

冷却速率对 C_f/Al 复合材料组织及性能的影响

李广龙^{1,2} 高光辉^{1,2} 周启文^{1,2} 王子木^{1,2} 周 珊^{1,2} 秘嘉杰³ 田 畅^{1,3} 曲迎东^{1,2}

(1.沈阳工业大学材料科学与工程学院;2. 沈阳工业大学辽宁省高校轻金属材料与工程重点实验室;
3.沈阳工业大学工程实训中心)

摘 要 为了改善碳纤维增强铝基(C_f/Al)复合材料中由于碳纤维与基体间导热系数相差较大、容易在复合材料内部引起铸造缺陷的问题,采用超声振动结合顺序凝固的方法制备了连续 C_f/Al 复合材料,并详细分析了凝固方式对复合材料组织及性能的影响。建立并计算了连续 C_f/Al 复合材料的凝固模型,并对结果进行了比较。结果表明,当复合材料内部存在沿纤维轴向的温度梯度时,有利于改善复合材料中心部位产生缺陷的问题。随着冷却速率的提高,复合材料内部的缺陷位置会逐渐向远离冷却端偏移,复合材料的中心处的碳纤维周围的气孔缺陷也会随着冷却速率的提高逐渐减少直至消失。在沿纤维轴向冷却速率为 5.42 K/s 时,制备的 C_f/Al 复合材料比相同条件下自然冷却得到试样的强度提升了 62.5%,这是因为碳纤维周围气孔缺陷的减少有利于复合材料性能的提高。

关键词 连续 C_f/Al 复合材料;冷却速率;补缩;缺陷

中图分类号 TB331;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cooling Rate on Microstructure and Properties of C_f/Al Composites

Li Guanglong^{1,2}, Gao Guanghui^{1,2}, Zhou Qiwen^{1,2}, Wang Zimu^{1,2}, Zhou Shan^{1,2}, Mi Jiajie³,
Tian Chang^{1,3}, Qu Yingdong^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology; 2. Key Laboratory of Light Metal Materials and Engineering at Universities of Liaoning Province, Shenyang University of Technology;
3.Engineering Training Center, Shenyang University of Technology)

Abstract: In order to avoid casting defects in carbon fiber reinforced aluminum matrix composites due to great difference in thermal conductivity between carbon fiber and matrix, continuous C_f/Al composites were fabricated by ultrasonic vibration combined with sequential solidification, and the influence of the solidification mode on the composite was analyzed. The solidification model of continuous C_f/Al composites was established and calculated, and the results were analyzed comparatively. The results indicate that the temperature gradient along the fiber axis in the composite is beneficial to improving the tendency of defects in the center of the composite. With the increase of cooling rate, the position of defects in composites is gradually shifted away from the cooling end. In addition, the porosity defects around the carbon fiber in the center of the composite is gradually reduced and finally disappear. When the axial cooling rate is 5.42 K/s, the strength of fabricated C_f/Al composites is increased by 62.5% compared with that of specimens obtained by natural cooling under the same conditions, which is attributed to the reduction of porosity defects around carbon fiber, leading to performance enhancement of composites.

Key Words: Continuous C_f/ Al Composites, Cooling Rate, Shrinkage, Defects

碳纤维增强铝基(C_f/Al)复合材料具有高比强度、高比模量、良好的导电导热以及低热膨胀系数等特点,在航空、航天、装备制造等领域具有极大应用潜力^[1-4]。但目前作为铝基复合材料中的增强体材料,碳纤维并没有完全发挥出其性能优势。因此,如何使复合材料中的

碳纤维充分发挥性能优势是推动 C_f/Al 复合材料发展与应用的重要问题。

在连续 C_f/Al 复合材料的研究领域,目前更多关注碳纤维在金属基体中的分散情况,认为复合材料性能降低的原因主要在于碳纤维在基体中不能够均匀分散,容

收稿日期:2023-03-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204394);辽宁省自然科学基金资助项目(2021-BS-150);辽宁省教育厅 2021 年度科学研究经费资助项目(LJKZ0116)
第一作者简介:李广龙,男,1990 年出生,副教授,沈阳(110870),E-mail:liguanglong1990@163.com
通信作者:曲迎东,男,1975 年出生,教授,沈阳(110870),E-mail:quyidong@sut.edu.cn
引用格式:李广龙,高光辉,周启文,等. 冷却速率对 C_f/Al 复合材料组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12):1 585-1 590.
LI G L, GAO G H, ZHOU Q W, et al. Effects of cooling rate on microstructure and properties of C_f/Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 585-1 590.

