体在浸渗过程中发生了严重的界面反应导致纤维表面损伤严重。

采用能谱仪对提取得到的纤维表面附着物进行了元素分析,见图 9。可以看出,经过浸渗和纤维提取处理后,纤维表面依然有高温裂解的碳残留,4 种连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料的附着物的元素组成基本分别对应着 4 种基体的元素组成,这是由于纤维表面的颗粒状突

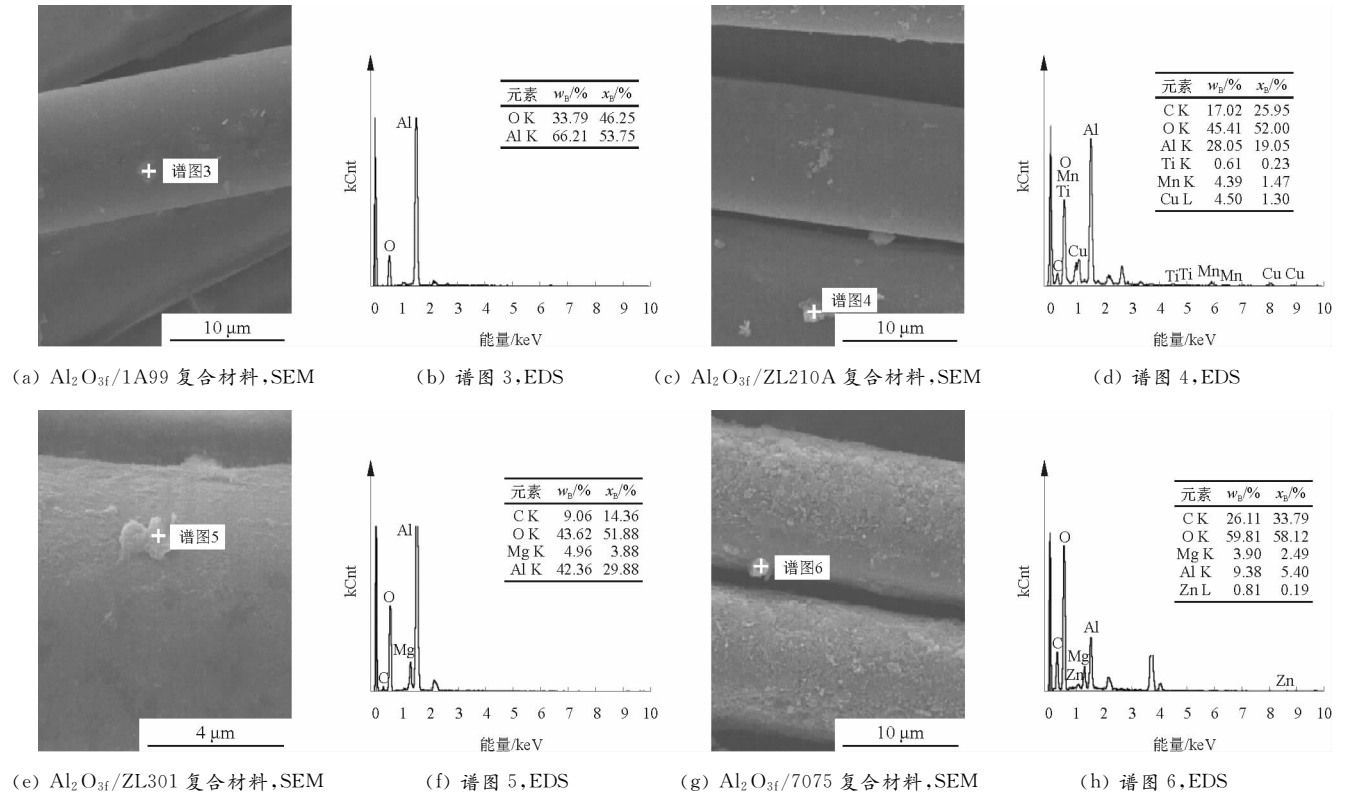


图 9 不同基体中提取的纤维 EDS 结果

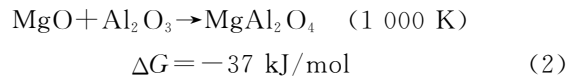
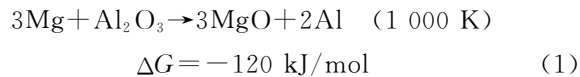
Fig.9 EDS results of fiber extracted from different matrices

