

大截面钢/铝异种金属摩擦焊接工艺研究

王希靖,商献伟,张昌青

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室,甘肃 兰州 730050)

摘要 采用连续驱动摩擦焊技术对大截面铸态纯铝与 Q235 钢异种金属进行了焊接工艺试验,通过扫描电镜(SEM)分析接头和断口形貌,测试接头力学性能及其电阻率,得到了纯铝与 Q235 钢焊接接头的力学性能与焊接参数的关系。结果表明,大截面铸态纯铝与 Q235 钢间具有良好的摩擦焊接性,焊接界面宏观断口呈均匀银灰色,焊接情况良好,具有 100%焊合的特征;采用优化焊接工艺参数施焊的焊接接头力学性能可以达到或超过铝侧基材,接头电阻率介于两侧母材电阻率之间。

关键词 摩擦焊接;异种金属;大截面;电阻率

中图分类号 TG453+.9 **文献标识码** A **文章编号** :1001-2303(2010)07-0045-04

Study on friction welding technology for large cross-section steel and Aluminum dissimilar metals

WANG Xi-jing, SHANG Xian-wei, ZHANG Chang-qing

(State Key Lab. of Advanced New Non-ferrous Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: For large cross-section cast aluminum and Q235 steel dissimilar metals, continuous drive friction welding technology has been used for welding test. By means of scanning electron microscopy (SEM), we analyzed the joint and fracture morphology and tested the mechanical properties of joints and its resistivity, got the relationship between welding parameters and mechanical properties of welded joints of cast aluminum and Q235 steel. The results showed that there had been a good friction welding properties between the large cross-section cast aluminum and Q235 steel. The macro-fracture surface at the welding interface was silver-gray uniformly. And the welding joint is in good condition, with 100% bonding characteristics. The mechanical properties of welded joints with optimization welding parameters can reach or exceed the aluminum substrate. The resistivity of welding joints is between aluminum and Q235 steel.

Key words: friction welding; dissimilar metals; large cross-section; resistivity

0 前言

目前制备双金属材料的研究领域极为广阔,生产方法也有多种。但对于钢/铝双金属的固-固复合连接,在通常情况下要实现其界面冶金结合还有一定的难度,存在的主要问题是:(1)铝在高温时易氧化,不利于界面冶金结合。(2)钢与铝在高温下易形成 Fe_3Al 等脆性化合物,会恶化界面结合质量^[1]。因此,选择合适的焊接方法和工艺是获得满意的铸铝与 Q235 钢异种金属焊接质量的关键。

摩擦焊接是一种高效、精密、节能、优质的固相连接技术,特别适用于异种金属的连接^[2]。铸态纯铝与 Q235 钢的物理性能差别悬殊,采用一般的熔焊

方法无法实现大截面纯铝与 Q235 低碳钢焊接,我国的摩擦焊接技术与国外相比无论是在研究上还是在应用上都存在一定的差距^[3-4],目前仅能实现较小直径焊件的焊接,对于直径 $\varphi 60$ mm 的大截面焊件的焊接还未见报道。

本研究采用连续驱动摩擦焊技术进行焊接试验,分析接头力学性能与焊接参数的关系,观察拉伸试样、冲击试样断口和接头形貌,测试接头电阻率,选用相对优化的工艺参数可实现大截面钢-铝焊接,获得飞边成形美观、焊合区性能良好、焊件同轴度精度较高的焊接接头。

1 试验

1.1 试验材料与方法

试验试样材料和尺寸为 $\varphi 90$ mm \times 100 mm 的 Q235 低碳钢棒和 $\varphi 60$ mm \times 330 mm 的铸态纯铝棒,

收稿日期:2009-09-15

作者简介:王希靖(1956—)男,甘肃榆中人,教授,博导,主要从事焊接设备及其自动化、搅拌摩擦焊技术以及焊接质量控制的研究工作。

其化学成分如表 1、表 2 所示。

表 1 Q235 钢化学成分 %

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(S)	w(P)	w(N)	w(O)
0.16	0.20	0.61	0.023	0.019	0.004 5	0.019

表 2 铸态纯铝化学成分 %

w(Al)	w(Mg)	w(Cu)	w(Si)	w(Fe)	w(其他)
99.60	0.304	0.02	0.01	0.01	0.056

焊接设备采用 C500 型连续驱动摩擦焊机 配有计算机闭环控制系统 可实时检测摩擦焊接扭矩、轴向压力、主轴转速和轴向缩短量等焊接参数随时间的变化 并具有轴向缩短量恒值控制、摩擦加热压力和顶锻焊接压力恒压控制等测控功能。