易发生团簇现象形成裂纹源,从而产生裂纹^[5-7]。为强化碳纤维在基体中的均匀分散,压力浸渗技术^[8]、固态轧制工艺^[9]、电磁渗浸工艺^[10]、挤压浸渗技术^[11]和真空压力浸渗技术^[12]等被成功用于 C_f/Al 复合材料的制备。由于碳纤维与铝基体之间的热膨胀系数以及导热系数相差较大,采用传统冷却方式凝固时,由于聚丙烯腈基(PAN)碳纤维导热系数较低,导致纤维及其附近的区域与基体中无纤维的区域会产生一定的温度差,纤维附近的高温金属液对周围进行补缩,导致最后凝固的单根纤维间隙内极易形成缩松、缩孔缺陷^[13]。因此在凝固阶段,基体内部会产生微小缺陷,从而促使裂纹的产生,导致 C_f/Al 复合材料性能降低。冷却速率对改善材料的内部组织缺陷以及提高综合力学性能有着重要的影响。KHALAJZADEH V等^[14]建立了一种合金凝固过程中气体和收缩诱导孔隙形成的统一模型,发现铝合金在凝固过程中孔隙率会随着冷却速率的增加而呈现下降的趋势。于博等^[15]对 AA5182 铝合金半连续铸造过程进行了探究。结果表明,收缩孔隙的形成与铸坯内部的冷却速率有很大关联,冷却速率越大,铸件的气孔等收缩缺陷越少。MUFADI F 等^[16]研究了冷却速率对铝合金(含10.4%的 Si)内孔隙率和拉伸性能的影响,发现在制备过程中气孔和收缩缺陷难以避免,但较高的冷却速率改善了缩松、缩孔等内部组织缺陷,进而提升了铸件的力学性能。ZHAO H D 等^[17]利用 Al-4.5Cu 合金进行了定向凝固试验,对铸件微观结构进行分析,发现将凝固方式改为定向凝固后柱状区域孔隙几乎消失,这说明当熔体内部沿着某一方向产生温度梯度并发生凝固时有利于改善铝合金铸件的内部缺陷。

综上所述,将分散技术与凝固工艺相结合理论上是改善 C_f/Al 复合材料内缺陷的有效途径。前期研究表明,超声振动可使碳纤维在铝基体中实现有效分散^[13]。因此,本研究提出利用超声振动结合顺序凝固制备 C_f/Al 复合材料,并根据实际结构建立三维模型,计算了不同冷却条件下复合材料内部温度场。对不同冷却条件下制备的 C_f/Al 复合材料的组织和性能进行了测试,探明了复合材料凝固过程中缺陷产生机制,旨在为纤维增强金属基复合材料的开发和应用提供参考。

1 试验方法

1.1 数学模型

采用 ProCAST 模拟软件对铸件内部温度场进行分析,并对铸造缺陷进行预测。ProCAST (ESI Group)通过数值求解 Navier-Stokes 方程和傅立叶方程进行模拟计算。在凝固过程中一般用非线性瞬态传热方程来描述^[18]:

$$\nabla \cdot (K \cdot \nabla T) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中,ρ 为密度,kg/m³;c_p 为定压比热容,J/(kg · K⁻¹);T 为热力学温度,K;t 为次数;∇为矢量微分算子;K 为导热量;q 为潜热源项,J/kg;而在冷却凝固过程中缺陷的产生则采用 Niyama 判据进行缩孔和缩松的评估^[19]。Niyama 判据是一个局部热参数,定义如下:

$$N_y = \frac{G}{\sqrt{\gamma}} \tag{2}$$

式中,G 为温度梯度,K/m;γ 为冷却速率,K/s。这些参数是在接近凝固结束时的特定温度下进行评估。

图 1 为 C_f/Al 复合材料的三维模型和网格划分后的模型示意图,网格数为 3 105 063。使用 Visual-Cast 模块,根据模型和实际情况,设置基体材料为 Al-12Si 合金及石墨,与空气接触温度为 293.15 K。具体模拟计算参数见表 1。

