

高强铝合金 TIG 和 MIG 焊接接头组织与耐腐蚀性能的研究

胡秀华¹, 李 龙¹, 夏承东¹, 周德敬¹, 严安², 吕金明²

(1. 银邦金属复合材料股份有限公司 江苏省金属层状复合材料重点实验室, 江苏 无锡 214145; 2. 无锡银邦防务科技有限公司, 江苏 无锡 214145)

摘 要:为研究不同焊接形式对高强铝合金焊接接头组织与耐蚀性能的影响,本文采用金相组织观察、力学性能测试、电化学测试及失重试验研究了手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 三种焊接方式的高强铝合金焊接接头组织与耐蚀性能。结果表明,焊核区受热输入的影响使组织晶粒粗大,导致材料的硬度下降,其中半自动 MIG 焊核区的晶粒相比与其他两种焊接方式的细小。热影响区由于受到热循环的作用,晶粒长大,硬度相比于母材有所降低。热影响区的腐蚀电位按照半自动 MIG、手工 TIG 和机器人 MIG 的顺序依次降低,焊核区的腐蚀电位按手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 的顺序依次下降。焊核区主要发生点蚀和晶间腐蚀。

关键词: TIG; MIG; 铝合金; 微观组织; 耐腐蚀性能

DOI: 10.14158/j. cnki. 1001-3814. 20182022

中图分类号: TG457.14

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)13-0024-04

Microstructure and Corrosion Resistance Property of Welded Joint of High-strength Aluminum Alloy Welded by TIG and MIG

HU Xiuhua¹, LI Long¹, XIA Chengdong¹, ZHOU Dejing¹, YAN An², LYU Jinming²

(1. Jiangsu Province Key Laboratory for Laminated Clad Materials, Yinbang Clad Material Co., Ltd., Wuxi 214145, China; 2. Yinbang Defense Technology Co., Ltd., Wuxi 214145, China)

Abstract: In order to study the effect of different welding forms on the microstructure and corrosion resistance of welded joints of high-strength aluminum alloy, the microstructure and corrosion resistance of high-strength aluminum alloy welded joints welded by manual tungsten inert gas (TIG) welding, semi-automatic metal inert-gas (MIG) welding and robotic MIG welding were studied by microstructure observation, mechanical property test, electrochemical test and weight loss test. The results show that the grains in weld nugget zone which affects by heat input is coarse. The coarse grains make the hardness of the material decrease. The grains in nugget zone of semi-automatic MIG are fine compared with that of the other two welding methods. The hardness of the heat affected zone is lower than that of the base metal because the grains grows up caused by the thermal cycling. The corrosion potential of HAZ decreases in turn according to the sequence of semi-automatic MIG, manual TIG and robotic MIG. The corrosion potential of weld nugget decreases in turn according to the sequence of manual TIG, semi-automatic MIG and robotic MIG. Pitting and intergranular corrosion occur in the nugget area.

Key words: TIG; MIG; aluminum alloy; microstructure; corrosion resistance

7 系铝合金属于 Al-Zn-Mg 系合金, 具有强度高、良好的焊接性、耐腐蚀性及挤压性能等优点, 被广泛地应用于航空航天、军事装备和轨道交通等领域。随着军事装备的快速发展, 对其轻量化和耐蚀

性提出了严格的要求。近年来, 7 系铝合金厚板广泛应用于炮架、装甲等结构中。对于铝合金中厚板的焊接常采用的焊接方式有钨极氩弧焊(TIG)、熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG)^[1]。许多学者对铝合金焊接接头的组织性能及在海水中的耐蚀性进行了研究, Fahimpour^[2]采用电化学腐蚀方法对焊接接头的耐蚀性进行研究, 结果表明焊接区域更易发生腐蚀; Zhang^[3]等人研究了 6061 铝合金双丝焊接接头微观组织与性能。以上研究仅限于对单一焊接方式的组织与腐蚀性能的研究, 未对不同焊接形式的接头性

