

316L 不锈钢与紫铜磁脉冲焊接组织性能分析

王卫东¹, 秦钢林², 邢淑清¹, 麻永林¹

(1. 内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 包头 014010; 2. 武汉埃森自动化工程有限公司, 武汉 430000)

摘 要: 为了得到 316L 不锈钢与紫铜磁脉冲焊接接头界面处结合方式、显微组织与性能, 分别对常温和深冷处理后的磁脉冲焊接接头进行微观组织观测和力学性能测定. 结果表明, 316L 不锈钢与紫铜经磁脉冲焊接后接头界面处产生了由应力波引起的亥尔姆霍兹失稳效应, 界面处呈现波浪状, 结合方式为冶金结合. 经深冷处理后的焊接接头组织和性能与未处理前基本一致, 深冷处理并不能使界面处组织和结合方式发生改变. 磁脉冲焊接过程中, 铜管变形以径向和周向变形为主, 界面处为变形孪晶组织, 不锈钢以径向变形为主, 界面处为变形奥氏体组织.

关键词: 异种金属焊接; 磁脉冲焊接; 组织; 低温力学性能

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151205001

0 序 言

热交换器的热流结构通常选用具有优良低温塑性、低温冲击韧性、低温机械性能、导热性能、无低温脆变转化温度的材料^[1]. 为了更好地发挥不同材料的特性和优势, 热交换器的热流结构可以通过 316L 奥氏体不锈钢与紫铜通过焊接制造. 这样可以发挥奥氏体不锈钢良好的低温性能和抗腐蚀性能, 同时也可以发挥紫铜良好的导热性能^[2]. 若采用传统熔焊方式, 在实际焊接过程中极易出现热裂纹、气孔、热影响区等诸多焊接缺陷^[3-6].

磁脉冲焊接技术是一种利用高能放电脉冲产生瞬间巨大电磁力, 从而实现高速、固态的冷焊的连接方法. 其焊接过程不需要填充金属和保护气体, 不产生热影响区, 接头处不产生晶粒粗大, 可大幅减小金属间化合物的产生. 其焊接工艺参数简单易控, 极大减少因人为操作误差导致的焊件品质问题, 高效节能且环保, 非常适合异种金属的连接^[7-8]. 该新型连接方式已经成功运用于铝合金/低碳钢、奥氏体不锈钢/铝合金、铝合金/镁合金、紫铜/铝合金等异种金属的连接^[9-10], 但关于奥氏体不锈钢/紫铜磁脉冲焊接的研究和报道尚未发现.

磁脉冲焊接的界面形貌类似于爆炸焊接, 常呈现波形结合区、直接结合区及熔化层结合区三种基本形态. 其中波形结合区为理想的结合区域, 结合区界面组织、结构、相性能最稳定. 对于界面波的形

成机理, 主要有复板流侵彻机理、涡街机理、亥尔姆霍兹失稳机理及应力波机理等, 但一直没有得到权威统一^[7-10].

1 试验方法

试验材料选用内径为 14 mm、壁厚为 1 mm 的铜管和直径 11 mm 的 316L 不锈钢棒, 铜管和不锈钢间隙为 1.5 mm. 具体焊接工艺参数如表 1 所示.

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameter

线圈匝数 <i>C</i>	焊接电压 <i>U</i> /kV	焊接电流 <i>I</i> /A	电源频率 <i>f</i> /kHz	倾角 <i>θ</i> /(°)
10	18~22	600	20	2

为检验焊接接头在极低温条件下的结合能力, 对接头进行深冷处理. 通过液氮对焊接接头进行深冷处理, 试验温度为 20 K, 急冷 40 次, 之后对接头进行力学性能测定, 并利用蔡司显微镜和扫描电镜观察接头界面处显微组织.

2 试验结果及分析

2.1 接头力学性能分析

为检验焊接质量, 对焊接后的接头进行了剥离试验和拉伸试验. 剥离试验选择焊接接头 0°, 90°, 180°和 270°四个方位进行, 如图 1a 所示. 焊接接头 A 处的铜母材未从不锈钢母材中剥离. 说明焊接接

头的结合性很好,满足基本力学性能.

