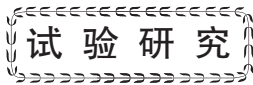


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2024.07.003



爆炸焊接铜/钢复合管界面组织表征与性能研究

李岩^{1,2}, 王贵成¹, 杨海娟¹, 张文斌¹, 李聚才², 刘翠荣^{1,2}

(1. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西电子科技学院 智能制造产业学院, 山西临汾 041000)

摘要: 为了研究应用于压力容器的管道或承压部件的铜/钢双金属复合管材料中晶粒存在形式和力学性能之间的关系, 通过爆炸焊接技术获得了 T2 铜/316L 不锈钢复合管, 并对其界面形貌与微观组织进行分析。结果表明, T2 铜/316L 不锈钢复合管结合界面处呈现平直界面和周期性波状界面, 波形结合区域的平均波长 203 μm 、波高 58 μm 。复合管结合界面两侧的元素发生互扩散, 扩散层厚度为 1 μm 。界面处 Fe 侧晶粒尺寸较小, 随着结合界面距离的增加晶粒尺寸逐渐变大。通过纳米压痕试验发现, 波峰处界面的纳米压痕结果达到了 3.16 GPa, 波谷处的纳米压痕结果达到了 2.44 GPa, 同时波峰处界面附近区域的纳米压痕结果均高于波谷处, Fe 侧纳米压痕结果均高于 Cu 侧。纳米压痕试验获得的力学性能分布规律和微观组织的分布规律相一致。

关键词: 爆炸焊; 铜/钢复合管; 波状结合; 再结晶; 纳米压痕

中图分类号: TH49; TB331; TG392

文献标志码: A

Characterization and performance study of the interface structure of explosion welded copper/steel composite tube

LI Yan^{1,2}, WANG Guicheng¹, YANG Haijuan¹, ZHANG Wenbin¹, LI Jucan², LIU Cuirong^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Intelligent Manufacturing Industry, Shanxi University of Electronic Science and Technology, Linfen 041000, China)

Abstract: In order to study the relationship between the existence type of grains in the copper/steel bimetallic composite pipes and mechanical properties, T2 copper/316L composite pipes were fabricated using explosion welding technology, and a detailed analysis of the interface morphology and microstructure of the copper/steel metal composite pipes was made. The results show that the bonding interface of the composite pipe features both a flat interface and a periodic wavy interface, with the wavy bonding region exhibiting an average wavelength of 203 μm and a wave height of 58 μm . Elements on both sides of the composite pipe bonding interface undergo interdiffusion, resulting in a diffusion layer thickness of 1 μm . The grain size on the Fe side of the interface is relatively small, gradually increasing with the distance from the bonding interface. Nanoindentation experiments reveals that the nanoindentation hardness at the peak of the wavy interface reaches 3.16 GPa, whereas at the trough it is 2.44 GPa. Furthermore, the hardness near the peak is consistently higher than that near the trough, with the hardness on the Fe side exceeding that on the Cu side. The distribution pattern of mechanical properties obtained from nanoindentation experiments aligns with the distribution pattern of the microstructure.

Key words: explosion welding; copper/steel composite tube; wavy interface; recrystallization; nanoindentation

收稿日期: 2024-04-09 修稿日期: 2024-05-30

基金项目: 山西省自然科学基金项目(202203021221149); 山西省重点研发计划项目(202302010101006); 山西省重点研发计划项目(202202150401016); 山西电子科技学院人才引进科研启动经费项目(2023RKJ021); 临汾市重点研发计划项目(2334)

0 引言

爆炸焊是一种以爆轰波为主要驱动力的复合材料制备技术,具有热影响区小、异质金属焊接能力强等优点^[1-2]。爆炸焊主要用于金属复合材料的制备,复合材料连接界面作为复合材料性能的过渡区域,决定了复合材料的性能。目前,通过爆炸焊技术已经成功制备了铜/铁、铝/铁、铝/铜、钢/钢等多种组合的复合材料^[3-6]。针对爆炸焊技术的参数选择,也有学者通过数值模拟、试验等多种手段获得了爆炸焊技术适用于各种组合材料的爆炸焊窗口,便于参数的选择^[7]。金属复合材料按外观可分为复合板、复合管、复合棒等,主要应用在防腐、压力容器制造,石化等行业。铜/钢复合管兼顾了铜的导热性和抗腐蚀性以及钢的强度和耐压性,满足不同工业需求的管道输送要求,已应用于高炉冷却板^[8]、化工、石油、容器等工业输送或承压管道系统^[9]。

