

10 钢/35CrMnSi 径向摩擦焊接头的 力学性能及组织特征

陈大军, 李忠盛, 张隆平, 戴明辉, 代野, 付扬帆

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究 10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头的力学性能和组织特征。**方法** 通过对 10 钢/35CrMnSi 进行惯性径向摩擦焊接试验, 采用 OM、超声检测、万能材料试验机及显微硬度仪对接头的微观组织及力学性能进行表征。**结果** 10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头焊合区内未发现裂纹、夹渣、未熔合等焊接缺陷, 焊合率 100%; 接头显微硬度分布呈现出中间高两头低的特征, 平均剪切强度达 520 MPa, 略高于 10 钢母材; 焊接界面为明显的“锯齿状”咬和, 35CrMnSi 侧的热影响区由细小马氏体和少量贝氏体组织, 10 钢侧形成了一层具有明显金属流线的塑性变形层, 靠近焊接界面的塑性变形层为厚度约 150 μm 的细晶区, 其组织为少量马氏体和铁素体。**结论** 采用惯性径向摩擦焊技术实现了 10 钢/35CrMnSi 异种金属的高强连接。

关键词: 惯性径向摩擦焊; 异种金属; 力学性能; 显微组织

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.02.021

中图分类号: TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)02-0117-05

Mechanical Properties and Microstructure Characteristics of Radial Friction Welding Joint of 10 Steel and 35CrMnSi

CHEN Da-jun, LI Zhong-sheng, ZHANG Long-ping, DAI Ming-hui, DAI Ye, FU Yang-fan

(Southwest Institute of Technique and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The paper aims to study mechanical properties and microstructure characteristics of joint of 10 steel/35CrMnSi by inertia radial friction welding. The inertia radial friction welding of 10 steel/35CrMnSi was tested. Microstructure characterization and mechanical properties of welding joints were studied with OM, ultrasonic testing, universal material testing machine and micro-hardness tester. The results show that the crack, slag and incomplete fusion were not found in weld zone of inertia radial friction welding joint of 10 steel and 35CrMnSi. The bonding rate was 100%. The micro-hardness curve of welding joint was high in the middle and low at two ends. The average shear strength of the welding joints could be up to 520 MPa, which was higher than that of 10 steel base metal. There was obvious serrated bite at the welding interface. The HAZ in 35CrMnSi side was fine martensite and a few bainite. And a plastic deformation layer with obvious metal streamline was formed in 10 steel side. The plastic deformation layer near the welding interface was a fine grain region with a thickness of about 150 μm . Few martensite and ferrite of microstructure were in the fine grain region. The results show that dissimilar metals of 10 steel and 35CrMnSi can be welded with high-strength by inertia radial friction welding.

KEY WORDS: inertia radial friction weld; dissimilar metals; mechanical properties; microstructure

35CrMnSi 是一种低合金高强度钢, 属于中碳调质钢, 经适当热处理后的 35CrMnSi 具有强度高、韧

性好等优异的力学性能, 同时还具有淬透性好、易于成形等诸多优点, 是制造承受强载荷冲击、重载等恶

收稿日期: 2018-01-27

作者简介: 陈大军 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为异种金属摩擦焊以及轻合金焊接。

劣使用工况条件构件的理想材料,已被广泛应用于航天航空、石油化工、电力、兵器等领域。35CrMnSi 管件/圆环焊接、管件/管件对接等的高强焊接问题是制约 35CrMnSi 材料工程化应用的关键因素之一。由于 35CrMnSi 热敏感性强,焊接时热裂纹倾向大,焊接性较差,目前采用电弧焊、埋弧焊、等离子弧焊等传统熔焊后易产生热裂纹等焊接缺陷,严重降低了接头的力学性能^[1-3]。真空电子束焊接头强度高,但受设备真空室尺寸以及焊接结构的限制,难以满足长管件/圆环类、管件/管件类等构件的焊接要求。惯性径向摩擦焊是一种将飞轮存储的动能通过相对摩擦转化为热能,使接触面达到热塑性状态,随后迅速径向顶锻从而实现连接的一种固相焊方法^[4-6],具有焊接强度高、高效、可靠性好等特点,尤其适用于管体/圆环类等异种材料构件的高强连接,已成为国内外异种材料焊接研究的热点^[7-15]。文中采用惯性径向摩擦焊工艺,对 10 钢/35CrMnSi 异种金属进行焊接试验,分析了惯性径向摩擦焊接头的力学性能与组织特征。

