

Ti 层体积分数对真空热压 Ti/Ti-Al 复合材料性能影响

马志健 张守银 侯晨阳 卢百平 徐志锋 余欢
(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 以纯 Ti 箔和 Al 箔为原材料,通过真空热压法(VHP)制备了 Ti/Ti-Al 叠层复合材料,研究了 Ti 层体积分数对其力学性能的影响。结果表明,Ti 层体积分数对 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的性能有明显的影响,Ti 层体积分数为 45% 的叠层复合材料具有较好的力学性能,室温抗拉强度为 313.5 MPa,抗弯强度为 911.5 MPa。Ti 层体积分数为 45% 的叠层复合材料通过韧性层阻碍裂纹扩展及脆性层中二次裂纹增加裂纹路径,有效吸收断裂能,提高材料的强度;弯曲试验中,Ti 层体积分数为 45% 的叠层复合材料裂纹扩展路径长且曲折,韧性 Ti 层通过裂纹尖端的塑性变形钝化裂纹,阻止裂纹扩展,提高了材料的韧性。

关键词 真空热压法;叠层复合材料;微观结构;力学性能

中图分类号 TB331 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ti Layer Volume Fraction on Mechanical Properties of Ti/Ti-Al Laminated Composites Prepared by Hot-pressing

Ma Zhijian, Zhang Shouyin, Hou Chenyang, Lu Baiping, Xu Zhifeng, Yu Huan
(Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University)

Abstract: Ti/Ti-Al laminated composites were prepared with pure Ti foil and Al foil as raw materials by vacuum hot pressing(VHP). The effects of Ti layer volume fraction on the mechanical properties of Ti/Ti-Al laminated composites were investigated. The results indicate that the volume fraction of the Ti layer has a significant effect on the properties of the Ti/Ti-Al laminated composite. When the Ti layer volume fraction is in range of 33% ~ 65%, the Ti/Ti-Al laminated composite with 45% Ti layer exhibits desirable room temperature tensile strength (313.5 MPa) and flexural strength(911.5 MPa), which hinders crack propagation and extension path of secondary crack in brittle layers through ductile layers, absorbing the fracture energy and improving the strength effectively. In the bending test, the crack propagation path of the Ti/Ti-Al laminated composite with 45% Ti layer is long and tortuous, and the ductile Ti layer passivates the crack through plastic deformation at the crack tip, preventing the crack from expanding, thus improving toughness of the composites.

Key Words: Vacuum Hot-pressing, Laminated Composites, Microstructure, Mechanical Properties

金属间化合物的性能介于金属与陶瓷之间,是理想的高温结构材料,在航空航天应用中具有巨大潜力^[1~3],但因其高的室温脆性限制了进一步的工业应用^[4]。用仿照自然生物(如天然贝壳^[5]、鲍鱼壳^[3]等)结构制备出的叠层复合材料,可以通过特殊的韧性-脆性相间的结构,提升金属间化合物的室温延展性,改善金属间化合物的室温脆性。

叠层复合材料的常用制备方法有沉积法^[8~10]、轧制法^[11~15]、热压法^[6,7,16~20]等,其中热压法可以随意调节成分以制备不同微观组织的复合材料,应用较为广

泛。ZHU K 等^[6]用真空热压法制备出具有仿生结构的叠层复合材料,分析了裂纹扩展行为及断裂机理。LYU S Y 等^[16,17]用真空热压法制备出不同微观组织结构的复合材料,研究了烧结温度和层序对其力学性能的影响,并提出了一种新的理论强度计算公式。VECCHIO K S 等^[18]在空气中热压制备了陶瓷纤维增强的金属间化合物叠层复合材料并研究了其断裂性能。结果表明,界面开裂与脆性 TiAl₃ 相及残余 Al 相的体积分数有关。WAN X 等^[19]采用混合烧结法制备出钛铝叠层复合材料,分析了叠层复合材料特有的断裂机

收稿日期:2021-11-28;修改稿收到日期:2021-12-19
基金项目:江西省教育厅科技资助项目(DA201903144);博士启动基金资助项目(EA201703481)
第一作者简介:马志健,男,1998 年出生,本科生,南昌(330063),E-mail:mazhjian2020@163.com
通信作者:张守银,男,1982 年出生,讲师,南昌(330063),E-mail:zhangsy@nchu.edu.cn
引用格式:马志健,张守银,侯晨阳,等. Ti 层体积分数对真空热压 Ti/Ti-Al 复合材料性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):1 040-1 046.
MA Z J, ZHANG S Y, HOU C Y, et al. Effects of Ti layer volume fraction on mechanical properties of Ti/Ti-Al laminated composites prepared by hot-pressing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):1 040-1 046.