目前,通过爆炸焊技术制备的复合材料,其性能取决于结合界面波形和结合界面处晶粒的存在形式。大量的研究重点为复合材料的结合界面的波形形成机制,主要包括压痕机制^[10]、流动不稳定机制^[11]、涡旋脱落机制和应力波机制^[12]。这些机制尽管阐明了界面形成机理,但是不具备普遍的应用性;只有部分研究揭示了结合界面的晶粒的演化过程,包括柱状晶粒^[13]、等轴晶粒^[14]、细长晶粒^[15]等,这些晶粒分布在不同的区域,力学性能具有差异性,对于不同区域晶粒的存在形式与力学性能之间的关系还需要进一步探索。

为了获得晶粒存在形式和力学性能之间的关系,本文通过爆炸焊技术将 T2 铜管和 316 不锈钢管成功复合,通过光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)对界面处波峰和波谷的微观组织分别进行表征分析,借助纳米压痕手段获得波峰和波谷处力学性能的变化规律,并通过压扁试验研究复合管的承压性能。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料及规格

T2 铜/316 不锈钢复合管的爆炸焊接试验使用的复管为 T2 铜管,尺寸为 60 mm×38 mm×3 mm(长度×内径×壁厚);基管为 316L 不锈钢,尺寸为 60 mm×24 mm×4 mm(长度×内径×壁厚)。爆炸焊接试验采用内爆法、平行安装、边缘中心起

爆的方式,爆炸焊接示意如图 1 所示。

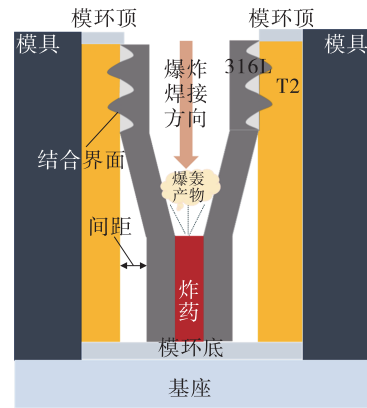


图1 复合管爆炸焊接示意

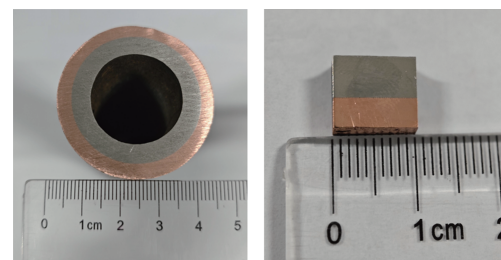
Fig.1 Schematic diagram of explosion welding of composite tubes

1.2 试验方法

爆炸焊接前对 T2 铜管内表面和 316L 不锈钢管外表面进行机械打磨清理,去除表面氧化物,然后使用纯度为 99.5% 的乙醇进行清洗。炸药选用硝酸炸药,炸药密度为 0.85 kg/m³,理论爆炸速度为 2 100 m/s,基管和复管之间的间距为 3 mm,装药厚度为 12 mm。图 2(a)(b) 示出爆炸焊完成后 T2 铜/316L 不锈钢复合管整体及侧面,图 2(c) 示出采用线切割机切割为 10 mm×10 mm×10 mm 的金相试样。



(a) 复合管整体形貌



(b) 复合管侧面

(c) 金相试样

图2 T2 铜/316L 不锈钢复合管

Fig.2 T2 copper/316L stainless composite tubes

2 复合管界面结合形式与元素分布

2.1 界面结合形式

图 3 示出低倍显微镜下的 T2 铜/316L 不锈

钢复合管的界面形态,可以看出,复合管不同位置的结合界面形状不同,在复合管开始位置结合界面形状为平直界面,随后形貌呈现周期性正弦波形和漩涡波形。结合面正弦波形平均波长 $203\ \mu\text{m}$ 、波高 $58\ \mu\text{m}$;漩涡波形平均波长 $223\ \mu\text{m}$ 、波高 $86\ \mu\text{m}$ 。其中,波形结合具有更大的接触面

积,因此常被认为具有更高的结合质量^[16]。由卡门涡街机理可知,波幅/波长的值为 0.281 时,该种波形界面具有最好的稳定性^[17]。T2铜/316L不锈钢复合管正弦波的波高/波长的值为 0.286 ,漩涡波形的波高/波长的值为 0.386 ,所以漩涡形貌会降低界面的稳定性^[1]。