1 试验

试验材料分别为 10 钢(环)和 35CrMnSi 高强度钢(管),其中 10 钢环尺寸为 $\Phi 55 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,其含有质量分数为 0.07%~0.13% 的 C, 0.17%~0.37% 的 Si, 0.35%~0.65% 的 Mn, 不大于 0.03% 的 S, 不大于 0.03% 的 P, 不大于 0.15% 的 Cr, 不大于 0.25% 的 Ni, 不大于 0.25% 的 Cu, 余量为 Fe。焊前对 10 钢环进行退火处理,热处理后的显微组织见图 1。可见,10 钢母材由铁素体和少量珠光体组成;35CrMnSi 钢管尺寸为 $\Phi 45 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,其含有质量分数为 0.32%~0.39% 的 C, 1.10%~1.40% 的 Si, 0.80%~1.10% 的 Mn, 不大于 0.025% 的 S, 不大于 0.025% 的 P, 1.10%~1.40% 的 Cr, 不大于 0.03% 的 Ni, 不大于 0.025% 的 Cu, 余量为 Fe。焊前对 35CrMnSi 钢管进行调质处理,热处理后的显微组织见图 2。可见,35CrMnSi 母材由回火索氏体和铁素体组成。

试验设备为 CT-30 型惯性径向摩擦焊机(见图 3),

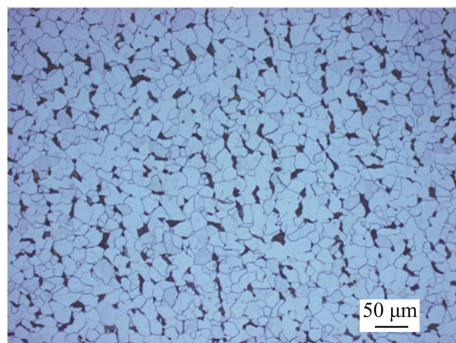


图 1 10 钢母材的显微组织

Fig.1 Microstructure of 10 steel base metal

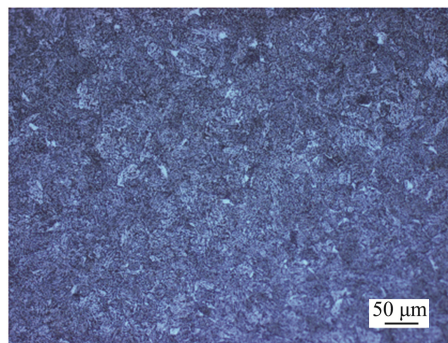


图 2 35CrMnSi 母材的显微组织

Fig.2 Microstructure of 35CrMnSi base metal

焊接前将 10 钢环安装在径向加压装置内,35CrMnSi 钢管安装在焊接工装中并稳定夹持,惯性径向摩擦焊摩擦压力的加载方向及试件旋转方式见图 4。前期工艺摸索优化出的焊接工艺参数如下,摩擦转速 ω_1 为 3000 r/min,顶锻转速 ω_2 为 650 r/min,摩擦压力 p_1 为 9 MPa,顶锻压力 p_2 为 16 MPa,保压时间 t 为 10 s。用此工艺参数共焊接出 3 组焊接试件,3 组试件的径向烧损量为 $(1 \pm 0.2) \text{ mm}$,其中 1[#]和 2[#]试件用于剪切试验,3[#]试件用于显微组织分析和显微硬度测试。



图 3 试验用 CT-30T 惯性径向摩擦焊机

Fig.3 CT-30T inertia radial friction welding machine for experiment

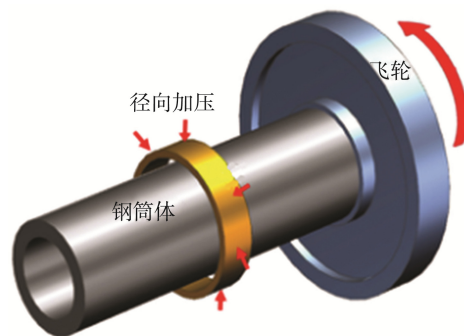


图 4 惯性径向摩擦焊

Fig.4 Schematic diagram of inertia radial friction welding

采用 CSS44100 电子万能试验机测试焊接接头的剪切强度;采用 HM-MT1000 显微维氏硬度计测试焊接接头的显微硬度,加载载荷为 300 g,各测试点间隔为 100 μm ;采用超声测试评价焊接接头的焊接质量,测试条件为面扫描,纵波,探头频率为 15 MHz;