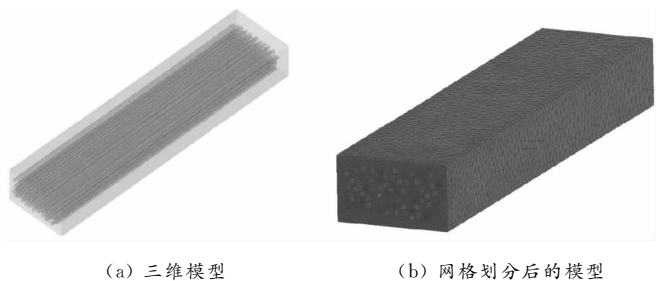


图 1 C_f/Al 复合材料的模型示意图

Fig.1 Model diagram of C_f/Al composites

表 1 模拟计算参数

Tab.1 Parameters for simulation and calculation					
浇注温度/ K	浇注时间/ s	重力加速度/ (m · s ⁻²)	合金密度/(kg · m ⁻³)	碳纤维导热系数/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	铝基体的导热系数/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
973	4	9.8	2 700	30	155

1.2 复合材料制备

采用 ZL102 合金为基体,增强体材料为 T300 碳纤维,其中每束纤维中包含 3 000 根直径为 7 μm 单丝碳纤维。采用超声振动结合顺序凝固的方法制备连续 C_f/Al 复合材料。将化学镀镍处理后的碳纤维制成预制体,试验原理见图 2。待铝合金熔化后,由升降机构控制的预制体及超声振头深入到熔体中施加振动。铝合金熔炼、碳纤维浸渗及分散的过程均在真空炉中进行。振动完成后将预制体提升离开液面,在沿纤维轴向一侧施加强制空气冷却。冷却过程中通过沿纤维轴向设置的 4 根热电偶实时监测各位置的温度。为探究冷却速率对 C_f/Al 复合材料组织及性能的影响,分别以自然冷却、1.68、3.56和 5.42 K/s 的速率冷却。

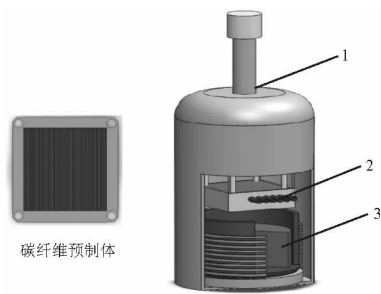


图 2 超声振动结合顺序凝固的试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental device for ultrasonic vibration combined with sequential solidification

1.超声振头 2.冷却气体 3.铝金属液

1.3 微观结构和力学性能

将试样分别采用 100 号、600 号、1000 号、1500 号和 2000 号砂纸打磨抛光。使用体积分数为 10% 的 HF 溶液进行腐蚀。采用蔡司热场扫描电镜 (ZEISS Gemini SEM 300) 对复合材料的横截面微观组织结构及断口形貌进行观察;通过扫描电镜配备的能量散色 X 射线系统 (EDS) 对复合材料的元素分布进行分析;利用拉伸电子试验机 (MTS-E45) 在室温条件下进行拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min。

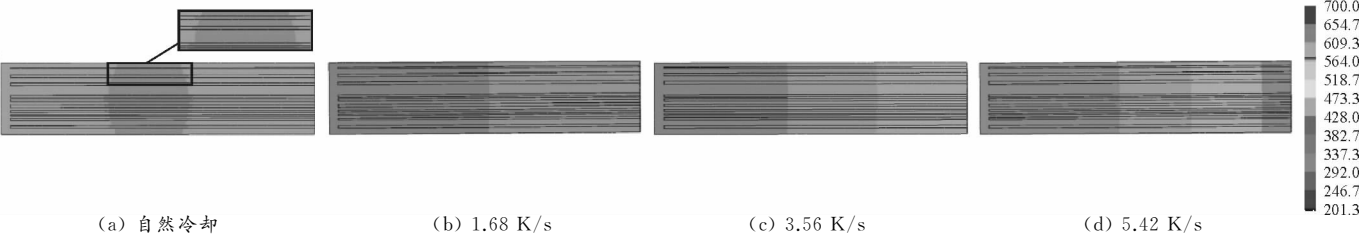


图 3 不同冷却速率下的温度场分布

Fig.3 Temperature field distribution under different cooling rates

在施加顺序凝固方法改进后,在 1.68 K/s 的冷却速率下,铸件不会在内部中心位置形成孤立液相区,而是从右向左形成一定的温度梯度,见图 3b。复合材料试样冷却凝固过程也变为右侧冷却端先凝固,而后逐渐向左推进。试样内部将产生沿纤维轴向的温度梯度,促使尚未凝固区域得到铝熔体的补充,在这种情况下便可减少复合材料内部缩孔缩松的倾向性。随着铸件内部