理。HARACH D J 等^[20] 在空气中采用热压法制备了 Ti-3Al-2.5V/Al 叠层复合材料,研究了其微观组织演变过程,并通过线性动力学揭示了 Ti/Al 界面反应机理。

对于含有相同体积分数延性增强相的金属基复合材料,通过叠层结构方式增强的增韧效果高于纤维和颗粒增强^[21]。ADHARAPURAPU R R 等^[22] 系统研究了 Ti/Al₃Ti 叠层复合材料裂纹扩展行为,发现在韧性层体积分数不变的情况下,韧性层厚度对裂纹扩展速率影响不大,而韧性层体积分数从 20% 提升至 40%,可使整体金属间化合物 Al₃Ti 疲劳性能提升一个数量级。PRICE R D 等^[23] 的研究表明,少量残余 Al 可以提高合金的力学性能。LYU S Y 等^[17] 通过真空热压法制备出不同 Ti 层体积分数的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料,发现 Ti 层体积分数为 53% 的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料抗拉强度最大且有适当的室温延展性。目前,对 Ti/Ti-Al 叠层复合材料组织和力学性能做了较多研究,而塑性相的强韧化机制研究相对较少。

本课题以纯 Ti 箔和 Al 箔为原材料,采用真空热压法(VHP)制备不同 Ti 层体积分数的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料,通过光镜(OM)、扫描电镜(SEM)及 X 射线衍射仪(XRD)观察微观组织并进行相分析,通过拉伸及三点弯曲试验对复合材料的力学性能和裂纹扩展行为进行表征和研究,得到力学性能较好的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料。重点从断裂力学及断口形貌学的角度,揭示叠层复合材料的强韧化机制。

1 试验材料及方法

1.1 叠层复合材料结构设计

原材料为工业纯 Ti 箔和 Al 箔,化学成分见表 1。Ti 箔厚度为 200 μm 和 100 μm,Al 箔厚度为 200 μm。将原材料剪裁为 φ100 mm 的圆箔,按图 1 进行堆叠制成预制体。叠层结构 3 次试验设计为:第 1 次为 6 层 200 μm 的 Ti 箔+5 层 200 μm 的 Al 箔,Ti 层理论体积分数约为 55%,记为 65Ti;第 2 次为 10 层 100 μm 的 Ti 箔+9 层 200 μm 的 Al 箔,Ti 层理论体积分数约为 36%,记为 45Ti;第 3 次为 9 层 100 μm 的 Ti 箔+8 层 200 μm 的 Al 箔,Ti 层理论体积分数为 36%,记为 33Ti。用体积分数为 10% 的 HF 和质量分数为 10% 的 NaOH 分别清洗 Ti 箔和 Al 箔,并将经过预处理的箔

表 1 原始箔材的化学成分

Tab.1 Chemical composition of original foil		%										
材料	w _B											
	Fe	C	N	O	H	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Ti 箔	0.13	0.012	0.003	0.11	0.003	—	—	—	—	—	—	余量
Al 箔	0.35	—	—	—	—	0.25	0.05	0.3	0.03	0.05	0.03	余量



图 1 箔材叠层顺序示意图

Fig.1 Schematic diagram of lamination sequence of foil
材放入体积分数为 10% 的 C₂H₅OH 中进行超声波清洗并干燥。

1.2 制备过程

采用真空热压法(VHP)将堆叠好的预制体放入真空热压炉(ZM-44-12Y)中,制备 Ti/Ti-Al 叠层复合材料。首先,从室温升温至 600 ℃,10 MPa 并保温,此阶段 Ti 箔和 Al 箔发生固-固扩散反应,初步实现 Ti 层和 Al 层的结合;随后升温至铝熔点(650~675 ℃)进行保温,此阶段为了防止铝液熔化后挤出模具,将压力降为 0,相比于固-固反应,固-液反应可以更快地将 Al 层消耗完成^[24];最后进行 950 ℃×1 h 的高温退火,此阶段施加压力为 10 MPa 或 40 MPa,高温退火可以提高复合材料的致密度及力学性能^[25],且在 950 ℃高温退火时具有较好的拉伸及弯曲性能^[26]。1060Al 熔点为 660 ℃,分别在 675、660 和 657 ℃进行热压。通过观察第 1 次试验制备 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的微观组织,发现其组织缺陷较多,故在后续试验中通过提高退火阶段的热压,以减少其组织缺陷。图 2 为制备工艺图,具体工艺参数见表 2。

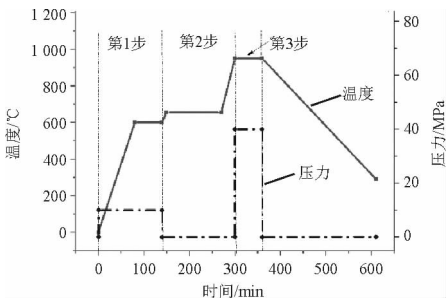


图 2 制备工艺示意图

Fig.2 Schematic diagram of preparation process

表 2 Ti/Ti-Al 叠层复合材料具体制备工艺参数

Tab.2 Preparation process parameters of Ti/Ti-Al laminated composites

步骤	第 1 步				第 2 步				第 3 步			
	温度/℃	时间/h	压力/MPa		温度/℃	时间/h	压力/MPa		温度/℃	时间/h	压力/MPa	
1	600	1	10		660	2	0		950	1	10	
2	600	1	10		675	2	0		950	1	40	
3	600	1	10		657	2	0		950	1	40	