采用 OLYMPUS-BX60M 光学金相显微镜观察焊接接头的显微组织。

2 结果及分析

2.1 焊接效果

10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头的宏观形貌见图 5。可见, 10 钢环外表面在工装的径向夹持力作用下形成了规则的挤压楞, 且 10 钢环在焊接过程中沿 35CrMnSi 钢管轴向方向发生强烈的塑性变形, 并在钢环两侧形成了结构基本对称的焊瘤 (飞边), 焊后钢环展开宽度约 8.6 mm (不含飞边), 是焊前钢环宽度的 1.7~1.8 倍, 宽度均匀适中, 成形良好。

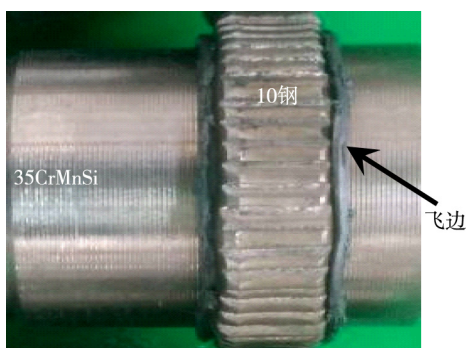


图 5 焊接试件的宏观形貌

Fig.5 Macro morphology of welding sample

10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头的超声检测图谱见图 6。可见, 焊缝两侧的检测图谱表现为连续红色带 (宽度约 2~2.5 mm), 说明在焊接飞边处存在大量未熔合等弱连接缺陷; 焊接飞边中间区域为焊合区, 检测图谱表现为连续且宽度均匀的蓝色带 (宽度约 9~10 mm), 未发现裂纹、夹渣、未熔合等焊接缺陷, 说明焊合区的焊合率 100%, 焊接质量好。

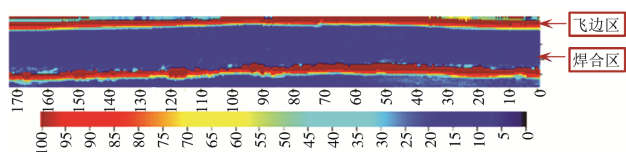


图 6 焊接接头的超声检测图谱

Fig.6 Ultrasonic testing figure of welding joints

2.2 剪切强度

基于管件/环类构件惯性径向摩擦焊接头的结构特点, 试验采用剪切强度来考核焊接接头强度, 从 1[#]和 2[#]焊接试件上分别制取 4 个剪切试样, 剪切试验后获得的剪切强度见图 7。可见, 10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头的剪切强度处于 510~530 MPa 之间, 平均剪切强度达到 520 MPa。对 10 钢母材上制取相同的 4 个试样进行剪切试验表明, 10 钢母材的

平均剪切强度为 492 MPa, 说明惯性径向摩擦焊接头的剪切强度略高于母材, 具有优异的剪切强度性能。

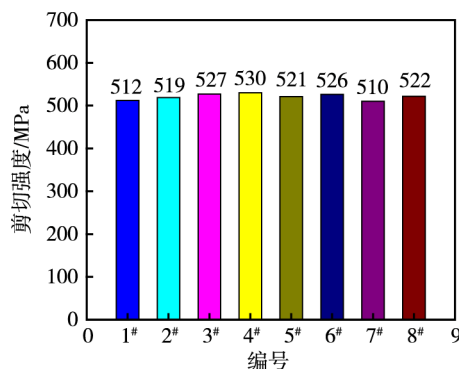


图 7 焊接接头的剪切强度值

Fig.7 Shear strength of welding joints

2.3 显微硬度

10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头的显微硬度分布曲线见图 8。可见, 焊接接头的显微硬度呈现出中间高两头低的特征, 在焊接界面及距离焊接界面 100 μm 以内区域的显微硬度值最高, 达到 500HV_{0.3} 以上。随着离焊接界面距离的增加, 接头显微硬度值逐渐减小, 在 35CrMnSi 侧离焊接界面 500 μm 区域的显微硬度值快速降至 208HV_{0.3}, 基本与母材显微硬度相同; 而在 10 钢侧离焊接界面 300 μm 处显微硬度快速降至 230HV_{0.3} 后缓慢下降, 在 600 μm 处才基本与母材相同。由于 35CrMnSi 显微硬度高于 10 钢, 导致钢管侧显微硬度高于 10 钢环侧的显微硬度。

