

文章编号:1000-582X(2010)09-024-05

飞轮转速对 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接特性的影响

罗 键^{1a}, 赵国际^{1a,1b}, 王向杰^{1a,1b}, 吴 玮², 徐晓菱²

(1. 重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 材料科学与工程学院, 重庆 400044;

2. 中国兵器工业部第五九研究所, 重庆 400039)

摘要:应用 CT-25 特种摩擦焊机, 在不同惯性飞轮转速条件下进行了 35CrMnSi/T3 的惯性径向摩擦焊接。利用电子扫描显微镜 (SEM) 观察界面微观结合特征及组织变化, 能谱分析仪 (EDS) 检测界面元素的扩散, 并测定了铜侧塑性变形区的硬度变化。试验结果表明: 惯性飞轮转速增大, 一级加压摩擦产热显著增加, 有利于接触界面二级加压顶锻产生更大的塑性变形, 促进工件接触面形成连接; 飞轮转速 3 000 r/min 时, 35CrMnSi/T3 径向摩擦焊接头结合区清洁, 再结晶区形成变形 α -Fe 和 ϵ -Cu 细晶组织, 元素扩散明显, 焊接效果良好; 铜侧界面处由于剧烈塑性变形致使硬度升高。

关键词:摩擦焊; 35CrMnSi/T3; 飞轮转速; 扩散

中图分类号: TG456.9

文献标志码: A

Effects of flywheel rotation speed on properties of 35CrMnSi/T3 inertial radial friction welding

LUO Jian^{1a}, ZHAO Guo-ji^{1a,1b}, WANG Xiang-jie^{1a,1b}, WU Wei², XU Xiao-ling²

(1a. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission; 1b. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, P. R. China)

Abstract: CT-25 special friction welding machine is used to weld 35CrMnSi/T3 with different inertial flywheel rotation speeds. The interface microcosmic binding characteristics and microstructure changes are observed by SEM. The element diffusion near the interface is detected by EDS and the microhardness of plastic deformation zone in Cu matrix is tested. The results show that, when the inertial flywheel rotation speed increases, friction heat of primary pressure increases significantly, more plastic deformation forms between the contact surfaces by secondary pressure, and bonding of work pieces is promoted. When the flywheel rotation speed is 3 000 r/min, the joint of 35CrMnSi/T3 by inertial radial friction welding process gets clean binding domain, elements obviously diffuses, the fine-grain α -Fe and ϵ -Cu structure forms in recrystallization zone and the welding effect is good. The microhardness of interface region in Cu matrix is increased by violent plastic deformation.

Key words: friction welding; 35CrMnSi/T3; flywheel rotation speed; diffusion

收稿日期: 2010-04-18

基金项目: 教育部博士点基金资助项目 (20070611030); 重庆市自然科学基金资助项目 (CSTC2008BB3303/CSTC2009BA3026); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-08-0607)

作者简介: 罗键 (1971-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事新型高效 (特种) 焊接技术与基础理论的研究, (E-mail) luojian@cqu.edu.cn。

异种金属连接在满足特定需要或节约贵金属等领域得到了广泛应用^[1]。钢/铜复合材料具有钢的良好力学性能和铜良好的耐蚀、导电、导热等性能,在电器、电子、汽车等领域作为铜替代品使用,能显著降低成本,优化性能,具有广阔应用前景^[2-3]。

铁与铜在液态时无限互溶,固态时有限互溶,不形成金属间化合物,但可形成有限溶解度的固溶体。由于铁与铜在高温时的晶格类型、晶格常数和原子半径等都很接近,对焊接有利;但铁(钢)与铜在物理性能方面差异很大,熔焊时,由于铜的线胀系数比铁大40%左右,铁-铜合金的结晶温度区间为300~400℃,且容易形成(Cu+Cu₂O)、(Fe+FeS)等低熔点共晶物,在焊接应力作用下易产生热裂纹,给可靠焊接造成了很多困难。采用火焰钎焊、中频钎焊、电阻焊^[4]、真空扩散焊^[5]、摩擦焊^[6-9]、爆炸焊^[10]等方法可以获得铁(钢)与铜的良好焊接接头,并在生产中得到了应用。