1.3 微观组织表征

在制备的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料上切取金相试样, 镶样并用砂纸进行打磨、抛光, 最后用腐蚀液(5% 的 HF+15% 的 HNO_3 +80% 的 H_2O)腐蚀试样 10~20 s。使用 X 射线衍射仪(D8ADVANCE)确定 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的物相, 并通过光镜(IM 300)和扫描电镜(SU1510)及能谱分析仪(INCA 250X-Max 50)观察其微观组织及分析相组成。

1.4 力学性能测试

在室温下, 用电子万能试验机(Instron5569)对 Ti/Ti-Al 叠层复合材料进行拉伸及三点弯曲试验。拉伸试验加载速度为 0.2 mm/min, 三点弯曲试验加载速度为 2 mm/min, 图 3 为拉伸试样和弯曲试样。

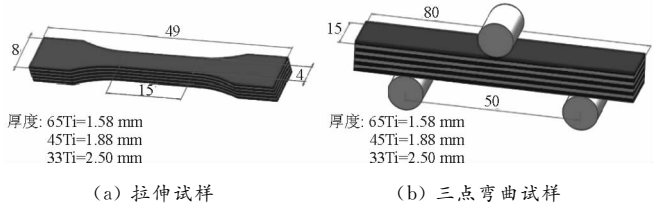


图 3 拉伸试样和弯曲试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of tensile specimen and bending specimen

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织

图 4 为真空热压法制备的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料横截面宏观组织。从宏观上看无明显缺陷, 韧性 Ti 层与脆性 Ti-Al 金属间化合物层结合较好。

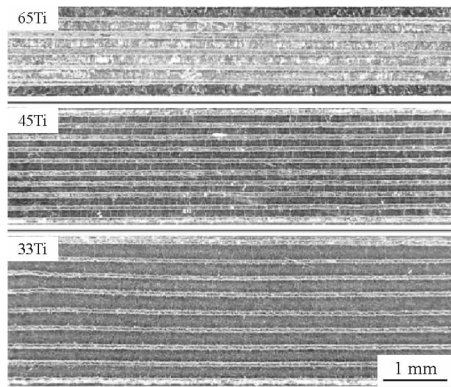


图 4 不同 Ti 体积分数的 Ti-Al 叠层复合材料光镜图
Fig.4 OM images of Ti/Ti-Al laminated composites with different Ti volume fraction

研究表明, Ti 和 Al 原子之间由于扩散系数差异会出现柯肯达尔(Kirkendall)孔洞^[27, 28], 而大量的柯肯达尔孔洞会降低金属间化合物层的硬度, 但对冲击韧性影响很小^[29]。图 5 为 65Ti、45Ti 和 33Ti 试样的显微组织。可以看出, 45Ti 试样组织中存在少量柯肯达尔孔洞, 而 65Ti 中存在大量的柯肯达尔孔洞, 33Ti 次之。从图 5d 和图 5e 也可以看出, 45Ti 较为致密, 而 65Ti 存在大量的柯肯达尔孔洞。对比 45Ti 和 33Ti 低温反应阶段(第 2 步)设定的温度, 可知随着温度升高, Ti 和 Al 的扩散速率加快^[29], 复合材料中柯肯达尔孔洞减少, 提高了复合材料的致密度。对比 65Ti 和 45Ti、33Ti 高温退火阶段施加的压力可知, 增大施加压力可以减少 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的柯肯达尔孔洞, 提高所制备复合材料的致密度。根据采用不同工艺参数制备的 65Ti、45Ti 和 33Ti 中柯肯达尔孔洞的分

