

异种铝合金 MIG 焊接接头的疲劳破坏行为

郑自芹¹, 徐智宝¹, 张文亮², 张大江¹, 梁景恒¹, 张中东¹, 王萌¹, 于壮壮¹

(1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 山东 烟台 264003; 2. 内蒙古特种设备检验研究院包头分院, 内蒙古 包头 014032)

摘要 用高频疲劳试验机、显微硬度计、OM、SEM、XRD 等设备研究了 5454-H24/6106-T6 异种铝合金 MIG 焊接接头的显微组织及疲劳性能。结果表明: 焊缝区为等轴晶组织, 由 α -Al 基体+少量 [FeMgO] 析出相组成, 5454-H24 铝合金侧熔合区为 α -Al 基体+Al-Mg 共晶, 6106-T6 铝合金侧熔合区为 α -Al 基体+Al-Si 共晶; 拉伸试样断裂位置与 6106-T6 铝合金侧软化区一致; 带余高焊接接头疲劳极限 $\sigma_{-1}=115$ MPa, 疲劳极限比 $\sigma_{-1}/R_m=56\%$, 去除焊缝余高后焊接接头疲劳强度提升 6.9%。低应力下疲劳源多位于焊缝表面气孔、疏松等焊接缺陷处, 高应力下裂纹更易在焊缝边部的焊接缺陷处萌生。焊缝余高和焊接缺陷是影响焊接接头疲劳性能的主要因素。

关键词 5454-H24/6106-T6 异种铝合金; MIG 焊接; 显微组织; 疲劳性能

中图分类号 TG444*.2

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2022)03-0099-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20220222.001

Fatigue and fracture behavior of MIG welded joint of dissimilar aluminum alloys

ZHENG Ziqin¹, XU Zhibao¹, ZHANG Wenliang², ZHANG Dajiang¹, LIANG Jingheng¹,

ZHANG Zhongdong¹, WANG Meng¹, YU Zhuangzhuang¹

(1. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Yantai 264003, China;

2. Baotou Branch of Inner Mongolia Special Equipment Inspection and Research Institute, Baotou 014032, China)

Abstract Microstructure and fatigue properties of 5454-H24/6106-T6 dissimilar aluminum alloy MIG welded joints were studied by high-frequency fatigue testing machine, micro-hardness tester, OM, SEM, XRD and other equipments. The results show that the weld zone is equiaxed crystal structure consisting of α -Al matrix and small amount of [FeMgO] precipitates, the partial melting zone (PMZ) on the side of 5454-H24 aluminum alloy is α -Al matrix + Al-Mg eutectic, and that of 6106-T6 aluminum alloy is α -Al matrix and Al-Si eutectic. The fracture position of the tensile specimen is consistent with the softening zone on the side of 6106-T6 aluminum alloy. The fatigue limit σ_{-1} of the welded joint with excess weld metal is 115 MPa, and the fatigue limit ratio σ_{-1}/R_m is 56%. The fatigue strength of the welded joint is increased by 6.9% after removal of the excess weld metal. Welding defects such as pores and looseness on the surface of weld are the main causes of fatigue cracks under low stress conditions, and cracks are more likely to initiate from defects at edge of weld under high stress conditions. Excess weld metal and weld defects are the main factors governing the fatigue performance of this type of welded joint.

Keywords 5454-H24/6106-T6 dissimilar aluminum alloy; MIG welding; microstructure; fatigue performance

随着高速列车轻量化发展, 轻质中等强度的铝合金材料在高速列车车体上的应用越来越广泛^[1-3]。5454 铝合金是 Al-Mg 系不可热处理强化铝合金^[2], 6106 铝合金是 Al-Mg-Si 系热处理强化铝合金^[1], 两种铝合金材料均为高速列车车体结构件的重要优选材料, 异种铝合金焊接在车体制造中不可避免, 它结合了异种铝合金高强度、耐腐蚀和铸造性能优异等优点, 使高速列车整体结构和零部件设计更合理、高效。

