

6061-T6铝合金T形接头静止轴肩搅拌摩擦焊 工艺及接头断裂行为研究

付宁宁, 朱志民, 金文涛, 戴忠晨

中车南京浦镇车辆有限公司 江苏南京 210031

摘要: 研究了旋转速度和焊接速度对6061-T6铝合金90° T形接头成形、显微组织和力学性能的影响, 通过静止轴肩搅拌摩擦焊得到了表面成形良好和内部无缺陷的6061-T6铝合金T形接头。旋转速度和焊接速度对6061-T6板筋方向抗拉强度影响均不大, 两组试验抗拉强度最大值与最小值之间仅相差18MPa。在所选旋转速度范围内, 接头的平均抗拉强度为母材的72.7%~77.7%; 在所选焊接速度范围内, 平均抗拉强度为母材的77.4%~83.4%。拉伸断裂基本上都发生在筋板上, 断裂方式为韧性断裂。底板硬度分布表现为焊核硬度波动较大, 最大值与最小值之间相差约37HV, 筋板中焊核硬度随与底板外表面距离的增加呈缓慢上升的趋势, 热影响区硬度随与底板外表面距离的增加而逐渐升高, 直至恢复到母材硬度水平。

关键词: 静止轴肩搅拌摩擦焊; 搅拌摩擦焊; 接头组织; 力学性能; 断裂行为

1 序言

搅拌摩擦焊(FSW)作为一项新型的固相连接技术, 已经在航空航天、轨道交通、汽车工业和船舶工业等领域取得了广泛应用。目前, 大多数FSW技术的工业应用主要局限于简单对接接头形式, 而在实际生产中大量使用T形接头、角焊缝及箱形结构时, 受搅拌工具轴肩的限制, FSW技术很难应用于这些结构制造^[1-4]。为了克服传统FSW技术的局限性, 英国焊接研究所在传统FSW基础上将轴肩与搅拌针分离, 开发出静止轴肩搅拌摩擦焊(Stationary Shoulder Friction Stir Welding, SSFSW)技术, SSFSW焊接工具由不旋转的轴肩及内部旋转的搅拌工具组成, 如图1所示。它在铝合金角焊缝及T形焊接接头的制造中具有明显的优势, 可以实现各种不同板厚角焊缝的连接^[5, 6]。

本文以6061-T6铝合金作为研究对象, 以SSFSW为焊接方法, 重点研究了不同旋转速度和工具行进速度对6061-T6铝合金T形接头组织和力学性能的影响, 并对其断裂行为进行了探讨分析, 为铝合金T形角接静止轴肩搅拌摩擦焊工程化应用提供数据支撑。

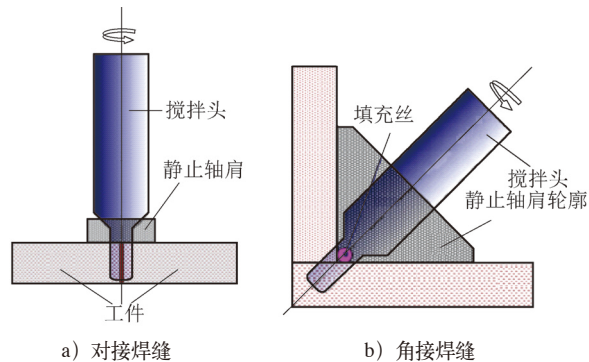


图1 SSFSW原理

2 试样制备及试验方法

试验所用的材料为6061-T6铝合金, 立板厚度为6mm, 底板厚度为10mm, 其化学成分及力学性能见表1、表2。

表1 6061-T6铝合金化学成分(质量分数)(%)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Bal.	0.4~0.8	0.7	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.25	0.15

表2 6061-T6铝合金母材力学性能

材料	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
6061-T6	251	296	11.4

焊接设备采用ESAB搅拌摩擦焊机,利用专用工装固定和专用的搅拌工具系统,焊接前将试板装夹在专用工装上,并将工装安装固定于焊接平台上,如图2所示,焊接试验参数见表3。