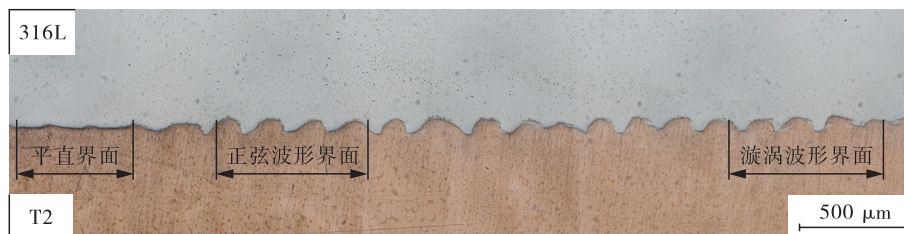


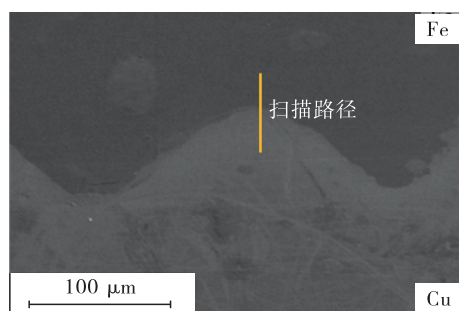
图3 T2铜/316L不锈钢复合管界面形态

Fig.3 Interface morphology of T2 copper/316L stainless composite tubes

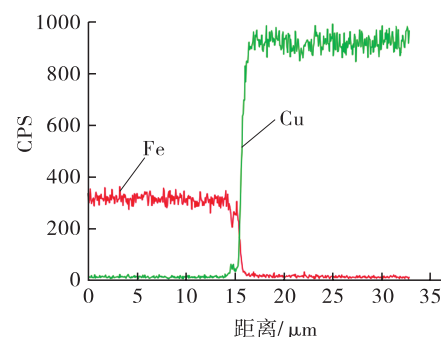
2.2 界面元素分布

图4(a)示出T2铜/316L不锈钢复合管界面波峰处线扫描路径和结果,图4(b)示出波谷处线扫描路径和结果。可以看出,Cu元素和Fe元素

扩散曲线呈现“X”状,说明在爆炸焊接过程中两种元素发生了互扩散,扩散层的厚度大约为 $1\ \mu\text{m}$ 。由于Cu与Fe原子半径十分接近,所以两种元素的扩散速度接近,并且扩散方式以置换扩散为主^[18]。



(a) 波峰线扫描分析



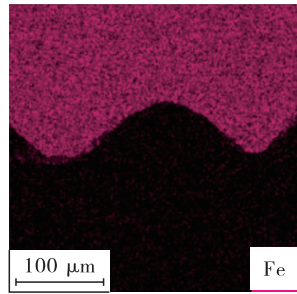
(b) 波谷线扫描分析

图4 界面附近波峰线和波谷线扫描分析

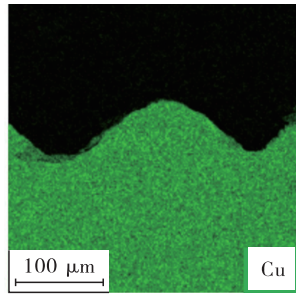
Fig.4 Line scan analysis near the interface peak and valley

为了进一步研究界面处元素扩散程度,对该区域进行了EDS面扫,观察界面处元素的扩散情况。图5示出Fe,Cu两种元素在界面附近的面扫

描结果,根据两种元素扫描结果对比度发现,界面处存在扩散现象,无明显金属间化合物。通常认为金属间化合物是不利于界面结合的^[19]。



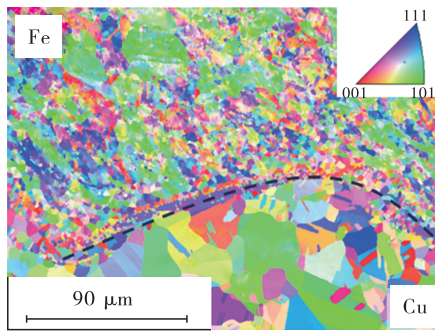
(a) Fe 侧 EDS 面扫描



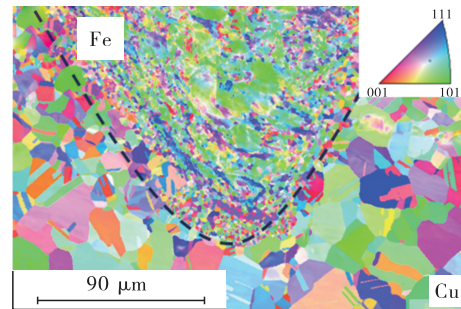
(b) Cu 侧 EDS 面扫描

图5 界面附近元素面扫描分析

Fig.5 Elemental mapping analysis near the interface



(a) 波峰



(b) 波谷

图6 T2铜/316L 不锈钢复合管不同区域的 IPF 图

Fig.6 IPF maps of different regions of the T2 copper/316 L stainless composite tubes