起有利于合金元素在该区域富集。

2.2 连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料的 XRD 分析

图 10 为不同连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料的 XRD 分析结果。结果表明, Al_2O_3 纤维与纯铝及 ZL210A 基体没有发现界面反应产物,而连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZL301}$ 复合材料中 Al_2O_3 纤维与 ZL301 发生界面反应生成了 MgAl_2O_4 (镁铝尖晶石),连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{7075}$ 复合材料中 Al_2O_3 纤维与 7075 基体发生了复杂的界面反应,生成了 $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$ (蓝晶石)和 ZnAl_2O_4 (锌铝尖晶石)。

在连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZL301}$ 复合材料的制备过程中,基体中的 Mg 化学活性很高,会发生如下反应:



上述反应的最终产物为 MgAl_2O_4 (镁铝尖晶石),这是一种稳定的化合物,其熔点高达 2135°C ,密度为 3.6 g/cm^3 。

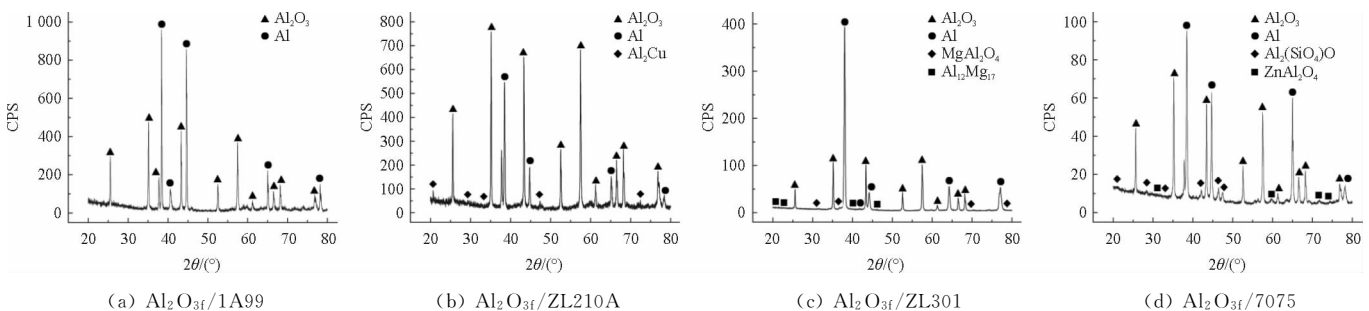
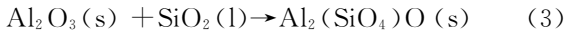


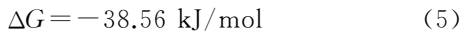
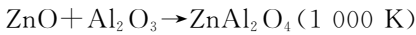
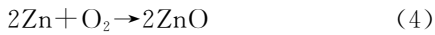
图 10 不同基体的连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料的 XRD 衍射图谱

Fig.10 XRD patterns of continuous $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composites with different matrices

在连续 Al₂O_{3f}/7075 复合材料的制备过程中 Al₂O₃ 纤维与 7075 基体发生了界面反应,生成了 Al₂(SiO₄)O (蓝晶石):



在连续 Al₂O_{3f}/7075 复合材料的制备过程中 Al₂O₃ 纤维与 7075 基体还发生了如下界面反应,生成了 ZnAl₂O₄(锌铝尖晶石),铝熔体中的 Zn 在高温下极易被氧化生成 ZnO,再发生反应生成 ZnAl₂O₄^[16]:



上述反应的最终产物为 ZnAl₂O₄,其熔点为 1 950 ℃,热稳定性好。

2.3 Al₂O₃ 纤维的抗拉强度

图 11 为不同状态下 Al₂O₃ 纤维的束丝抗拉强度。可以看出,Al₂O₃ 纤维原丝的平均抗拉强度为 2 189 MPa,经预热或 NaOH 腐蚀的 Al₂O₃ 纤维抗拉强度仅下降了不到 1%,分别为 2 167 MPa 和 2 171 MPa,预热处理及 NaOH 腐蚀处理对 Al₂O₃ 纤维的抗拉强度影响可以忽略,显示了 Al₂O₃ 纤维优异的热稳定性和耐腐蚀性。而从连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料提取得到的纤维中,剩余抗拉强度最高的是从连续 Al₂O_{3f}/1A99 复合材料中提取出来的纤维,为 1 746 MPa,约为 Al₂O₃ 纤维原丝的 79.7%;剩余抗拉强度最低的是从连续 Al₂O_{3f}/7075 复合材料中提取出来的 Al₂O₃ 纤维,为 980 MPa,仅为 Al₂O₃ 纤维原丝的 44.7%;从连续 Al₂O_{3f}/ZL210A 复合材料和连续 Al₂O_{3f}/ZL301 复合材料中提取出来的 Al₂O₃ 纤维剩余强度分别为 1 658 MPa 和 1 584 MPa。表明在连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料的制备过程中,Al₂O₃ 纤维受到了不同程度的损伤。