熔化极氩弧焊(melt inert-gas, MIG)是目前大型铝合金结构件最常用的焊接方法之一^[4-5], 由于两种铝合金强化方式的区别, 焊接过程中 6xxx 系铝合金组织与性能受焊接热输入影响较大^[6], 而冷作硬化 5xxx 铝合

金通常受焊接热影响较小^[5,7]。列车车体焊接结构件在列车运行过程中常受纵向力或横向力作用, 为确保车辆的安全运行, 车体焊接结构必须有足够的可靠性和疲劳安全性。因此, 本文作者通过研究 5454-H24 铝合金与 6106-T6 铝合金接头的疲劳性能, 以期高速列车车体焊接的结构设计与安全运行提供基础数据与依据, 对其工程化应用和提高安全可靠性具有重要意义。

1 试验材料及方法

1.1 材料

选用 6 mm 厚的 6106-T6 型材及 5454-H24 平板。

收稿日期: 2021-10-31; 修回日期: 2022-03-01

第一作者: 郑自芹, 男, 硕士, 副研究员; 主要研究方向为理化测试表征与服役评价。E-mail: zhengziquin111@163.com。

通信作者: 梁景恒, 男, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为理化测试表征与服役评价。E-mail: 441382625@qq.com。

用直径为 1.2 mm 的 ER5356 焊丝进行 MIG 焊接。母材及焊丝化学成分如表 1 所示。

表 1 5454/6106 铝合金及焊丝化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical compositions of 5454/6106 aluminum alloy and welding wire (mass fraction/%)

成分	6106	5454	ER5356
Mg	0.40~0.80	2.40~3.00	4.90
Si	0.30~0.60	≤0.25	0.13
Mn	0.050~0.200	0.500~1.000	0.057
Cr	≤0.200	0.050~0.200	0.065
Ti	—	≤0.20	0.11
Fe	≤0.35	0.00~0.40	0.12
Cu	≤0.250	≤0.100	0.011
Zn	≤0.10	≤0.25	<0.13
Al	余量	余量	余量

1.2 方法

用 IGM 自动焊机进行 MIG 焊接,单 V 型坡口,坡口角度为 60°,焊接电流为 140 A,电压为 20 V,焊接速度为 0.4 m/min,保护气体为氩气,气体流量为 (20±2) L/min。垂直于焊缝方向截取拉伸试样及疲劳试样,如图 1 所示。试样厚度为 5 mm,为全厚度试样。在 QBG-20 电磁谐振高频疲劳试验机上进行轴向力拉伸(正弦波)疲劳试验,试验频率为 140 Hz,循环应力比 $R(\sigma_{min}/\sigma_{max})=0.1$,到试样断裂或循环次数达到 1×10^7 时结束。采用升降法测定焊接接头的疲劳极限,有效试样数量为 12 根及以上。从对接试板上截取金相试样,经 Keller 试剂(体积比, HF:HCL:HNO₃:H₂O=1:1.5:2.5:95)腐蚀 1 min 后在金相显微镜(OM, AXIO Observer. A1m)下观察焊接接头不同区域显微组织形貌。在 HVS-1000 型数显维氏硬度计上测定焊接接头横截面厚度中心方向的显微硬度分布,载荷大小为 1 N,保荷时间为 10 s。

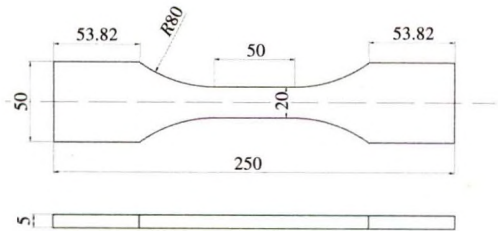


图 1 焊接接头疲劳试样形状及尺寸(mm)
Fig.1 Geometry and dimensions of specimens of welded joints used in fatigue test(mm)