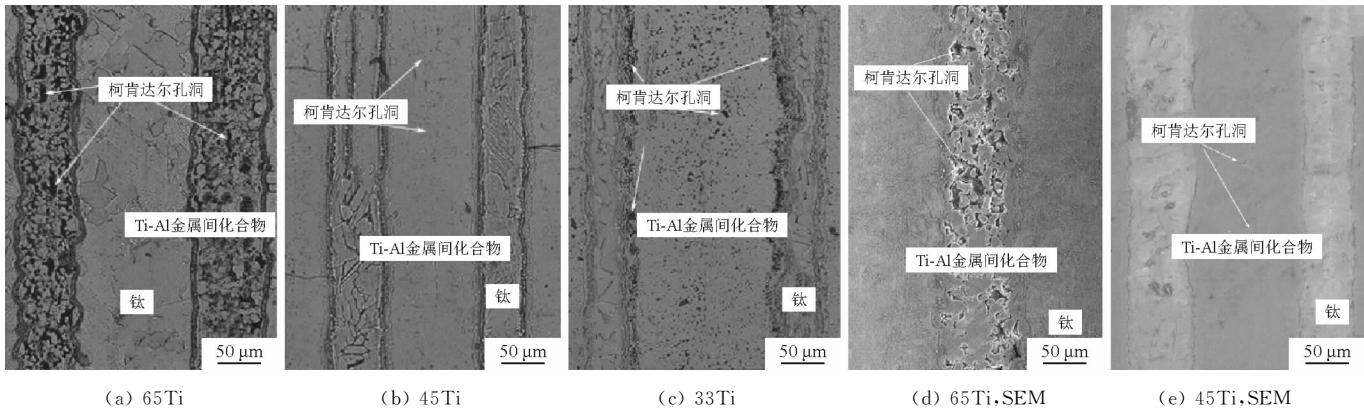


图 5 65Ti、45Ti 和 33Ti 试样微观形貌

Fig.5 Microstructures of 65Ti, 45Ti and 33Ti specimens

析结果可知, 通过优化低温反应阶段(第 2 步)的温度或高温退火阶段(第 3 步)的压力等工艺参数, 可使金属间化合物层中的柯肯达尔孔洞明显减少。

图 6 为 45Ti 叠层复合材料的相组成及相分布。通过 EDS 线扫描(见图 6b), 得到 Ti 和 Al 在韧性 Ti 层、脆性 Ti-Al 金属间化合物层的变化趋势。从 EDS 面扫

描可知, 在制备复合材料的过程中, Ti 箔和 Al 箔之间发生了相互扩散, 见图 6e。EDS 点扫描分析结果见表 3。对照二元 Ti-Al 相图^[30], 4 点对应的成分分别为 TiAl_3 、 TiAl 、 Ti_3Al 和 Ti, 与先前研究结果一致^[6, 16, 31]。从图 6d 和相图可知, 组织中还有少量的 TiAl_2 相。TiAl₂ 相是中间相, 为 Ti_3Al 与 TiAl 反应生成物^[32]。

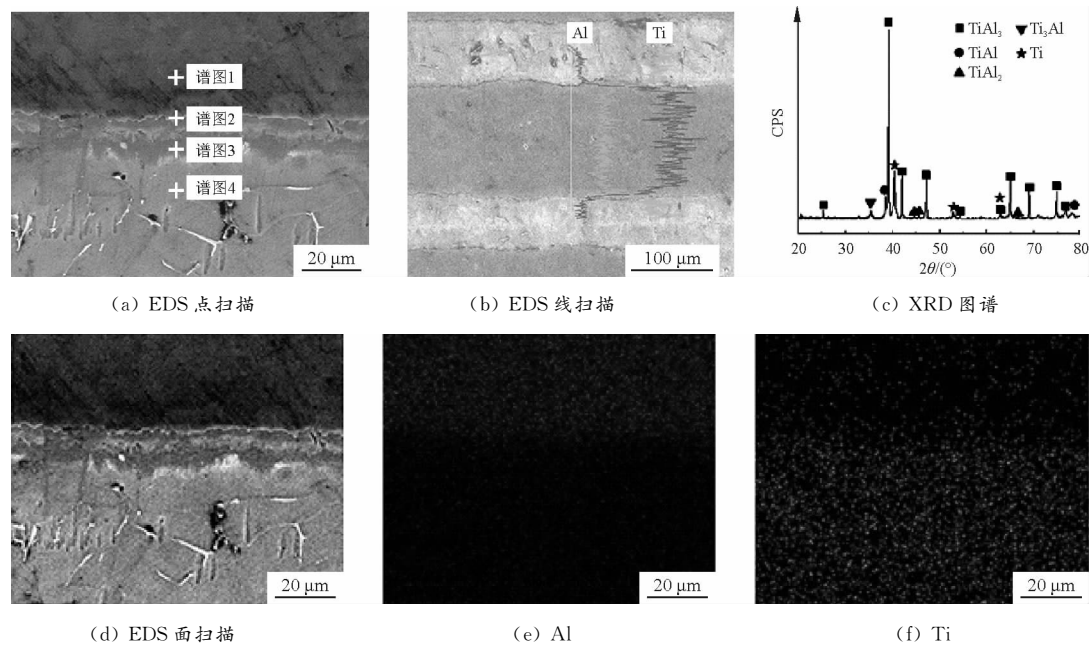


图 6 45Ti 叠层复合材料相组成
Fig.6 Phase composition of 45Ti laminated composite

表 3 图 6a 中 EDS 点分析结果

谱图	$x_B/\%$		相
	Ti	Al	
1	26.2	73.8	TiAl ₃
2	53.7	46.3	TiAl
3	74.96	25.04	Ti ₃ Al
4	88.19	11.81	Ti

2.2 拉伸性能及断口形貌

图 7 和图 8 分别为 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的拉伸性能及断口形貌。从图 7a 看出,弹性变形阶段,45Ti 的弹性变形区长于 65Ti,都明显大于 33Ti;同时 65Ti 延展性优于 45Ti,又都明显优于 33Ti。从图 7b 看出,65Ti 和 45Ti 叠层复合材料的抗拉强度差别不大,但都大于 33Ti 叠层复合材料,表明韧性 Ti 层的厚度对叠层复合材料的抗拉强度起到关键作用,此结果与文献[16, 17]一致。还可以看出,65Ti 复合材料的伸长率高于

