

35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接 复合界面的元素扩散

罗键¹, 赵国际², 罗乾³, 王向杰², 徐晓菱⁴

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 400030, 重庆; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 400030, 重庆; 3. 华菱集团涟源钢铁股份有限公司, 417009, 湖南娄底; 4. 中国兵器工业第五九研究所, 400039, 重庆)

摘要: 应用惯性径向摩擦焊工艺进行了 35CrMnSi/T3 的摩擦焊接, 并利用扫描电子显微镜观察了界面的微观结合特征, 利用能谱分析仪检测了界面元素的扩散. 试验结果表明: 惯性径向摩擦焊飞轮转速为 3 000 r/min 时, 35CrMnSi/T3 接触面结合紧密并形成了明显的波浪状“咬合”, 界面附近发生了元素的互相扩散与溶解, 实现了冶金结合; 界面处 Fe 原子在 Cu 基体中的扩散距离约为 33 μm , Cu 原子在钢中的扩散距离约为 3 μm ; 径向摩擦焊接过程中接触面快速而剧烈的塑性变形有利于抑制摩擦焊接头中氧的不利影响.

关键词: 摩擦焊; 35CrMnSi/T3; 界面; 扩散

中图分类号: TG453 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0063-05

Element Diffusion on Interface of 35CrMnSi/T3 Inertial Radial Friction Weld

LUO Jian¹, ZHAO Guoji², LUO Qian³, WANG Xiangjie², XU Xiaoling⁴

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

3. Lianyuan Iron & Steel Co. Ltd. of Hunan Hualing Group, Loudi, Hunan 417009, China;

4. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

Abstract: Inertial radial friction welding process was adopted to weld 35CrMnSi and T3. The interface microcosmic binding characteristics were observed by SEM. The element diffusion near the interface was detected by EDS. The results show the tightly connected contact surface of 35CrMnSi/T3 with obviously wavy occlusion at flywheel rotation speed of 3 000 r/min. The elements diffusion and dissolution through the interface occur, and the metallurgical bonding forms. The diffusion distance of Fe atoms into copper matrix gets to 33 μm and Cu atoms into Fe matrix about 3 μm . In addition, the adverse effect of oxygen on friction welded joints is inhibited by the evident plastic deformation of the contact surfaces in radial friction welding process.

Keywords: friction welding; 35CrMnSi/T3; interface; diffusion

在电器、电子、汽车等多个领域, 钢/铜复合材料作为铜的替代品使用, 能显著降低成本, 优化性能, 具有广阔的应用前景^[1]. 摩擦焊是利用工件表面相

互摩擦所产生的热使接触面达到热塑性状态、然后迅速顶锻从而完成焊接的一种压焊方法, 适用于异种材质的焊接^[2-3]. 尽管钢与铜在物理性能方面差异

很大,使熔焊较为困难,但它们具有良好的摩擦焊接性^[4],能够形成性能良好的连接^[5-6]. 径向摩擦焊接改变了常规的摩擦面方向,通过特殊装置对圆周面径向加压,可实现圆环或薄壁套管与轴类或管类零件的焊接,并且在难焊材料连接中获得了一些成功的应用^[7-8].

关于钢/铜径向摩擦焊,徐晓菱等^[9-10]研究了兵工行业中薄壁紫铜弹带与钢弹体的连接技术,吴玮等^[11]对典型铜合金与钢的摩擦焊接性及焊接工艺进行了研究. 但是,有关钢/铜径向摩擦焊连接机理的研究目前鲜有报道.

本文在先期钢/铜径向摩擦焊工艺研究^[9-11]的基础上,研究了某关键部件铜环(材质 T3)与 35CrMnSi 钢轴体的惯性径向摩擦焊接头的界面结合特点,分析了元素的扩散与相互作用及其对结合性能的影响,以期为进一步提高该结构的连接质量提供理论依据.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

结构中的铜环为 T3 紫铜,其化学成分见表 1,环外径为 30 mm,壁厚为 3.5 mm,长为 4.5 mm,冷拔态;钢轴体为 35CrMnSi 钢,化学成分见表 2,尺寸为 $\varnothing 20\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,调制态.