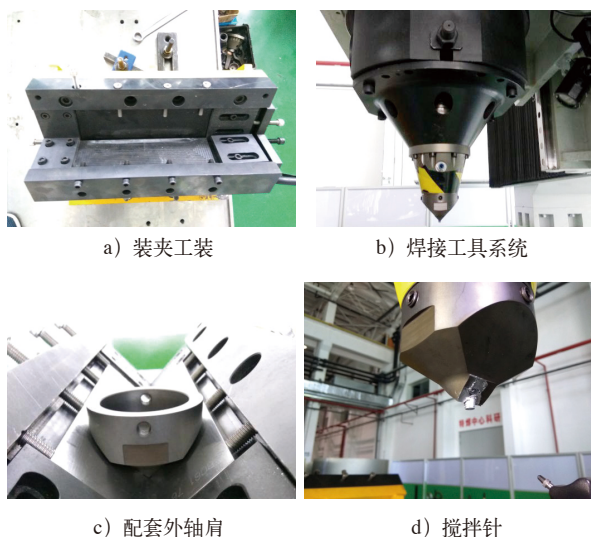


图2 SSFSW的T形接头焊接使用的工具系统

表3 SSFSW的T形接头焊接试验参数

试样编号	旋转速度 /r·min ⁻¹	焊接速度 /mm·min ⁻¹
3-1	1000	200
3-2	1200	200
3-3	1400	200
3-4	1600	200
3-5	1800	200
3-7	1400	300
3-8	1400	400
3-9	1400	500

3 试验结果及讨论

3.1 接头宏观形貌

图3为6061-T6不同焊接参数下SSFSW的T形接头焊缝横截面宏观形貌。由图3a~e可以看出,在相同的焊接速度下,随着旋转速度的增加,焊缝的流动性明显增强,焊接结合质量越来越高。在相对较低旋转速度1000r/min下,在筋板与底板相结合的部位有一条明显的残余结合线,说明焊缝金属没有得到足够的机械搅拌作用将原始界面破碎,如图3a所示。当旋转速度提高到1200r/min时(见图3b),残余结合线还没有得到消除,但所处位置发生了变化,不再是处于原始筋板与底板的结合部位。当旋转速度继续提高到1400r/min(见图3c)、1600r/min(见图3d)和1800r/min(见图3e)后,残

余结合线消失,接头连接质量提高,说明在旋转速度>1400r/min后,焊缝金属得到了充分的机械搅拌作用,从而将原始界面破碎混合。

当旋转速度为1400r/min时,在焊接速度为300mm/min(见图3f)、400mm/min(见图3g)和500mm/min下(见图3h),所有焊缝在原始筋板和底板相结合的部位存在一条明显的残余结合线,说明在旋转速度为1400r/min时,所选焊接速度都偏高,旋转速度和焊接速度没有良好的匹配。