2 结果与分析

2.1 焊接接头的显微组织

两种试验铝合金母材的显微组织如图 2 所示。结合 XRD 相分析,可见 5454-H24 铝合金显微组织为 α -Al 基体+[FeMgO]相组成,6106-T6 铝合金显微组织为 α -Al 基体+Mg₂Si+[AlFeSi]相组成。图 3a、b 分别为 6106-T6/5454-H24 接头 5454-H24 侧和 6106-T6 侧不同区域的显微组织,根据受热影响和熔化程度的不同,可分为热影响区、熔合区和焊缝区。图 3c 为 5454-H24 铝合金侧熔合区显微组织形貌。可见,沉淀相分散聚集成无沉淀熔合区。6106-T6 铝合金侧熔合区显微组织为 α -Al 基体+沿晶界聚集分布的 Al-Si 共晶组成(图 3d)。图 4 为 XRD 物相分析。可见,5454-H24 铝合金与焊缝金属成分更相似,与 6106-T6 铝合金差

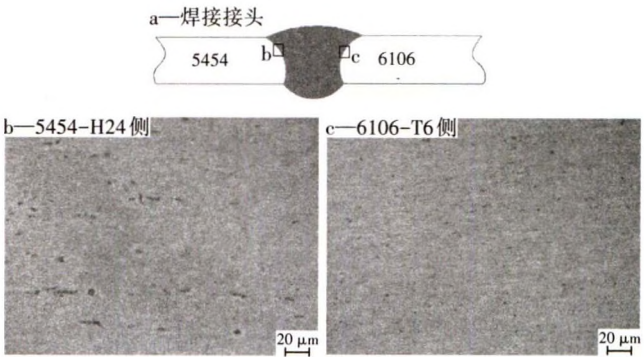


图 2 显微组织照片
Fig.2 Microstructure of base metal

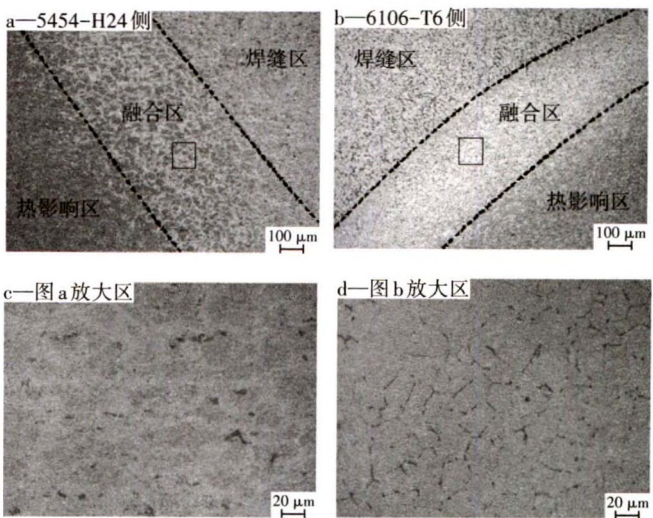


图 3 铝合金焊接接头不同区域显微组织图
Fig.3 Microstructures of different areas in aluminum welded joint

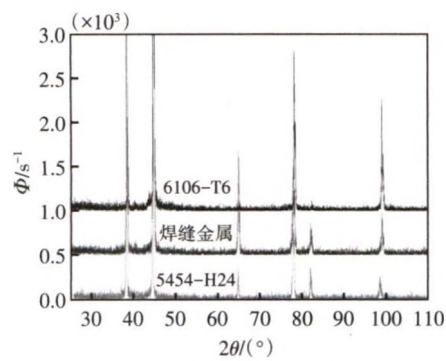


图4 XRD物相分析
Fig.4 XRD phase analysis

异较大,主要为Mg成分差别。

2.2 焊接接头不同区域硬度分布

5454-H24/6106-T6焊接接头显微硬度分布如图5所示。可知,焊缝区硬度值约为64HV_{0.1}~69HV_{0.1};6106-T6铝合金和5454-H24铝合金母材硬度值分别约为93HV_{0.1}和83HV_{0.1}。在距离6106-T6侧熔合线约8 mm的热影响区存在一个硬度软化区,软化区硬度值约为57HV_{0.1},这是由于6106-T6铝合金为热处理强化铝合金,在焊接过程中受焊接热输入影响,Mg₂Si强化相聚集长大导致过时效,造成硬度明显降低,在一种6A01-T5铝合金MIG焊接接头的研究中也得到类似的结论^[5];在距离5454-H24侧熔合线约6 mm的热影响区存在一个软化区,软化程度较弱,软化区硬度值约为64HV_{0.1},5454-H24铝合金虽不是热处理强化铝合金,但在焊接热循环作用下,热影响区中晶粒发生再结晶长大,造成硬度小幅降低^[6]。6106-T6侧热影响区宽度约为18 mm,5454-H24侧热影响区宽度约为10 mm。6106-T6侧硬度软化区为整个焊接接头硬度最薄弱区。