表 1 T3 的化学成分

质量分数/%				
Cu	Fe	Pb	Sb	Bi
99.7	—	0.01	—	0.02

质量分数/%				
Zn	Sn	S	O	C
—	—	0.01	0.10	—

表 2 35CrMnSi 的化学成分

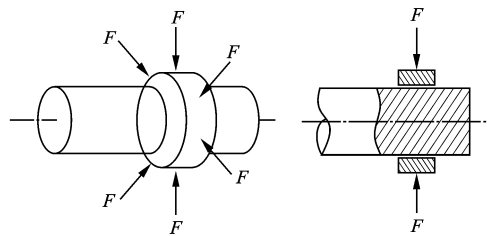
质量分数/%			
C	Si	Mn	Mo
0.32~0.39	1.10~1.40	0.80~1.10	—

质量分数/%				
Cr	Ni	V	Ti	B
1.10~1.40	—	—	—	—

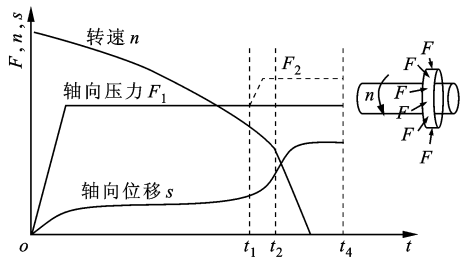
1.2 结构形式及焊接方法

试验部件铜环与钢轴体的连接结构形式如图 1

所示. 焊前铜环用磷酸与硝酸的混合溶液(二者的体积比为 95 : 5)浸泡 20 min 左右,用清水冲洗后吹干,35CrMnSi 用丙酮清洗.



(a) 连接结构



(b) 焊接过程中各参数的变化

图 1 径向摩擦焊连接结构示意图

径向摩擦焊接设备为 CT-25 特种摩擦焊机,转速为 0~5 000 r/min,无级可调,最大轴向推力为 250 kN,焊接工件的最大长度为 1 500 mm,通过自动控制系统能够实现轴向、径向、惯性、连续驱动等多种摩擦焊工艺.

焊接时,移动夹具上均匀排布的 8 个压头先施加径向预紧力夹紧紫铜圆环,待钢轴体随飞轮达到预定转速后,飞轮与驱动电机脱离,压头开始对静止环件均匀施加 2 级径向压力. 摩擦界面产生的摩擦热把接头区域加热到焊接温度,2 个工件的接触表面产生塑性变形. 在顶锻压力的作用下,工件的转速会由于摩擦力的作用而迅速减小直至停止,接触摩擦区域经过表面激活、扩散和再结晶,最终形成连接^[9-11].

1.3 工艺参数与接头检验

对惯性飞轮转速分别为 1 800、2 400 和 3 000 r/min 的焊接试样进行宏观检查,结果表明:当惯性飞轮转速为 3 000 r/min 时,铜环的塑性变形充分,与钢基体结合紧密. 根据该结构的特殊用途对接头进行了专项剪切检验,强度合格. 根据检测结果并结合文献^[11],确定本次径向摩擦焊接试验的工艺参数如下:主轴转速 3 000 r/min;摩擦压强 68 MPa;顶锻压强 220 MPa;焊接时间 0.8 s.

1.4 微观分析

将焊接样品沿平行于钢轴体轴线方向用电火花切割,切割面经金相砂纸打磨后抛光,结合区域的铜侧用 CuCl₂ 体积分数为 8% 的氨水溶液浸蚀 3 s,钢侧用体积分数为 4% 的硝酸酒精浸蚀 1 s,制备金相试样。

采用 KQ-100E 型超声波清洗器清洗金相试样,利用 TESCAN Vega II LMUSEM 扫描电子显微镜 (SEM) 观察界面的结合特征,用 OXFORD ISIS300EDS 能谱分析仪检测界面元素的分布状况。

2 试验结果与讨论

2.1 摩擦结合面的特点

惯性径向摩擦焊接过程通过移动夹具对紫铜圆环施加径向压力,摩擦并顶锻钢轴体实现焊接。一级加压摩擦过程能有效地去除表面膜并产生热量,将接头区域加热到焊接温度。在二级加压顶锻条件下,2 个工件的接触表面产生塑性变形,将原焊接面上的氧化膜挤出,从而形成连接。