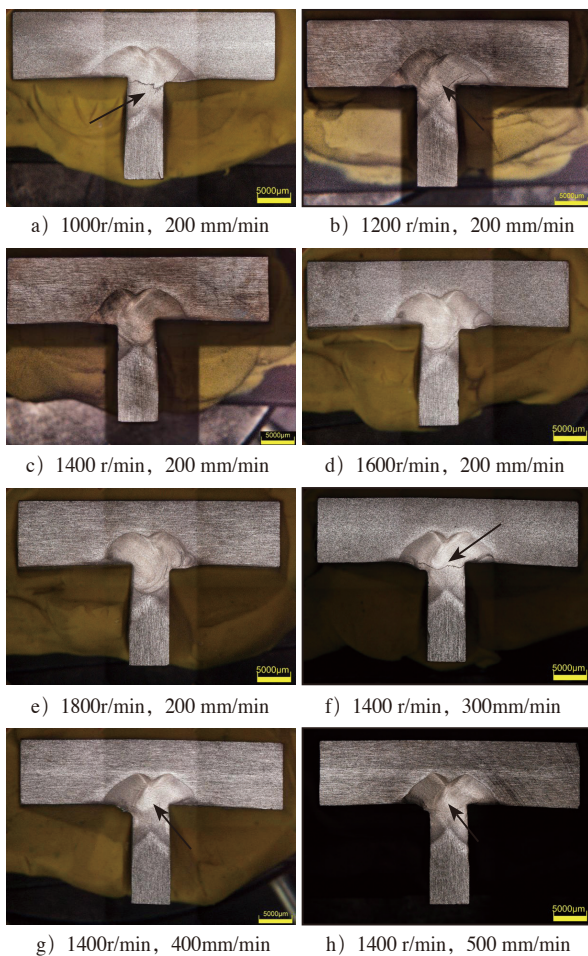


图3 SSFSW的T形接头焊缝横截面宏观形貌

3.2 接头微观组织

图4所示为6061-T6铝合金SSFSW的T形接头金相位置,图5a~h分别对应图4中a~h区。

图5所示为转速为1400r/min,焊接速速为500mm/min时SSFSW6061-T6铝合金T形接头各区域组织形貌。由图可以看出,母材保留原始的轧制组织形态,呈扁平状分布。焊核区均为细小的等轴回复再结晶晶粒,焊核区与热机影响区组织差别明显,靠近焊核区的热影响区的晶粒有少量变形。焊

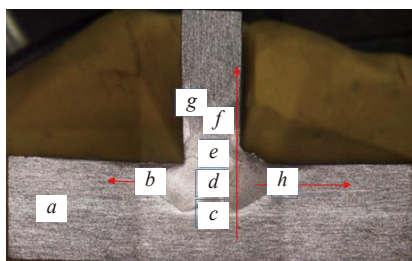


图4 6061-T6铝合金SSFSW的T接头金相拍摄位置

核中的原始界面残余处无明显的微观缺陷。通过对应位置的高倍显微组织照片可以发现,浅色区域和深色区域均为等轴晶,深色区域晶粒更为细小,而浅色区域晶粒尺寸更大,说明焊核内的材料流动不均匀导致不同区域再结晶之后发生了不同程度的晶粒长大。

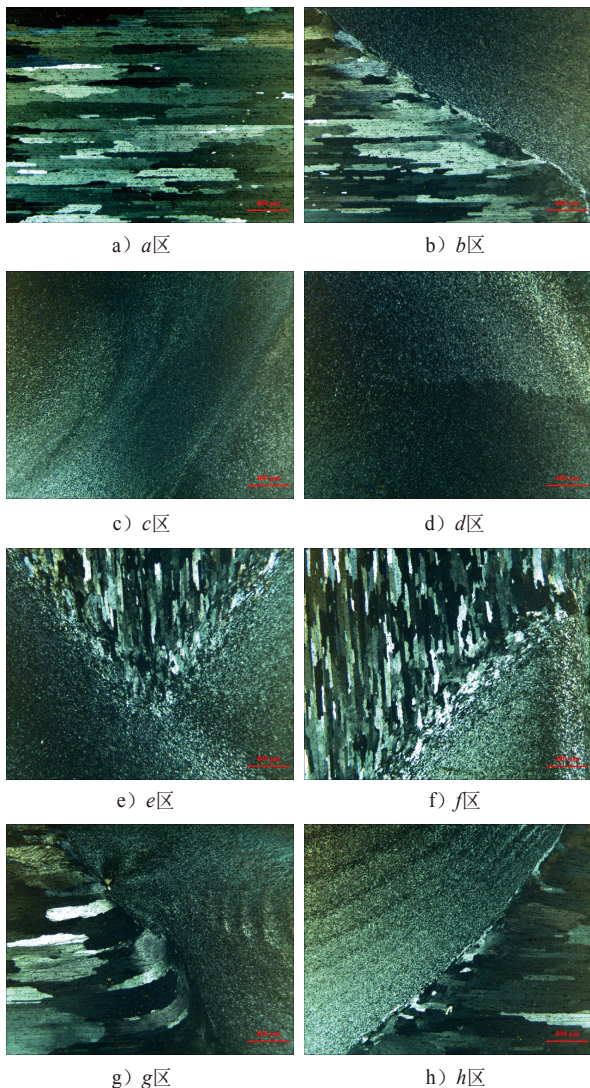


图5 SSFSW6061-T6铝合金T形接头各区金相组织

3.3 旋转速度对接头力学性能的影响

(1) 接头拉伸性能 图6所示为焊接速度为

200mm/min的焊接工艺下,不同旋转速度对应的SSFSW6061-T6铝合金T形接头沿筋板方向力学性能。由图可以看出,在本组所选旋转速度下,随着旋转速度的增加,接头沿筋板方向平均抗拉强度呈先增加后降低的趋势,但变化幅度范围比较小,最大值与最小值之间仅相差约15MPa,最大值出现在旋转速度为1200r/min时,为230MPa,最小值出现在旋转速度为1600r/min时,为215MPa,4组试样平均抗拉强度为母材的72.7%~77.7%。综上可以看出,旋转速度对6061-T6板筋方向抗拉强度影响不大,参数适应范围较大。