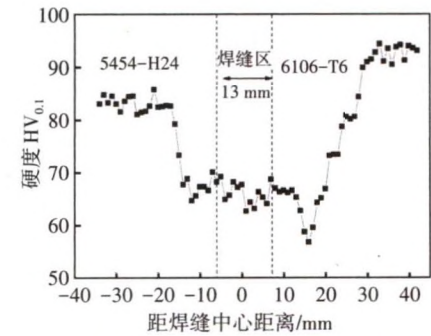


图5 铝合金焊接接头硬度分布
Fig.5 Hardness distribution of aluminum alloy welded joint

2.3 焊接接头的力学性能

5454-H24/6106-T6焊接接头力学性能如表2所示。2个试样断裂位置均为6106-T6铝合金侧热影响区,这与硬度测试中焊接接头最薄弱区一致。

表2 5454-H24/6106-T6焊接接头力学性能
Table 2 Mechanical properties of 5454-H24/6106-T6 welded joints

试样编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	断裂位置
1	207	139	6106-热影响区
2	204	153	6106-热影响区

2.4 焊接接头的疲劳性能

图6为5454-H24/6106-T6铝合金焊接接头疲劳S-N曲线及其疲劳极限升降图(图中数字→表示循环次数超过10⁷且没有断裂的试样数量),采用升降法计算的疲劳极限 σ_{-1} 为115 MPa,疲劳极限比 $\sigma_{-1}/R_m=56.1\%$ 。

由疲劳断口可见,15个疲劳试样中断裂全部位于焊缝区,其中有5个试样起裂于焊缝表面,见图7a黑圈所示位置。10个试样起裂于焊缝边部,见图8a黑圈箭头。图7a为焊接接头典型表面起裂的断口形貌,疲劳断裂起源于焊缝表面的焊接缺陷(气孔),如图7b所示。裂纹扩展区受疲劳载荷作用表现为典型的河流状和放射性疲劳辉纹,如图7c所示。瞬断区为韧窝断

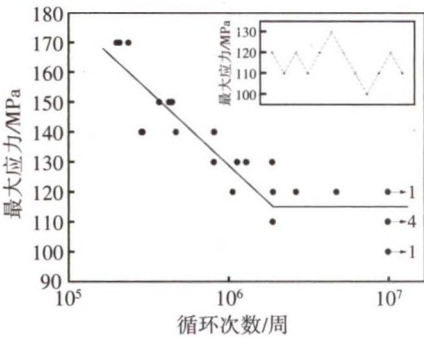


图6 铝合金焊接接头的S-N曲线和疲劳极限的升降图
Fig.6 S-N curve and fatigue limit diagram of aluminum alloy welded joint

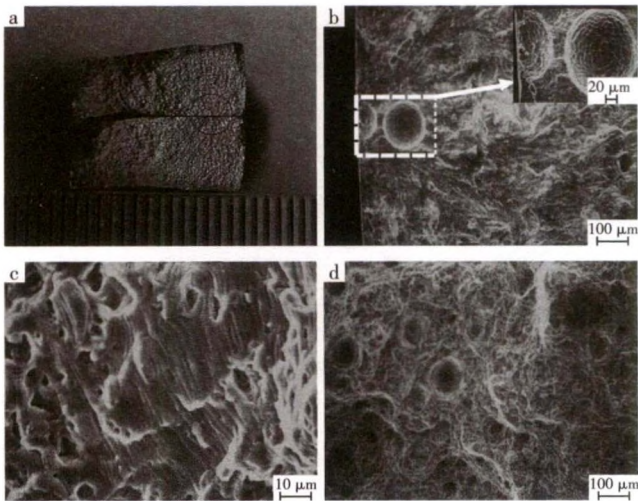


图7 表面起裂的典型疲劳断口SEM图
Fig.7 Typical SEM fractographs of fatigue fracture triggered by surface cracking