图 2 为 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接结合面的形貌。可以看出,由于一级加压摩擦产热充分,接触界面上二级加压顶锻产生的塑性变形充分,因此 35CrMnSi/T3 接触面结合紧密并形成了明显的波

浪状“咬合”,表明摩擦焊接过程中有效地去除了接触面的氧化膜,实现了良好的微观连接,其中靠近界面区域的铜基体塑性变形更为剧烈。

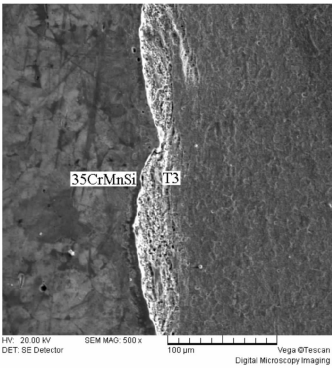
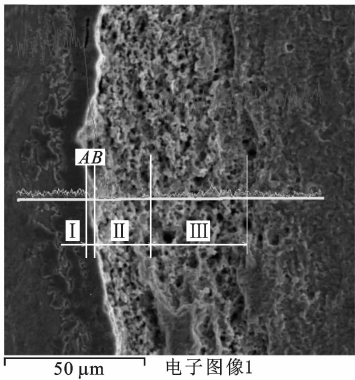


图 2 径向摩擦焊接结合面的形貌

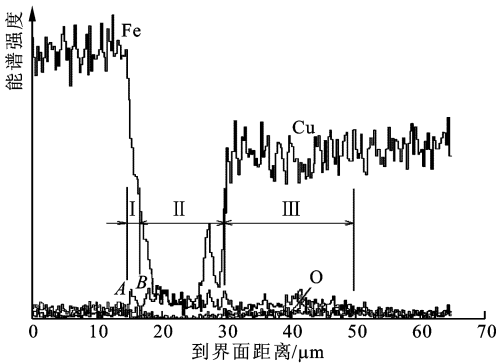
2.2 焊接过程中 Fe 与 Cu 的迁移

利用 EDS 线扫描所得 Fe、Cu、O 元素在焊接区域的扩散情况见图 3,可分为 3 个特征区。

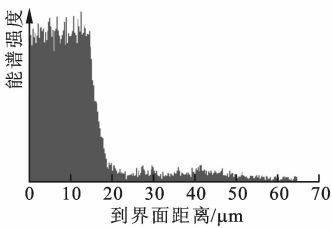
(1) I 区,为 Cu 在 Fe 基体的扩散区,根据 Cu 与 Fe 元素分布发生显著变化的位置可分别确定左、右边界(见图 3 中的 A、B)。该区的宽度约为 3 μm,Cu 原子在这里越过界面向钢中扩散。Fe 与 Cu 不形成金属间化合物,但可形成有限溶解度的固溶体,因此判断在该区形成了 Cu 溶解于 Fe 的固溶体



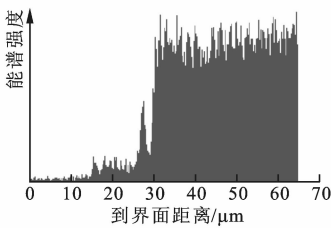
(a)接头分区



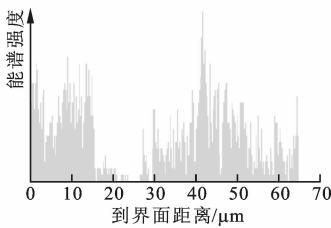
(b)3 个区的元素分布情况



(c)Fe 的分布



(d)Cu 的分布



(e)O 的分布

图 3 径向摩擦焊接头的能谱线扫描结果

α -Fe.

(2) II 区,为 Fe 在剧烈变形的 Cu 基体大量扩散的区域. 该区由于一级加压摩擦产热充分,因此接触界面上二级加压顶锻产生的塑性变形充分,靠近界面区域的铜基体在剧烈塑性变形的作用下发生了动态再结晶. 该区域宽约 13 μm ,能谱分析结果(见图 4b)表明,Fe 原子大量过渡(检测点的元素原子分数分别为 Fe 40.18%,Cu 41.80%,其余为 C),未检测到其他元素. 由于 Fe 与 Cu 可形成有限溶解度的固溶体,因此判断在该区域形成了 α -Fe+ ϵ -Cu 双相组织,表明在摩擦焊接的剧烈塑性变形作用下,接触面处可以部分形成纯净的异种金属微观连接.