径向摩擦焊接是在径向力作用下,利用摩擦界面上产生的摩擦热把接头区域加热到焊接温度,以实现圆周面上的摩擦焊接,主要用于回转体结构件如管子、环件的装配焊接^[11]。利用径向摩擦焊可以高效、方便、快速地将一个圆环或薄壁套管焊接到轴

类或管类零件上。Kwietniewski等^[12]研究了钛合金径向摩擦焊不同顶锻力条件下的塑性变形及其对晶粒尺寸和力学性能的影响;文献^[13-15]研究了典型铜合金与钢的径向摩擦焊接性与焊接工艺。截至目前,关于异种金属径向加压条件下摩擦连接机理与结合界面特点的研究鲜有报道。

笔者在先期试验研究工作的基础上^[13-16],利用惯性径向摩擦焊进行了某部件铜环与钢轴体的焊接试验,分析了不同工艺条件对连接界面特点和性能的影响,以期为工艺改进提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

结构中铜环为T3紫铜,化学成分见表1,外径 $\phi 30$ mm,壁厚3.5 mm,宽4.5 mm,冷拔态;钢轴体为35CrMnSi,化学成分见表2,尺寸为 $\phi 20$ mm \times 50 mm,调制态。

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见图1。 $V(H_3PO_4):V(HNO_3)=19:1$,焊前铜环用磷酸与硝酸混合溶液浸泡20 min左右,用清水冲洗后吹干;35CrMnSi用丙酮清洗。

表1 T3的化学成分

成分	$\omega(Cu)$	$\omega(Fe)$	$\omega(Pb)$	$\omega(Sb)$	$\omega(Bi)$	$\omega(Zn)$	$\omega(Sn)$	$\omega(S)$	$\omega(O)$	$\omega(C)$
质量分数	99.7	—	0.01	—	0.02	—	—	0.01	0.10	—

表2 35CrMnSi的化学成分

成分	$\omega(C)$	$\omega(Si)$	$\omega(Mn)$	$\omega(Mo)$	$\omega(Cr)$	$\omega(Ni)$	$\omega(V)$	$\omega(Ti)$	$\omega(B)$
质量分数	0.32~0.39	1.10~1.40	0.80~1.10	—	1.10~1.40	—	—	—	—

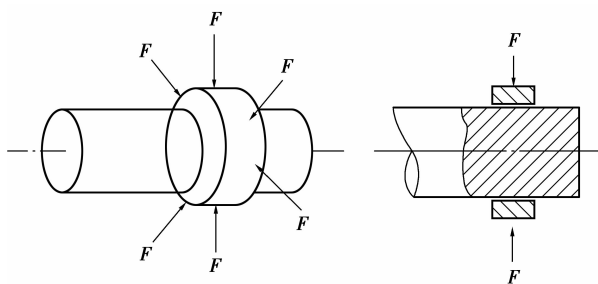


图1 径向摩擦焊连接结构示意图

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250 kN,焊接工件的最大长度1 500 mm,通过自动

控制系统能够实现轴向、径向、惯性、连续驱动等摩擦焊接工艺。

焊接时,移动夹具先施加预紧力预夹紧紫铜圆环,待钢轴体随飞轮达到预定转速后,飞轮与驱动电机脱离,开始对静止环件施加两级径向摩擦压力。摩擦界面产生的摩擦热把接头区域加热到焊接温度,两工件接触表面产生塑性变形。在顶锻压力作用下,工件的转速会在摩擦力的作用下迅速减小直至停止,接触摩擦区域经过表面激活、扩散和再结晶,最终形成连接^[12-15]。