2 试验结果与分析

2.1 连续 C_f/Al 复合材料的凝固过程

图 3 为不同冷却速率下连续 C_f/Al 复合材料铸件内部温度场分布情况。可以看出,在自然冷却过程中,由于环境温度较低,同时随着冷却时间延长,铸件内温度由外向内逐渐降低,凝固由外向内推进。随着冷却过程的进行,在铸件内部中心位置形成了孤立液相区。孤立液相区的金属液在冷却过程中作为最后凝固区域需要大量金属液对孤立液相区形成的空隙进行补缩,因此会在该处产生缩孔等缺陷。同时由于 PAN 基碳纤维导热系数低于铝基体的,所以其温度降低的速率始终会低于基体材料。通过图 3a 的局部放大图也可以看出,碳纤维的冷却速率低于铝合金基体的冷却速率。在这种情况下基体金属会率先凝固,使得纤维及其附近的基体区域与无纤维的区域形成一定的温度差,迫使纤维附近的高温金属液不得不对周围进行补缩,导致最后凝固的单根纤维周围区域极易形成缩松缩孔缺陷。这与 KANG C G 等^[20]关于 Al₂O₃ 纤维在铝基中凝固传热的研究结果相一致。

的温度梯度继续加大,见图 3c 和图 3d,铸件内部最后凝固的液相区域会随着冷却速率的增加向远离冷却端偏移,有利于消除铸件内部的整体缺陷。

在凝固过程中由于液体收缩和凝固收缩,铸件通常产生缩松、缩孔等铸造缺陷^[21-22],会严重影响复合材料的综合性能,因此,对复合材料凝固过程缺陷的产生进行模拟预测。图 4 为连续 C_f/Al 复合材料内部总体缩

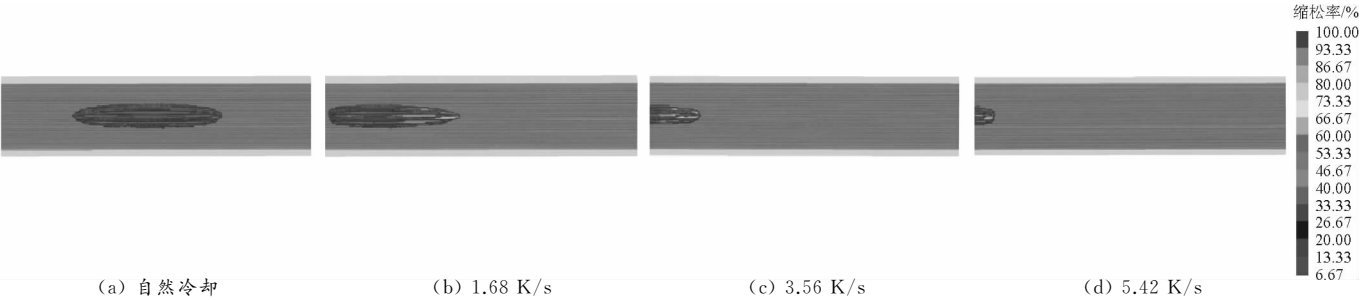


图 4 ProCAST 模拟缺陷分布预测

Fig.4 Distribution prediction of defects simulated by ProCAST

孔和缩松倾向预测。可以发现,缺陷主要存在于铸件的中间位置,而四周并未有缺陷的存在。这表明中心最后凝固区域得不到补缩,因此产生了大量缺陷,这与温度场模拟计算结果一致。采用顺序凝固方法后,试样内部产生了一定的温度梯度,复合材料内部的缺陷会逐渐向后凝固一侧移动,见图 4b~图 4d,并且随着冷却速率增大,缺陷向后凝固一侧的移动倾向也会增大,复合材料中心区域将获得无缺陷的组织,缺陷将移至后凝固的预