33Ti 和 45Ti,33Ti 的伸长率几乎为零。从图 8 看出,对于不同 Ti 体积分数的 Ti-Al 叠层复合材料,其断口主要由两部分组成:Ti 层延性断口和 Ti-Al 金属间化合物层解理断口。从图 8c 看出,45Ti 拉伸断口的韧性 Ti 层有大量韧窝存在,发生延性断裂。脆性 Ti-Al 金属间化合物层多处出现二次裂纹,发生解理断裂,同时

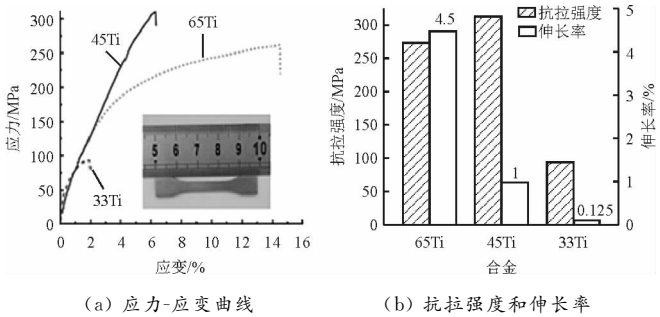


图 7 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的力学性能
Fig.7 Mechanical properties of Ti/ Ti-Al laminated composites

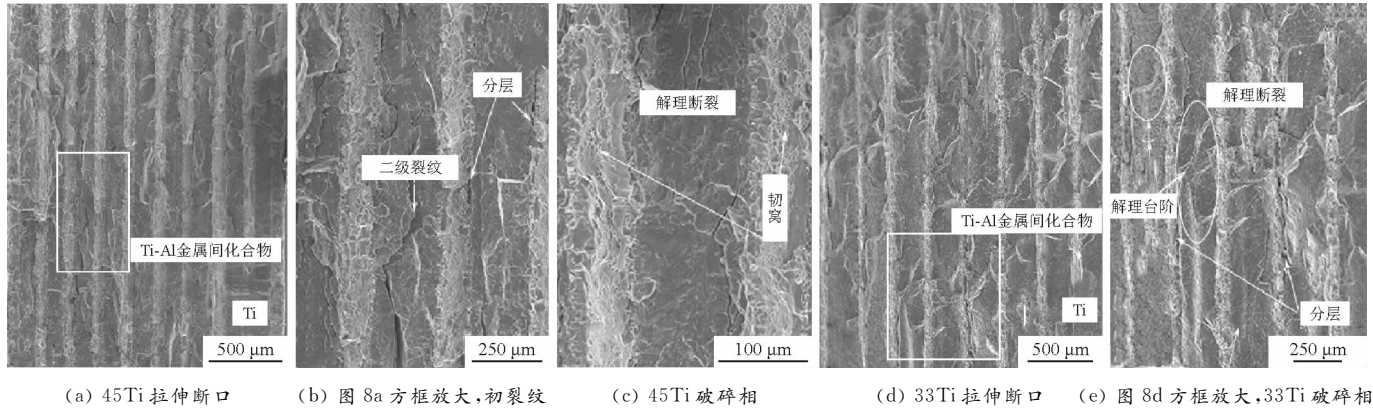


图 8 Ti/Ti-Al 叠层复合材料断口形貌
Fig.8 Fracture morphologies of Ti/ Ti-Al laminated composites

局部韧性 Ti 层和脆性 Ti-Al 金属间化合物层出现层间开裂(见图 8b)。与 45Ti 拉伸断口比较,33Ti 韧性 Ti 层较薄且存在较少韧窝,见图 8d,表现为较差的抗拉强度(见图 7b)。脆性 Ti-Al 金属间化合物层存在解理台阶,但未出现二次裂纹;同时局部韧性 Ti 层和脆性 Ti-Al 金属间化合物层出现层间开裂,见图 8e。65Ti 主要发生延性断裂,33Ti 主要发生脆性断裂,而 45Ti 在提高抗拉强度的同时存在适当的延展性,具有相对较优的抗拉强度,高于 Ti-Al₃Ti 叠层复合材料的抗拉强度(250±95) MPa^[32]与 174 MPa^[33]。在变形过程中,多相金属间化合物层的存在有利于裂纹钝化、裂纹偏转和载荷转变,可以提高整体 Al₃Ti 层的强度^[34]。

2.3 三点弯曲性能及裂纹扩展行为

图 9 和图 10 为 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的三点弯曲性能及裂纹形貌。分析载荷-位移曲线(图 9a)可知,65Ti 表现最优的抵抗弯曲的能力,45Ti 次之,33Ti 最差,表明韧性 Ti 层体积分数对材料抵抗弯曲的能力起到重要作用。与 33Ti 曲线比较,45Ti 曲线呈现出明显的阶梯状区域,这种断裂形式可以提高复合材料的吸收能量能力及抗损伤能力。抗弯强度试验结果表明(见图 9b),65Ti 和 45Ti 叠层复合材料的抗弯强度相当且大于 33Ti 叠层复合材料,表明脆性 Ti-Al 金属间化合物层体积分数过大会降低复合材料的抗弯强度。从图 10 可以看出,45Ti 裂纹的偏转路径长于 33Ti,且 45Ti 出现明显的层间裂纹扩展。结果表明,在弯曲过程中,试样失效的形式包括韧性 Ti 层的断裂、脆性 Ti-Al 金属间化合物层的断裂与破碎。图 10b 中多处有破碎的 Ti-Al 金属间化合物。同时由于 Ti-Al 金属间化合物的本征脆性,在图 10e 中的脆性 Ti-Al 金属间化合物层存在大量微裂纹。由于韧性 Ti 层的阻碍,大部分裂纹只存留在脆性层,而其中一部分裂纹会发生偏转,沿层间界面继续扩展,增加裂纹的扩展路径。观察 33Ti 弯曲断口截面(见图 10f),裂纹的扩展路径为弯曲锯齿形,说明在裂