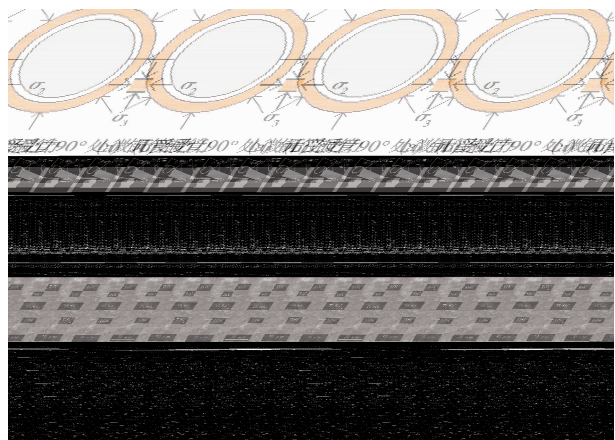


图 1 接头剥离及拉伸试验
Fig. 1 Peeling and tensile test

图 1b 为接头拉伸后试样纵切形貌,可知拉断部分为铜母材(图中 B 区域),焊接接头处完好,金属界面处无宏观裂纹和脱落现象,说明磁脉冲焊接接头满足基本力学性能,接头处结合能力要远高于紫铜母材金属的强度.

2.2 深冷处理前后组织分析

图 2 所示为深冷处理前的组织形貌. 图 2a 为低倍扫描组织,左侧为紫铜,右侧为不锈钢. 可知焊接接头界面呈现波浪形,其组织、相和结构最稳定. 其结合机理可由应力波引起的亥尔姆霍尔兹失稳效应

解释. 图 2b 为高倍扫描组织,经放大后可以清晰地观察到界面处两种金属无缝结合在一起,同时可以看出分界面上无裂隙、孔洞等焊接缺陷. 由图 2b 可知,紫铜经快速变形后的扫描组织多为细长纤维状的孪晶组织. 当变形以极快的速度进行时,紫铜晶体来不及经过位错滑移、攀移、交滑移等低速变形机制进行塑性变形,只能通过孪晶的方式进行变形,最终靠近界面处的铜以孪晶组织存在,且存在一定的方向性,呈现河流状. 而不锈钢是实芯且强度较大,只在靠近界面处发生了细微变形,变形组织不明显,仍以等轴晶组织存在.

图 2c 为靠近界面处的不锈钢显微组织形貌,可知该区域由于变形量较小,基体组织仍为奥氏体组织. 图 2d 为界面处显微组织形貌,在进行磁脉冲焊接时,会发生应力波引起的亥尔姆霍尔兹失稳效应,主要体现为金属形成射流,由一种金属流向另一种金属,最终在界面处形成波浪形. 由图 2d 可知,金属射流是由铜流向不锈钢,在一些区域产生回流,最终界面处呈现波浪形,不锈钢组织为奥氏体组织,铜为变形组织,以孪晶组织存在. 由于紫铜在界面处多为变形孪晶组织,晶粒内部缺陷较多,很容易发生腐蚀,最终在图片中呈现的颜色较深,而不锈钢由于本身变形较小,同时具有很好的抗腐蚀性能,所以在图片中呈现的颜色较为光亮.