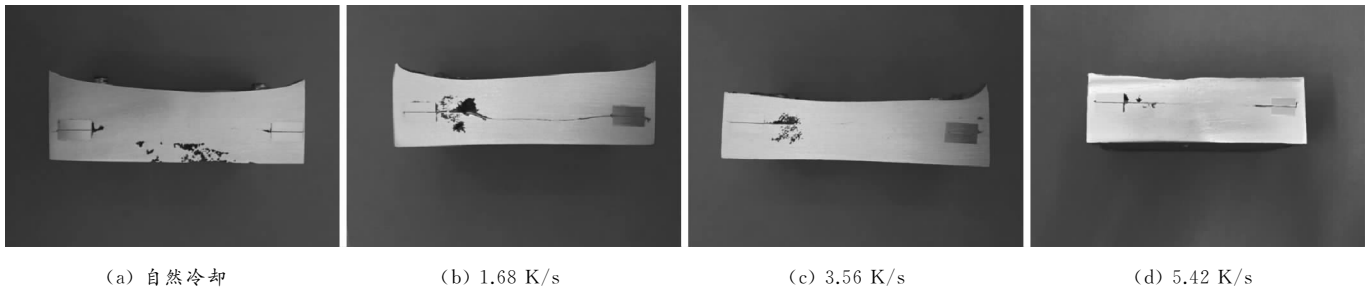


图 5 C_f/Al 复合材料宏观试样

Fig.5 Macroscopic specimens of the C_f/Al composites

下相比缺陷位置发生了明显变化,见图 5d,这与模拟计算的缩孔、缩松缺陷产生的位置及大小吻合。

图 6 为连续 C_f/Al 复合材料在不同冷却速率下内部的微观组织。可以看到,铝基体中有大量的缺陷存在,气孔均围绕在碳纤维周围。这是因为碳纤维的降温速率远低于基体材料,因此碳纤维周围往往成为最后凝固区域,在自然冷却条件下基体金属会率先凝固,碳纤维周围的高温金属液不得不对周围进行补缩,造成大量的缩松、缩孔缺陷,这与模拟结果一致。当施加一定冷却速率后,存在于碳纤维周围的气孔缺陷得到了明显改

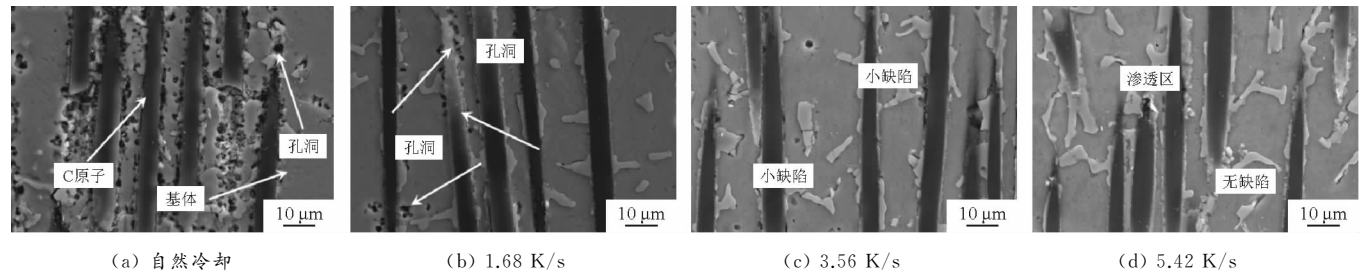


图 6 不同冷却速率下复合材料的微观组织

Fig.6 Microstructure of the composites at different cooling rates

著减少。试验结果与图 3 和图 4 中结果一致。可见,沿纤维轴向冷却速率的提高可以有效地减少熔体内部缺陷的产生,在复合材料试样主体中心部位形成无铸造缺陷的内部组织,对连续 C_f/Al 复合材料综合性能的提高具有积极意义。

2.3 力学性能和断裂特征

图 7 为连续 C_f/Al 复合材料在不同冷却速率下的应力-应变曲线。可以看出,在自然冷却状态下连续 C_f/Al 复合材料的抗拉强度仅为 72.6MPa,弹性模量为

留补缩区域内,从而获得致密度高的复合材料。

2.2 冷却速率对微观组织的影响

采用超声振动结合顺序凝固制备的连续 C_f/Al 复合材料见图 5。可以看出,连续 C_f/Al 复合材料内部存在大量缩松、缩孔等缺陷,主要在试样内部的中间部位产生。随着冷却速率增加,缺陷的位置逐渐向远离冷却端移动,且缩松、缩孔等铸造缺陷尺寸逐渐减小。在 5.42 K/s 冷却速率下试样内部的缺陷与自然冷却条件