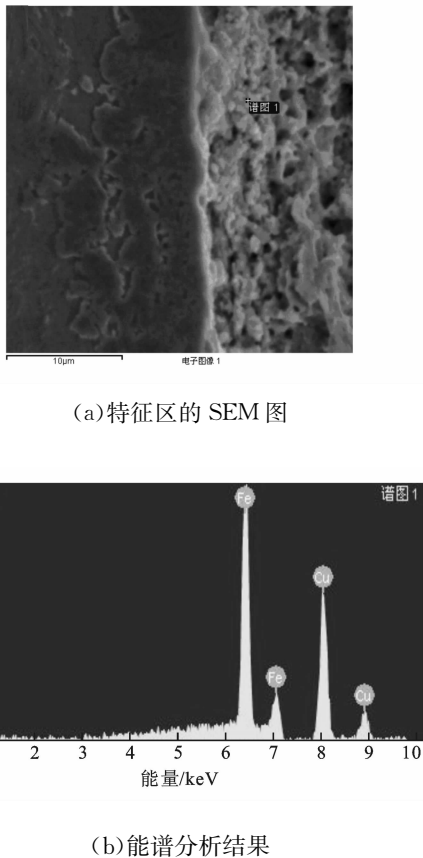


图 4 塑性变形区特征点分析结果

(3) III 区,为 Fe 在 Cu 基体的延伸扩散区. 该区域宽约 20 μm ,表明 Fe 原子越过界面和 Cu 基体剧烈塑性变形区后继续向 Cu 中进行了扩散,但扩散逐渐减弱. Fe 可以有限溶解于 Cu 形成固溶体,因此判断在该区域形成了 ϵ -Cu.

综合以上分析表明:在 35CrMnSi/T3 径向摩擦焊接过程中,界面附近发生了元素的互相扩散与溶解,表明界面已实现了冶金结合;钢中的 Fe 原子在 Cu 基体中的扩散距离共约 33 μm (II 区与 III 区),而

Cu 原子在钢中的扩散距离明显较短,约为 3 μm (I 区);由于焊接过程持续时间短,径向摩擦焊接接触界面间的原子扩散距离均明显小于铜/钢扩散连接中的距离^[12].

2.3 氧与金属的作用

金属材料在高温下活性增大,易与氧结合导致材料变质^[12]. T3 紫铜中 O 的质量分数达 0.1%,由 Cu-O 相图可知,O 几乎不溶解于 Cu,O 在基体中主要以 $\text{Cu}_2\text{O}+\text{Cu}$ 共晶形式存在.

35CrMnSi/T3 中各元素的氧化物标准生成自由能 ΔG^θ 与温度 T 的关系(Ellingham 图)如图 5 所示^[13].

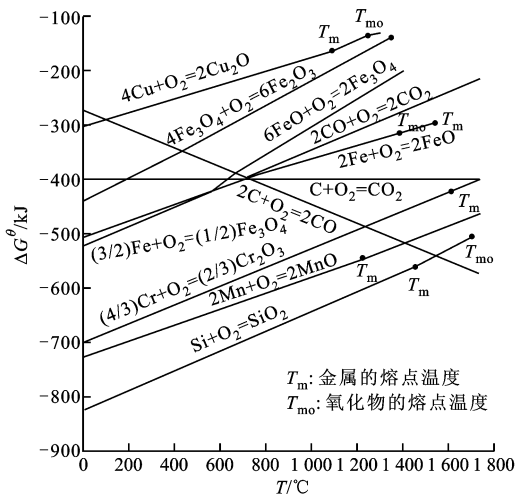


图 5 部分典型氧化物的 Ellingham 图

由图 5 可知, Fe_2O_3 和 Cu_2O 的标准生成自由能都为负值,但 Fe 氧化物的 G^θ 绝对值更大,即 Fe 与 O 的亲合力比 Cu 的大,可将 Cu 从其氧化物中还原出来. 因此可以认为,Fe 原子扩散进入 Cu 基体后,将还原共晶物中的 Cu_2O 并形成 Fe 的氧化物. 有关研究认为,铜/钢的原子相互扩散会在界面处形成 Fe_2O_3 . 氧化物是硬脆相,在界面附近分布必然对结合性能造成不利影响.