收稿日期: 2018-06-22

基金项目: 重点国别及机构产业技术合作项目(BZ2016004); 无锡市关键共性技术研发项目资助(CGE02G1932); 江苏省 333 人才资助项目(BRA2017096); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才团队项目(TD-XCL-015)

作者简介: 胡秀华(1990-), 女, 山东滨州人, 硕士, 主要研究方向: 材料的腐蚀与防护; 电话: 18018442502; E-mail: 15863071036@163.com

能进行对比性研究，同时这些研究也是针对不同的材料采用不同的焊接工艺进行研究，即使采用的焊接形式相同，但所选的参数相差比较大。本文采用手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 三种焊接方式对 40 mm 厚的铝合金进行焊接，通过金相显微镜、扫描电镜、电化学工作站及腐蚀失重对焊接接头的微观形貌、腐蚀性能进行测试、比较。

1 试验材料与方法

试验材料为 200 mm×100 mm×40 mm 的 7 系高强铝合金板材，化学成分如表 1 所示。采用对接焊方式，焊接前将待焊试板酸洗，清洗后立即烘干，烘干温度≤90℃，时间≥2 h，丙酮清洗焊接坡口，不锈钢丝刷打磨坡口及周围 30 mm 范围内的氧化膜，直至露出光亮的金属本体。焊前将焊接板材双面开 80°V 形坡口，留 2 mm 钝边，试板之间的间隙为 1 mm。手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 三种焊接方式所采用的焊接工艺参数相同。焊前应将试板预热至 80~90℃，采用直径为 1.6 mm 的 ER5356 焊丝，氩气纯度≥99.99%，电流为 240 A，电压为 30 V，在进行多道焊时，控制层间温度在 70~90℃，避免层间裂纹，且层间表面要清理干净，避免夹渣、未焊透、未熔合等现象。

表 1 铝合金化学成分(质量分数，%)

Tab.1 Chemical composition of aluminum alloy (wt%)						
Zn	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Al
4.2~4.7	2.4~2.6	0.2~0.5	0.05~0.15	0.05~0.2	0.1~0.2	余量

选取焊接表面成形好的试板，并采用无损检测检测焊接试板是否合格。采用线切割的形式以焊缝为中心垂直于焊接方向截取试样，金相观察和硬度测试(设备：Wilson Hardness TUKONTM1202)试样

的尺寸为 120 mm×30 mm×40 mm。其中金相试样使用 Keller 试剂腐蚀后在 Axio Imager A2 金相显微镜观察各区域的微观组织。将试样浸泡在 5% NaCl 溶液中 20 天进行失重试验测试，并采用金相显微镜对各区域腐蚀形貌进行观察。采用 Nova 电化学工作站进行电化学腐蚀测试：三电极体系(工作电极为被测试样，参比电极为饱和甘汞电极，对电极为铂片)，测试溶液为 5% NaCl+3 mL H₂O₂，开路电位测试时间 3600 s，取平均值，极化测试电位扫描范围-1.2~-0.65 V，扫描速率 0.001 V/s。

2 试验结果及讨论

2.1 焊接接头组织

焊接过程中，熔化的焊丝与局部熔化的铝合金基体相互熔合形成焊接熔池，冷却时重新结晶形成焊接接头的焊缝区域，靠近焊缝母材的金属受到热输入的影响，组织和性能也发生相应的改变。图 1 为不同焊接形式的焊接接头微观组织，焊接后焊缝固态相变的组织变化较复杂，随焊接材料与母材混合后的化学成分和焊接工艺的不同，可出现不同的组织，接头组织变化对接头的性能具有十分重要的影响。

图 1(a)为 7 系铝合金母材轧制组织，材料沿轧制方向发生明显的塑性变形。图 1(b)、(d)、(f)为不同焊接方式焊核区(NZ)的微观组织，由于焊核区处于焊缝的中间位置，该区域存在大量的热输入，结晶后晶粒仍然受到高温的影响，促使晶粒逐渐长大，形成粗大的晶粒组织；此外，焊缝中心的过冷度小，结晶速度慢，也使得焊核的晶粒粗大。图 1(c)、(e)、(g)为焊接接头热影响区(HAZ)的微观组织，焊接时受焊核热循环的影响，导致靠近焊核区域的金属晶