界面处微观组织晶粒在爆炸焊过程中,会经历变形晶粒阶段、亚结构晶粒阶段、再结晶晶粒阶段^[21-22]。为了进一步探究界面处晶粒的再结晶程度,对界面区域再结晶分布图进行分析。图7示出界面处不同区域的晶粒存在形式图,其中蓝色晶粒代表再结晶晶粒,黄色代表以亚结构晶粒,红色代表变形晶粒。两个区域 Cu 侧的晶粒有 90% 的晶粒均发生了再结晶,只有小部分晶粒以亚结构晶粒存在;Fe 侧有一半左右的晶粒以亚结构晶粒存在,30% 左右的晶粒发生了再结晶,20% 左右的晶粒以变形晶粒的形式存在。这是由于 T2 铜管和 316L 不锈钢管在爆轰波的作用下发生

2.3 界面处 EBSD 分析

为了研究爆炸焊接对复合管界面不同区域的影响以及微观组织的分布规律,选取波峰和波谷两个特征区域进行 EBSD 分析。图6示出 T2 铜/316L 不锈钢复合管不同位置的反极图 (Inverse Pole Figure, IPF)。

图6晶粒分布图中不同颜色代表不同的晶粒取向,红色代表 $\langle 001 \rangle$,绿色代表 $\langle 101 \rangle$,蓝色代表 $\langle 111 \rangle$,黑色虚线为波峰、波谷分界线。从图中不同区域的反极图可以看出,波峰和波谷处的晶粒尺寸均出现了不同程度的细化。Fe 侧发生了明显的晶粒细化,Cu 侧晶粒尺寸基本保持原始状态^[20]。Fe 侧晶粒细化区域明显大于 Cu 侧,随着界面距离的增加晶粒尺寸也呈现梯度长大的趋势。波谷处 Fe 侧晶粒沿着界面熔合线存在明显拉长现象。爆炸焊接界面处晶粒细小的原因主要是在爆炸焊接过程中,界面处造成高应变量集中,在爆轰波的热输入作用下发生高速碰撞和较大冷却速度,导致了快速的晶粒再结晶和晶粒细化现象。

了高速碰撞,界面处均产生了塑性变形。由于 Cu 侧与爆轰波直接接触,在发生塑性变形后又发生了再结晶过程,晶粒得到细化^[16];而 Fe 侧受爆轰波作用较小,部分晶粒发生了再结晶,其余晶粒以亚结构晶粒和变形晶粒形式存在。

晶粒取向决定着塑性微观组织变形程度,为了验证再结晶过程对降低塑性变形的影响,对界面处晶粒的平均取向差进行分析。图8示出爆炸焊接界面不同区域的 KAM (Kernel Average Misorientation) 图。可以看出,Fe 侧平均取向差值较大,而 Cu 侧平均取向差值较小。通过对比图7和图8可以发现,Cu 侧晶粒存在形式主要为再结晶

晶粒, 塑形变形在再结晶阶段得到释放, 整体表现为塑形变形程度较小, 局部的取向差升高为冷变形阶段位错的堆积有关; 而 Fe 侧平均取向差值较大, 主要是因为 Fe 侧的晶粒存在形式为亚结构晶粒和

变形晶粒, 亚结构晶粒能够释放部分由于爆轰波带来的部分塑形变形, 而变形晶粒则没有释放塑形变形, 表现为在沿着熔合线方向发生了一定程度的拉长, 这导致了 Fe 侧平均取向差值较大的原因。