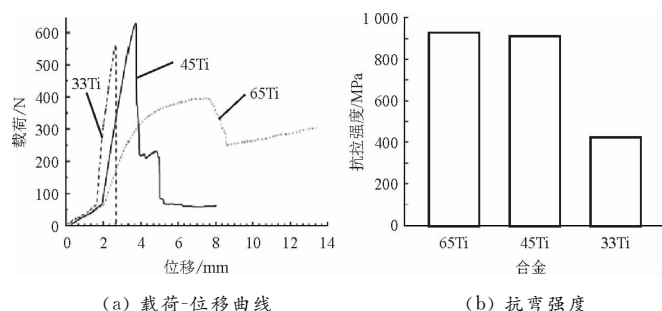


图 9 Ti/Ti-Al 叠层复合材料三点弯曲性能

Fig.9 Three-point bending properties of Ti/Ti-Al laminated composites

纹扩展过程中,裂纹发生了偏转。有少量的微裂纹出现在脆性 Ti-Al 金属间化合物层中(见图 10g),部分微裂纹会沿着层间界面继续扩展(见图 10h)。所制备 45Ti 复合材料的抗弯强度为 911.5 MPa,挠度为 4 mm,均高于 Ti-Al 叠层复合材料^[6](抗弯强度为 462±30 MPa,挠度为 1 mm)。通过观察对比裂纹形貌图,45Ti 裂纹扩展路径更长且更曲折,同时参照载荷-位移曲线,可知 45Ti 具有更优的弯曲性能。

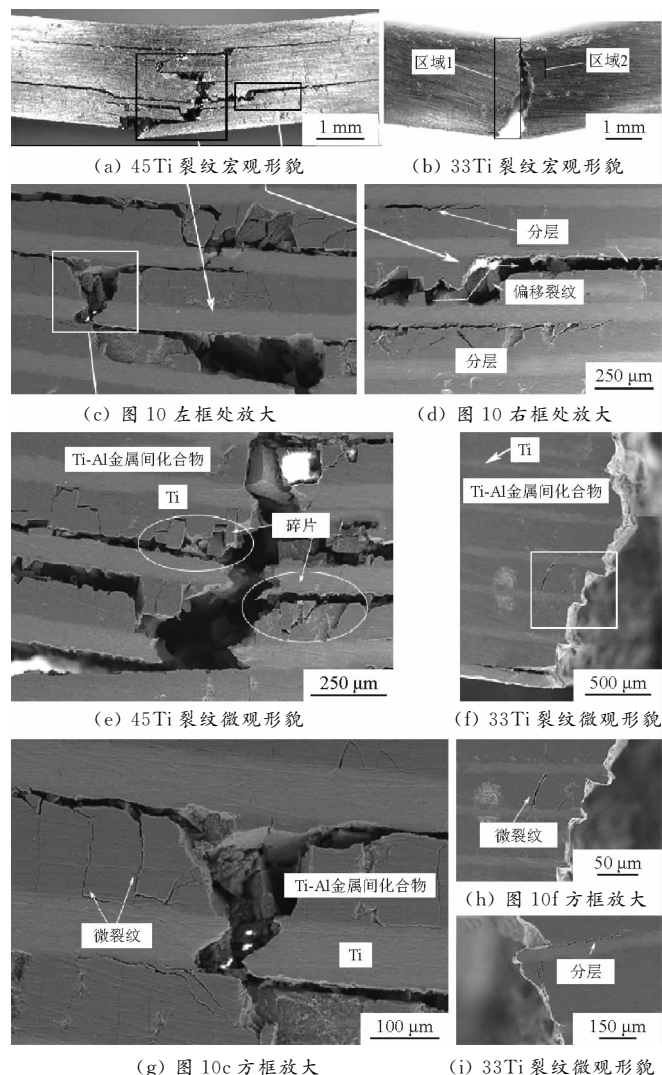


图 10 Ti/Ti-Al 叠层复合材料的裂纹形貌

Fig.10 Crack morphologies of Ti/Ti-Al laminated composites

3 结 论

(1)通过增加高温退火阶段的压力或者提高低温反应阶段的温度,可减少脆性 Kirkendall 孔洞,制备出组织致密的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料。