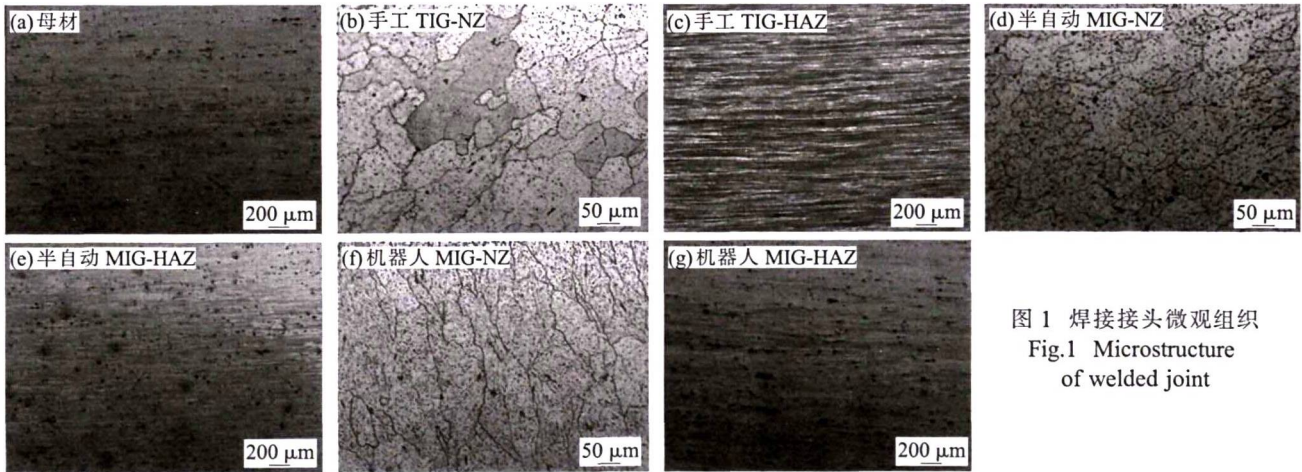


图 1 焊接接头微观组织
Fig.1 Microstructure of welded joint

粒发生再结晶,同时母材中存在的部分低熔点相发生溶解,晶粒尺寸略大于母材,但热影响区的组织及晶粒结构未发生明显的变化,仍能看出母材冷轧时的带状痕迹。通过对比不同焊接形式焊核晶粒的大小,发现半自动 MIG 焊核晶粒尺寸小于其他两种焊接方式的晶粒尺寸,这将会影响材料的力学性能和耐蚀性能。

2.2 硬度测试

金属材料的软硬程度是衡量材料力学性能的指标之一,可以反映出材料的焊接质量以及焊缝力学性能的不均匀性。研究表明,材料的耐磨性与硬度值成正比,焊接接头硬度较低的区域易发生疲劳断裂失效,即热影响区、熔合区和焊核区都可能存在失效。因此,分析不同焊接接头硬度分布规律,是对疲劳失效机理分析的重要基础。

焊接试样从焊缝中心向金属基体测得的硬度变化如图 2 所示,在 TIG 和 MIG 焊接过程中,热输入导致强化析出相($MgZn_2$)减少,使第二相强化作用减弱。研究表明,组织晶粒的大小以及强化相的分布影响材料的硬度,晶粒组织越细小,硬度越大;通过前述金相显微的观察表明半自动 MIG 焊核区晶粒小于其他焊接形式,这也使得该焊接形式的焊核