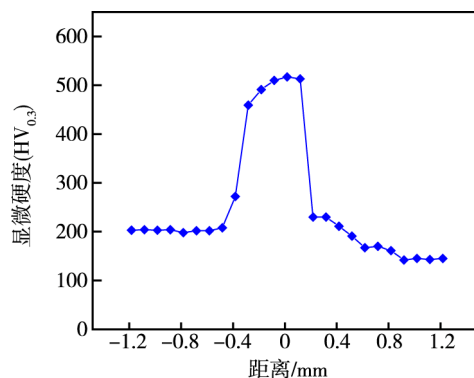


图 8 焊接接头的显微硬度分布

Fig.8 Micro-hardness distribution of welding joints

2.4 显微组织

10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头的纵截面显微组织见图 9。可见, 接头中未见裂纹、夹渣、未熔合等焊接缺陷, 焊接飞边主要由 10 钢侧塑性金属挤出而形成, 而 35CrMnSi 侧很少形成飞边。还可以看出, 由于受焊接过程的旋转摩擦、顶锻压力以及热传导等综合作用, 35CrMnSi 侧热影响区中部宽度最大 (约 450~500 μm), 从中部到边缘逐渐变小 (约 60

μm),这主要由于中部区域金属流变困难,加之散热慢,温度最高,导致热影响区宽度大;而边缘处高温金属易被挤出,热传导迅速,温度较低,因而热影响区宽度最小。

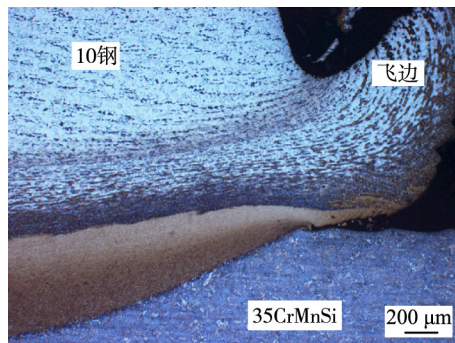


图9 焊接接头的纵截面显微组织

Fig.9 Longitudinal section microstructure of welding joints

10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头的横截面显微组织见图 10。可见, 惯性径向摩擦焊接头可分为 4 个区域:A 区为 35CrMnSi 母材,B 区为 35CrMnSi 热影响区,C 区为 10 钢塑性变形区,D 区为 10 钢母材。还可看出,在 10 钢塑性变形区(C 区)和 35CrMnSi 热影响区(B 区)内均出现金属流线形态的组织,且 10 钢/35CrMnSi 焊接界面为明显的“锯齿状”咬和,这说明焊接过程中 10 钢和 35CrMnSi 金属均受大顶锻力作用发生了快速而强烈的塑性变形,实现了冶金结合。

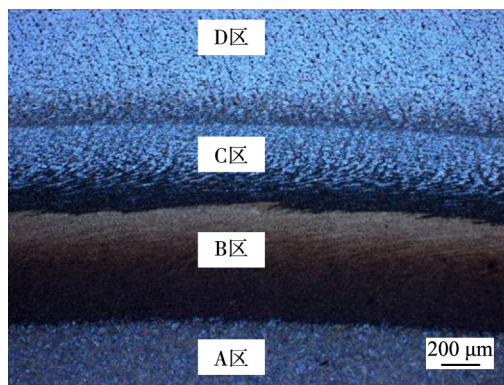


图10 焊接接头的横截面显微组织

Fig.10 Cross section microstructure of welding joints

35CrMnSi 母材(A 区)和热影响区(B 区)的显微组织见图 11。可见, 热影响区(B 区)厚度约 $500\mu\text{m}$, 其组织为晶粒细小的马氏体和少量贝氏体, 这主要由于此区域焊接峰值温度处于 A_{c3} 以上, 组织经历了奥氏体化, 经快速冷却后形成了细小马氏体和少量贝氏体, 致使 35CrMnSi 侧热影响区显微硬度值较高, 这与图 8 所示的显微硬度分布规律相吻合。靠近热影响区的 35CrMnSi 组织形态与母材一致, 未见明显变形。