为了保证摩擦焊接质量和严格控制焊件同轴度精度 焊前将焊接表面车光 并用丙酮清洗 对所有焊接试件的椭圆度和弯曲度进行了精细测量合理的配对组合。

1.2 焊接参数

铸铝与 Q235 钢的物理性能差别悬殊 为防止顶锻时铝端大变形 在铝端焊接面附近加拘束环。焊接规范参数如表 3 所示。

表 3 铸态纯铝与 Q235 钢摩擦焊接参数

组号	转速 $v/r \cdot \text{min}^{-1}$	摩擦压力 P/MPa		摩擦时间 t/s		顶锻力 P/MPa		顶锻时间 t/s		刹车时间 t/s
		一级	二级	一级	二级					
1	1 230	39.2	41.6	2.0	3.0	98	4.0	0.2		
2	1 230	39.2	41.6	2.0	2.5	83	5.0	0.2		
3	1 230	39.2	58.0	1.5	2.0	78	1.0	0.2		

1.3 测试方法

将焊后的试样在 CSS-110 型拉伸机上进行整体拉伸 并按 GB2651-89 等相关技术标准测定试件的力学性能 试验环境温度为 26 °C 将摩擦接头按《金属拉伸试验试样》(GB/T228-2002)线切割成 15 mm×5 mm×120 mm 的标准拉伸试样 焊缝置于该试样的中间部位 拉伸试验按《金属拉伸试验方法》(GB3714-87、GB228-87)进行评定 利用 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸试样、冲击试样断口及接头形貌 利用双臂电桥对焊接接头的电阻率进行测定。

2 实验结果及分析

2.1 摩擦焊接接头整体拉伸试验

拉伸前后工件的变化如图 1 所示 拉伸曲线如图 2 所示。由于铸铝与 Q235 钢的导热系数不同 飞

边均在铸态纯铝一侧成形 其外观是均匀连续的造型特征 有相互平行曲折状较浅细的飞边裂纹 飞边色泽呈浅灰色(见图 1a),飞边的尺寸随摩擦加热压力、摩擦加热时间和顶锻压力的加大而增大。

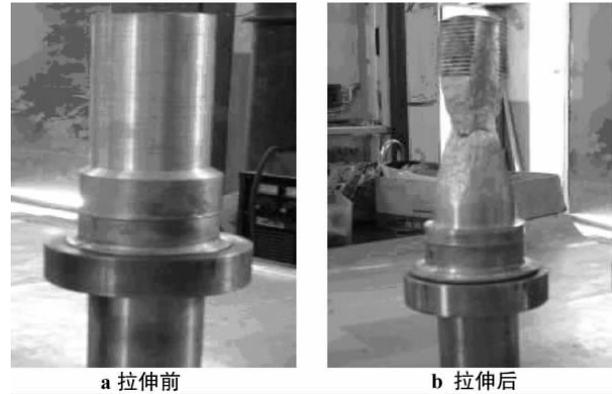


图 1 拉伸前后的接头宏观形貌

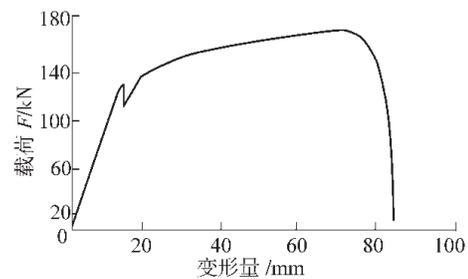


图 2 拉伸曲线示意

焊件拉伸时的拉力 $F_p=17\text{ t}$ 抗拉强度 $\sigma_b=95\text{ MPa}$,延伸率 $\delta=16.7\%$,断面收缩率 $\psi=(S_0-S_n)/S_0=92.9\%$,可知经摩擦焊焊后接头的抗拉强度高于铝侧母材的抗拉强度。

2.2 摩擦焊接接头室温拉伸试验

考虑截面上不同的取样位置对接头力学性能的影响 取样位置如图 3 所示 每一位置取 5 个试样 各工艺参数下接头抗拉强度曲线如图 4 所示。试验结果表明 接头抗拉强度在端面中心处最低 外缘次之 从距圆心半径 2/3 处的试样的抗拉强度较高 接头强度等于或高于铝基材。

考虑焊件同轴度精度控制的要求 同时兼顾焊

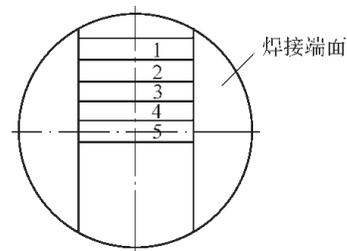
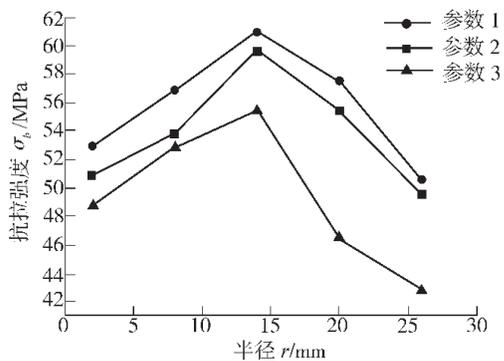