善,见图 6b。与自然冷却状态下制备的试样相比,在冷却过程中当试样内部存在一定温度梯度时仅在纤维周围出现少量的气孔缺陷,这是因为后凝固区域起到良好的补缩作用。但是由于纤维冷却速率较小,在排布较为紧密的纤维簇间隙内部受凝固过程的影响仍会存在少量气孔。随着冷却速率增加到 5.42 K/s 时,碳纤维与铝基体结合紧密,复合界面光滑平整,缩松、缩孔缺陷基本消失。这是由于复合材料试样内部存在着更大的温度梯度使得强制冷却效果增加,等温面上的碳纤维与基体间温差被无限缩小,使得复合材料内部的缩孔缺陷显

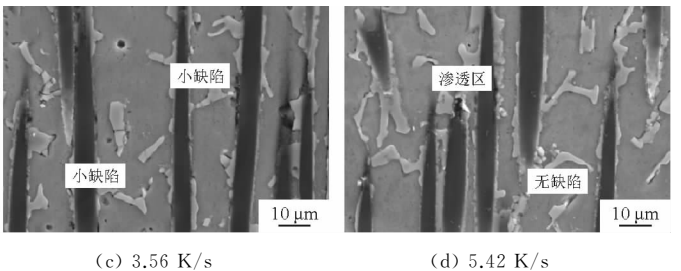


图 7 不同冷却速率下复合材料的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of the composites at different cooling rates

95.5 GPa。随着冷却速率的增加,复合材料的抗拉强度得到提升,在5.42 K/s冷却速率下达到了118 MPa,弹性模量为 114.7 GPa。但冷却速率的提升,还将引起基体组织中 Si 分布的改变,见图 6。基体组织中 Si 分布的变化及界面情况将对材料的塑性具有着重要影响,故随着冷却速率的增加,材料的塑性没有出现理论上的增长。

图 8 为连续 C_f/Al 复合材料的拉伸断口形貌。可以看出,断口较为平整,大量的气孔存在于碳纤维间隙处。SHA J J 等^[23]研究表明,当 C_f/Al 复合材料的断口较为平齐,纤维呈现出被直接切断状态时,纤维并没有承受载荷便被复合材料基体中产生的应力集中直接

切断。图 9 为断口区域下方的截面图及 EDS 元素分析。可以看出,碳纤维周围存在着大量气孔缺陷,见图 9c。此外,碳纤维被裂纹直接切断,而裂纹的两端分别为两个气孔。这表明在承受载荷时,碳纤维周围的气孔处产生了严重的应力集中,较大的应力使得载荷不能通过界面传递给纤维,而是直接产生裂纹切断碳纤维,使得碳纤维并未承受过大载荷便发生了断裂。

随着冷却速率增加,拉伸断口处的气孔逐渐减少,断口的形态逐渐由平整断裂变为纤维拔出的断裂状态。当沿纤维轴向的冷却速率达到 5.42 K/s 时,复合材料的拉伸断口处出现了明显的纤维拔出现象,见图 8d,表明在试样拉伸过程中,得碳纤维并未承受过大载荷便

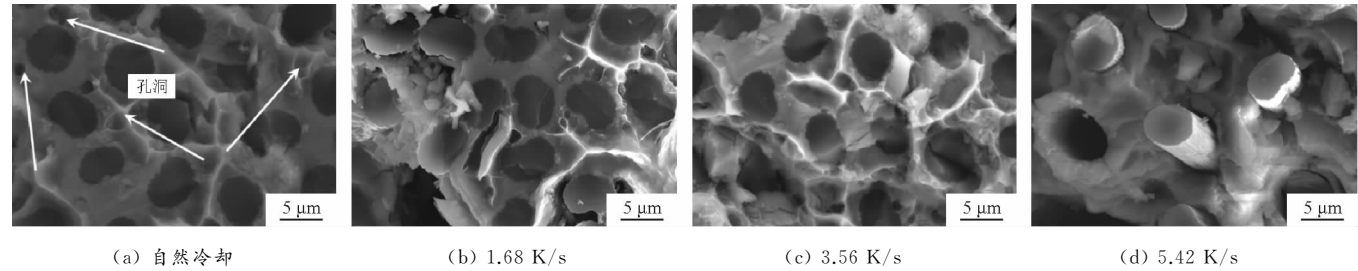


图 8 复合材料的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies of the composites