口,说明焊接接头的塑性良好,如图7d所示。图8为焊缝边部起裂的典型断口形貌,从断口扩展形貌可见,裂纹同样起裂于焊接缺陷处(疏松)。

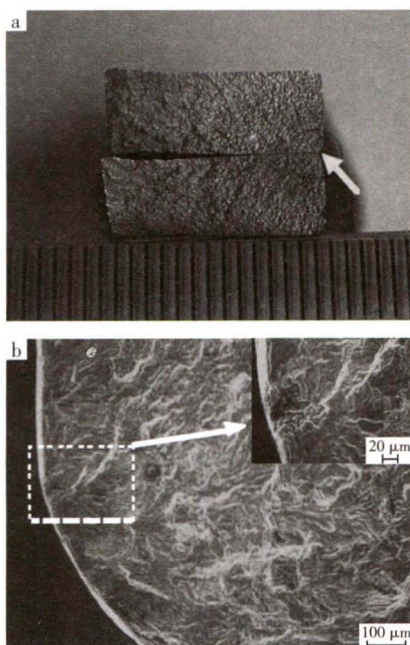


图8 边部起裂的典型疲劳断口SEM图

Fig.8 Typical SEM fractographs of fatigue fracture induced by corner edge cracking

3 讨论

由于5454-H24铝合金与6016-T6铝合金化学成分差别较大,对两者的可焊性提出了较大的挑战。ER5356焊丝与5454-H24铝合金成分较相近,在金相结果中焊缝区及熔合区焊接熔合性良好,未出现因化学成分差异导致的焊接不良缺陷,在后续的拉伸试验及疲劳试验中亦表明两种材料具有良好的异种可焊性。

通常材料疲劳性能与拉伸强度具有密切关系^[8]。在本研究中,焊接接头硬度最低点出现在6106-T6铝合金侧的热影响区,拉伸试样同样断裂于该硬度软化区,然而在疲劳试验中所有试样的断裂位置均为焊缝区。

除强度外,焊接接头的疲劳性能同样受焊接质量的影响^[9-10]。如前文所述,15个疲劳断裂试样中,无论是焊缝表面起裂还是焊缝边部起裂,裂纹均萌生于气孔及疏松等焊接缺陷。这是由于载荷循环作用下,气孔及疏松等焊接缺陷易造成应力集中,从而成为裂纹源。目前认为氢是铝合金焊接时产生气孔的主要原因^[11]。而氢的来源主要是焊丝及母材表面氧化膜吸附的水分,焊丝以细小熔滴形式通过熔柱进入熔池,由于熔柱温度高,且熔滴比表面积大,有利于熔敷金属吸附氢;同时,MIG焊接时熔池熔化母材金属的深度较大,由于铝合金密度小,冷却速度快,不利于熔池中气

泡逸出,导致铝合金焊缝内易产生气孔;此外,焊接保护气体的成分、纯度等因素也可能影响焊接气孔的形成^[12]。因此,建议对施工现场及焊丝存放库房的湿度进行严格控制,选用高纯度和合适成分的保护气进行焊接;对铝合金进行焊前清理也十分必要,建议用丙酮清洗铝合金表面污渍,用不锈钢丝去除焊缝区的氧化膜。焊接疏松缺陷则认为是焊缝金属上下温差较大,导致其塑性流动行为发生变化,在最后凝固部位焊缝金属液体补缩不足导致缺陷形成^[13]。建议合理控制焊接速度和焊接温度以增大最后凝固部位的焊缝金属液体补给,并对最后凝固部位用砂纸打磨平滑。

