

文章编号 1004-924X(2016)增-0012-08

中间层法钛/钢层合板激光熔覆制备及性能

赵志伟¹, 王续跃^{1*}, 于冬洋¹, 王存山²

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 三束材料改性教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对激光熔覆制备钛/钢层合板时覆层与基层结合性能较差的问题,通过添加一定比例的钛铁混合粉末作为中间层的方法,提高钛/钢层合板的制备质量。采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)及能谱分析仪(EDS)对Ti含量分别为0%、5.5%和11.5%的试件进行了组织和成分分析,在拉伸试验机上进行拉剪性能检测,并对剪切断口形貌进行观察分析。结果表明,中间层材料与基体都能形成冶金结合,中间层钛含量小于11.2%时,钛熔覆层能与中间层形成牢靠结合;钛熔覆层中上部生成纯钛等轴晶组织,晶内为针状马氏体组织,钛熔覆层下部为胞状(β -Ti+TiFe)共晶组织;钛熔覆层硬度为工业纯钛的2~3倍;在中间层钛含量为5.5%时,钛熔覆层与中间层结合强度最大为14 MPa;钛/钢层合板的剪切断强度差异主要由晶粒尺寸决定,剪切断裂为沿晶脆性断裂。该研究结果可为激光熔覆制备钛/钢层合板提供了理论基础和实验依据。

关键词:激光熔覆;钛/钢层合板;中间层;微观组织;力学性能

中图分类号:TN249; TG113.25 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0012

Preparation and properties of titanium clad steel plate with interlayer in laser cladding

ZHAO Zhi-wei¹, WANG Xu-yue^{1*}, YU Dong-yang¹, WANG Cun-shan²

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams,
Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: wbxzd@dlut.edu.cn

Abstract: In consideration of the weak bonding property between the cladding and base course during preparation of the titanium/steel sandwich plate through laser cladding, the method of adding a certain proportion of Ti-Fe mixed powder was adopted to improve the preparation quality of the sandwich plate. The optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were employed to analyze the structure and composition of the test pieces with Ti content of 0%, 5% and 11.5%. Then tension-shear performance tests were performed and the morphologies of the shear fracture were observed. The test result indicates that both of the interlayer materials and substrate can achieve the metallurgical bonding. When the interlayer titanium content less

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375073);创新研究群体科学基金资助项目(No. 51321004)

than 11.2wt%, the titanium cladding layer can be securely bonded with the interlayer, at the top of which was pure titanium equiaxed crystal and the bottom part was cellular (β -Ti + TiFe) eutectic structure. The hardness of the titanium cladding layer is 2—3 times greater than that of commercial pure titanium. When the interlayer titanium content is 5.5wt%, the bonding intensity between the titanium cladding layer and the interlayer is 14 MPa as a maximum. The difference of shear strength in the sandwich plate mainly relies on crystal dimensions and the shear fracture is intergranular brittle fracture. The research results provide significant theoretical and experimental basis for laser cladding preparation of titanium/steel sandwich plate.

Key words: laser cladding; titanium/steel sandwich plate; interlayer; microstructure; mechanical property

1 引 言

钛/钢层合板作为纯钛的替代品,其以工业纯钛作为表层,以普通碳钢或低合金钢作为基体。既具有钛的耐腐蚀性能,又具有碳钢的强度和塑性,而成本只有纯钛板的 1/5~1/10。钛/钢层合板因其超高性价比优势已经越来越多地应用到石油、化工、海水淡化、核电等行业中^[1-2]。

目前,钛/钢层合板的主要制备方法有爆炸焊接法^[3-4]、轧制法和爆炸+轧制^[5]的方法。其中,爆炸焊接只适用于制备覆层厚度在 10 mm 以上的层合板,且不能连续生产、机械化程度低、噪声和污染对环境的影响较大。而轧制法和爆炸+轧制的方法在制备总厚度在 2 mm 及其以下的层合板时,不仅设备昂贵、后期维护费用高,而且对工艺环节要求严格、对操作水平要求高。上述工艺和材料上的原因导致目前国内总厚度在 4mm 以下的钛/钢层合板的制备还处于探索和尝试阶段。因此,改进原有的钛/钢层合板生产技术和扩充新的钛/钢层合板制备技术受到越来越多的重视。

激光熔覆是利用高能量激光束熔化熔覆材料,并在基材上形成很薄的、低稀释率的 50 μm ~2 mm 厚的无气孔、无裂纹的,与基材结合良好的熔覆层。该技术具有热输入量较低,不需要后续加工量或后续加工量很小,污染小等特点,近十年来在材料表面改性方面受到高度重视^[6-7]。此外,激光熔覆还具有工艺简单、操作方便、生产周期短等优势,适于单件小批量生产;而且其冷却速度快(达 10^6 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$),熔覆组织具有快速凝固的典型特性,可与基层形成冶金结合状态,因此适用于较薄层合板的制备,是爆炸焊接法和轧制法的有益补

充。目前,关于直接激光熔覆铁和钛的研究还比较少,且大多处于试验阶段。文献[8]尝试用激光熔覆的方式将纯钛粉熔到 304 不锈钢上,通过调节激光工艺参数,获得了无裂纹缺陷的熔覆层,并对熔覆层组织进行了分析。文献[9]和[10]在钛合金表面激光熔覆纯铁粉涂层,获得了无裂纹的涂层,并对涂层组织进行了研究。文献[11]在纯钛表面激光熔覆制备出铁基涂层,大大提高了基体钛的耐磨性能。但这些关于钛与钢的激光熔覆涂层的研究多集中于组织分析和提高表面耐磨性能,对其力学性能的研究还比较少。

本课题组已经通过激光熔覆的方式制备出总厚度约为 2 mm,钛覆层厚度为 0.3~0.4 mm 的钛/钢层合板,并对其组织和性能进行了相应研究^[12]。在采用双层熔覆的方式制备钛熔覆层厚度达到 0.8~1 mm 的钛/钢层合板时,钛覆层与基体发生自动脱落现象。为了改善钛/钢层合板在激光熔覆制备中覆层与基层的结合问题,本文采用添加中间层材料的方法进行了相关试验,提高了钛/钢层合板激光熔覆制备质量,并对添加中间层的钛/钢层合板的组织成分和力学性能进行了分析和研究。

2 试验材料与制备方法

实验中采用基板为 Q235A 碳钢,尺寸为 160 mm \times 60 mm \times 1.5 mm,化学成分如表 1 所示。钛熔覆层材料为工业纯钛粉末,粉末颗粒直径为 45~90 μm ,化学成分如表 2 所示。中间层材料应该与覆层和基层材料都有较好的润湿性,所以这里选择一定钛含量的钛-铁混合粉末,其中钛粉与覆层材料一致,铁粉选用 99.99% 的纯铁粉末,

粉末颗粒直径为 45~90 μm 。初步试验设计时中间层材料的钛质量分数在 0~22.4% 变化,如表 3

所示。中间层法钛/钢层合板激光制备试样的横截面示意图如图 1 所示。

表 1 Q235A 钢的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Q235A steel (%)

Elements	C	Mn	Si	S	P	Cr, Ni, Cu
Content	0.14~0.22	0.30~0.65	≤ 0.30	≤ 0.05	≤ 0.045	≤ 0.03

表 2 工业纯钛粉末的化学成分

Tab. 2 Chemical composition of CP titanium powder (%)

Elements	Ti	Fe	C	O	N	H
Content	BAL	≤ 0.25	≤ 0.10	≤ 0.2	≤ 0.03	≤ 0.015

表 3 中间层熔覆材料中钛粉质量百分比及激光熔覆工艺参数

Tab. 3 Mass fraction of titanium powder in interlayer material and parameters of laser cladding

试样编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
中间层 Ti 含量(wt%)	0	5.5	11.5	14.8	18.8	22.4
中间层熔覆激光工艺参数	功率 420 W, 扫描速度 200 mm/min			功率 650 W, 扫描速度 200 mm/min		
钛层熔覆激光工艺参数	功率 420 W, 扫描速度 200 mm/min					

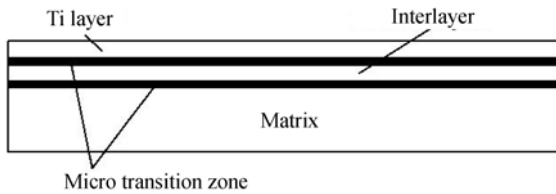


图 1 中间层法钛/钢层合板横截面示意图

Fig. 1 Cross-section of with interlayer prepared by laser cladding

实验中采用 JK1002 型 Nd:YAG 固体激光器。中间层和熔覆层均采用激光熔覆方式制备。通过试验调整,中间层熔覆时激光工艺参数为光斑直径 2 mm,载粉气体压力和保护气体流量分别保持在稳定值 0.2 MPa 和 5 L/min。搭接率都选择 30%,熔覆面积为 30 mm \times 30 mm。中间层制备后,将中间层表面用砂纸打磨后熔覆纯钛层,搭接率为 30%,熔覆面积为 30 mm \times 25 mm。熔覆后钛含量较小的 1#、2#、3# 钛层与中间层结合较好,且钛层表面平整;钛含量较高的 4#、5#、6# 在钛熔覆层和中间层之间出现明显的开裂现象,结合失效,因此在后续试验中,只对结合性能较好的 1#、2#、3# 进行分析,如图 2 所示。

将制备的结合能力较好的 1#、2#、3# 钛/钢层合板制备成 3 组试样,通过线切割、研磨抛光并用 4% 的硝酸酒精腐蚀中间层和基体组织,用

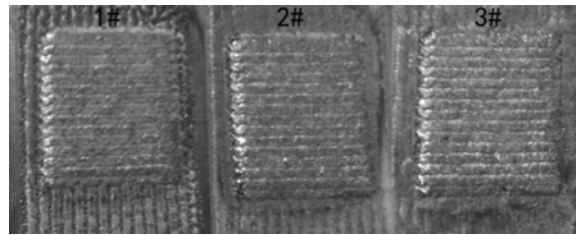


图 2 中间层法钛/钢层合板激光制备试样

Fig. 2 Samples of titanium clad steel plate with interlayer

氢氟酸:硝酸:水=4:8:73 的 Keller's 溶液对钛熔覆层进行侵蚀,分别进行光学显微镜(Optical Microscopy, OM)金相分析、扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)形貌分析及能谱分析(Energy Disperse Spectroscopy, EDS)等。根据国标 GB/6396-2008 将试样切割成拉伸样件进行拉剪试验,并对拉剪断口形貌进行观察分析。

3 试件组织分析与力学性能

3.1 微观组织和成分分析

3 组试样的 OM 金相如图 3 所示。与中间层相邻的基体因受热,温度高于奥氏体相变转变点,在高温下形成奥氏体,在冷却后形成细小的马氏体组织。不同含量的中间层材料在激光熔覆后厚

度均匀、组织致密,没有微裂纹、气孔等缺陷产生,呈现出良好的冶金结合形式。中间层晶粒形状与钛含量密切相关。中间层为纯铁的 1# 试样中,晶粒表现为横穿整个中间层的粗大定向生长的柱状晶。在钛质量分数分别为 5.5% 的 2# 试样和 11.5% 的 3# 试样中,中间层晶粒以等轴晶为主,且晶粒随钛含量的增大而逐渐细化,这有利于中间层强度和韧性的提高。

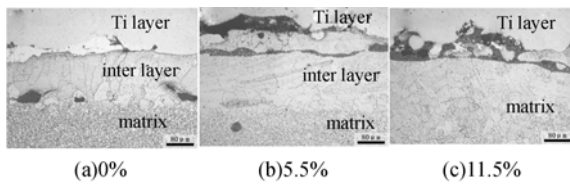


图 3 OM 下不同钛含量沉积层的微观组织

Fig. 3 Interlayer microstructures of various titanium contents under OM

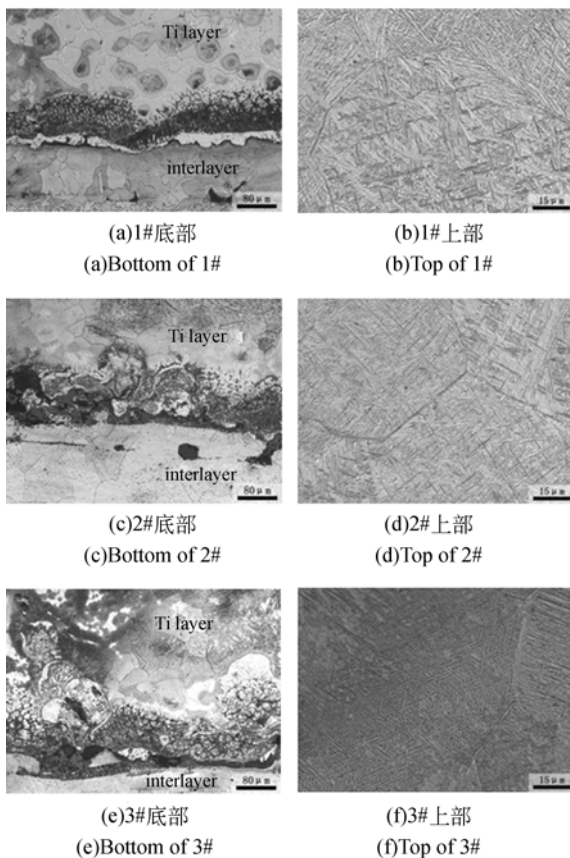


图 4 不同试样钛熔覆层不同部位金相照片

Fig. 4 Metallographics of bottom and top parts of titanium layer in different samples

为了观察钛覆层的微观形貌,对中间层钛含量分别为 0, 5.5%, 11.5% 时钛覆层进行拍摄,其底部和上部的金相照片如图 4 所示,3 个试样的钛熔覆层与中间层之间都有一定厚度的过渡微区,其组织在腐蚀后呈现黑色,且其厚度随中间层钛含量的增大而变大,过渡微区上方为较亮的等轴晶组织,没有出现柱状晶和树枝晶组织,这有利于提高钛熔覆层的各向同性。这是因为激光熔覆过程中激光扫描速度较慢,且熔池在厚度方向的尺寸较大,使得熔池持续存在时间较长,熔覆层冷却速度慢所导致的。钛熔覆层中上部也为等轴晶组织,晶界清晰明显,等轴晶内部为针状马氏体钛,且随着中间层钛含量的增大,马氏体组织逐渐细化。

图 5 所示为熔覆层底部沿垂直于结合面方向的元素线扫描分析。在熔覆层不同区域处组织形态有所不同,但并没有发生明显的成分偏析。根据 EDS 成分分析,熔覆层中铁元素含量很少,几乎为纯钛组织,这使得熔覆层具有纯钛的耐腐蚀性能,从而为钛/钢层合板替代纯钛板提供了质量保证。这是因为添加中间层后,中间层材料与钛熔覆层的热物理性能比较接近,在钛层熔覆过程中,中间层材料熔化较少,降低了钛层的稀释率。

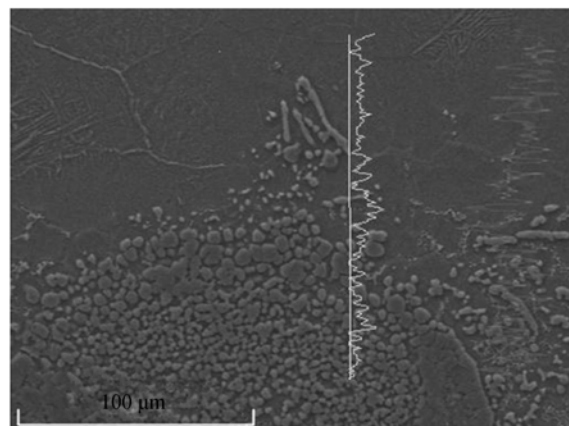


图 5 钛激光熔覆层沿横截面 EDS 线成分分析

Fig. 5 EDS analysis of elements segregation in inter-section surface of titanium layer

图 6 为 1# 样件钛熔覆层底部的 SEM 照片和 EDS 成分分析,熔覆层底部由 β -Ti 和 TiFe 共晶组织构成,共晶组织具有典型的胞状集群结构^[13]。根据 Ti-Fe 二元合金相图,并结合组织形貌特征,可以判断出熔覆层在凝固过程中发生共

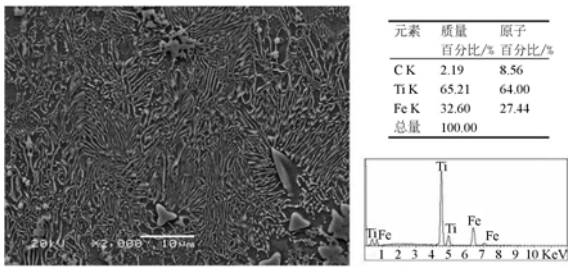


图 6 1# 试样钛熔覆层底部 SEM 形貌及成分分析
Fig.6 SEM micrograph and component analysis of bottom of titanium layer from 1# sample

晶转变,形成胞状(β -Ti + TiFe)共晶组织。在进一步冷却过程中,本应该发生 β -Ti 向 α -Ti 同素异构转变,但由于 Fe 元素对 β -Ti 的稳定作用以及高的冷却速度,致使 β -Ti 向 α -Ti 的转变受到抑制,最终(β -Ti + TiFe)共晶组织被保留至室温。

3.2 力学性能分析

对钛/钢层合板截面进行显微硬度检测,结果表明与无中间层材料激光熔覆制备的钛/钢层合板一致^[12],钛层硬度约为工业纯钛的 2~3 倍,硬度最大值都位于钛熔覆层与基体或中间层结合的部位。为确定钛/钢层合板基体与熔覆层之间的结合性能,需要分别检测中间层与基体的结合力

和中间层与钛层的结合力。根据国标 GB/6396-2008,在层合板总厚度小于 10 mm 时,可用拉剪试样代替剪切试验。

3.2.1 拉剪试验和分析

因试验中制备的钛/钢层合板面积较小,故根据拉剪试验的基本原理和实际熔覆面积设计拉剪试样尺寸,如图 7 所示。拉剪试验机为台湾宏达 HT-2402 电脑伺服控制材料试验机,最大载荷为 10 kN,试验中加载速度为 1 mm/min。拉剪试验后钛熔覆层整体完好,无明显裂纹产生,剪切面位于钛熔覆层和中间层材料结合的部位,中间层材料与基体之间结合牢靠。由此说明中间层材料与基体间呈现冶金结合,钛/钢层合板结合能力最弱的部位位于钛熔覆层与中间层材料之间。

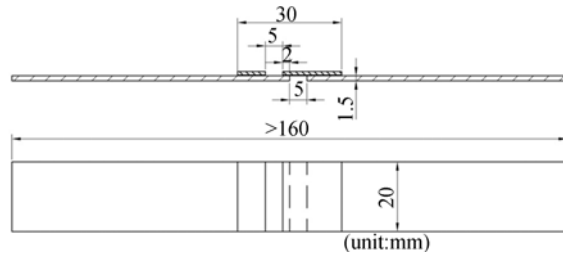


图 7 拉剪试样尺寸图

Fig.7 Dimensions of tensile-shear test specimen

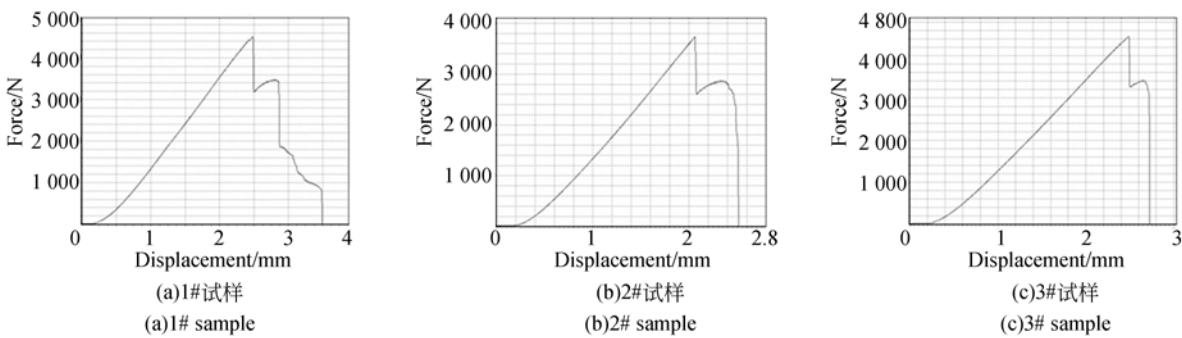


图 8 拉剪试验曲线

Fig.8 Tensile-shear test curves

拉剪试验曲线如图 8 所示,拉伸力有两个峰值,在达到第一个峰值前,材料性质表现为脆性。拉力发生突变后,材料性质表现为塑性变形。此时材料受力部位主要有两部分组成:中间层材料承受的拉应力和钛覆层与中间层材料结合面处所承受的剪切应力。根据第一个峰值后材料表现出的塑性特征及试验过程观察,可以判断出

此时钛覆层与中间层结合面的剪切已经完成,曲线描述的是中间层材料的抗拉强度。1# 试样中曲线后半段出现一定波动是由中间层材料没有同时断裂所导致的。因此,钛覆层和中间层材料的剪切力为应力突变,如图 8 所示,3 个剪切力分别为 1 323, 1122, 1202 N。测量剪切面积分别为 140, 80, 120 mm²。1#、2# 和 3# 试样的

剪切应力分别为 9.45, 14, 10 MPa。由于中间层钛含量为 14.8% 的 4# 试样在熔覆过程中自动开裂,即剪切力为 0,因此随中间层钛含量从 0 增大到 14.8% 的过程中,钛熔覆层与中间层材料之间剪切强度呈现先增大后减小的趋势。根据铁-钛二元合金相图可知,钛在铁中最大溶解度约为 8.7%。分析原因可能为,在钛含量小于 8.7% 时,中间层中钛以固溶体状态存在,在钛含量大于 8.7% 时,中间层中生成大量金属间化合物,进而影响中间层与钛熔覆层之间的结合能力,最终导致在钛含量大于 14.8% 时,结合失效。

3.2.2 拉剪断面分析

对 3 组试样的剪切面进行 XRD 检测分析,结果如图 9 所示。根据 XRD 图谱可以看出 3 组试样剪切面的相成分基本相同,都为 Fe、Fe₂Ti、TiFe 和 β -Ti。由此可知,组织和成分的差异并不是导致 3 组试样拉剪性能差异的主要因素。

图 10 为 3 组试样拉剪试验后剪切面的 SEM 形貌。可以看出 1# 试样剪切面晶粒最为粗大,2# 试样最细小,3# 试样居中。由于材料的力学性能与其晶粒大小成反比,可知 3 组试样的剪切强度差异主要是由晶粒尺寸决定的。对剪切面钛侧和铁侧不同部位分别进行 EDS 分析,在钛侧剪切面钛和铁的含量各占 50%,推测组织为钛铁金属间化合物 TiFe。铁侧剪切面上有裂纹产生,裂纹

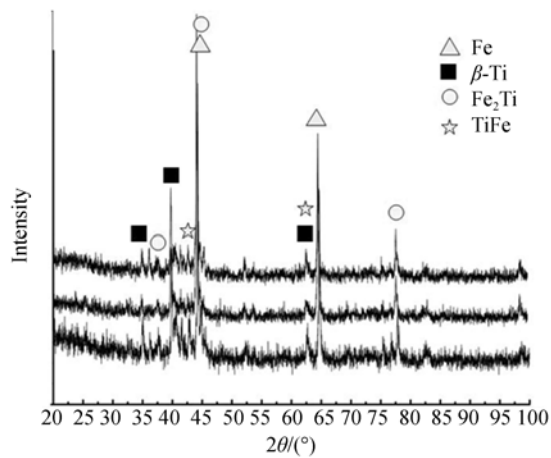


图 9 试样剪切面 XRD 谱线图

Fig. 9 XRD spectra of shear plane in different samples

处成分,钛、铁含量也基本为 50%,组织为 TiFe,裂纹中断于成分为纯铁的组织处。因此可以推断,在剪切过程中,剪切面出现在组织为金属间化合物 TiFe 的区域。结合 3.1 中对钛熔覆层底部组织的分析可知,在激光熔覆过程中,熔覆层底部发生了成分偏析现象,使得晶界部分形成网状 TiFe 金属间化合物组织。TiFe 具有硬度大、塑形差的特点,在拉剪试验中,首先承受载荷并发生裂纹,且裂纹会沿着晶界扩展,最终形成整个剪切断裂。

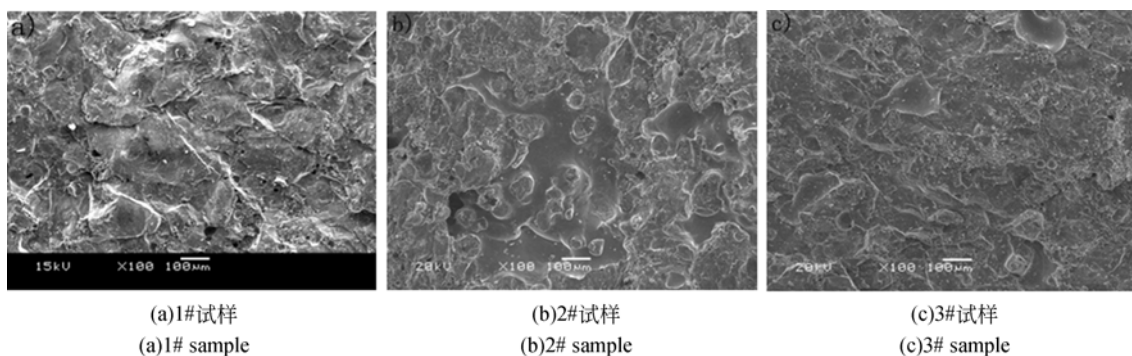


图 10 剪切面的 SEM 形貌

Fig. 10 SEM micrographs of shear planes

4 结 论

本文为提高钛/钢层合板覆层与基体的结合

质量,制备了厚度为 0.8~1 mm 钛覆层的层合板,分别用钛含量从 0 到 22.4% 的钛铁混合粉末作为中间层材料,进行钛/钢层合板激光熔覆制备,并对它进行微观组织成分和力学性能分析。

试验结果表明:中间层材料都能与 Q235 基体形成冶金结合,在中间层钛含量在小于 11.5%时,钛熔覆层和中间层之间能形成良好结合,在中间层钛含量为 5.5%时,剪切强度达到最大值 14 MPa。钛熔覆层与中间层之间形成厚度较小的原子扩散区域,在钛熔覆层中没有发现明显的铁元素扩散现象。钛熔覆层中以等轴晶为主,晶内形

成针状马氏体组织,在钛熔覆层底部与中间层之间形成原子扩散区域形成等轴晶钛组织和晶间 TiFe 金属间化合物组织。不同钛含量中间层材料的钛/钢层合板的剪切强度差异主要由晶粒尺寸决定。剪切断裂裂纹萌生于钛熔覆层底部的晶间金属间化合物 TiFe 组织处,断裂机制以沿晶脆性断裂为主。

参考文献:

- [1] 闫力. 钛钢复合板的特点及应用领域[J]. 中国钛业, 2011(03): 12-14.
YAN L. Behaviors and applications of Ti/Steel composite sheets[J]. *China Titanium Industry*, 2011(03): 12-14. (in Chinese)
- [2] 马志新,胡捷,李德富,等. 层状金属复合板的研究和生产现状[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 799-803.
MA ZH X, HU J, LI D F, *et al.*. Overview of research and manufacture of layer-metal composite plate[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2003, 27(6): 799-803. (in Chinese)
- [3] 张越举,杨旭升,李晓杰,等. 钛/钢复合板爆炸焊接实验[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 103-107.
ZHANG Y J, YANG X SH, LI X J, *et al.*. An experimental research on explosive welding of titanium/steel clad plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 103-107. (in Chinese)
- [4] AKBARIMOUSAVI S. A. A., FARHADISARTANGI P. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel[J]. *Mater Design*, 2009, 30(3): 459-468.
- [5] 王敬忠,颜学柏,王伟琪,等. 带夹层材料的爆炸-轧制钛钢复合板工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(2): 309-313.
WANG J ZH, YAN X B, WANG W Q, *et al.*. Titanium cladding steel plates with interlayer by explosion and rolling bonding[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(2): 309-313. (in Chinese)
- [6] 吴宏亮,王文先,崔泽琴,等. TA2 钛合金表面激光熔覆 Ni60 涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(12): 140-143.
WANG H L, WANG W X, CUI Z Q, *et al.*. study on Ni60 coating on TA2 alloy substrate by laser cladding[J]. *Material & Heat Treatment*, 2010, 39(12): 140-143. (in Chinese)
- [7] 牛兴林,张德强,李金华,等. 45 钢表面激光熔覆 Fe 基粉末实验研究[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 148-151.
NIU X L, ZHANG D Q, LI J H, *et al.*. Study of laser cladding Fe-based powder on 45 steel surface [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014(12): 148-151. (in Chinese)
- [8] EL-LABBAN M H F. On the possibility of laser cladding for 304 stainless steel using commercially pure titanium[J]. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2014, 6(6): 401-407.
- [9] 黄果,苏钰,段志宇,等. 钛合金表面激光熔覆纯铁涂层显微组织的研究[J]. 上海金属, 2013, 35(2): 22-26.
HUANG G, SU Y, DUAN ZH Y, *et al.*. Microstructure of Fe powder on laser-cladded Ti6Al4V alloy[J]. *Shanghai Metals*, 2013, 35(2): 22-26. (in Chinese)
- [10] 段志宇,苏钰,李军. 钛合金激光熔覆纯铁粉的热力学与组织性能[J]. 上海工程技术大学学报, 2013, 27(2): 132-136.
DUAN ZH Y, SU Y, LI J, *et al.*. Thermodynamics and structure performance of laser cladding pure Fe powder on Ti alloy [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2013, 27(2): 132-136. (in Chinese)
- [11] CHEN J M, GUO C, ZHOU J S. Microstructure and tribological properties of laser cladding Fe-based coating on pure Ti substrate[J]. *T. Non-ferr. Metal Soc.*, 2012, 22(9): 2171-2178.
- [12] 赵志伟,王续跃,徐文骥. 钛/钢层合板激光熔覆制备及其组织和性能[J]. 机械设计与制造, 2015(10): 117-119.
ZHAO ZH W, WANG X Y, XU W J. Microstructure and properties for titanium clad steel

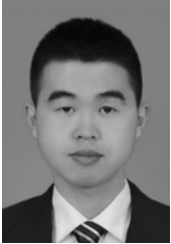
plate prepared by laser cladding[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015(10): 117-119. (in Chinese)

- [13] 王锐,王寿山. Nb₄Si 含量对激光熔覆 Ti-Fe 合金涂层组织和性能的影响[J]. *中国激光*, 2013,40

(1): 88-94.

WANG R, WANG C S. Influence of Nb₄Si content on microstructure and property of Ti-Fe alloy coating prepared by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013,40(1): 88-94. (in Chinese)

作者简介:



赵志伟(1990—),男,硕士,2012年于福州大学获得学士学位,2015年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事激光熔覆方面的研究。E-mail: zha-zhw642@qq.com

导师简介:



王续跃(1960—),男,教授,博士生导师,1983年、1988年、1997年于大连理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密与特种加工等方面的研究。E-mail: wbzdz@dlut.edu.cn