(2)Ti 层的体积分数对叠层复合材料的性能有明显的影。Ti 层体积分数在 33%~65% 之间时,45% Ti 层的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料组织比较致密较,具有较好的力学性能,有较优的弹性及适当的延展性。随着

Ti 层体积分数的增加, 会提高复合材料的弯曲强度但伸长率会降低, 对比裂纹形貌来看, 45Ti 具有更优的弯曲特性。

(3) Ti/Ti-Al 叠层复合材料为韧-脆相间的层状结构, 45Ti 层的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料通过韧性层阻碍裂纹扩展及脆性层中二次裂纹增加裂纹路径, 有效吸收断裂能, 提高材料的强度。

(4) Ti/Ti-Al 叠层复合材料特殊的层状结构决定其特有的裂纹扩展行为, 即裂纹的偏转与钝化。韧性 Ti 层通过裂纹尖端的塑性变形钝化裂纹, 阻止裂纹扩展, 提高材料的韧性。其中, Ti 层体积分数为 45% 的 Ti/Ti-Al 叠层复合材料裂纹扩展路径长且曲折, 表现出更优的韧性。

参 考 文 献

- [1] WARD-CLOSE C M, MINOR R, DOORBAR P J. Intermetallic-matrix composites-A review[J]. *Intermetallics*, 1996, 4(3): 217-229.
- [2] YAMAGUCHI M, INUI H, ITO K. High-temperature structural intermetallics[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(1): 307-322.
- [3] VECCHIO K S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites[J]. *JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2005, 57(3): 25-31.
- [4] 郭鑫, 马勤, 季根顺, 等. 金属间化合物基叠层复合材料研究进展[J]. *材料导报*, 2007, 21(6): 66-69.
- [5] 赵赫威, 郭林. 仿贝壳珍珠母层状复合材料的制备及应用[J]. *科学通报*, 2017, 62(6): 14-16.
- [6] ZHU K, YU W, AMAN Y, et al. Synthesis, microstructure and mechanical properties of a bio-inspired Ti-intermetallic multi-layered/SiCf-reinforced Ti-matrix hybrid composite[J]. *Journal of Materials*, 2016, 51(18): 8 747-8 760.
- [7] YU W, ZHU K, AMAN Y, et al. Bio-inspired design of SiCf-reinforced multi-layered Ti-intermetallic composite[J]. *Materials & Design*, 2016, 101(5): 102-108.
- [8] FU E G, LI N, MISRA A, et al. Mechanical properties of sputtered Cu/V and Al/Nb multilayer films[J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, A493(1): 283-287.
- [9] MA E. Growth of amorphous silicide during Ti/Si interfacial reactions in multilayer thin films[J]. *Materials Science & Engineering*, 2005, A398(1-2): 60-65.
- [10] LI Y P, TAN J, ZHANG G P. Interface instability within shear bands in nanoscale Au/Cu multilayers[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(11): 1 226-1 229.
- [11] WANG Q W, FAN G H, GENG L, et al. A novel fabrication route to microlaminated TiB₂-NiAl composite sheet with {111} <μνδ> texture by roll bonding and annealing treatment[J]. *Intermetallics*, 2013, 37: 46-51.
- [12] 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.
- [13] ZHANG C, WANG S, QIAO H, et al. Enhancing the Mechanical Properties of Hot Roll Bonded Al/Ti Laminated Metal Composites (LMCs) by Pre-Rolling Diffusion Process[J]. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, 2019, 9(7): 795-780.
- [14] ZHANG X, YU Y, LIU B, et al. In-situ investigation of deformation behavior and fracture mechanism of laminated Al/Ti composites fabricated by hot rolling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 783: 55-65.
- [15] KIM D W, LEE D H, KIM J S, et al. Novel twin-roll-cast Ti/Al clad sheets with excellent tensile properties[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8 110-8 115.
- [16] LYU S, SUN Y, LI G, et al. Effect of layer sequence on the mechanical properties of Ti/TiAl laminates[J]. *Materials & Design*, 2018, 143: 160-168.
- [17] LYU S, SUN Y, REN L, et al. Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti-Al multilayered composites[J]. *Intermetallics*, 2017, 90: 16-22.
- [18] VECCHIO K S, JIANG F. Fracture toughness of Ceramic-Fiber-Reinforced Metallic-Intermetallic-Laminate (CFR-MIL) composites[J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, A649(1): 407-416.
- [19] WAN X, ZHU K, XU Y, et al. In-Situ Observation of Fracture Behavior of Ti-Aluminide Multi-Layered Composites Produced by a Hybrid Sintering Process[J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1 568-1 572.
- [20] HARACH D J, VECCHIO K S. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2001, A32(6): 1 493-1 505.
- [21] SOBOYEJO W O, YE F, CHEN L C. Effects of reinforcement morphology on the fatigue and fracture behavior of MoSi₂/Nb composites[J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(5): 2 027-2 041.
- [22] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S, JIANG F, et al. Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate composites[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2005, A36(6): 1 595-1 608.
- [23] PRICE R D, JIANG F, KULIN R M, et al. Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites[J]. *Materials Science and Engineering*, 2011, A528(7): 3 134-3 146.
- [24] LAZURENKO D, STARK A, ESIKOV M, et al. Ceramic-Reinforced γ-TiAl-Based Composites: Synthesis, Structure, and Properties[J]. *Materials*, 2019, 12(4): 629-635.
- [25] LIN C, HAN Y, GUO C, et al. Synthesis and mechanical properties of novel Ti-(SiC_f/Al₃Ti) ceramic-fiber-reinforced metal-intermetallic-laminated(CFR-MIL) composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 722: 427-437.
- [26] SUN Y, CHEN J, MA F, et al. Tensile and flexural properties of multilayered metal/intermetallics composites[J]. *Materials Characterization*, 2015, 102: 165-172.
- [27] FUKUTOMI H, NAKAMURA M, SUZUKI T, et al. Void Formation by the Reactive Diffusion of Titanium and Aluminum Foils[J]. *Materials Transactions*, 2007, 41(9): 1 244-1 246.