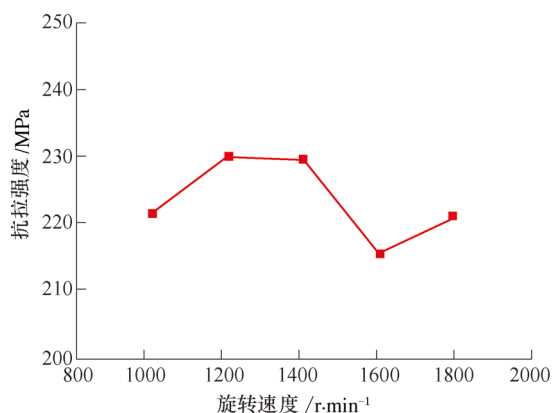


图6 SSFSW不同旋转速度T形接头沿筋板方向拉伸性能

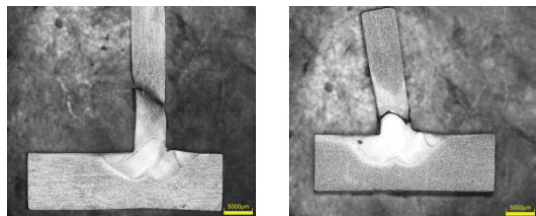
(2) 接头的断裂表面及断裂行为分析 图7所示为焊接速度为200mm/min的焊接工艺下,不同旋转速度对SSFSW6061-T6铝合金T形接头沿筋板方向拉伸断裂表面宏观形貌。由图可知,所有接头拉伸断裂均发生在筋板上,断口表面宏观形貌除3-4号样呈螺旋型,其他试样断口与拉伸加载方向夹角呈45°。



图7 不同旋转速度SSFSW的T形接头沿筋板方向拉伸断裂表面宏观形貌

不同旋转速度SSFSW6061-T6铝合金T形接头沿筋板方向拉伸断裂位置横截面金相如图8所示。由图可以看出,拉伸断裂处均存在明显的缩颈,说明

拉伸断裂为韧性断裂模式, 3-2-1号试样断裂在筋板处, 断口与拉伸加载方向夹角呈 45° , 3-4-1号试样断裂在焊缝区的筋板上, 断口呈半圆形分布。

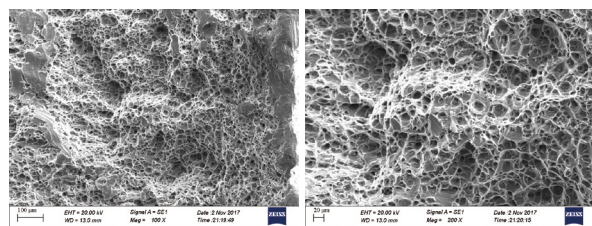


a) 3-2-1试样, 旋转速度1200r/min b) 3-4-1试样, 旋转速度1600r/min

图8 不同旋转速度SSFSW的T形接头沿筋板方向拉伸断裂横截面金相

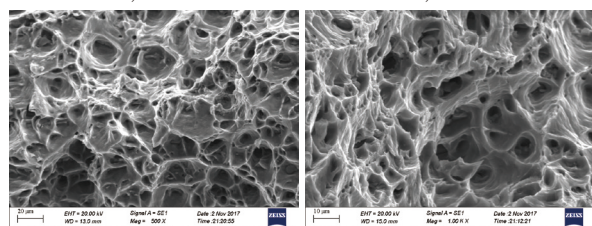
图9所示为6061-T6铝合金在旋转速度为1200r/min、焊接速度为200mm/min的焊接工艺下的SSFSW的T形接头断口SEM。由图可以看出, 断裂模式主要为韧性穿晶断裂, 特征是断口微观形貌呈现大量的韧窝状形貌, 不同尺寸的典型的拉长形韧窝是局部连续应变的结果, 这是在焊接过程结束后因第二相粒子粗化造成的。大韧窝的周围存在小韧窝, 断裂方式属于典型的微孔聚集型断裂。大韧窝及小韧窝的形成原因, 普遍认同是第二相粒子和基体界面之间的力减弱或者是第二相粒子发生断裂产生了最初的显微空洞, 随后发生滑移作用, 显微空洞随之逐渐长大, 当达到一定尺寸后, 较小的第二相粒子也会形成显微空洞, 然后发生长大, 并会与之前已经存在的空洞在长大过程中联结, 从而形成了尺寸大小不一的韧窝。