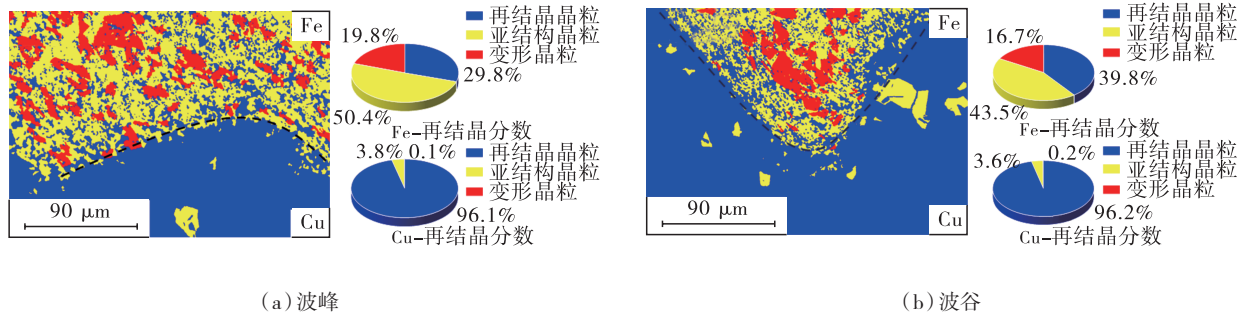


图7 界面处不同区域的再结晶晶粒分布及 Cu 侧和 Fe 侧晶粒种类统计图

Fig.7 Recrystallized grain distribution maps and grain type statistics on the Cu side and Fe side at different regions of the interface