区硬度高于其他焊接接头;此外,大量的热输入可能导致合金中的主要强化元素 Mg 、 Zn 蒸发、烧损或再分布,这也使得材料的硬度下降。热影响区主要受焊接热输入的影响,温度升高时母材中原有的强化相 $MgZn_2$ 发生溶解或晶粒粗化,致使材料的硬度下降。随着距离焊核位置的增大,受到热影响的作用减弱,材料的硬度逐渐上升。三种焊接形式的焊接接头在靠近焊核区域处硬度突然上升,之后减小,因为该区域位于熔化金属和未熔金属之间,受到熔化金属焊接热循环的影响,发生再结晶,但该区域相比于焊核区具有较大的过冷度,高温时间短,金属发生快速结晶,晶粒来不及长大,因此形成的晶粒比焊核区细小,导致材料的硬度有所上升。在热影响区硬度再次下降,且硬度随着离焊缝的距离硬度逐渐上升,最终接近母材的硬度。

2.3 腐蚀性能测试

图 3(a)为不同焊接形式的焊接接头在 5%NaCl 溶液中的极化曲线。通过图 3(a)发现,母材与焊接接头的其他区域的极化曲线相差比较大,曲线的倾斜程度较大,倾斜程度表示极化程度,曲线的倾斜程度越大,极化程度就越大,电极过程越难进行,材料的耐蚀性越高,因此母材的耐蚀性要高于其他焊接接头部位。图 3(b)为焊接接头不同区域腐蚀电位的变化曲线,母材的腐蚀电位略高,说明母材发生腐蚀反应的趋势小于其他区域,对于不同焊接形式的同一焊接区域,热影响区的腐蚀电位按照半自动 MIG、手工 TIG 和机器人 MIG 的顺序依次降低,焊核区的腐蚀电位按手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 的顺序依次下降。将不同焊接形式的焊接接头放入 5%NaCl 溶液中在室温下浸泡 360h,对腐蚀前后的试样进行称重,计算出腐蚀前后的质量变化,得出如图 3(c)不同焊接形式焊接接头的腐蚀速率与

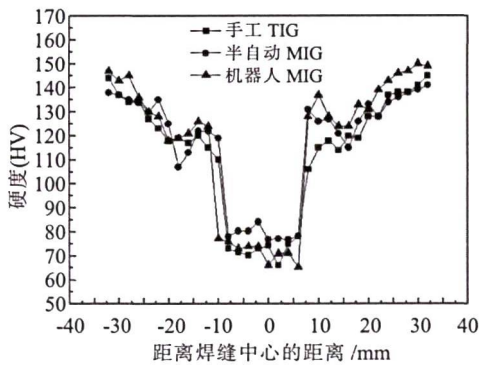


图 2 焊接接头硬度曲线
Fig.2 Hardness curves of welded joints

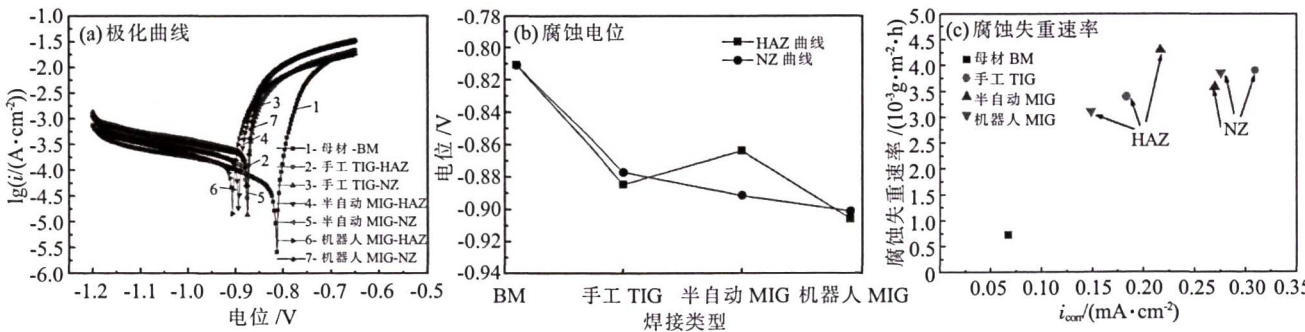


图 3 焊接接头的极化曲线、腐蚀电位和腐蚀失重
Fig.3 Polarization curves, corrosior potential and corrosion weight loss of welded joints