本试验是在其他参数不变的情况下,研究初始飞轮转速不同对惯性径向摩擦焊焊接界面结合特征的影响,工艺参数见表3。

表 3 35CrMnSi/T3 径向摩擦焊工艺参数

主轴转速 ($r \cdot \min^{-1}$)			摩擦压强 /MPa	顶锻压强 /MPa	焊接时间 /s
1#	2#	3#			
1 800	2 400	3 000	60~70	190~220	0.8~0.9

1.3 微观分析

将焊接样品沿垂直于钢轴体轴线方向利用电火花切割,经金相砂纸打磨后抛光,结合区域处铜侧用 8%的 CuCl_2 氨水溶液浸蚀 3 s,钢侧用 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 电子扫描显微镜 (SEM) 观察界面微观组织特征,OXFORD ISIS300EDS 能谱分析仪检测界面元素分布状况。对铜侧塑性变形区利用 HV-1000 型显微硬度计进行硬度分析,0.49 N 挡,延时 20 s,取距离界面相等的 3 个点测量并取其平均值作为测试结果。

2 试验结果与讨论

2.1 焊接样品

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,两工件接触表面产生塑性变形,焊接面上的氧化膜被挤出,形成连接。在相同的一级加压摩擦和二级加压顶锻条件下,惯性飞轮不同初始转速所形成的 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接试样见图 2。

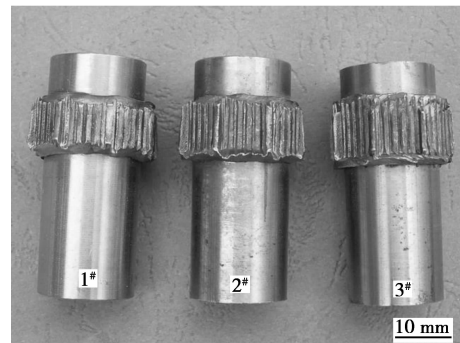


图 2 焊接接头试样

各试样飞轮脱开时转速:1#, 1 800 r/min;2#, 2 400 r/min;3#, 3 000 r/min。由图 2 可见,随着飞轮脱开时转速的增大,压合区域也显著增大,这是由于增大飞轮转速,一级加压摩擦产热增加,有利于接触界面二级加压顶锻产生更大的塑性变形,促进 35CrMnSi/T3 异种金属接触面形成固相塑性连接。

2.2 接头微观分析

在相同的一级加压摩擦和二级加压顶锻条件下,飞轮不同初始转速所形成的 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接接头组织如图 3 所示。

