

7020 铝合金 MIG 焊焊接接头的组织与性能

彭小燕¹, 曹晓武¹, 段雨露¹, 陈举飞¹, 徐国富^{1,2}, 尹志民^{1,2}

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 采用显微硬度及拉伸力学性能测试、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、微区 X 射线衍射(Micro XRD)研究经 ER5356 焊丝金属惰性气体保护焊(Metal inert gas, MIG)的 7020 铝合金厚板焊接接头的微观组织和力学性能。结果表明: 7020 铝合金 MIG 焊焊接接头的抗拉强度为 268 MPa, 屈服强度为 231 MPa, 伸长率为 4.5%, 焊接系数约为 0.7; 焊接接头的焊缝区为树枝状铸造组织; 熔合区靠近焊缝一侧为柱状晶, 靠近热影响区一侧为细小的等轴晶组织; 热影响区为发生了部分再结晶的纤维组织; 基材为明显的纤维组织。焊缝区的铸态组织导致其成为焊接接头最薄弱的位置, $\eta'(\text{MgZn}_2)$ 相粗化导致热影响区内离焊缝中心约 30 mm 的位置形成硬度较低的软化区。

关键词: 7020 铝合金; MIG 焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Microstructures and properties of MIG welded joint of 7020 aluminum alloy

PENG Xiao-yan¹, CAO Xiao-wu¹, DUAN Yu-lu¹, CHEN Ju-fei¹, XU Guo-fu^{1,2}, YIN Zhi-min^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The mechanical properties and microstructures of the welded joint of 7020 aluminum alloy welded using 5356 welding wire by the method of metal inert gas (MIG) welding were investigated by OM, SEM, TEM, micro X-ray diffraction, microhardness test and tensile mechanical properties test. The results show that the tensile strength, yield strength, elongation and welding coefficient of the welded joint are 268 MPa, 231 MPa, 4.5% and 0.7, respectively. The weld zone is characterized by dendritic structure, the columnar grains form in the fusion zone on one side of the welding seam as well as equiaxed crystal on the other side. The fibrous organization is obviously found in the base metal, and in the heat affected zone, the recrystallization occurs. The weld zone is the weakest position in the welded joint due to the dendritic structure. The soften zone in the heat affected zone, approximately 30 mm away from the centre of welding seam, forms as a result of $\eta'(\text{MgZn}_2)$ coarsening.

Key words: 7020 aluminum alloy; metal inert gas welding; microstructure; mechanical property

铝合金具有密度小、耐蚀性好、易加工等特点, 是高速轨道列车轻量化的主体材料。为了适应高速轨

道车辆的发展, 世界各国竞相研制和生产铝合金车体^[1-3]。Al-Zn-Mg 系中强可焊合金的不仅具有适中的

基金项目: 装备预研基金重点项目(9140A20010311QT4801)

收稿日期: 2013-07-29; 修订日期: 2013-11-30

通信作者: 徐国富, 教授, 博士; 电话: 0731-88877217; E-mail: csuxgf66@csu.edu.cn

强度, 较宽的固溶处理温度范围, 优良的热变形性能和抗应力腐蚀性能, 而且焊接性能良好, 特别是焊后其室温时效强化能力极高, 因此是用来制作焊后不便进行热处理的焊接构件, 如底架、枕梁等关键部件的理想材料^[4-6]。日本、西欧等国广泛采用 7020 铝合金制造轨道列车车体^[7-9]。目前, 许多学者对该合金的焊接接头性能进行了研究。MOUSAVI 等^[10]研究了 7020 铝合金电磁搅拌焊的晶粒细化机制, 研究表明熔合线中与母材具有相似化学组成的晶粒由于搅拌作用被卷入熔池内, 并发生细化。GAM 等^[11]研究 7020 铝合金电子束焊接的组织与性能, 研究表明熔合区和热影响区对稳定裂纹扩展具有较高的阻力。RAM 等^[12]研究 7020 铝合金焊接通过孕育细化组织对热裂纹以及拉伸性能的影响, 研究表明焊接中孕育得到的晶粒不仅降低了合金热裂纹倾向, 还改善了合金硬度和拉伸性能。DUDZIK^[13]对比了 7020、5083、5089 铝合金的 MIG 焊焊接性能, 结果表明 7020 铝合金的焊接强度高于后两者的。虽然 7020 铝合金具有良好的综合性能, 但由于在焊接过程中焊接接头不同位置受焊接热循环的作用, 尤其是焊缝和热影响区内合金的性能会发生显著变化, 可能影响轨道列车的安全运行寿命。本文作者对轨道车辆用 7020 铝合金焊接接头组织和性能进行系统研究, 对改善该合金焊接接头的性能具有积极的指导意义。