腐蚀电流密度散点图, 焊接母材的腐蚀电流密度为 0.0665 mA/cm^2 , 平均腐蚀速率为 $0.7216 \times 10^{-3} \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$, 相比于焊接接头的其他区域耐蚀性高。因为在焊接过程中焊缝金属熔化重新凝固, 导致接头区域的组织和成分发生明显的变化以及产生部分的缺陷, 例如夹渣、气孔、组织分布不均等, 溶液中的 Cl^- 首先吸附在缺陷位置, 优先发生腐蚀形成阳极区, 而未被腐蚀的区域为阴极区, 这种大阴极小阳极更加促进材料的腐蚀, 因而导致焊核区域的腐蚀速度较大。对手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 热影响区的腐蚀电流密度进行对比, 分别为 0.183 mA/cm^2 、 0.216 mA/cm^2 、 0.148 mA/cm^2 , 热影响区的腐蚀速率大小为机器人 MIG < 手工 TIG < 半自动 MIG。

对材料的腐蚀形貌进行观察发现, 焊核区主要发生的是点蚀和晶间腐蚀(图 4(a))。产生晶间腐蚀

的主要原因是焊接过程中, 焊核金属熔化发生再结晶, 在晶界析出 MgZn_2 相, 此外杂质原子也易在晶界区偏析, 导致晶界、晶界附近及晶粒中心存在电位差, 研究发现晶界的电位低于其他部位^[4], 这种化学不均匀性使晶界与晶粒本身的活性不同, 晶界的活化性高, 在微电池里成为阳极, 优先发生溶解。图 4(b)为铝合金晶界分布示意图。沿晶界连续分布的富锌相不断发生电化学反应而溶解, 导致晶界成为腐蚀的阳极活性通道, 使腐蚀不断向金属内部发展, 引起晶间腐蚀。晶间腐蚀能够导致焊接接头硬度的降低, 降低晶界之间的结合能^[5-6], 使材料的强度和塑性性能减小。

图 4(c)为铝合金点蚀示意图。铝合金发生点蚀主要是由于材料表面的钝化膜遭到破坏而导致的, 溶液中含有大量的 Cl^- , 活性高, 与铝合金表面的氧

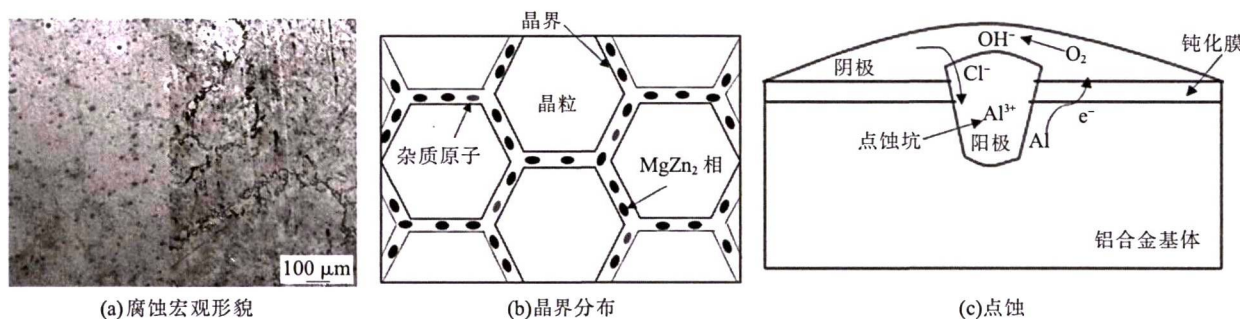


图 4 焊核区腐蚀形貌及腐蚀机理示意图

Fig.4 Corrosion morphology of weld nugget and schematic of corrosion mechanism

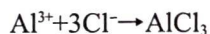
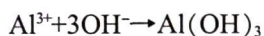
化膜发生反应, 使氧化膜减薄、破裂, 金属基体暴露 在溶液中, 溶液中的 Cl^- 促进金属基体的局部溶解, 即:



在蚀孔的周边发生阴极还原反应, 即:



随着 OH^- 的形成, 使蚀孔周围的 pH 升高, 孔内形成的 Al^{3+} 向外迁移, 与 OH^- 、 Cl^- 结合, 即:



$\text{Al}(\text{OH})_3$ 在点蚀孔周围沉积形成硬壳层, 使蚀孔内形成一个蔽塞区。尽管该处存在膜修复, 但溶解速率大于再钝化速率, 结果导致形成点蚀核。在点蚀孔形成后, 蔽塞区阻碍了孔内外物质的交换, 孔内介质相对孔外呈滞留状态。孔内缺氧, 孔外富氧, 从而行成了氧浓度差电池, 进一步加速了孔内金属的离子化过程。孔内金属离子不断增加, 为保持电中性,

孔外 Cl^- 不断向孔内迁移、富集。同时孔内金属离子发生水解 ($\text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{AlOHCl}^+$), 使孔内溶液 pH 降低, 加速蚀坑向金属内部发展。而孔外大片面积处于钝化的阴极状态, 同时又受到蚀孔内阳极过程所释放的电子的阴极保护作用, 对蚀孔周围全面腐蚀起到一定的抑制作用。

3 结论

(1) 手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 焊核区受热输入和过冷度的影响形成粗大的晶粒, 热影响区受到焊核热作用晶粒也发生一定的粗化现象, 使材料的硬度降低。

(2) 热影响区的腐蚀电位按照半自动 MIG、手工 TIG 和机器人 MIG 的顺序依次降低, 焊核区的腐蚀电位按手工 TIG、半自动 MIG 和机器人 MIG 的顺序依次下降。焊核区主要发生的是点蚀和晶间腐蚀。

(下转第 31 页)

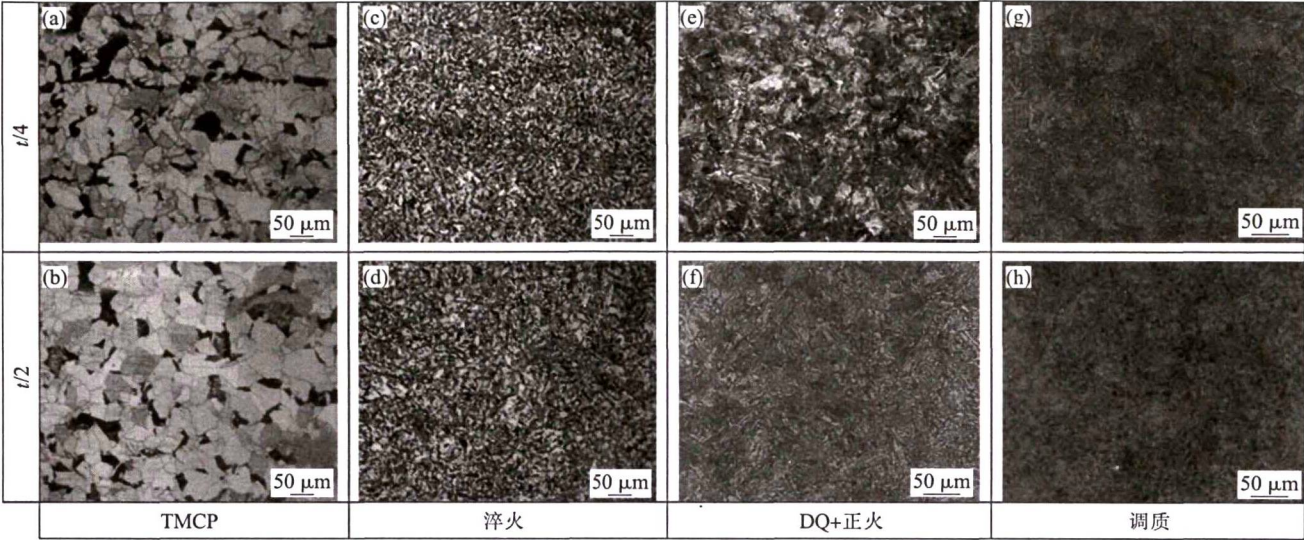


图 3 不同生产工艺在不同厚度位置的显微组织
Fig.3 Microstructure of different production technologies at different thickness locations