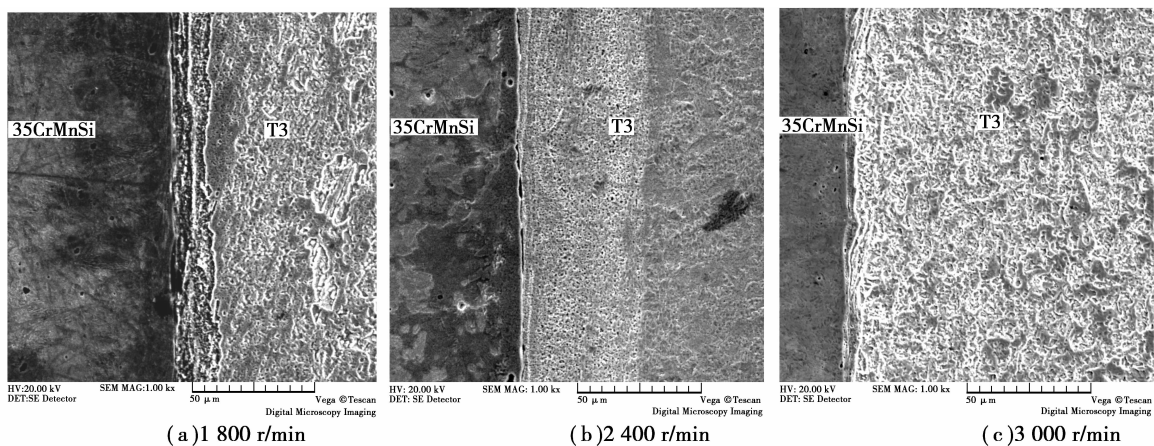


图 3 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接接头 SEM 照片

由图 3 可见,由于钢硬度大,铜较软且升温快,焊接过程中的变形主要发生在铜侧,而在钢侧塑性变形较小。

当飞轮转速较低(1 800 r/min)时,一级加压摩擦产热不足,二级加压顶锻产生的塑性变形明显较

小,其中钢侧基体边缘几乎没有发生变形,而铜侧基体发生了不均匀的塑性变形,尤其是靠近钢界面处形成了一个宽度约为 $15 \mu\text{m}$ 疏松的带状区域(如图 3(a)所示)。由于钢侧基体未参与该区变化,可以认为该疏松的带状区域是由层叠拉长的铜晶粒以

及接触面间的氧化膜、缝隙和空洞构成,即在此工艺条件下形成有效的摩擦焊固相塑性连接是比较困难的。

增大飞轮转速至 2 400 r/min 时,一级加压摩擦产热增加,二级加压顶锻产生的塑性变形有所改善,钢侧基体边缘部分发生变形且与铜基体结合,而铜侧基体发生了较均匀的塑性变形,在靠近钢界面处形成了一个明显的宽度约为 40 μm 细化变形区域(如图 3(b)所示),但接触面仍存在明显的未结合区,表明该塑性固相连接效果仍需改进。

飞轮转速至 3 000 r/min 所形成的 35CrMnSi/T3 接头组织见图 3(c)。由于一级加压摩擦产热充分,接触界面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作用下发生动态再结晶,在靠近钢基体侧形成了明显的剧烈塑性变形区域。对该区域进行的能谱线扫描分析(图 4)结果表明,在铜再结晶区发生了明显的铁元素过渡(图 4 中 A 处)。铁与铜不形成金属间化合物,但可形成有限溶解度的固溶体,因此判断在该区域形成了 $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\epsilon\text{-Cu}$ 双相组织。界面区钢与铜基体结合紧密并形成了明显的波浪状“咬合”,实现了良好微观塑性连接。

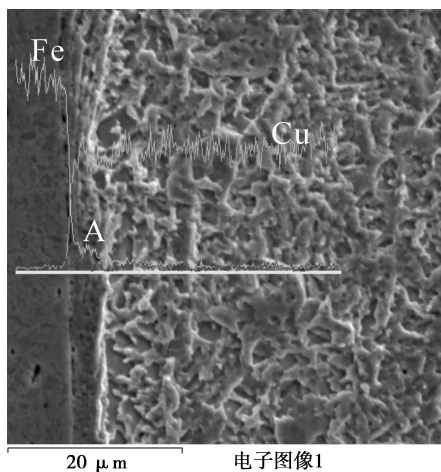


图 4 接头界面区能谱线扫描

结合文献[13]提出的钢与铜径向摩擦焊接头质量判定依据,在飞轮转速至 3 000 r/min 所形成的 35CrMnSi/T3 接头结合面清洁,发生了再结晶并形成变形细晶组织,元素扩散显著,表明达到了良好的焊接效果,界面结合牢靠。