图 2e 为靠近界面处铜的显微组织,可知铜经快速变形后,靠近界面处的组织以细长纤维状的孪晶

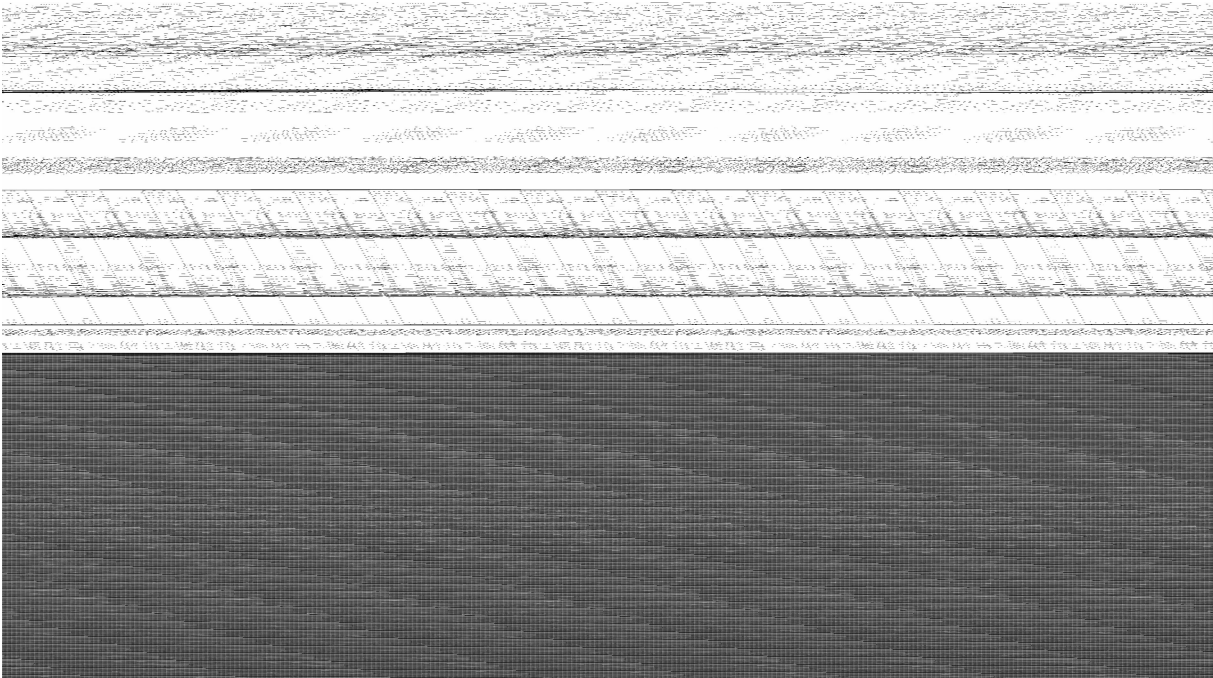


图 2 深冷处理前组织形貌
Fig. 2 Microstructure before cryogenic treatment

组织形式存在,该孪晶群以一定的方向与界面存在一定夹角,且靠近界面距离越近,孪晶群越多. 图 2f 为远离界面处的铜显微组织,对比图 2e 可知,远离界面处的铜组织以等轴晶组织存在. 随着到界面处距离的增加,紫铜的变形逐步减小,所形成的孪晶组织也大大减少.

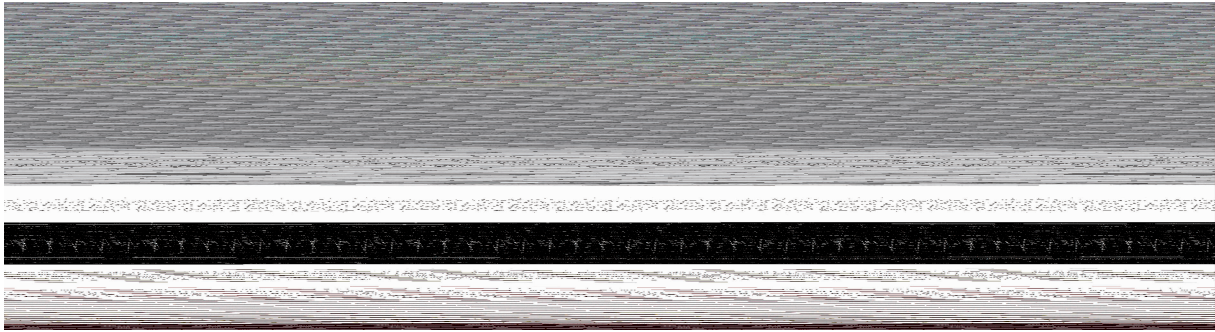


图 3 深冷处理后 SEM 组织形貌
Fig. 3 Scanning microstructure after cryogenic treatment

2.3 铜管变形分析

铜管受力分析如图 4 所示. 铜管在冲击变形过程中,主要有两方面的受力. 取微元进行受力分析,当微元处在铜管的 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 时,所受力为受径向 σ_y 和周向应力 σ_x 两向正应力,轴向应力 σ_z 忽略不计,同时变形与应力存在一一对应的关系,变形后,直径由 D_1 变成 $D_2, D_1 > D_2$. 对铜管 90° 处微元受力分析可知,微元共有三个方向受力,分别为径向应力 σ_y 、周向应力 σ_x 和轴向应力 σ_z . 由于微元位于铜管 90° 处,该处坐标面只有正应力,即该处坐标轴为主轴,此处的正应力为主应力, $\sigma_z = \sigma_1, \sigma_x = \sigma_2, \sigma_y = \sigma_3$, 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

铜管的径向变形为整体变形. 铜管内壁接触到不锈钢棒表面之前,变形主要为周向压缩变形. 当铜管内壁接触到不锈钢棒表面时,不仅存在周向压缩变形,同时还存在径向压缩变形. 以径向压缩变形为主,根据变形及受力分析可知,分两个阶段: (1) 铜管内壁接触到不锈钢棒表面之前. 变形以周向压缩为主,周向变形速率大,断面会出现变形区,以孪晶为主,分布趋势为与径向相同,垂直于周向. (2) 铜管内壁接触到不锈钢棒表面后. 变形以径向压缩为主. 第一阶段变形产生的径向分布的孪晶仍存在,但靠近铜管内壁的部分由于发生径向压缩,将会产生周向分布的孪晶. 两个阶段变形过渡区将会存在径向和周向的混合孪晶. 以上分析可以在扫描电镜组织形貌中得到验证,证明其存在三个变形区,即周向孪晶变形区、径向孪晶变形区和混合孪晶变

图 3 为深冷处理后的 SEM 形貌,可知相比未处理的组织,深冷处理后的扫描组织没有发生变化,因此深冷处理并不能使接头界面处的组织、相及结构发生变化. 进一步说明,两种金属通过磁脉冲焊接结合在一起的性能与熔化焊形成的焊缝的性能十分接近,甚至比熔化焊的接头有更为优越的性能.