3 结论

(1) 对于厚度 80mm 的大单重 Q345D 钢特厚板,采用 TMCP 或轧后 DQ+正火工艺不能有效地控制钢板显微组织,无法满足综合性能要求。其中, TMCP 工艺在 -20℃ 冲击吸收能低于标准要求,轧后 DQ+正火工艺的屈服强度和 -20℃ 冲击吸收能量均低于标准要求。

(2) 轧后淬火和轧后调质处理的钢板强度、塑性和韧性均满足标准要求。该 2 种工艺均能够使钢板在淬火加热过程中发生充分再结晶,并通过随后的快速冷却获得晶粒细化的显微组织,保证了钢板的综合力学性能。

(3) 采用较低的碳当量成分设计,结合单一的轧后淬火工艺就能保证钢板获得较细的晶粒尺寸和较好的综合力学性能,更适合大单重 Q345D 钢特厚板的生

参考文献:

[1] 沈继刚,李宏图,王勇. 浅论我国大单重特厚钢板的轧制生产

(上接第 27 页)

参考文献:

[1] 王生,李周,尹志民,等. 钎钴微合金化焊丝焊接头的组织与性能[J]. 兵器材料科学与工程,2005,28(3):26-29.

[2] Fahimpour V, Sadrnezhad S K, Karimzadeh F. Corrosion behavior of aluminum 6061 alloy joined by friction stir welding and gas tungsten arc welding methods [J]. Materials & Design, 2012, 39: 329-333.

[3] Zhang C, Zhang X M, Liu S D, et al. Effect of rolling deformation on quench sensitivity relative to intergranular corrosion of 7A55

技术[J]. 宽厚板,2011,17(2):24-26.

[2] 刘军刚. 焊接结构用厚钢板生产研究与应用[J]. 热加工工艺,2015,44(13):116-117.

[3] 李峰,张伟亮. 大单重宽幅钨钼板的开坯热轧制生产技术[J]. 中国重型装备,2013(4):27-37.

[4] 周许,王立新,胡建成. 提高低合金高强度钢 Q345D 低温冲击功的工艺研究[J]. 大型铸锻件,2011,15(1):22-25.

[5] 李婧,邵长静,刘相华,等. Q235 特厚钢板生产工艺研究[J]. 热加工工艺,2015,44(9):121-123.

[6] 惠保卫,高永军. 大单重钼棒坯精锻-连轧生产工艺研究[J]. 中国铝业,2017,41(3):47-51.

[7] Yi Hailong, Liu Zhenyu, Wang Guodong, et al. Development of Ti-microalloyed 600MPa hot rolled high strength steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 17(12):54-58.

[8] 龚立国. 250mm 特厚板 Q345D 热处理工艺研究[J]. 金属材料与冶金工程,2017(2):23-28.

[9] 马凤杰,包石磊,王忠英,等. 热处理工艺对 Q345D 低合金高强度钢低温冲击韧性的影响 [J]. 现代冶金,2011,39(4):8-10.

[10] 周建,康永林,毛新平. Ti 微合金钢的成分及工艺对显微组织和力学性能的影响[J]. 钢铁,2006,41(增刊):343-350.

[11] 张鑫,郭汉杰,李洪亮. DH36 船板钢拉伸断口分层的原因分析[J]. 热加工工艺,2012,41(6):192-194. [H]

aluminum alloy [J]. Mining & Metallurgical Engineering, 2007, 27(6): 69-60.

[4] 章友谊,刘华,朱小兵. 7A52 铝合金 MIG 焊接接头显微组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2013,42(19):172-174.

[5] 田福泉,付高峰,周传良,等. 高速列车车厢用的铝合金板焊接接头的组织与性能[J]. 东北大学学报(自然科学版),2006,27(1):49-52.

[6] 彭云,许良红,田志凌,等. 焊接热输入对高强铝合金接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报,2008,29(2):17-21. [H]