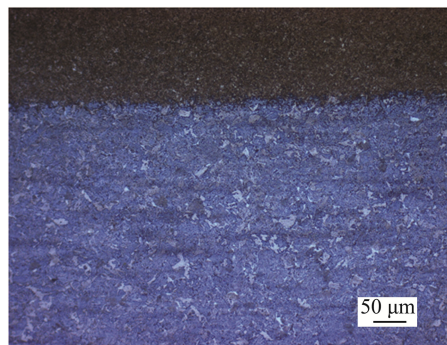


图11 35CrMnSi 母材(A 区)和热影响区(B 区)的显微组织

Fig.11 Microstructure of 35CrMnSi base metal (A zone) and heat affected zone (B zone)

从焊接界面到 10 钢母材(D 区)的显微组织见图 12。可见, 10 钢侧(C 区)形成了一层具有明显金属流线的塑性变形层, 其中靠近焊接界面区域的变形尤为剧烈, 形成了厚度约 $150\mu\text{m}$ 的细晶区, 其组织为少量马氏体和铁素体, 越远离焊接界面, 晶粒变形程度越小。细晶区的形成原因初步分析由惯性径向摩擦焊工艺的特点所决定, 在焊接界面的相互摩擦生热过程中, 10 钢同时承受很大的径向压力和周向剪切力, 在热-力耦合作用下, 10 钢侧发生了快速而强烈的塑性变形, 存储了大量变形能, 降低了焊缝金属的再结晶温度, 加上靠近焊接界面区域的焊接温度很高, 造成再结晶晶粒的成核率很大。由于惯性径向摩擦焊接时间仅数秒, 加之焊缝区温度梯度大, 冷却速度快, 大量再结晶晶粒来不及长大就结束, 从而在靠近焊接界面的 10 钢侧形成了一层细晶区。随着离焊接界面距离的增加, 塑性变形层的晶粒变形程度和形变硬化效果逐渐变小, 致使其显微硬度逐渐降低, 这也与图 8 所示的显微硬度分布规律相吻合。

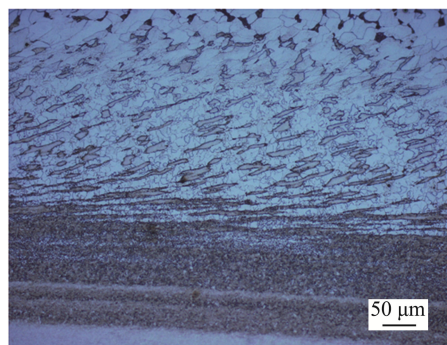


图12 焊接界面到 10 钢母材(D 区)的显微组织

Fig.12 Microstructure from welding interface to 10 steel (D zone)

3 结论

1) 采用惯性径向摩擦焊技术实现了 10 钢/35CrMnSi 异种金属的高强连接。

2) 10 钢/35CrMnSi 惯性径向摩擦焊接头焊合区内未发现裂纹、夹渣、未熔合等焊接缺陷, 焊合率 100%。

3) 接头显微硬度分布呈现出中间高两头低的特征, 平均剪切强度达 520 MPa, 略高于 10 钢母材。

4) 10 钢/35CrMnSi 焊接界面为明显的“锯齿状”咬和。35CrMnSi 侧的热影响区为细小马氏体和少量贝氏体组织; 10 钢侧形成了一层具有明显金属流线的塑性变形层, 靠近焊接界面的塑性变形层为厚度约 150 μm 的细晶区, 其组织为少量马氏体和铁素体。

参考文献:

- [1] 解瑞军, 李林货, 陈芙蓉. 35CrMnSi 钢电子束焊接头显微组织和力学性能研究[J]. 焊接技术, 2009, 38(1): 6—8.
XIE Rui-Jun, LI Lin-huo, CHEN Fu-rong. Study on Microstructure and Mechanical Property of Joint of 35CrMnSi Steel Plate by EBW[J]. Welding Technology, 2009, 38(1): 6—8.
- [2] 吕世雄, 杨士勤, 王海涛, 等. 堆焊铜合金/35CrMnSiA 接头的界面结构特征[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 63—66.
LYU Shi-xiong, YANG Shi-qin, WANG Hai-tao, et al. The Interface Structure Features of the Copper Alloy/35CrMnSiA Joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 63—66.
- [3] 陈国庆, 张秉钢, 王振兵, 等. 真空电子束焊接 35CrMnSi 钢[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 33—36.
CHEN Guo-qing, ZHANG Bing-gang, WANG Zhen-bing, et al. Vacuum Electron Beam Welding of 35CrMnSi Steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 33—36.
- [4] 周君. 摩擦焊技术与展望[J]. 机械工人(热加工), 2006(2): 27—29.
ZHOU Jun. Development and Prospect of Friction Welding Technology[J]. Machinist Metal Forming, 2006(2): 27—29.
- [5] 耿培皓, 秦国梁. 惯性摩擦焊接技术及其在航空工业领域的应用[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 73—82.
GENG Pei-hao, QIN Guo-liang. Inertia Friction Welding Technology and Its Application in Aviation Industry Field[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 73—82.
- [6] 秦国梁, 梁永亮, 周军, 等. 初始转速对惯性径向摩擦焊接头成形的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 19—22.
QIN Guo-liang, LING Yong-liang, ZHOU Jun, et al. Influence of the Initial Rotation Speed on the Formation of Inertial Radial Friction Welding Joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2): 19—22.
- [7] 陈大军, 徐晓菱, 徐元泽, 等. K418 涡轮盘与 42CrMo 轴异种材料惯性摩擦焊研究[J]. 焊接, 2008(6): 58—60.
CHEN Da-jun, XU Xiao-ling, XU Yuan-ze, et al. Inertia Friction Welding of Dissimilar Materials Between K418 Turbine Disk and 42CrMo Shaft[J]. Welding & Joining, 2008(6): 58—60.
- [8] 赵衍华, 张丽娜, 孙秀京, 等. LF6 铝合金与不锈钢异种金属惯性摩擦焊工艺技术研究[J]. 宇航材料工艺, 2016(5): 68—71.
ZHAO Yan-hua, ZHANG Li-na, SUN Xiu-jing, et al. Inertia Friction Welding Between LF6 Aluminum Alloy and Stainless Steel[J]. Aerospace Materials & Technology, 2016(5): 68—71.
- [9] 陈五星, 戴明辉, 陈大军, 等. 不锈钢与渗碳钢惯性摩擦焊接头的组织与性能[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 198—202.
CHEN Wu-xing, DAI Ming-hui, CHEN Da-jun, et al. Microstructure and Properties of Inertia Friction Welded Joint of Stainless Steel and Carburizing Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 198—202.
- [10] 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.
- [11] 罗键, 赵国际, 徐晓菱, 等. 飞轮转速对 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接特性的影响[J]. 重庆大学学报, 2010(9): 24—28.
LUO Jian, ZHAO Guo-ji, XU Xiao-ling, et al. Effects of Flywheel Rotation Speed on Properties of 35CrMnSi/T3 Inertial Radial Friction Welding[J]. Journal of Chongqing University, 2010(9): 24—28.
- [12] 罗键, 孙玉, 刘德佳, 等. 小尺寸 T3/35CrMnSi 钢异种材料惯性径向摩擦焊接头的特性[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1309—1314.
LUO Jian, SUN Yu, LIU De-jia, et al. Characteristics of Inertial Radial Friction Welding Joints of Small Size T3/35CrMnSi Dissimilar Metal Materials[J]. The China Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7): 1309—1314.
- [13] 秦国梁, 张春波, 周军, 等. 37CrMnMo 钢管径向摩擦焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 21—25.
QIN Guo-liang, ZHANG Chun-bo, ZHOU Jun, et al. Microstructure and Properties of Radial Friction Welded Joint of 37CrMnMo Steel Pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 21—25.
- [14] 徐晓菱, 徐元泽, 吴玮, 等. 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, et al. Study on Radial Friction Welding Band of Small Shell[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(3): 346—348.
- [15] 罗键, 赵国际, 徐晓菱, 等. 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接复合界面的元素扩散[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 63—67.
LUO Jian, ZHAO Guo-ji, XU Xiao-ling, et al. Element Diffusion on Interface of 35CrMnSi/T3 Inertial Radial Friction Weld[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2010, 44(3): 63—67.