图 3 拉伸试样取样位置示意



注:铸铝棒为实验室浇铸而成,其抗拉强度为 60 MPa

图4 接头抗拉强度曲线

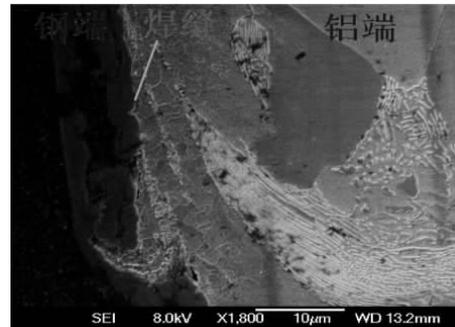
合区抗拉强度的要求,优化选择焊接参数,即采用表3中的第1组焊接参数组合。

2.3 摩擦焊接头扫描电镜分析

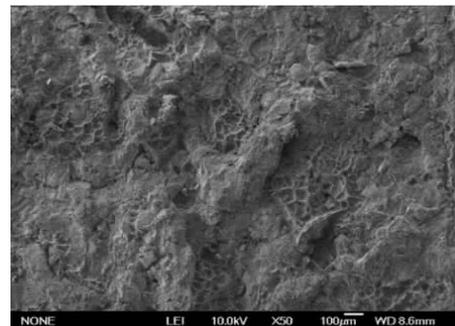
对接头界面微观结构、拉伸断口和冲击断口进行了扫描电镜分析。图5a为焊接接头界面微观结构,可以看出焊接界面两侧异种金属互相嵌入、渗合、交错,焊合区未见裂纹、未焊合及过热、过烧等缺陷,焊态下结合界面呈曲面状分布,清晰可见。热影响区宽度小,焊合区结合紧密,无气孔、夹杂、裂纹等冶金缺陷。焊接界面发生了一定程度的原子扩散,母材Q235钢中的成分向铝中的扩散较弱,近缝区发生了晶粒细化,使接头性能提高。图5b为拉伸试样断口形貌,断口呈均匀银灰色,断口微观形貌是明显的韧窝,韧窝中存在许多粒状夹杂,整个断面由许多塑坑组成,表现出明显的韧性断裂特征,既无氧化,又能100%焊合,而且具有良好的力学性能。图5c为冲击断口试样形貌,断面由许多塑坑组成,可见冲击试样同样表现出韧性断裂的特征。

铸铝与Q235低碳钢摩擦焊接过程中在摩擦压力和轴向顶锻压力的共同作用下发生热塑性流变,于是在扭转和挤压塑性变形的焊区内各自发生了组织结构的变化。对于Q235低碳钢,因其摩擦焊接温度远低于其热塑性变形温度,热强度较高,基本无变形量。

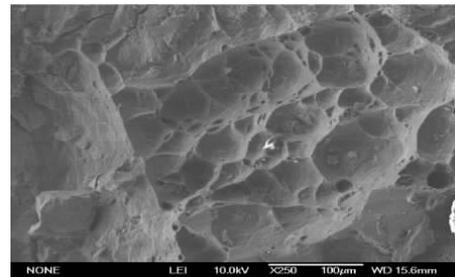
摩擦焊接过程中,在摩擦界面产生了大量的扭转塑性变形,位错密度高,晶粒尺寸减小,晶界面积增大,沿晶界和位错发生的“短路扩散”促使了元素的扩散。元素足够的扩散能加之高顶锻压力,晶粒之间接触界面增大。由于摩擦压力大、主轴转速下降快,摩擦界面温度具有瞬时温升、温降的工艺特点,焊接时间较短,元素扩散受到限制,扩散距离短,只能在能量高的晶界处存在。经试验分析,还没有发



a 摩擦焊接头界面微观结构



b 摩擦焊接头拉伸断口形貌



c 摩擦焊接头冲击断口形貌

图5 接头及断口扫描电镜图

现过高的摩擦压力、顶锻压力和过长的摩擦时间使热塑性变形温度过高而形成金属间脆性化合物或铝端过烧。

2.4 焊接接头电阻率的测量

沿径向不同位置分别取样,利用低电阻四接点接线方式和双电桥结构排除接触电阻和导线电阻,比较待测低电阻和已知的标准电阻,多次测量求取平均值,从而精确测出接头电阻,电桥接线如图6所示。

由表4可知,接头平均电阻为 $66.0312 \mu\Omega$,平均电阻率 $132.06 \mu\Omega \cdot \text{mm}$,接头电阻率介于两侧母材电阻率之间,接头电阻较均匀。