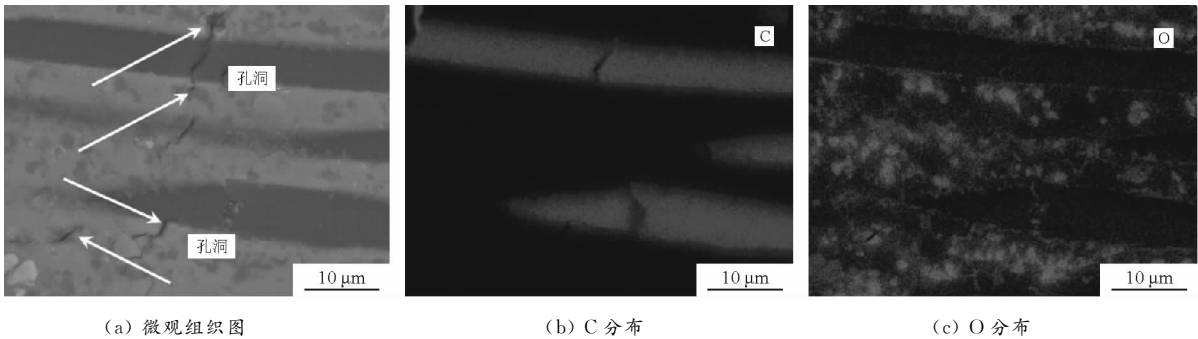


图 9 复合材料的 EDS 能谱图

Fig.9 EDS results of the composites

发生了断裂。

随着冷却速率增加,拉伸断口处的气孔逐渐减少,断口的形态逐渐由平整断裂变为纤维拔出的断裂状态。当沿纤维轴向的冷却速率达到 5.42 K/s 时,复合材料的拉伸断口处出现了明显的纤维拔出现象,见图 8d,表明在试样拉伸过程中,载荷通过基体和碳纤维的界面传递到每一根碳纤维上^[24],这是获得高抗拉强度复合材料的理想断裂状态,此时连续 C_f/Al 复合材料的抗拉强度也相对较高。

在较低的冷却速率状态下,铸造产生的缩松、缩孔缺陷导致了碳纤维产生应力集中,从缺陷处形成断裂源,使纤维和铝基体整体发生变形或断裂,降低了材料的抗拉强度,进而影响复合材料的力学性能^[25]。当冷却速率较高时,纤维周围基体光滑平整没有明显的孔洞

存在,碳纤维呈现短拔出形态,有利于复合材料拉伸性能的改善。因此,加快连续 C_f/Al 复合材料的冷却速率将对提高连续 C_f/Al 复合材料的综合性能具有重要意义。但是 C_f/Al 复合材料的强度和塑性与界面结合、纤维分布状态和基体微观组织等均有着重要联系,单纯地减少铸造缺陷并不能大幅提升复合材料的性能。

3 结 论

(1)结合 C_f/Al 复合材料铸件内部温度场数值模拟计算可知,由于 PAN 基碳纤维导热系数低于铝基体,凝固过程中纤维及其附近的基体区域与无纤维的区域将形成一定的温度差,这使得纤维附近的高温金属液不得不对周围进行补缩,导致最后凝固的单根纤维周围区域形成缩松、缩孔缺陷。

(2) 超声振动结合顺序凝固工艺, 将使连续 C_f/Al 复合材料内部在凝固过程中产生沿纤维轴向的温度梯度, 这将促进后凝固区域补缩作用的增强, 达到改善疏松、缩孔缺陷的目的。随着复合材料沿单向冷却速率增加, 等温面上碳纤维与基体间温差被无限缩小, 有利于减少复合材料内部的缺陷的产生。

(3) 在自然冷却条件下, 复合材料拉伸断口较为平整, 这是由于大量气孔存在于碳纤维间隙处, 产生严重的应力集中使得碳纤维被直接切断。当沿纤维轴向的冷却速率达到 5.42 K/s 时, 复合材料内部缩孔缺陷消失, 拉伸断口处呈现出了纤维拔出的状态, 比自然冷却试样的强度提升了 62.5%。