考虑到成本等因素,实际工程应用中,在一些非主要受力结构位置的焊缝余高通常不打磨,上述研究即为带余高焊接接头的疲劳性能。此时,焊缝余高表面可能存在的局部几何不连续导致产生应力集中,这也可能是试样从焊缝余高边部起裂的一个原因^[4]。为验证这点,对带余高试样进行打磨处理,并进行疲劳试验对比,结果如图9、10所示。与带余高试样相比,平滑试样裂纹基本沿焊缝心部垂直扩展,断口位置发生较明显塑性变形(图9)。平滑试样疲劳极限 σ'_{-1} 为123 MPa,对焊接接头焊缝表面进行平滑处理有效提高了焊接接头的疲劳极限。可见,带余高焊接接头有86%(高应力)和50%(低应力)起裂于焊缝边部,而平滑试样中,起裂于焊缝边部的试样比例分别为50%(高应力)和44%(低应力),无论在较高还是较低的应力下,

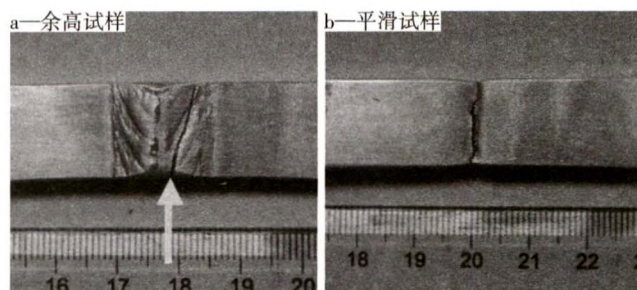


图9 铝合金焊接接头疲劳断裂宏观形貌

Fig.9 Fractographs of fatigue test of aluminum alloy welded joint

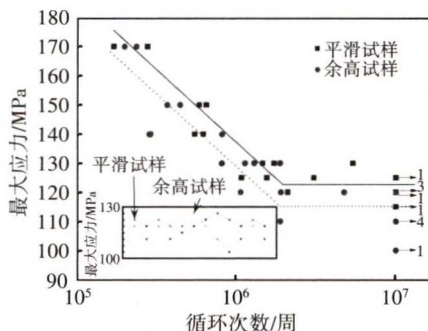


图10 铝合金焊接接头的S-N曲线

Fig.10 S-N curve of aluminum alloy welded joint

相较于带余高试样,平滑试样起裂位置更随机。

4 结论

1) 5454-H24/6106-T6 异种铝合金焊接接头中,焊缝区显微组织为 α -Al 固溶体,两侧熔合区组织差异较大,5454-H24 铝合金侧为 α -Al 基体+Al-Mg 共晶相,而6106-T6 侧熔合区为 α -Al 基体+沿晶界聚集的Al-Si 共晶相。焊缝金属成分与5454-H24 铝合金更相近。

2) 5454-H24/6106-T6 异种铝合金焊接接头中硬度最低区域在6106-T6 铝合金侧的热影响区,与拉伸试样断裂位置吻合。

3) 5454-H24/6106-T6 异种铝合金焊接接头采用升降法求得疲劳极限为115 MPa,疲劳极限比为56%。在高应力下(比疲劳极限高15 MPa 以上),86% 试样断裂于焊缝边部。去除焊缝余高后,疲劳极限提升到123 MPa,此时试样断裂位置较随机。

4) 焊缝表面气孔、疏松等焊接缺陷是影响焊接接头疲劳性能的主要因素。建议通过进一步优化焊接工艺,严格控制焊接条件及打磨焊缝余高等措施提高焊接接头的疲劳性能。

5 参考文献

[1] 韩晓辉,李帅贞,毛镇东,等. 高速列车用6106-T6 铝合金型材激光-电弧复合焊接工艺及接头性能[J]. 中国激光, 2019,46(12):86-94.

HAN Xiaohui, LI Shuaizhen, MAO Zhendong, et al. Laser-arc hybrid welding process and joint performances of 6106-T6 aluminum alloy profiles for high speed trains[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019,46(12):86-94. (in Chinese)

[2] 孙强. 5454 铝合金 H2n 及 O 状态板材生产工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2008,36(6):18-20.