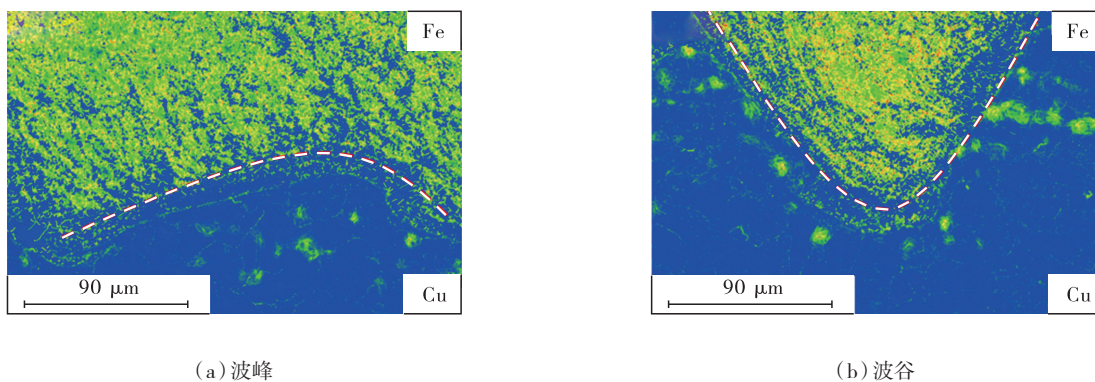


图8 爆炸焊接界面不同区域的 KAM 图

Fig.8 KAM maps of different regions of the explosion welding interface

3 力学性能分析

3.1 纳米压痕试验

图9示出界面处波峰和波谷不同区域的纳米硬度图。

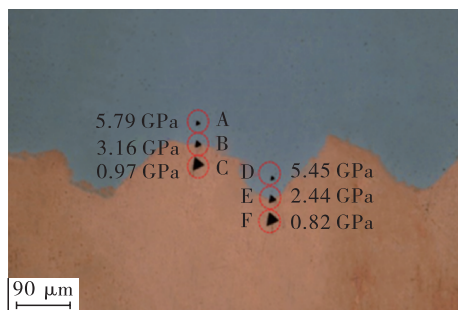


图9 爆炸焊界面处纳米硬度分布

Fig.9 Nano-hardness distribution map at the explosion welding interface

可以看出, Fe 侧和界面处的纳米硬度远高于

Cu 侧, 除了材料本身的性能差异外, 也与微观组织的存在形式有关, 这也与前面 EBSD 所表现的微观组织分布特点相一致。

图10示出 T2 铜 / 316L 不锈钢复合管界面处不同位置的位移 - 载荷曲线。

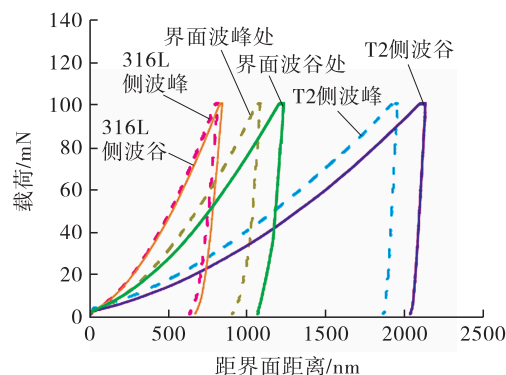


图10 界面处不同位置位移 - 载荷曲线

Fig.10 Displacement - load curves at different positions of the interface

可以看出,在相同的最大压痕载荷下,316L 不锈钢侧在波峰和波谷位置处,压痕深度差距较小,说明在上述工艺参数下爆炸焊接的复合管结合质量高,波峰处的加工硬化程度略强。界面处在波峰、波谷的压痕深度均大于316L 不锈钢侧,但都小于T2铜侧,相比更加接近316L 不锈钢侧,这主要是由于界面结合处发生了严重的塑性变形。随着塑性应变的增加,加工硬化程度和抵抗外部变形的能力增加,但由于母材316L 不锈钢的硬度值明显大于T2铜,所以表现出图10曲线分布。图11、图12分别示出纳米硬度和弹性模量在不同位置处的分布。可以看出,在最大载荷一致的情况下,结合位置处波峰位置的硬度值大于波谷位置。

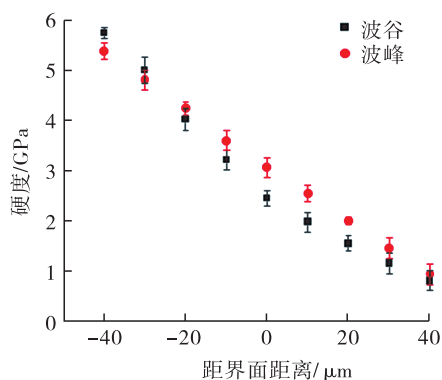


图11 不同位置处纳米硬度分布

Fig.11 Nano-hardness distribution map at different positions

以图12中明显观察到界面处波峰位置的弹性模量值变高,说明受爆炸焊影响,界面处发生了塑性流动和冷变形^[23-25],界面处的材料都发生了不同程度的加工硬化。同时波峰处的塑性变形量较大且较大过冷度,形核时位错发生纠缠,在波峰处堆积。而波谷位置的晶粒受到较少的塑性变形量,导致硬度值相对较低。另外,在界面处波峰

位置的弹性模量值大于波谷位置,这是由于波峰位置的晶粒可能在加工过程中被更多地压实或织构化,使得晶粒间的连接更加牢固,从而提高了整体材料的弹性模量^[26]。而波谷位置的晶粒可能因为塑性变形较少而保持较为松散的状态,弹性模量值相对较低。

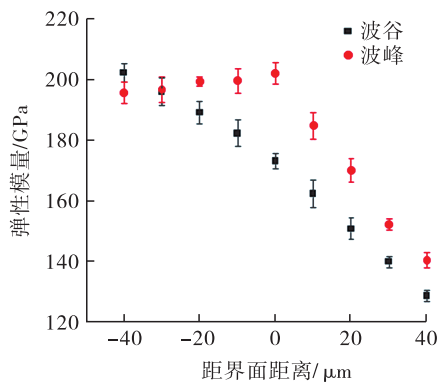


图12 不同位置处弹性模量分布

Fig.12 Elastic modulus distribution map at different positions

3.2 压扁试验

在T2铜/316L 不锈钢复合管中间位置处,取长度10 mm 的样品进行压扁试验,试样尺寸为10 mm×25 mm (长度×内径),压扁过程如图13所示,当径向压下量为25 mm 时,结合界面处开始出现裂缝,压缩后的复合管截面呈近似椭圆状。压扁试验过程中,上下圆弧半径逐渐增大,导致外侧铜受压应力作用,内侧316L 不锈钢受拉应力作用,在界面处产生剪切应力;左右两侧圆弧半径逐渐减小,导致外侧铜受拉应力的作用,内侧316L 不锈钢受压应力的作用,在界面处产生剪切应力。如果界面处剪切应力大于双金属复合材料的结合强度,容易使复合材料在界面处产生微裂纹,甚至产生分层等缺陷^[27]。