2.3 塑变区硬度分析

飞轮不同初始转速所形成的接头铜侧塑性变形区域硬度测定结果见图 5。

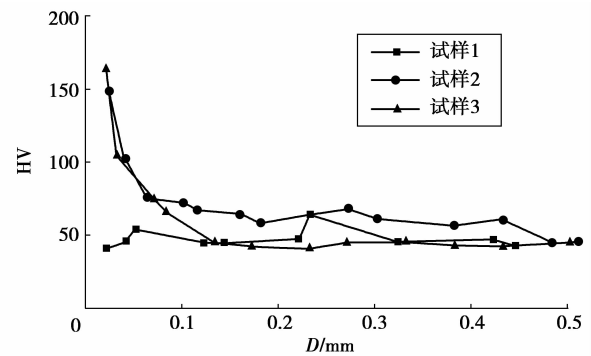


图 5 接头铜侧塑性变形区硬度

由硬度分布可见,在距离钢/铜界面约 50 μm 范围内,与铜基体硬度相比,1# 试样硬度略有下降,2#、3# 试样硬度则明显升高。结合图 3 接头微观组织,距界面约 50 μm 范围也正是铜侧塑性变形区域:1# 试样由层叠拉长的铜晶粒以及接触面间的氧化膜、缝隙和空洞构成的疏松的带状区域导致硬度下降;2# 与 3# 试样由于较充分的一级加压摩擦产热及接触界面二级加压顶锻产生剧烈塑性变形,该区域发生加工硬化及动态再结晶,致使越靠近变形严重的界面处硬度越高,这与文献[12]指出的径向摩擦焊靠近焊合区硬度增大是一致的。

3 结 论

1) 惯性径向摩擦焊飞轮脱开时转速对焊件结合起着至关重要的作用,一级加压摩擦产热随飞轮转速增大而显著增加,有利于接触界面二级加压顶锻产生更大的塑性变形,促进工件接触面形成连接。

2) 飞轮转速 3 000 r/min 时,35CrMnSi/T3 径向摩擦焊接头结合面清洁,形成再结晶变形 $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\epsilon\text{-Cu}$ 细晶组织,元素扩散明显,焊接效果良好;接头铜侧靠近接触界面区域由于剧烈塑性变形导致硬度升高。

参考文献:

- [1] MESHARAM S D, MOHANDAS T, MADHUSUDHAN R G. Friction welding of dissimilar pure metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184 (1/3): 330-337.
- [2] 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 BAO-MIAN, LI XING-GANG, XU GUANG-MING, et al. Study and application of Cu/steel clad metal[J]. Materials Review, 2002, 16 (2): 22-24.
- [3] 邢丽,李磊,柯黎明. 低碳钢与紫铜搅拌摩擦焊接头显微组织分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 17-20.

- XING LI, LI LEI, KE LI-MING. Microstructural investigation on friction stir welds of dissimilar metals between mild steel and copper[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 17-20.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第 2 卷 材料的焊接[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 刘德义, 刘世程, 陈汝淑, 等. 黄铜/钢扩散复合双金属界面组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(1): 110-113.
- LIU DE-YI, LIU SHI-CHENG, CHEN RU-SHU, et al. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonding brass/steel bimetal[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(1): 110-113.
- [6] JAYABHARATH K, ASHFAQ M, VENUGOPAL P, et al. Investigations on the continuous drive friction welding of sintered powder metallurgical (P/M) steel and wrought copper parts[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 454/455(4): 114-123.
- [7] 傅莉, 杜随更, 介万奇. 电场对异种金属摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. 材料研究学报, 2003, 17(3): 281-286.
- FU LI, DU SUI-GENG, JIE WAN-QI. Influence of electric field on the microstructure and mechanical property of the friction welding joint between T2 copper and stainless steel[J]. Chinese Journal of Material Research, 2003, 17(3): 281-286.
- [8] KIMURA 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.
- [9] 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(1/3): 48-58.
- [10] DURGUTLU A, GULENC B, FINDIK F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding[J]. Materials and Design, 2005, 26(6): 497-507.
- [11] 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.
- [12] 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(1/2): 49-55.
- [13] 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 XIAO-LING, XU YUAN-ZE, WU WEI. Study on radial friction welding band of small shell[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(3): 346-348.
- [14] XU X L, XU Y Z, WU W. Research on radial friction welding of 30 mm shell's band[J]. Journal of China Ordnance, 2008, 4(1): 69-71.
- [15] 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 XIAO-LING, XU YUAN-ZE. 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.
- [16] XU X L, WU W, XU Y Z, et al. The research of radial friction welding[J]. Welding in the World, 2005, 49(1/2): 31-33.

(编辑 张 苹)