SUN Qiang. Research on production process of 5454 aluminum alloy plate with H2n and O tempers[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2008,36(6):18-20. (in Chinese)

[3] WANG Hongxuan, ZHANG Jiayi, WANG Bin, et al. Influence of surface enhanced treatment on microstructure and fatigue performance of 6005A aluminum alloy welded joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020,60:563-572.

[4] 何柏林,封亚明,李力. 超声冲击及焊缝余高对6082 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019,29(7):1377-1383.

HE Bailin, FENG Yamig, LI Li. Effect of ultrasonic impact and weld reinforcement height on the fatigue properties of 6082 aluminum alloy welded joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019,29(7):1377-1383. (in Chinese)

[5] 毛镇东,郑自芹,李帅贞,等. 高速列车用6A01-T5 铝合金

MIG 焊接接头软化行为研究[J]. 热加工工艺, 2021,50(1):35-39.

MAO Zhendong, ZHENG Ziqin, LI Shuaizhen, et al. Softening behavior of MIG welded joint of 6A01-T5 aluminum alloy for high-speed trains[J]. Hot Working Technology, 2021,50(1):35-39. (in Chinese)

[6] 胡靖元,刘志颖,李培跃,等. 5083/6063 异种铝合金 MIG 焊接接头组织和力学性能[J]. 热加工工艺, 2018,47(19):237-239.

HU Jingyuan, LIU Zhiying, LI Peiyue, et al. Microstructure and mechanical properties of 5083/6063 dissimilar aluminum alloy MIG welding joint[J]. Hot Working Technology, 2018,47(19):237-239. (in Chinese)

[7] 郑凯,毛镇东,王灿,等. 补焊对光纤激光-CMT 复合焊接 6106-T6/5454-H24 铝合金异种接头组织性能的影响[J]. 应用激光, 2019,39(3):429-434.

ZHENG Kai, MAO Zhendong, WANG Can, et al. Effect of repair welding on microstructures and properties of 6106-T6/5454-H24 aluminum alloy dissimilar joint with fiber laser-CMT hybrid welding[J]. Applied Laser, 2019,39(3):429-434. (in Chinese)

[8] 沈月,何国球,田丹丹,等. 二次枝晶臂间距对 A319 铝合金拉伸及疲劳性能的影响[J]. 材料研究学报, 2014,28(8):587-593.

SHEN Yue, HE Guoqiu, TIAN Dandan, et al. Effect of secondary dendrite arm spacing on tensile property and fatigue behavior of A319 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014,28(8):587-593. (in Chinese)

[9] 范清海. 焊接缺陷对铝合金焊接接头疲劳性能影响[J]. 科学技术创新, 2016(23):58.

FAN Qinghai. Effect of weld defects on the fatigue of aluminum alloy joint[J]. Scientific and Technological Innovation, 2016(23):58. (in Chinese)

[10] 李敬勇,马建民. 焊接工艺方法对6061-T6 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2004,24(3):52-57.

LI Jingyong, MA Jianmin. Effect of welding processes on fatigue properties of 6061-T6 aluminum welded joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004,24(3):52-57. (in Chinese)

[11] 彭勇军. 铝合金 MIG 焊气孔的成因及消除措施[J]. 金属加工(热加工), 2015(12):58-60.

PENG Yongjun. Causes and elimination of blowholes in aluminum alloy MIG welding[J]. MW Metal Forming, 2015(12):58-60. (in Chinese)

[12] 李亮亮,单清群,曹春鹏,等. A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊电参数特性分析[J]. 电焊机, 2019,49(5):70-73.