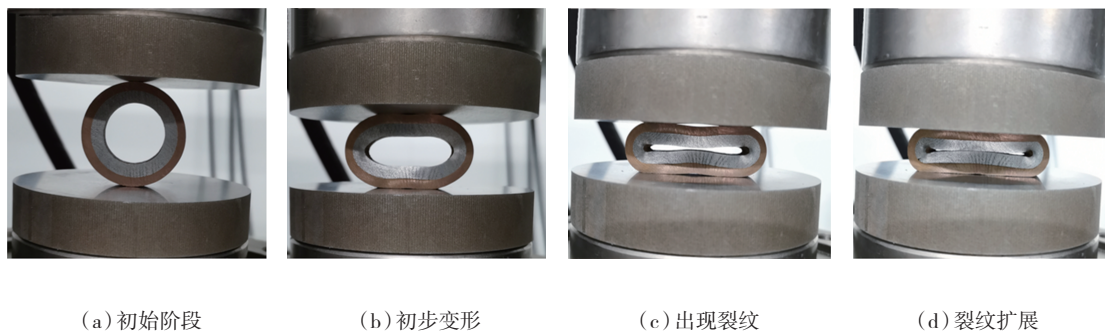


图13 T2铜/316L 不锈钢复合管试样压扁过程

Fig.13 Flattening process of T2 copper/316L stainless steel composite tubes

4 结论

(1) 爆炸焊复合管界面呈现平直界面、周期性的正弦波状,平均波长 $203\ \mu\text{m}$ 、波高 $58\ \mu\text{m}$;存在漩涡形貌,漩涡波形平均波长 $223\ \mu\text{m}$ 、波高 $86\ \mu\text{m}$ 。

(2) 由于界面处塑形变形和较大冷却速度,导致界面附近区域 Fe 侧晶粒明显小于 Cu 侧的晶粒,且随着界面距离的增加呈现梯度长大现象;界面处 Cu 侧的再结晶程度明显高于 Fe 侧;爆炸焊完成后,塑性变形几乎都集中在结合界面处和 Fe 侧,Cu 侧塑性变形整体较低。

(3) 由于界面处受到较大冷却速率和应力集中,导致结合界面处的纳米硬度值高于两侧材料;波峰区域相较于波谷区域受到较大冷却速率和应力集中,导致波峰区域的纳米硬度值和弹性模量值高于波谷区域的纳米硬度值。

(4) T2 铜 /316L 不锈钢复合管的径向压下量为 $25\ \text{mm}$ 时,压扁结束状态时复合管界面呈近似椭圆状,结合界面处存在轻微裂缝。

参考文献:

- [1] 梁汉良, 罗宁, 陈彦龙, 等. TA2/AZ31B/2024Al 爆炸焊接复合板界面微观结构特征及其动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(4): 141 – 158.
LIANG H L, LUO N, CHEN Y L, et al. Interfacial microstructure characteristics and dynamic mechanical properties of TA2/AZ31B/2024Al explosively-welded composite plates[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(4): 141 – 158.
- [2] 张婷婷, 王文先, 袁晓丹, 等. Mg/Al 合金爆炸焊接及其界面接合机制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 52 – 58.
ZHANG T T, WANG W X, YUAN X D, et al. Interface bonding mechanism of Mg/Al alloy explosive welded[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 52 – 58.
- [3] SUN X J, TAO J, GUO X Z. Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(10): 2175 – 2180.
- [4] GUO X Z, TAO J, WANG W T, et al. Effects of the inner mould material on the aluminium – 316L stainless steel explosive clad pipe[J]. Materials & Design, 2013, 49: 116 – 122.
- [5] ZHOU G A, XU J F, SHEN Z W, et al. Microstructure and mechanical properties of simultaneously explosively-welded Steel/Cu pipes and Al/Cu pipe/rod[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 244 – 253.
- [6] 樊新民, 徐天祥. Ta—10W 衬管与钢管段的爆炸复合[J]. 稀有金属材料与工程, 1995, 24(2): 55 – 59.
FAN X M, XU T X. Explosive clad of Ta – 10W liner tube and steel tubular sections[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1995, 24(2): 55 – 59.
- [7] 杨海娟, 刘翠荣, 张文斌, 等. 铜 / 钢复合管爆炸焊接数值模拟及边界效应[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(4): 994 – 1001.
YANG H J, LIU C R, ZHANG W B, et al. Numerical simulation and boundary effects of explosive welding of copper/steel composite pipes[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(4): 994 – 1001.
- [8] FENG R, ZHAO W C, GAN K F, et al. Investigation of interface microstructure and properties of copper/304 stainless steel fabricated by explosive welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 2343 – 2353.
- [9] DING L, XU J F, MA H H, et al. A novel dynamic self-constrained explosive welding method for manufacturing copper-steel bimetallic tube[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 7229 – 7241.
- [10] BAHRANI A S, BLACK T J, CROSSLAND B. The mechanics of wave formation in explosive welding[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1967, 296(1445): 123 – 136.
- [11] BEN – ARTZY A, STERN A, FRAGE N, et al. Wave formation mechanism in magnetic pulse welding[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(4): 397 – 404.
- [12] EL-SOBKYH, BLAZYNISKITZ. Experimental investigation of the mechanics of explosive welding by means of a liquid analogue[C]// Proceedings of the 5th International Conference on High Energy Rate Fabrication. Denver, Colorado, 1975: 1 – 21.
- [13] PAUL H, PETRZAK P, CHULIST R, et al. Effect of impact loading and heat treatment on microstructure and properties of multi-layered AZ31/AA1050 plates fabricated by single-shot explosive welding[J]. Materials & Design, 2022, 214: 110411.
- [14] LIU K Y, CHEN P W, RAN C, et al. Investigation on the interfacial microstructure and mechanical properties of the W – Cu joints fabricated by hot