低压铸造铝合金蜗轮减速机壳体工艺设计及优化

吴琪琪 苏小平
(南京工业大学机械与动力工程学院)

摘 要 为提高低压铸造蜗轮减速机壳体成形品质并提高生产效率,利用数值模拟方法对其凝固过程中的温度场、缩松缩孔情况进行分析。预测了缩松缩孔缺陷的位置分布及大小,并分析其形成原因。在此基础上,通过改进浇道、调整工艺参数、添加冷却等措施进行优化设计。结果表明,优化后的铸件内无缩松、缩孔缺陷,提高了铸件品质,凝固时间缩短了 38.8%。通过金相分析,验证了此优化工艺的可行性。

关键词 减速机壳体;低压铸造;工艺优化;金相分析
中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.025



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Design and Optimization of Low-pressure Die Casting Process for Aluminum Alloy Worm Reduction Gears

Wu Qiqi, Su Xiaoping

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Technology University)

Abstract: In order to improve the quality of low-pressure die casting worm reduction gear housing and production efficiency, numerical simulation methods were used to analyze the temperature field and shrinkage porosity during the solidification process. The distribution and size of the shrinkage porosity were predicted, and the reasons for its formation were analyzed. On this basis, through improving the runner, adjusting the technological parameter, and adding cooling channel, the scheme was designed and optimized. The results show that there exists absence of shrinkage porosity in the optimized castings, which improves the quality of the castings and the setting time is reduced by 38.8%. The feasibility of the squeeze casting process was verified by metallographic observation.

Key Words: Reduction Gear Housing, Low-pressure Die Casting, Process Optimization, Metallographic Observation

某工程车辆蜗轮减速机壳体是蜗轮蜗杆动力传输过程中重要的受力部件,传统的壳体多由重力铸造球墨铸铁制备,较重且容易出现铸造缺陷。铝合金壳体具有质量轻、导热性能好等特点,近年来得到广泛应用。低

收稿日期:2022-01-20;**修改稿收到日期:**2022-03-10
基金项目:江苏省高校自然科学研究课题资助项目(19KJB460005)
第一作者简介:吴琪琪,男,1993 年出生,硕士研究生,南京(211816),E-mail:wuqiqinjtech@163.com
通信作者:苏小平,男,1965 年出生,教授,南京(211816),E-mail:suxiaoping@njtech.edu.cn
引用格式:吴琪琪,苏小平. 低压铸造铝合金蜗轮减速机壳体工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):1 046-1 049.
WU Q Q, SU X P. Design and optimization of low-pressure die casting process for aluminum alloy worm reduction gears[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):1 046-1 049.

[28] CUI X P, FAN G H, GENG L, et al. Fabrication of fully dense TiAl-based composite sheets with a novel microlaminated micro-structure[J]. Scripta Materialia, 2011, 11(9): 276-279.

[29] BOONRUANG C, THEPPAWONG A. Impact property of TiAl₃-Ti laminated composite fabricated from metallic sandwich [J]. Composite Structures, 2019, 229: 111-379.

[30] SCHUSTER J C, PALM M. Reassessment of the binary Aluminum-Titanium phase diagram[J]. Journal of Phase Equilibria & Diffusion, 2006, 27(3): 255-277.

[31] XU L, CUI Y Y, HAO Y L, et al. Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A436(4): 638-647.

[32] LAZURENKO D V, MALI V I, BATAEV I A, et al. Metal-In-termetallic Laminate Ti-Al₃Ti Composites Produced by Spark Plasma Sintering of Titanium and Aluminum Foils Enclosed in Ti-tanium Shells[J]. Metallurgical and Materials Transactions A vol-ume, 2015, A46(9): 4 326-4 334.

[33] LIU M, JIANG F, JIAO F, et al. Continuous carbon fiber rein-forced Ti/Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites fabricated using ultrasonic consolidation assisted hot pressing sin-tering[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A765: 138-142.

[34] LU Z, JIANG F, CHANG Y, et al. Multi-phase intermetallic mixture structure effect on the ductility of Al 3Ti alloy[J]. Mate-rials Science & Engineering, 2018, A721: 274-285.

(编辑:刘卫)