1 实验

1.1 材料

焊接用铝合金母材为约 18 mm 厚的 7020 轧制板材, 热处理状态为 T6。焊接所用的焊丝为 ER5356 合金, 母材和焊丝的化学成分如表 1 所列。

表 1 7020 铝合金和 ER5356 焊丝的化学成分
Table 1 Chemical compositions of 7020 aluminum alloy and ER5356 filler metal

Alloy	Mass fraction/%				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
7020	0.35	0.40	0.20	0.15	1.20
ER5356	0.25	0.40	0.10	0.35	4.80

Alloy	Mass fraction/%				
	Zn	Cr	Ti	Zr	Al
7020	4.50	0.20	0.05	0.15	Bal.
ER5356	0.10	0.15	0.13	—	Bal.

1.2 实验方法

采用 MIG 自动焊接方式对 7020 铝合金试样进行多道焊对接, 焊接方向垂直于板材的轧制方向, 焊接工艺参数如表 2 所列。焊接样品拉伸力学性能测试在 MTS-810 拉伸机上进行拉伸, 拉伸速度为 2 mm/min, 结果取 3 组试样的平均值; 硬度测试在 HVS-10 显微维氏硬度仪器上进行, 从焊缝中心开始向母材逐点(间隔 1 mm)测量其维氏硬度, 测试加载载荷为 29.4 N, 加载时间为 10 s。

焊后各区的金相显微组织在 Leica DMIL LED 倒置显微镜下观察, 金相试样采用 keller 试剂进行腐蚀。拉伸断口在 Sirion200 场发射扫描电镜下观察; 透射电镜微观组织观察在 FEI Tecnai G² 20 透射电子显微镜下进行, 透射电镜样品于-30 ℃左右的 75% CH₃OH+25% HNO₃(体积分数)的溶液中进行电解双喷减薄, 双喷电压为 10~15 V; 焊缝、熔合区以及热影响区的物相组成测试在理学 D/Max Raid IIR X 射线衍射仪上进行。

表 2 7020 铝合金的 MIG 焊接工艺参数
Table 2 MIG welding parameters of 7020 aluminum alloy

Welding current/A	Welding voltage/V	Welding speed/(m·min ⁻¹)	Argon gas flow/(L·min ⁻¹)	Diameter of welding wire/mm
200-250	22-28	0.3-0.36	15	1.2

2 结果与分析

2.1 焊接接头的力学性能

表 3 所列为 7020 铝合金基材及焊接接头的常温拉伸实验结果。拉伸断裂位置在焊缝处(如图 1 所示)。由表 3 可知, 母材的抗拉强度为 393 MPa, 伸长率为 16.6%, 而焊接接头的抗拉强度和伸长率分别为 268MPa 和 4.5%, 相对于母材分别下降了 31.8%和 72.9%, 其焊接系数约为 0.7。根据欧洲标准 EN485-2 和 EN288-4, 7020 铝合金厚板大于 12.5 mm、低于 40 mm 时的抗拉强度最低值为 350 MPa; 经过焊接的检验样品的抗拉强度 $R_m(w)$ 必须要满足以下条件:

$$R_m(w) = R_m(pw) \times \eta \tag{1}$$

式中: $R_m(pw)$ 为所规定的基体材料的最低拉伸强度; η 为利用率。T6 态 Al-Zn-Mg 合金焊接后的硬化处理方式 为自然时效时, T 对应为 0.75, 则 7020 铝合金焊接接头的拉伸强度最低值应为 263 MPa。因此, 7020 铝合金 MIG 焊焊接接头的力学性能符合使用条件。

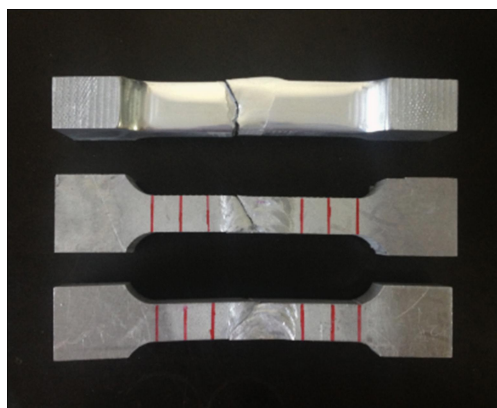


图1 焊接接头的断裂位置

Fig. 1 Fracture position of welded joint

表3 7020 铝合金基材及其焊接接头拉伸性能

Table 3 Mechanical properties of 7020 aluminum alloy and its welded joint

Sample	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A/\%$
Base alloy	393	344	16.6
Welded joint	268	231	4.5