图 3e 所示的 O 元素分布的能谱线扫描分析结果表明,II 区(即发生了剧烈塑性变形的区域)中含氧量极低,这一结果与图 4b 的特征点能谱分析结果一致. 可以认为,快速而剧烈的塑性变形有利于抑制 O 的不利影响,提高结合性能. 此外,控制 Cu 中的含氧量也是避免接头中形成氧化物的有效措施.

3 结 论

(1)当惯性径向摩擦焊接中飞轮转速为 3 000 r/min 时,35CrMnSi/T3 接触面结合紧密并形成明

显的波浪状“咬合”,实现了良好微观连接。

(2)在 35CrMnSi/T3 径向摩擦焊接过程中,界面附近发生了元素的互相扩散与溶解,实现了冶金结合。钢中的 Fe 原子在 Cu 基体中的扩散距离约为 $33\text{ }\mu\text{m}$, Cu 原子在钢中的扩散距离约为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。

(3)在径向摩擦焊接过程中,接触面快速而剧烈的塑性变形有利于抑制摩擦焊接接头中 O 的不利影响,提高结合性能。

参考文献:

- [1] 李宝绵,李兴刚,许光明,等.铜/钢复合材料的研究及应用[J].材料导报,2002,16(2):22-24.
LI Baomian, LI Xinggang, XU Guangming, et al. Study and application of Cu/steel clad metal [J]. Materials Review, 2002, 16 (2): 22-24.
- [2] MESHARAM S D, MOHANDAS T, MADHUSUDHAN REDDY G. Friction welding of dissimilar pure metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1/3): 330-337.
- [3] 罗键.摩擦扭矩 VCFE 法检测与数理模型研究[J].西安交通大学学报,1998,32(9):101-104.
LUO Jian. Determination of friction torque for continuous drive friction welding by application of voltage-current floating evaluation method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(9): 101-104.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册:第1卷,焊接方法及设备[M].3版.北京:机械工业出版社,2008:808-840.
- [5] KINURA M, KASUYA K, KUSAKA M, et al. Effect of friction welding condition on joining phenomena and joint strength of friction welded joint between brass and low carbon steel [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(5): 404-412.
- [6] MOATA R, KARADGEA M, PREUSSA M, et al.

Phase transformations across high strength dissimilar steel inertia friction weld [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204: 48-58.

- [7] XU Xiaoling, WU Wei, XU Yuanze, et al. The research of radial friction welding [J]. Welding in the World, 2005, 49(1/2): 31-33.
- [8] KWIETNIEWSKI C, DOS SANTOS J F, DA SILVA A A M, et al. Effect of plastic deformation on the toughness behaviour of radial friction welds in Ti-6Al-4V-0.1Ru titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 417: 49-55.
- [9] 徐晓菱,徐元泽,吴玮.小口径炮弹弹带摩擦焊技术[J].兵工学报,2007,28(3):346-348.
XU Xiaoling, XU Yuanze, WU Wei. Study on radial friction welding band of small shell [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(3): 346-348.
- [10] XU Xiaoling, XU Yuanze, WU Wei. Research on radial friction welding of 30 mm shell's band [J]. Journal of China Ordnance, 2008, 4(1): 69-71.
- [11] 吴玮,徐晓菱,徐元泽.典型铜合金 T3、B5、H96 与 35CrMnSi 的摩擦焊接性研究[J].兵器材料科学与工程,2006,29(5):55-58.
WU Wei, XU Xiaoling, XU Yuanze. Study on radial friction welding of typical copper-alloy T3、B5、H96 with steel 35CrMnSi [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2006, 29(5): 55-58.
- [12] 王璞,刘世程,刘德义,等.铜中氧对铜/钢扩散复合界面的影响[J].材料热处理学报,2006,27(3):71-74.
WANG Pu, LIU Shicheng, LIU Deyi, et al. Effects of oxygen contents in copper on the diffusion interface of copper/steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(3): 71-74.
- [13] 李美栓.金属的高温腐蚀[M].北京:冶金工业出版社,2001:1-30.

(编辑 葛赵青)

本刊在线稿件处理系统正式开通运行,实行在线投稿、
在线审稿、在线查询和全文免费阅读。

<http://www.jdxb.cn>