图10所示为6061-T6铝合金在旋转速度为1600r/min、焊接速度为200mm/min的焊接工艺下的



a) 100×

b) 200×

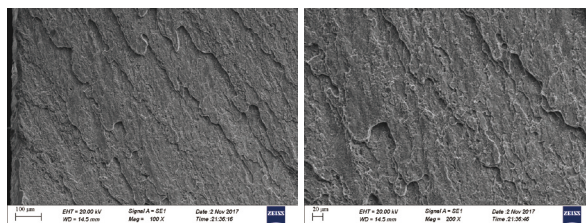


c) 500×

d) 1000×

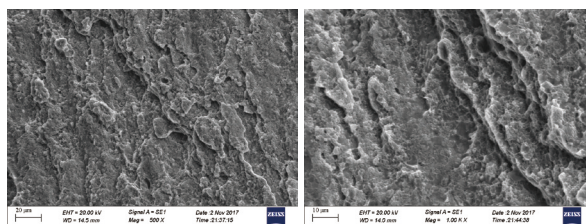
图9 试样3-2-1拉伸断裂断口SEM观察

SSFSW的T形接头断口SEM。由图10可知, 接头断裂在焊缝区, 断口呈沿晶脆性断裂的模式。



a) 100×

b) 200×



c) 500×

d) 1000×

图10 试样3-4-1拉伸断裂断口SEM观察

3.4 焊接速度对接头力学性能的影响

(1) 接头拉伸性能 6061-T6铝合金在旋转速度为1400r/min焊接工艺下, 不同焊接速度SSFSW的T形接头沿筋板方向的拉伸性能如图11所示。由图可知, 在本组试验选定的参数范围内, 随着焊接速度的增加, 接头沿筋板方向平均抗拉强度呈上升的趋势, 但变化范围不大, 维持在一个相对稳定的水平上, 最大值与最小值仅相差约18MPa, 平均抗拉强度为母材的77.4%~83.4%。

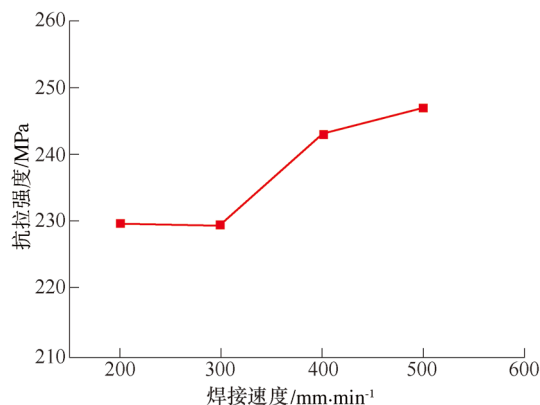


图11 不同焊接速度SSFSW的T形接头沿筋板方向平均拉伸性能

(2) 接头的断裂表面及断裂行为分析 图12所示为不同焊接速度SSFSW的T形接头沿筋板方向拉伸断裂表面宏观形貌。本组试验所有试样均断裂在筋板上, 断口与加载方向夹角约呈 45° 。图13所示为在旋转速度为1400r/min、焊接速度

分别为300mm/min、400mm/min和500mm/min时SSFSW6061-T6铝合金T形接头拉伸断裂位置横截面宏观形貌。由图可以看出，拉伸断裂均发生在筋板上，断口处有明显的缩颈。