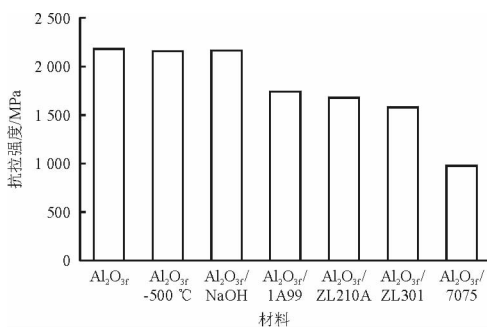


图 11 不同状态下的 Al₂O₃ 纤维的抗拉强度

Fig.11 Tensile strength of Al₂O₃ fibers at different states

在连续 Al₂O_{3f}/1A99 复合材料和连续 Al₂O_{3f}/ZL210A 复合材料的制备过程中,Al₂O₃ 纤维与基体之间的界面反应程度较弱,但由于高温的铝液对纤维造成了一定的热冲击以及 Al₂O₃ 纤维与基体之间存

在物理结合,因此 Al₂O₃ 纤维也受到一些损伤,但铝液的浸渗对 Al₂O₃ 纤维的损伤程度较低。连续 Al₂O_{3f}/ZL301 复合材料在浸渗过程中发生了程度较轻的界面反应,导致纤维表面出现了一些缺陷,加上高温铝液的冲击和纤维与基体之间的物理结合,导致 Al₂O₃ 纤维受到更大的损伤。连续 Al₂O_{3f}/7075 复合材料在制备过程中发生了严重的界面反应,导致 Al₂O₃ 纤维表面出现大量缺陷,大幅削弱了提取到的 Al₂O₃ 纤维的承载能力。

2.4 Al₂O₃ 纤维复合过程中的损伤机制

在连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料的真空气压浸渗制备过程中,Al₂O₃ 纤维经历了升温、预热、浸渗以及降温等过程。结果表明,纤维预热及 NaOH 腐蚀对 Al₂O₃ 纤维的损伤程度很小,这是由 Al₂O₃ 纤维优异的热稳定性和耐腐蚀性决定的。对 Al₂O₃ 纤维性能损伤最为严重的过程是 Al₂O₃ 纤维与基体复合的过程,而纤维的损伤过程又与纤维与基体之间的界面结合状况紧密相关。

连续 Al₂O_{3f}/Al 复合材料中 Al₂O₃ 纤维与基体间的界面结合机制可分为:①机械结合,主要是 Al₂O₃ 纤维表面与铝基体之间的摩擦力,其值主要取决于纤维的比表面积和粗糙度;另一方面,由于复合材料中纤维与基体间热膨胀系数存在差异,高温浸渗后冷却过程中复合材料内部产生了复杂的内应力,这也形成了机械结合,并且会对复合材料产生较大的影响;②化学结合,又分为反应结合和互扩散结合。铝基体与增强体 Al₂O₃ 纤维发生化学反应或相互之间发生原子扩散,其反应程度主要取决于两者的化学性质。一般情况下,化学反应后的化学结合导致界面结合很强,并且还严重损伤纤维本身的性能,因此应将这种结合控制在一定程度;③物理结合,主要是指范德华力和氢键。

可以发现,Al₂O₃ 纤维去胶后的表面并非光滑的,其表面存在一些微小的缺陷。在 Al₂O₃ 纤维与基体的复合过程中,由于 Al₂O₃ 纤维与基体之间的热膨胀系数不一致,导致复合材料制备过程中产生了残余应力,而残余应力作用在纤维后容易在纤维的缺陷处产生应力集中,导致缺陷被进一步放大,最后表现为纤维强度的损伤。另一方面,由于 Al₂O₃ 纤维与基体之间发生的界面反应会造成 Al₂O₃ 纤维表面被反应侵蚀,纤维的实际截面积减小,并且这些反应形成的缺陷处易在纤维受载时产生应力集中,导致纤维强度大幅下降,这是造成纤维损伤的最主要原因。连续 Al₂O_{3f}/1A99、Al₂O_{3f}/ZL210A 和 Al₂O_{3f}/ZL301 复合材料的界面反应程度远低于连续 Al₂O_{3f}/7075 复合材料,这也是造成 4 种纤维损伤程度差异较大的主要原因。