形区. 铜组织类型比较单一,主要以变形组织为主,且变形后的组织,由于存在大量孪晶,容易腐蚀.

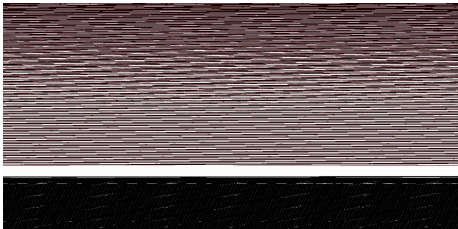


图 4 受力分析
Fig. 4 Stress Analysis

2.4 不锈钢棒变形分析

不锈钢棒变形只有一个阶段,当铜管内壁接触到不锈钢棒表面时,不锈钢棒表面发生局部变形. 不锈钢棒表面微观区域发生变形,且以径向压应力和径向压缩变形为主. 同时变形是在极短时间内完成的 (10^{-6} s 左右), 316L 不锈钢属于奥氏体不锈钢,晶格类型为面心立方晶格,存在较多滑移系,当冲击力足够大时,较易发生变形,且钢棒表面组织多为变形组织,且沿周向分布,与铜管内表面变形组织类似.

3 结 论

(1) 316L 不锈钢与紫铜磁脉冲焊接后接头界面处产生由应力波引起的亥姆霍兹失稳效应,

界面处呈现波浪状,结合方式为冶金结合.

(2) 焊接接头经深冷处理后组织和性能与未处理前基本一致,深冷处理并不能使界面处组织和结合方式发生改变.

(3) 铜管变形以径向和周向变形为主,界面处为变形孪晶组织. 不锈钢以径向变形为主,界面处为变形奥氏体组织.

参考文献:

[1] 路兰卿, 于 洋. 高压液氢容器的研制[J]. 航天制造技术, 2013, 6(3): 50-52.
Lu Lanqing, Yu Yang. Development of high pressure and liquid hydrogen vessel [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, 6(3): 50-52.

[2] 张立伟, 张文杰, 魏仁海, 等. 不锈钢管铜翅片热沉制造关键技术[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 587-590.
Zhang Liwei, Zhang Wenjie, Wei Renhai, *et al.* The manufacturing technique of stainless steel pipe and copperplate structure in heat sink[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(6): 587-590.

[3] 张利军, 薛祥义, 郑 筠, 等. 316L 不锈钢/铜浸渗复合接头的组织性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(12): 1169-1171.
Zhang Lijun, Xue Xiangyi, Zheng Yun, *et al.* Microstructure and properties of 316L stainless steel/copper composite joint[J]. Special Casting and Nonferrous Alloy, 2013, 33(12): 1169-1171.

[4] 李 扬, 胡绳荪, 申俊琦. 紫铜与 316L 不锈钢脉冲激光焊微观组织及力学性能[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 99-104.

Li Yang, Hu Shengsun, Shen Junqi. Microstructural characteristics and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welded copper and 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 99-104.

[5] 贺地求, 李 剑, 李东辉, 等. 铝合金超声搅拌复合焊接[J]. 焊接学报, 2011, 12(9): 70-72.
He Diqu, Li Jian, Li Donghui, *et al.* Study on ultrasonic stir hybrid welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 22(9): 70-72.

[6] 刘树英. 纯铜与不锈钢扩散焊接头性能及原子扩散动态解析[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 101-104.
Liu Shuying. Joints performance of diffusion bonding between pure Cu and stainless steel and dynamic analysis of atomic diffusion[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 101-104.

[7] 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.

[8] Shribman V. Magnetic pulse welding for dissimilar and similar materials[C]. Proceedings of 3rd International Conference on High Speed Forming, 2008: 13-22.

[9] Manogaran A P, Manoharan P, Priem D, *et al.* Magnetic pulse spot welding of bimetals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(6): 1236-1244.

[10] Kore S D, Date PP, Kulkarni S V, *et al.* Electromagnetic impact welding of Al-to-Al-Li sheets[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(3): 034502.

作者简介: 王卫东,男,1988 年出生,硕士研究生. 主要从事电磁脉冲焊接和超低温态下焊接的研究. Email: 358964931@qq.com

通讯作者: 邢淑清,女,教授,硕士研究生导师. Email: 286338044@qq.com