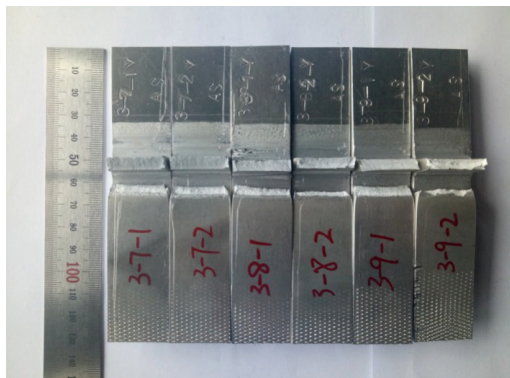
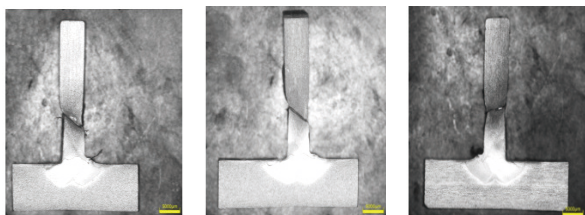


图12 不同焊接速度SSFSW的T形接头沿筋板方向拉伸断裂表面宏观形貌



a) 300mm/min试样 b) 400mm/min试样 c) 500mm/min试样

图13 6061-T6铝合金SSFSW的T形接头拉伸断裂位置横截面宏观形貌

图14所示为SSFSW6061-T6铝合金T形接头在旋转速度为1400r/min、焊接速度300mm/min时拉伸断口SEM。由图可以看出，断裂模式主要为韧性穿晶断裂，特征是断口微观形貌呈现大量的大小不一的韧窝状。

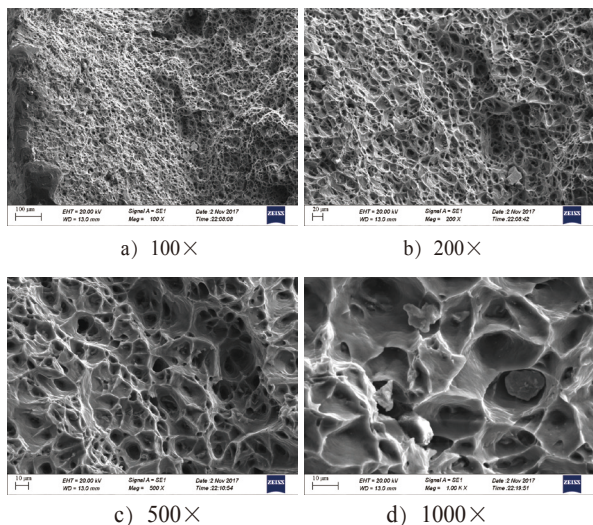


图14 试样3-7-1拉伸断口SEM观察

3.5 接头显微硬度分布

图15所示为旋转速度为1400r/min、焊接速度为200mm/min接头底板的硬度分布。左侧为第1道焊缝，右侧为第2道焊缝。在200mm/min的旋转速度下底板硬度分布表现为焊核硬度波动较大，最大值与最小值之间相差约37HV。热影响区中硬度分布随与焊核中心距离的增加而逐渐升高，且第2道焊缝热影响区硬度高于第1道焊缝，第2道焊缝和第1道焊缝热影响区最低硬度分别为75HV和66HV。

图16所示为旋转速度为1400r/min、焊接速度为200mm/min接头筋板的硬度分布，筋板中焊核硬度随与底板外表面距离的增加呈缓慢上升的趋势，热影响区硬度随与底板外表面距离的增加而逐渐升高，直至恢复到母材硬度水平。热影响区由于受到剧烈热循环的影响，硬度出现不同程度的降低，而焊核区中不同材料流动状况使再结晶不均匀，从而出现了较大的硬度波动。由于200mm/min焊接速度下接头第2道焊缝热影响区受到了第1道焊缝产生的热循环影响，因此其中的沉淀相进一步析出，从而