3 结 论

(1)在同样的制备工艺下,不同的基体对 Al_2O_3 纤维表面的损伤程度不同,基体为 1A99 和 ZL210A 的复合材料中提取的 Al_2O_3 纤维的表面比较光滑,有少量附着物,纤维与基体之间的界面反应程度轻微;基体为 ZL301 的复合材料中提取的 Al_2O_3 纤维的表面略为粗糙,有少量附着物,纤维与基体之间的界面反应程度较低,界面反应产物为 MgAl_2O_4 (镁铝尖晶石);从连续 Al_2O_3 /7075 复合材料中提取的 Al_2O_3 纤维的表面十分粗糙,有大量附着物,纤维与基体之间的界面反应剧烈,界面反应产物为 $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$ (蓝晶石)和 ZnAl_2O_4 (锌铝尖晶石)。界面反应是导致 Al_2O_3 纤维表面形貌差异的主要原因。

(2) Al_2O_3 纤维原丝的平均束丝抗拉强度为 2 189 MPa,经预热过及经 NaOH 腐蚀的 Al_2O_3 纤维抗拉强度仅下降了不到 1%,分别为 2 167 MPa 和 2 171 MPa;提取得到的纤维中,纤维剩余强度最高的是从 1A99 基体中提取出来的纤维,其强度为 1 746 MPa,约为原丝的 79.7%;剩余强度最低的是从 7075 基体中提取出来的纤维,为 980 MPa,仅为 Al_2O_3 纤维原丝的 44.7%;从 ZL210A 和 ZL301 基体中提取出来的 Al_2O_3 纤维强度分别为 1 658 MPa 和 1 584 MPa。界面反应是造成 Al_2O_3 纤维强度损伤的主要原因。

参 考 文 献

- [1] MOSER B, ROSSOLL A, WEBER L, et al. Nextel™ 610 alumina fibre reinforced aluminium: Influence of matrix and process on flow stress[J]. Composites, 2001, A32: 1 067-1 075.
- [2] QI L H, MA Y Q, ZHOU J M, et al. Effect of fiber orientation on mechanical properties of 2D- C_f /Al composites by liquid-solid extrusion following vacuum infiltration technique[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A625: 343-349.
- [3] MOSER B, ROSSOLL A, WEBER L, et al. Damage evolution of Nextel 610™ alumina fibre reinforced aluminium[J]. Acta Mater., 2004, 52: 573-581.
- [4] 王涛,赵宇新,付书红,等.连续纤维增强金属基复合材料的研究进展及关键问题[J].航空材料学报,2013,33(2): 87-96.
- [5] 王振军,陈智,张良,等.真空辅助差压浸渗制备 C_f /Al 复合材料的组织与性能[J].特种铸造及有色合金,2014(3): 233-236.
- [6] 顾姝,蔡长春,余欢,等.国产 M55J 级碳纤维三维编织 C_f /Al 复合材料组织与性能[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5): 621-627.
- [7] 马立敏,张嘉振,岳广全,等.复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J].复合材料学报,2015,32(2): 317-322.
- [8] 武高辉.金属基复合材料发展的挑战与机遇[J].复合材料学报,2014,31(5): 1 228-1 237.
- [9] 肖荣林,郑化安,付东升,等.铝基复合材料的制备及应用进展[J].铸造技术,2015,36(5): 1 118-1 121.

- [10] 肖何,陈藩,刘寒松,等.国产 ZT7H 碳纤维表面状态及其复合材料界面性能[J].复合材料学报,2020,38(8): 2 554-2 567.
- [11] MA Y Q, QI L H, ZHENG W Q, et al. Effect of specific pressure on fabrication of 2D- C_f /Al composite by vacuum and pressure infiltration[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1 915-1 921.
- [12] 廖焕文,徐志锋,余欢,等.纤维预热温度对真空气压浸渗连续 SiC_f /Al 复合材料致密度和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2014,24(9): 2 264-2 271.
- [13] LI S L, QI L H, ZHANG T, et al. Interfacial microstructure and tensile properties of carbon fiber reinforced Mg-Al-RE matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 663: 686-692.
- [14] SEONG H G, LOPEZH F, ROBERTSON D P, et al. Interface structure in carbon and graphite fiber reinforced 2014 aluminum alloy processed with active fiber cooling[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A487: 201-209.
- [15] LANCIN M, MARHIC C. TEM study of carbon fibre reinforced aluminium matrix composites: Influence of brittle phases and interface on mechanical properties[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2000, 20(10): 1 493-1 503.
- [16] 朱伯铨,李享成.刚玉-莫来石-铝尖晶石复相材料合成的热力学研究[J].耐火材料,2004,38(2): 63-65.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