- explosive welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 300: 117400.
- [15] SUNNY S, GLEASON G, MATHEWS R, et al. Simulation of laser impact welding for dissimilar additively manufactured foils considering influence of inhomogeneous microstructure [J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109372.
- [16] LYSAK V I, KUZMIN S V. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212 (1): 150 – 156.
- [17] 胡晓轩. 镍 / 钢复合管界面微观组织与力学性能研究 [D]. 东营: 华东石油大学, 2019.
HU X X. Study on the interfacial microstructure and mechanical properties of Ni/steel composite pipes [D]. Dongying: East China University of Petroleum, 2019.
- [18] YANG M, XU J F, MA H H, et al. Microstructure development during explosive welding of metal foil: morphologies, mechanical behaviors and mechanisms [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 212: 108685.
- [19] 张莉莉, 王文, 韩鹏, 等. 5083Al/SUS316 爆炸复合板中间层优化设计及其对组织性能的影响 [J]. *材料科学与工艺*, 2024: 1 – 8.
ZHANG L L, WANG W, HAN P, et al. Optimization design of the interlayer of 5083Al/SUS316 explosive composite plate and its effect on microstructures and mechanical properties [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2024: 1 – 8.
- [20] YANG M, WANG J X. Interface investigations of 2A14Al/Nb explosively welded composites with 1060Al and Ag interlayers: Morphologies, grains, and mechanical properties [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 4654 – 4666.
- [21] MCQUEEN H J. Development of dynamic recrystallization theory [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 387/389: 203 – 208.
- [22] GLOC M, WACHOWSKI M, PLOCINSKI T, et al. Microstructural and microanalysis investigations of bond titanium grade1/low alloy steel st52 – 3N obtained by explosive welding [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 671: 446 – 451.
- [23] 李玉龙, 杨泓, 刘冠鹏, 等. 铜 / 钢爆炸焊接头界面组织及力学性能研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2020, 28 (1): 39 – 45.
LI Y L, YANG H, LIU G P, et al. Microstructure and mechanical properties of explosive welded joint of copper/steel [J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28 (1): 39 – 45.
- [24] 李岩, 陈闯, 李艳彪, 等. 钛 / 铝爆炸焊接复合板界面表征及冶金连接机制 [J]. *压力容器*, 2021, 38 (7): 9 – 16.
LI Y, CHEN C, LI Y B, et al. Interface characterization and metallurgical bonding mechanism of Ti/Al explosively welded composite plates [J]. *Pressure Vessel*, 2021, 38 (7): 9 – 16.
- [25] 臧伟, 袁雪婷, 郭龙创, 等. 电站冷凝器用钛钢复合板结合界面均匀性研究 [J]. *压力容器*, 2022, 39 (1): 34 – 39.
ZANG W, YUAN X T, GUO L C, et al. Study on uniformity of titanium/steel interface used in condensers of power station [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2022, 39 (1): 34 – 39.
- [26] REID S R. A discussion of the mechanism of interface wave generation in explosive welding [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1974, 16 (6): 399 – 413.
- [27] 卢召红, 何琳琳, 徐艳, 等. 薄壁内衬复合管衬层径向临界脱层屈曲分析 [J]. *压力容器*, 2023, 40 (4): 37 – 44.
LU Z H, HE L L, XU Y, et al. Analysis of radial critical delamination buckling of a thin – walled lined composite pipe liner [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2023, 40 (4): 37 – 44.

作者简介: 李岩 (1988), 男, 教授, 主要从事爆炸焊接复合材料制备等工作, 通信地址: 030024 山西省太原市万柏林区窰流路 66 号太原科技大学材料科学与工程学院, E – mail: yanli1988@163.com。

本文引用格式:

李岩, 王贵成, 杨海娟, 等. 爆炸焊接铜 / 钢复合管界面组织表征与性能研究 [J]. *压力容器*, 2024, 41 (7): 17 – 24.

LI Y, WANG G C, YANG H J, et al. Characterization and performance study of the interface structure of explosion welded copper/steel composite tube [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2024, 41 (7): 17 – 24.