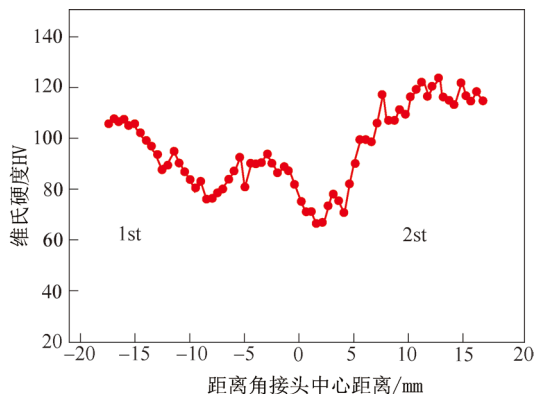


图15 SSFSW的T形接头沿底板方向硬度分布

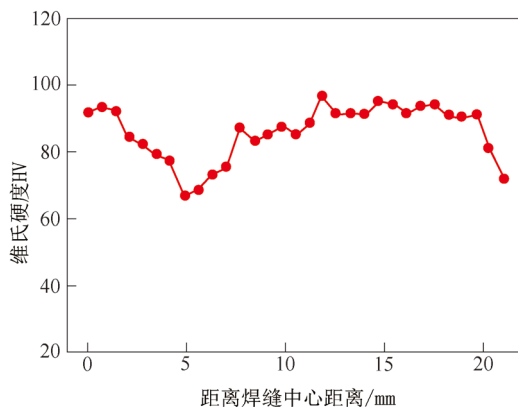


图16 SSFSW的T形接头沿筋板方向硬度分布

激光焊技术在轨道客车制造领域的应用及发展

高文文, 孟庆顺, 刘庆祝, 王洪潇, 刘立国, 刘海伟, 杨健

中车长春轨道客车股份有限公司 吉林长春 103362

摘要: 随着国家推进一带一路建设和走出去战略的需要, 必将为轨道客车制造行业提供了巨大的市场, 代表中国制造的轨道车辆也必须具备世界领先的技术水平。激光焊技术的日趋成熟已在工业制造领域得到广泛应用, 为此, 随着激光技术的深入研究和工业应用, 也必将轨道车辆焊接技术推向新的高度。通过对激光器设备的选用, 激光焊使用料件的要求, 工艺方法的选用, 保证了非熔透型激光叠焊技术在轨道车辆上的推广与应用。

关键词: 轨道客车制造; 激光叠焊; 非熔透

1 序言

近年来, 随着人们出行品质的提升, 城市轨道交通也随之蓬勃发展, 对地铁车辆的需求和品质也逐步提升^[1, 2]。不锈钢材料具有强度高、焊接性能

好、易冷加工、价格低廉等特点, 符合轨道车辆的选材标准, 因此不锈钢材质地铁车辆更是地铁市场领域的重要构成部分, 特别是在国际地铁车辆市场上, 不锈钢车身的地铁更是占据了主导地位^[3]。不

提高了第2道焊缝热影响区的硬度。

4 结束语

1) 通过SSFSW得到了表面成形光滑、内部无缺陷的6061-T6铝合金T形接头。当焊接参数选择不当时, 在筋板与底板相结合的部位有一条明显的残余结合线。

2) SSFSW的T形接头的焊核区为均匀细小的等轴晶, 焊核内的材料流动不均匀导致不同区域再结晶之后发生了不同程度的晶粒长大。

3) 当焊接速度一定时, 随着旋转速度的增加, 接头沿筋板方向平均抗拉强度呈先增加后降低的趋势; 当旋转速度一定时, 随着焊接速度的增加, 接头沿板筋方向的平均抗拉强度呈上升的趋势, 断裂方式为韧性断裂。

4) 底板硬度分布表现为焊核硬度波动较大, 最大值与最小值之间相差约37HV, 筋板中焊核硬度随与底板外表面距离的增加呈缓慢上升的趋势。

参考文献:

- [1] 吉华, 徐萌, 封小松, 等. 静止轴肩搅拌摩擦焊T型接头组织及力学行为[J]. 电焊机, 2013, 43 (9): 37-40.
- [2] 刘会杰, 李金全, 段卫军. 静止轴肩搅拌摩擦焊的研究进展[J]. 焊接学报, 2012, 33 (5): 108-112.
- [3] 彭蝶, 张连华, 韩晓辉, 等. 轨道交通制造焊接技术应用现状及发展趋势[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (8): 6-9, 13.
- [4] 赵俊, 柯黎明, 黄斌, 等. 工艺参数对铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊焊缝成形的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (13): 22-25.
- [5] 张华, 赵常宇, 林三宝, 等. 7050-T7451铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J]. 焊接, 2018 (9): 5-8.
- [6] MALTIN C A, NOLTON L J, SCOTT J L, et al. The potential adaptation of stationary shoulder friction stir welding technology to steel[J]. Materials & Design, 2014, 64: 614-624.