摩擦焊接是通过加压和加热在接触表面产生塑性变形、表面激活、扩散和再结晶以及“体”的相互作用等而形成焊接接头的,在焊接过程中被焊

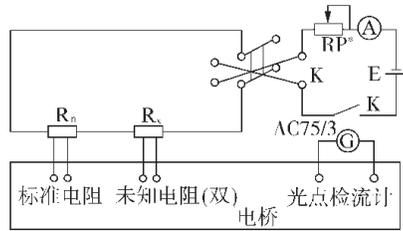


图 6 双臂电桥接线

表 4 试验结果

试样	电阻率 $\rho / \mu \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$		接头电阻 R/Ω	接头电阻率 $\rho / \mu \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$
	钢端	铝端		
M1	167.07	32.03	60.285 3	120.570 7
M2	168.54	33.34	68.855 3	137.710 6
M3	169.24	34.03	65.768 4	131.536 8
M4	166.86	32.76	69.215 6	138.431 2

件仍处于固相状态，焊缝为锻造组织，焊合区不会产生与熔化和凝固冶金有关的焊接缺陷和焊接脆化现象，在轴向压力和摩擦扭矩的共同作用下，焊接界面两侧异种金属互相嵌入、渗合、交错^[5-6]，冶金结合面积增大，热影响区宽度较小，在摩擦焊接表面和表面近区产生的某些力学冶金效应，如晶粒细化、组织致密、夹杂物弥散分布，以及摩擦焊接表面的自清理作用等，使接头电阻率较小且均匀。

3 结论

(1) 铸态纯铝与 Q235 钢异种金属采用摩擦焊接方法可以形成良好的焊接接头。优化的摩擦焊接参

数为：一级摩擦压力 39.2 MPa，二级摩擦压力 41.6 MPa；一级摩擦时间 2.0 s，二级摩擦时间 3.0 s，顶锻力 98 MPa；顶锻时间 4.0 s，刹车时间 0.2 s。

(2) 采用优化焊接规范参数施焊的焊接接头焊合区未见裂纹、未焊合及过热、过烧等缺陷，焊态下结合界面清晰可见，力学性能可以达到或超过铝侧基材。

(3) 采用优化焊接规范参数施焊的焊接接头摩擦焊接界面宏观断口呈均匀银灰色，表征焊接情况良好，具有 100% 焊合的特征。

(4) 焊接接头电阻率介于两侧母材电阻率之间，电阻率较均匀。

参考文献：

- [1] 成小乐, 高益民. YL12/Cu/0Cr18Ti 异种材料扩散连接接头微观分析[J]. 稀有金属材料工程, 2007, 36(3): 487-491.
- [2] 毛信孚, 傅莉. Monel K500 合金摩擦焊接工艺研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(1): 39-42.
- [3] 郭久柱. 不锈钢与铝合金薄壁管的摩擦焊接[J]. 焊接学报, 1992, 13(4): 231-236.
- [4] Yashan D, Tsang S, Johns W L, et al. Inertia friction welding of 1100 aluminum to type 316 stainless steel[J]. Welding Journal, 1987, 66(8): 27-36.
- [5] 张田仓. 纯铝与不锈钢异种材料惯性摩擦焊接的研究[J]. 航空工艺技术, 1998, 42(3): 33-37.
- [6] 白建红, 傅莉, 杜随更. 钛合金/纯铝异种金属摩擦焊接工艺[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 50-54.

申明

各位作者：

为确保杂志质量，尊重和保护作者和他人知识产权、著作权，根据国家期刊出版管理的相关规定，《电焊机》杂志特作以下申明。

1. 作者应保证是向本刊所投稿件的著作权人，不得抄袭、剽窃、盗用他人科研成果、文章和信息。文章中引用和参考他人文章、著作和成果(包括网络信息)时，按编辑出版规定，应在文章中以参考文献方式明确标识。如作者的文章涉及侵犯他人知识产权、著作权等合法权益时，一切后果文责自负。

2. 作者所投稿件应保证尚未在其他媒体(包括网络)出版或发表，也未向其他媒体投稿。

3. 《电焊机》杂志已被多家国内外权威收录机构、数据库、专业网站列为来源刊，收录和引用。凡本刊录用的文章，即视为本刊已获得该文章与《电焊机》相关的网上传播、汇编出版、电子出版、收录和引用等权利。本刊向作者支付的稿酬，已包含上述各项权利的报酬，本刊和其他机构不再另行支付。

作者向本刊投稿时，若无特别说明则视为同意以上申明。如不同意以上申明者请另投它刊。

特此申明。

《电焊机》杂志社
2010 年 1 月 1 日