参 考 文 献

- [1] 王敏, 曲迎东, 李广龙, 等. 电镀短碳纤维增强铝基复合材料的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1 117-1 120.
- [2] 刘晨曦, 于惠舒, 张楠楠, 等. 碳纤维增强铝基复合材料的研究现状[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(12): 1 205-1 218.
- [3] CALISKAN E, IPEK S K, DISPINAR D, et al. Development of Coating Methods of Fiber Reinforced for Different Matrix Composites for Industrial Applications[C]. Performance and Analysis held during the 151st TMS Annual Meeting and Exhibition, Anaheim, USA, 2022.
- [4] 李廷举, 刘嘉鸣, 杨茜, 等. 碳纤维增强铝基复合材料制备及强化机制研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1 177-1 181.
- [5] HU X F, FANG J, XU F, et al. Real internal microstructure based key mechanism analysis on the micro-damage process of short fiber-reinforced composites[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 34 761.
- [6] 邓高生, 杨瑞宾, 刘忠侠. 短碳纤维增强 2024 铝基复合材料微屈服行为研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 637-640.
- [7] YI L F, YAMAMOTO T, ONDA T, et al. Microstructure and thermal properties of nickel-coated carbon fibers/aluminum composites[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(19): 1-10.
- [8] ZHU C G, SU Y S, WANG X S, et al. Process optimization, microstructure characterization and thermal properties of mesophase pitch-based carbon fiber reinforced aluminum matrix composites fabricated by vacuum hot pressing[J]. Composites, 2021, B215: 108 746.
- [9] 张峻嘉. 碳纤维编织布增强铝基复合材料的制备及其渗浸机制研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.
- [10] EID M, KAYTBAY S, ELKADY O, et al. Microstructure and mechanical properties of C_f/Al composites fabricated by hot coining technique[J]. Ceramics International, 2021, 47(15): 21 890-21 904.
- [11] 吕钊钊. 熔体挤压浸渗金属涂覆碳纤维增强铝基复合材料微观组织与力学性能[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2021.
- [12] 陈卫军. 真空压力浸渗 C_f/Al 复合材料 T 型件的成形工艺研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- [13] LI G L, QU Y D, ZHOU Q W, et al. The effect of carbon fibers distribution on fracture behavior of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites prepared by ultrasonic vibration[J]. Materials Research Express, 2019(6): 095 606.
- [14] KHALAJZADEH V, CARLSON A K D, BACKMAN D G, et al. A pore-centric model for combined shrinkage and gas porosity in alloy solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2017, A48(4): 1 797-1 816.
- [15] 于博, 豆瑞峰, 王一帆, 等. AA5182 铝合金半连续铸造过程热裂敏感性模拟研究[J]. 铸造, 2022, 71(12): 1 529-1 536.
- [16] MUFADI F, IRIAN M A. Effect of cooling rates on the 3D porosity of permanent mold castings measured by computed tomography[J]. Materials Evaluation, 2015, 73(5): 603-610.
- [17] ZHAO H D, WU C Z, LI Y Y. Porosity formation in columnar region of unidirectional solidified Al-4.5Cu casting[J]. Cast Metals, 2014, 21(1-4): 313-318.
- [18] WU H, SHI H M, LIU H F, et al. Numerical simulation of flow field and temperature field on aluminum alloy engine cylinder in casting process[J]. Materials Science Forum, 2011, 704-705: 50-57.
- [19] NIYAMA E, UCHIDA T, MORIKAWA M, et al. A method of shrinkage prediction and its application to steel casting practice[J]. Journal of Japanese Foundry Engineering Society, 1982, 7: 52-63.
- [20] KANG C G, RAY S, ROHATGI P K. A micromechanical solidification heat transfer in one dimensional Al- Al_2O_3 composite and its consequence on microstructure evolution[J]. Materials Science and Engineering, 1994, A188(1-2): 193-199.
- [21] 贾浩敏, 尹析明, 唐建新. 铸件凝固过程中缩松、缩孔预测及数值模拟优化[J]. 热加工工艺, 2008(17): 51-53, 57.
- [22] 陈绪梁, 王剑涛, 黄锋, 等. 模具镶块铸钢件缩孔缩松预测及铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(3): 257-261.
- [23] SHA J J, LÜ Z Z, SHA R Y, et al. Improved wettability and mechanical properties of metal coated carbon fiber-reinforced aluminum matrix composites by squeeze melt infiltration technique[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 317-330.
- [24] 张育铭. 碳纤维增强铝基复合材料制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [25] 李广龙, 曲迎东, 刘野, 等. 超声波振动法制备 C_f/Al 复合材料的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(7): 744-746.

(编辑: 彭瑾)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |