

TIG 电弧复合熔滴沉积增材制造 45 钢/铅合金双金属结构工艺研究

杜 军[✉], 蒋敏博, 张永恒, 徐思远, 魏正英

西安交通大学机械工程学院, 西安 710049

传统钢/铅粘接结构在使用或长期贮存过程中存在粘接层局部脱粘、老化或强度退化等问题,严重影响复合结构的完整性和长期稳定性。本工作提出采用钨极惰性气体(Tungsten inert gas, TIG)电弧复合熔滴沉积成形新方法实现 45 钢/铅合金双金属结构的直接冶金复合增材制造,利用金相显微镜、扫描电镜、能谱仪、硬度实验以及拉伸实验等方法对钢/铅双金属结构成形试样的界面组织特征与力学性能进行分析。结果表明,铅合金沉积层特征尺寸随 TIG 电弧热输入的改变呈现出明显的非线性依赖特征;45 钢/铅合金双金属结构界面未被发现明显孔隙、裂纹等冶金缺陷;界面化合物(Intermetallic compounds, IMCs)层的厚度约为 30~70 μm ;钢/铅双金属成形试样的界面剪切强度平均值为 28.4 MPa,远高于文献报道的强度(4.2 MPa),试件剪切拉伸断裂均发生在铅合金沉积层侧而非结合界面。

关键词 熔滴沉积成形 钨极惰性气体(TIG)电弧 钢/铅双金属结构 增材制造

中图分类号:TG146.2 **文献标识码**:A

Study on the TIG-droplet Hybrid Additive Manufacturing of 45 Steel/Lead Alloy Bimetallic Structure

DU Jun[✉], JIANG Minbo, ZHANG Yongheng, XU Siyuan, WEI Zhengying

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

The traditional steel/lead bonding structures are based on bonding process, which can lead to serious problems in the application and long-term storage, such as local strap debonding, aging and strength degradation. The above-mentioned problems seriously affect the integrity, long-term stability and environmental adaptability of steel/lead composite structures. This paper puts forward a novel additive manufacturing method to fabricate 45 steel/lead alloy bimetallic structures by direct metallurgical connection, which is a combination of droplet deposition manufacturing and variable-polarity TIG arc process. The microstructure and mechanical properties of the fabricated samples were analyzed by using many experimental means such as OM, SEM, EDS, microhardness test, and so on. The results showed that a nonlinear relationship existed between the heat input of the welding arc and the feature sizes (deposition height and width) of the lead alloy deposited layers. No evidence of cracks and micro voids was found at the bonding interface. The thickness of the interfacial reaction layer is within the range of 30—70 μm . The average interfacial bonding strength of the fabricated sample can reach 28.4 MPa, which is much higher than 4.2 MPa of the report. The fracture location is always on the side of lead alloy deposited layers.

Key words droplet deposition manufacturing, tungsten inert gas (TIG) arc, steel/lead bimetallic structure, additive manufacturing

0 引言

45 钢力学性能好,具有较高的强度和较好的加工性能;铅合金具有良好的导热性、导电性,对 γ 射线有良好的吸附性且不易被穿透,是首选的屏蔽材料。钢/铅复合结构具有质量轻、强度高、射线屏蔽效果优越、电化学性能优异等优点,在核屏蔽、电化学等领域中展现出巨大的研究价值和应用潜力^[1-2]。粘接方法是目前常用的钢/铅双金属结构连接成形方法,该方法是利用胶粘剂(如环氧树脂)把 45 钢、铅合金薄板或壳体连接成整体的操作工艺。然而,粘接方法所成形的钢/铅双金属结构在使用或长期的贮存过程中,受环境、载荷等因素影响,粘接层易出现局部脱粘、老化或强度退化等问题,严重影响了双金属结构的完整性和长期稳定性^[3]。粘接成形无法实现具有复杂几何属性的复合结构成形,此外,粘接成形前需对粘接表面进行预处理,大大增加了复合结构的研制周期^[4]。

增材制造(Additive manufacturing, AM)技术是一种自下而上逐层堆积材料的制造方法,通过金属增材制造技术制造的金属材料零部件越来越多地被成功应用于航空航天、国防军工、医疗器械、汽车制造、注塑模具等工业领域。近年来,

为满足工业产品日益增加的复杂性要求,多材料增材制造(Multi-material additive manufacturing, MM-AM)技术得到迅速发展,并成为学者们争相研究的热点^[5]。MM-AM 技术可成形具有复杂材料属性和几何属性的结构以及更多功能的实体结构,例如,功能梯度材料(Functionally gradient materials, FGM)结构^[6]、复合材料(Composite material, CM)结构^[7]及双金属结构^[8]。

目前国内外关于双金属结构的增材制造技术研究仍处于探索阶段,哈尔滨工程大学的苗玉刚等^[9]于 2015 年首次利用 BC-MIG 电弧增材制造技术成形铝/钢双金属 T 型结构,其金相观察结果表明沉积层熔合性好、组织均匀。随后,Takeyuki 等^[10]利用电弧熔丝增材制造出无缺陷的镍/钢双金属结构试样,其抗拉强度接近镍合金或不锈钢同种材料结构的抗拉强度;天津大学的田银宝等^[11]采用 TC4 和 ER2319 焊丝直流/变极性冷金属过渡实现双金属结构的电弧增材制造,并对钛/铝双金属结构的界面组织特征与力学性能进行了分析。近来, Khodabakhshi 等^[12]采用激光熔覆技术在 A316-L 和 A410-L 钢表面沉积钴,研究了直接沉积、添加功能梯度层和中间层沉积三种方式下双金属界面宏微观孔隙和

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775420);民用航天预研项目(D020208)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51775420) and the Pre-research Project of Civil Aerospace (D020208).

金属间化合物 (Intermetallic compounds, IMCs) 层的微结构特征,结果表明,通过添加 Cu 中间层可显著抑制宏观孔隙的产生。上述研究工作以定性研究为主,以丝材、粉末或金属薄片为原材料,大大增加了研制成本和周期。针对理化性质差异巨大(如熔点相差 1 257 K,热导率相差三倍)的 45 钢/铝合金双金属结构的增材制造研究,尚未见文献报道。

本工作提出采用变极性 TIG 电弧复合熔滴沉积成形工艺实现 45 钢/铝合金双金属结构的增材制造,分析 TIG 电弧热输入对铝合金沉积层特征尺寸的影响,采用 OM、SEM、EDS、硬度实验以及拉伸实验等方法对钢/铅双金属结构成形试样进行近界面微区显微组织观察分析和力学性能测试,验证了利用该工艺在成形钢/铅双金属结构时的可行性和有效性。该成形方法也为其他理化性质差异巨大的双金属结构增材制造提供了新的工艺途径。

1 TIG 电弧复合熔滴沉积增材制造原理

本研究以钢/铅双金属结构为对象,将熔滴微喷沉积工艺与变极性 TIG 电弧相结合,提出了一种 45 钢/铝合金双金属结构 TIG 电弧辅助熔滴沉积增材制造新方法,其工艺原理如图 1 所示。

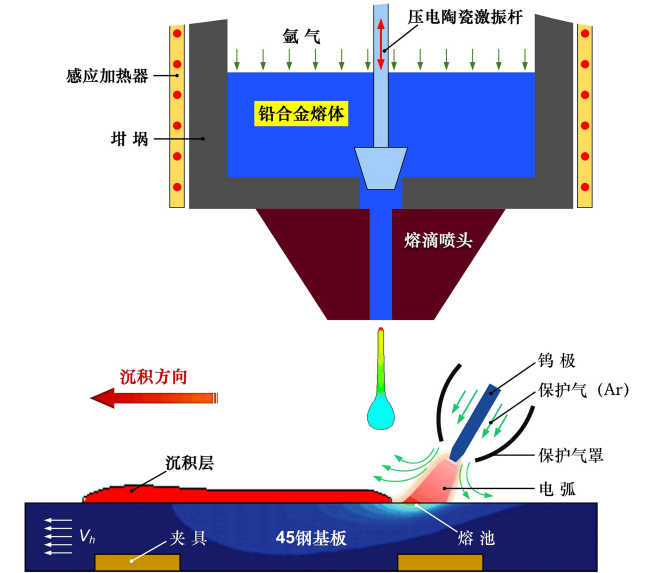


图 1 TIG 电弧复合熔滴沉积成形工艺原理图
Fig.1 Schematic of TIG-droplet hybrid additive manufacturing

采用感应加热的方式熔化坩埚内的铝合金(铸锭)原材料,通过浸入液态合金中的压电陶瓷激振杆协同熔滴喷头内流道结构产生精确可控的铝合金熔滴。为克服铝合金熔滴在 45 钢成形基板表面过冷造成的铺展困难以及无法形成冶金结合的问题,采用位置固定的倾斜变极性 TIG 电弧作用于移动的 45 钢成形基板表面以形成浅层熔池,当铝合金熔滴与 45 钢表面熔池结合后,在熔体表面张力、熔滴动量、电弧力的综合作用下进行动态铺展凝固,形成沉积层。前置变极性 TIG 电弧的引入在提高 45 钢成形基板与铝合金熔滴界面浸润性、实现异种金属界面直接冶金结合的同时,利用其“阴极清理”效应,可及时有效清除 45 钢表面氧化物,避免了沉积层内的氧化物夹杂。

2 实验方法

实验采用的 45 钢成形基板尺寸为 200 mm×200 mm×8 mm,将其固定于三维运动平台之上,熔滴喷头与 45 钢板板间的距离设置为 50 mm,TIG 焊枪与 45 钢板表面法向夹角 α 为 30°。在开展钢/铅双金属结构 TIG 电弧复合熔滴沉积成形工艺实验前,需对 45 钢板板表面进行喷砂处理以去除表面油污、杂质以及氧化物。实验材料:45 钢和铝合金的化学成分及相关热物性参数分别见表 1 和表 2。

表 1 45 钢与铝合金的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions (mass fraction,%) for the 45 steel and lead alloy

铝合金	Sb	Sn	Cl	Zr	Al	I	Hg	Pb
	10.66	2.93	2	0.17	0.85	0.48	0.1	余量
45 钢	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Fe	
	0.45	0.77	0.3	0.03	0.01	0.01	余量	

表 2 45 钢与铝合金的相关热物性参数
Table 2 Related thermophysical properties for the 45 steel and lead alloy

	熔点/℃	密度 kg·m ⁻³	线膨胀 系数/K ⁻¹	比热 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
铝合金	283	8 947	15.7×10 ⁻⁶	212.9
45 钢	1 540	7 890	11.3×10 ⁻⁶	502

采用线切割的方法从钢/铅双金属结构物件上截取了尺寸为 15 mm×10 mm×10 mm 的成形试样,将成形试样截面清洗干净后,依次用 400#、800#、1 200#、2 000#的砂纸在金相研磨抛光机上对试样横截面进行打磨,打磨至截面无明显划痕时换用抛光布进行抛光,抛光过程中使用氧化铝抛光粉进行粗抛光和精抛光。由于铝合金硬度远小于 45 钢的硬度,在打磨和抛光时可将硬度较小的铝合金置于抛光机内侧,使界面在打磨过程中尽量平整并减少划痕。采用质量分数为 4% 的硝酸酒精对已抛光好的成形试样横截面进行腐蚀,腐蚀时间为 10 s。腐蚀完后将试样用无水乙醇清洗干净后用吹风机吹干,然后利用 Nikon MA200 倒置金相显微镜对成形试样横截面进行金相组织观察。利用 Hitachi SU3500 扫描电镜及附带的能谱仪(EDS)分别对 45 钢/铝合金双金属结构成形试样界面区域进行显微组织观察和物相分析。根据钢/铝界面形貌特征,从沉积层中心至边缘依次指定三条显微硬度测量线,采用 HVS-50Z 型维氏显微硬度计沿指定测量线进行硬度测试,实验过程中针对硬度差异较大的铝合金沉积层和 45 钢,分别采用 0.098 N 和 1.96 N 的载荷压力,载荷保持时间均为 10 s。表 3 为钢/铅双金属结构 TIG 电弧复合熔滴沉积成形中的相关工艺参数。

3 结果与讨论

3.1 45 钢/铝合金双金属结构的沉积层形貌

图 2 为 TIG 电弧复合熔滴沉积工艺所成形的钢/铅双金属结构成形试样及其横截面形貌。铝合金沉积层表面平滑,无明显塌陷、不连续等缺陷。铝合金沉积层与 45 钢板板结合界面整体呈清晰直线状。

在铝合金熔滴参数保持不变的条件下,对不同电弧热输入参数下的沉积层特征尺寸(层宽 w 和层高 h)进行了统计,

表3 钢/铅双金属结构 TIG 电弧复合熔滴沉积成形中的相关工艺参数
Table 3 Process parameters for TIG assisted droplet deposition manufacturing of steel/lead bimetallic structures

工艺参数	取值
铝合金熔滴直径/mm	2.1
铝合金熔滴产生频率/Hz	10
铝合金熔滴冲击速度/(m/s)	0.85
铝合金熔滴初始温度/K	565
环境温度/K	298
45 钢板初始温度/K	298
45 钢板移动速度/(mm/s)	4, 5, 6
变极性 TIG 电弧峰值电流/A	180, 200, 220, 240
峰值电流占空比	0.5
脉冲电流频率/Hz	50
弧长/mm	5.5

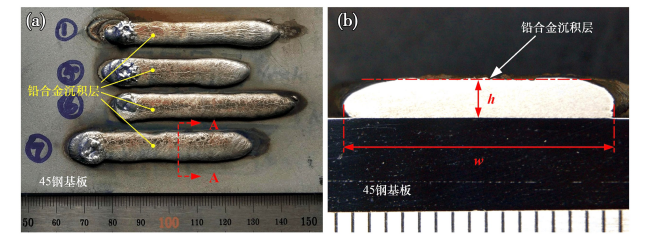


图2 钢/铅双金属结构成形试样及横截面形貌:(a)成形试样;(b)成形试样横截面形貌
Fig.2 As-fabricated sample and cross-section of steel/lead bimetallic structure: (a) as-fabricated sample; (b) cross-section of sample

其结果如图 3 所示。

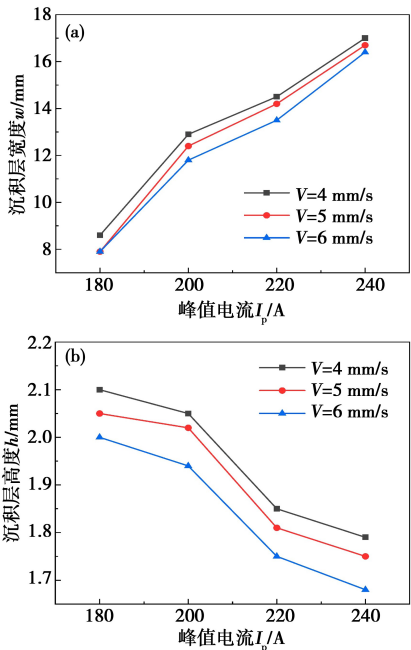


图3 铝合金沉积层特征尺寸随 TIG 电弧峰值电流、45 钢板移动速度的变化规律:(a)沉积层宽度随 TIG 电弧热输入的变化;(b)沉积层高度随 TIG 电弧热输入的变化
Fig.3 Influence of TIG welding peak current on the feature sizes of deposits at three different travel speeds of 45 steel substrate: (a) deposition width vs peak current; (b) deposition height vs peak current

从图 3 中可见,随着 TIG 电弧峰值电流的增大,沉积层宽度呈非线性增加趋势,沉积层高度呈非线性减小趋势,这是由于单位时间内铝合金熔体遵守质量守恒定律,变极性

TIG 电弧峰值电流的增加使 45 钢表面熔池尺寸以及局部区域温度明显增加,进而提高了铝合金熔滴的高温浸润性和铺展程度。在相同电弧峰值电流作用下,沉积层宽度和高度均随 45 钢板移动速度的增大而减小。

3.2 钢/铅双金属结构成形试样近界面微区组织

图 4 为钢/铅双金属结构界面区域宏观微观组织形貌。由图 4a 可见,钢/铅界面清晰平直,铝合金沉积态组织呈块状及条带状分布(图 4b)。图 4c 为钢/铅界面组织 SEM 图,界面处未发现明显孔隙、裂纹等宏观冶金缺陷。利用扫描电镜对其进行高倍组织观察,如图 4d 所示,发现在 45 钢基体与铝合金沉积层之间存在厚度为 30~70 μm 的金属化合物反应层,界面反应层的层厚具有不均匀性,且在 TIG 熔池中心位置处最不均匀,其原因为成形时熔池中心区域具有最高温度和最长高温保留时间,使得钢-铅异种金属发生更加充分的扩散反应。

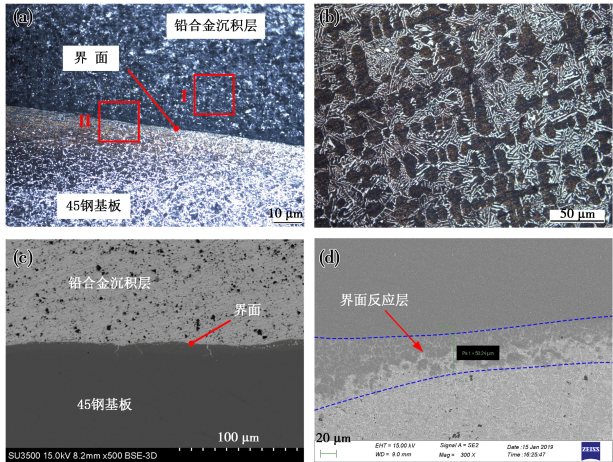


图4 钢/铅双金属结构界面宏观微观组织特征:(a)界面区域宏观组织形貌光镜图;(b)铝合金沉积态微观组织(图 4a 中 I 区);(c)界面区域微观组织 SEM 图;(d)界面反应层的高倍 SEM 图
Fig.4 Macro and micro structure characteristics of the interface of fabricated steel/lead bimetallic structure: (a) optical image of macrostructure at the interface region; (b) microstructure of lead alloy deposited layer; (c) SEM image of the interface region; (d) high-magnification SEM image of the reactive interface

3.3 界面组织物相分析

对钢/铅双金属结构成形试样界面进行微观组织及能谱分析,结果如图 5 所示。由图 5b 中线扫描能谱可以看出,在 45 钢基体一侧的界面处,Fe、Sn 元素扩散较为平缓,但存在 Sb 元素突增;而在铝合金沉积层一侧的界面处,Fe 元素的原子分数急剧下降。

对钢/铅双金属结构成形试样界面不同位置的物相进行 XRD 分析,衍射图谱如图 6 所示。由图 6 可知,在界面处形成了 FeSn_2 和 FeSb_2 金属间化合物。

3.4 钢/铅双金属结构成形试样界面力学性能测试分析

利用 HVS-50Z 维氏显微硬度计对钢/铅双金属结构界面区域的硬度进行测量。自 45 钢一侧至铝合金沉积层一侧依次沿图 7a 中 L1、L2、L3 所示位置进行测量,其中,L1 对应熔池中心区域,L3 处为未熔化区域。铝合金一侧和 45 钢一侧各取 16 组测试点,在靠近界面处的 0~50 μm 范围内每间隔

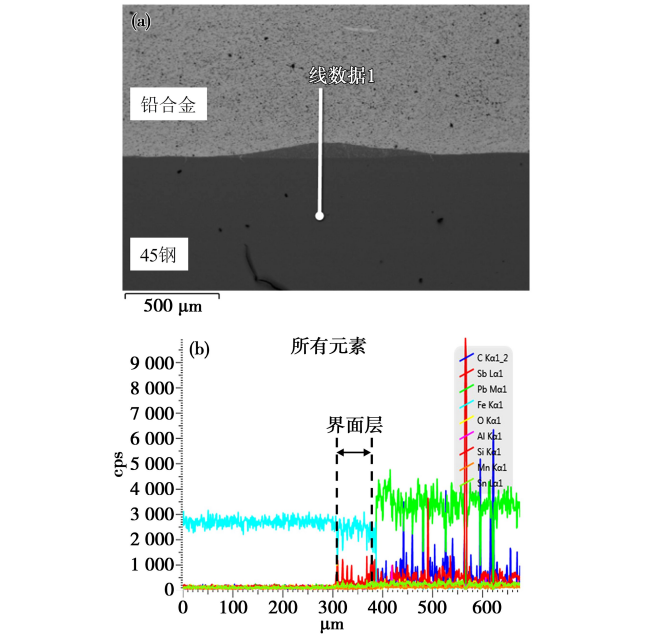


图 5 钢/铅双金属结构界面 SEM 组织形貌与能量图谱: (a) SEM 图; (b) 线扫描图谱(电子版为彩图)

Fig.5 SEM image and line scan pattern of the bonding interface of steel/lead bimetallic structure: (a) SEM image; (b) line scan pattern

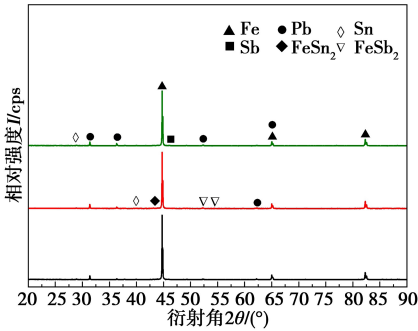


图 6 钢/铅双金属结构界面 XRD 衍射图谱
Fig.6 XRD pattern of steel/lead bimetallic interface

10 μm 进行取点测量, 50 μm 之外每隔 50 μm 进行测量, 钢/铅界面区域显微硬度分布曲线如图 7b 所示。

由图 7b 可以看出, 显微硬度变化最剧烈的位置在钢/铅界面附近。因受 TIG 电弧热的作用, 在 45 钢基板 TIG 焊热影响区有细化的铁素体、珠光体组织形成, 因此显微硬度显著升高。在 L1 测量方向上, 由于在 45 钢基板熔化区有奥氏体组织形成, 其硬度值达到 607HV。L3 测量方向上, 45 钢基板表面未被 TIG 电弧熔化, 因此未发生组织转变, 靠近界面处显微硬度出现跳变。在铅合金沉积一侧, 显微硬度值保持稳定。

从钢/铅双金属结构制件上截取了 10 mm×4 mm 的条形试样, 在室温下以 0.5 mm/min 的拉伸速率在电子万能拉伸机上进行拉剪试验。图 8a 为制作的拉伸试样及其搭接截面, 试样断裂位置与断口形貌分别如图 8b 和图 8c 所示。

从图 8 可以看出, 断口位于靠近界面的铅合金沉积层一侧, 断裂方式为脆性断裂。试样抗拉剪切力为 0.83 ~ 1.39 kN, 计算出最小抗拉剪强度为 20.6 MPa、最大抗拉剪强度为 34.8 MPa、界面平均剪切强度为 28.4 MPa, 其中, 其界面平

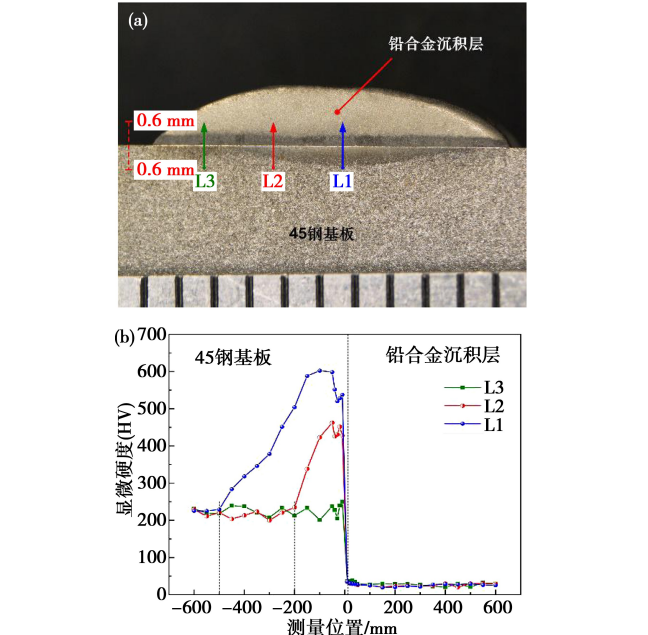


图 7 成形试样横截面及其界面显微硬度分布: (a) 显微硬度测量位置; (b) 钢/铅界面显微硬度分布(电子版为彩图)

Fig.7 Cross-section of fabricated sample and micro-hardness distribution: (a) measurement location; (b) micro-hardness distribution at steel/lead interface

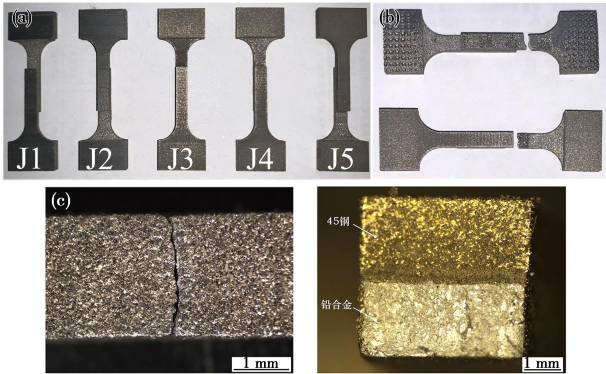


图 8 钢/铅双金属结构拉伸试样、断裂位置以及断口形貌: (a) 拉伸试样及其搭接截面; (b) 拉伸试样断裂位置; (c) 拉伸试样断口形貌

Fig.8 Tension specimens, fracture position and fracture morphology of the as-fabricated steel/lead bimetallic structures: (a) tension specimens and overlapping section; (b) fracture position; (c) fracture morphology

剪切强度远高于文献[13]报道的钢/铅粘接结构(4.2 MPa)。剪切拉伸断裂均发生在铅合金沉积层侧而非结合界面, 断口形貌如图 8c 所示, 未见铅合金沉积层有内部缺陷, 断裂方式为脆性断裂。

4 结论

(1) 采用 TIG 电弧复合熔滴沉积成形新方法, 实现了 45 钢/铅合金双金属结构的直接冶金复合增材制造。在钢/铅双金属结构界面处未发现明显孔隙、裂纹等宏观冶金缺陷。

(2) 在钢/铅双金属结构界面处有金属间化合物反应层形成, 物相分析表明, 界面反应层主要为 Fe 微晶、FeSb₂ 和 FeSn₂ 新生相, 金属间化合物层厚度为 30~70 μm。

(3) 采用 TIG 电弧复合熔滴沉积成形的 45 钢/铅合金双金属结构界面平均剪切强度为 28.4 MPa, 远高于传统粘结结

构界面的平均剪切强度;断裂位置总处于铝合金沉积层侧而非结合界面,断裂方式为脆性断裂。研究结果对理化性质差异巨大的钢/铅双金属结构增材制造具有较大的指导意义和参考价值。

参考文献

1 Li X, Gao B, Zhu Y, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(11), 4679.
2 Liu Y, Yan J, Yuan D, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 218, 81.
3 Sun K H, Li J W, Sun C M, et al. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(1), 93(in Chinese).
孙凯华, 李建文, 孙朝明, 等. *应用声学*, 2019, 38(1), 93.
4 Jairaja R, Narayana N G. *The Journal of Adhesion*, 2021, 97(8), 760.
5 Bandyopadhyay A, Heer B. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 2018, 129, 1.



杜军,西安交通大学机械学院,副研究员。2013年3月毕业于西安交通大学,获机械工程专业博士学位。同年加入西安交通大学工作至今,主要从事双金属结构和陶瓷颗粒增强金属基复合材料的增材制造相关基础理论与应用技术研究。在国内外重要期刊发表文章80余篇,获得国家授权发明专利24项。

6 Giselle H L, Ejun P, David H, et al. *Additive Manufacturing*, 2018, 23, 34.
7 Jonathan E S, Nikhil G, Dirk L. *JOM*, 2018, 70(3), 272.
8 Khodabakhshi F, Farshidianfar M H, Bakhshivash S, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 43, 83.
9 Miao Y G, Zeng Y, Wang T, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(7), 5(in Chinese).
苗玉刚, 曾阳, 王腾, 等. *焊接学报*, 2015, 36(7), 5.
10 Takeyuki A, Hiroyuki T. *Precision Engineering*, 2016, 45, 387.
11 Tian Y B, Shen J Q, Hu S S, et al. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(11), 1407(in Chinese).
田银宝, 申俊琦, 胡绳荪, 等. *金属学报*, 2019, 55(11), 1407.
12 Khodabakhshi F, Farshidianfar M H, Bakhshivash S, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 43, 83.
13 Yang Q, Yuan M K, Li M Z, et al. *Materials Science & Technology*, 2007, 15(6), 839(in Chinese).
杨强, 袁明康, 李明珍, 等. *材料科学与工艺*, 2007, 15(6), 839.
(责任编辑 汪芸竹)