LI Liangliang, SHAN Qingqun, CAO Chunpeng, et al. Study on electrical parameters of laser-MIG hybrid welding of A7N01 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2019,49(5):70-73. (in Chinese)

新型高密度高强度含钨钢的组织与性能

潘磊¹,王琳^{1,2},刘安晋¹,程兴旺^{1,2}

(1.北京理工大学 材料学院,北京 100081;2.冲击环境材料技术国家级重点实验室,北京 100081)

摘要 对新型高密度高强度合金钢进行700~1 100 ℃不同温度淬火+400 ℃回火处理,进行硬度、准静态拉伸测试,用扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)、电子背散射衍射(EBSD)等研究了淬火温度对合金钢显微组织及力学性能的影响。结果表明:试验钢最佳淬火温度为800 ℃,后经400 ℃回火后可获得较好的强韧性匹配,此时抗拉强度为1 907 MPa,屈服强度为1 755 MPa,伸长率达8%。经热处理,试验钢基体析出细小弥散分布的μ相,随淬火温度提高,弥散分布的析出相数量减少,对试验钢产生的沉淀强化作用降低,强度因此降低。

关键词 高密度高强度合金钢;淬火温度;力学性能;显微组织;μ相

中图分类号 TG142.1 文献标志码 A 文章编号 1004-244X(2022)03-0104-06
DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20220318.005

Microstructure and properties of novel high density and high strength tungsten steel

PAN Lei¹, WANG Lin^{1,2}, LIU Anjin¹, CHENG Xingwang^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2.National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing 100081, China)

Abstract The novel high density and high strength alloy steel was quenched at range of 700-1 100 ℃ and then tempered at 400 ℃. The hardness and quasi-static tensile tests were performed, and scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), and X-ray diffraction (XRD), electron backscatter diffraction (EBSD), etc. were employed to investigated the effect of quenching temperature on the microstructure and mechanical properties of alloy steel. The results show that the optimum quenching temperature of the test steel is 800 ℃, and after tempering treatment at 400 ℃, a better strength-plastic matching can be obtained. The tensile strength is 1 907 MPa, and the yield strength is 1 755 MPa, and the elongation is 8%. After heat treatment, fine and dispersed μ phases precipitate in the test steel matrix. As the quenching temperature increases, the number of the dispersed precipitate phases decreases, resulting in a decrease in the precipitation strengthening effect and hence the strength.

Keywords high density and high strength alloy steel; quenching temperature; mechanical properties; microstructure; μ phase

为改善合金钢的组织形貌,获得良好的强度及韧性匹配,通常需要对合金钢进行热处理。超高强度合金钢由于其优越的力学性能,广泛应用于军事装备、航空航天等领域^[1-3]。热处理制度是影响超高强度合金钢性能的关键,通过恰当的热处理,可使合金钢获取较优的性能,满足应用需求^[4-6]。如对30CrMnSiNi2A用880 ℃保温1 h油淬,250 ℃保温3 h空冷的热处理,得到的合金钢抗拉强度达1 762 MPa,伸长率为10.9%^[7];Aermet 100在885 ℃保温1 h空冷后进行-73 ℃深冷处理1 h,再经482 ℃回火5 h后,抗拉强度可达1 965

MPa,伸长率为14%,具有良好的塑性变形能力^[8]。超高强度钢的密度通常约为7.8 g/cm³,在高速侵彻时,当弹体结构与速度一定,密度越大,动能越大,对目标造成的毁伤破坏效果越好,因此本文作者希望开发一种高密度合金钢,并通过恰当的热处理使其在具有高密度的同时兼具高强度及良好的塑性。

本文作者设计了一种高W含量新型高密度合金钢,密度达8.9 g/cm³,通过XRD、SEM、TEM、EBSD等系统研究了淬火温度对新型高密度高强度合金钢显微组织及力学性能的影响。

收稿日期:2021-09-16;修回日期:2021-12-26

第一作者:潘磊,男,硕士研究生;主要研究方向为合金钢的组织、静动态力学性能及微观表征。E-mail:738905727@qq.com。

通信作者:王琳,女,硕士生导师,副教授;主要研究方向为超钢强及钛合金的力学性能和微观表征、高应变率载荷下材料的动态响应行为。

E-mail:linwang@bit.edu.cn。

[13] 毛育青,柯黎明,刘奋成,等. 铝合金厚板搅拌摩擦焊焊缝疏松缺陷形成机理[J]. 航空学报,2017,38(3):251-259.
MAO Yuqing, KE Liming, LIU Fencheng, et al. Formation

mechanism of weld loose defect in friction stir welding thick plates of aluminum alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2017,38(3):251-259. (in Chinese)