2.2 焊接接头硬度分布

焊接过程中, 焊接热循环的作用使得焊接接头不同区域的硬度值有很大的区别。图2所示为焊接接头的维氏硬度分布。

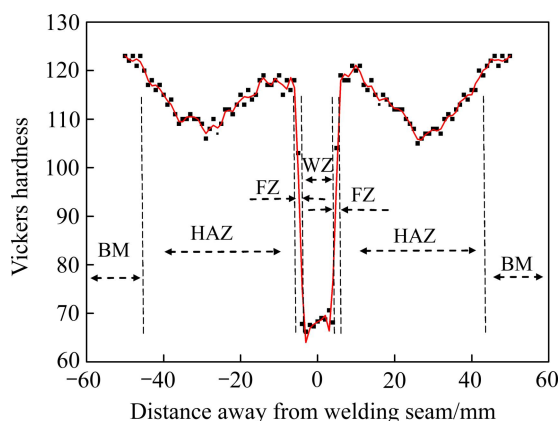


图2 焊接接头的硬度曲线分布

Fig. 2 Hardness distribution of welded joint

由图2可知, 焊接接头硬度曲线以焊缝(WZ)中心为对称轴, 近似对称分布。焊缝宽度约10 mm, 且焊缝中心硬度最低(67HV左右)。距焊缝中心15 mm区域, 硬度随着距离焊缝中心的增大而升高, 达到118HV左右。由于熔合区(FZ)的成分既不是原始的基材成分, 又不是焊缝金属的成分, 而是两种熔体交混后形成的

一种合金, 该区的硬度介于焊缝区和基材的之间, 比焊缝区的高, 比基材的低, 约为103HV。焊件冷却时, 焊接热沿基材方向扩散。热影响区(HAZ)沿散热方向依次出现淬火+过时效现象, 因此, 可把热影响区分为淬火区和过时效区。淬火区中原有的析出相固溶到铝基体中形成过饱和固溶体, 焊件经过一段时间的停放后固溶体会析出 η' (Mg₂Zn)相, 产生自然时效强化, 从而获得较高的硬度。距离焊缝中心15~30 mm范围, 硬度逐渐降低, 最低值约为106HV。原因是过时效区距离焊缝较远, 温度高于7020铝合金的时效温度却低于固溶处理温度, η' 相聚集长大、粗化, 导致固溶强化和沉淀强化效果要比淬火区的低, 强度和硬度降低, 形成一个软化区, 即图2中距离焊缝中心约30 mm处的低谷。尽管过时效区发生软化, 但硬度值仍比焊缝区的高得多, 说明焊接接头最薄弱的位置为焊缝区。随着离焊缝中心距离的增大, 硬度不断增大, 到达基材(BM)后达到稳定状态(约为123HV)。

2.3 焊接接头的显微组织

图3所示为7020铝合金焊接接头不同区域的金相显微组织照片。由图3(a)可以看出, 焊缝区组织呈树枝状。焊接加热时, 焊缝处的温度高达700~800℃, 焊丝熔化随后冷却, 由于焊接熔池快速结晶, 溶质来不及扩散, 加之各组元、熔池各部位结晶先后不同, 溶质浓度有差异, 同时溶质来不及均匀化, 从而形成了典型的铸造组织^[14], 这种急冷结晶组织使得焊缝区硬度较低, 塑性较差。熔合区是焊丝与基体金属形成的一种交混合金, 图3(b)体现了这种特征, 即靠近焊缝一侧为沿热散方向以联生结晶形式^[15-16]形成的柱状晶; 靠近基材一侧为细小的等轴晶组织, 其平均晶粒尺寸为5~10 μm。根据焊接熔池温度场的分布特征, 熔池边缘的加热温度稍高于基材的熔点, 而且存在一层运动速度很低的附面层。在该附面层中, 大量来自基材和焊丝的未熔Al₃(Zr、Ti)质点成为 α (Al)的非均质形核核心, 促进细小等轴晶的形成^[17-18]。由于Al₃(Zr、Ti)粒子对位错和亚晶界有钉扎作用, 该细小等轴晶粒薄层能够在一定程度提高强度, 改善该区的力学性能。图3(c)中热影响区组织呈现出纤维状组织的特征, 但是靠近焊缝的热影响区, 受焊接热的影响在拉长的纤维组织边缘出现部分再结晶细小晶粒。基材为明显的纤维状加工组织, 如图3(d)所示。

图4所示为焊接接头不同位置的TEM像。由图4(a)可知, 焊缝区没有明显的析出相。焊缝区的性能

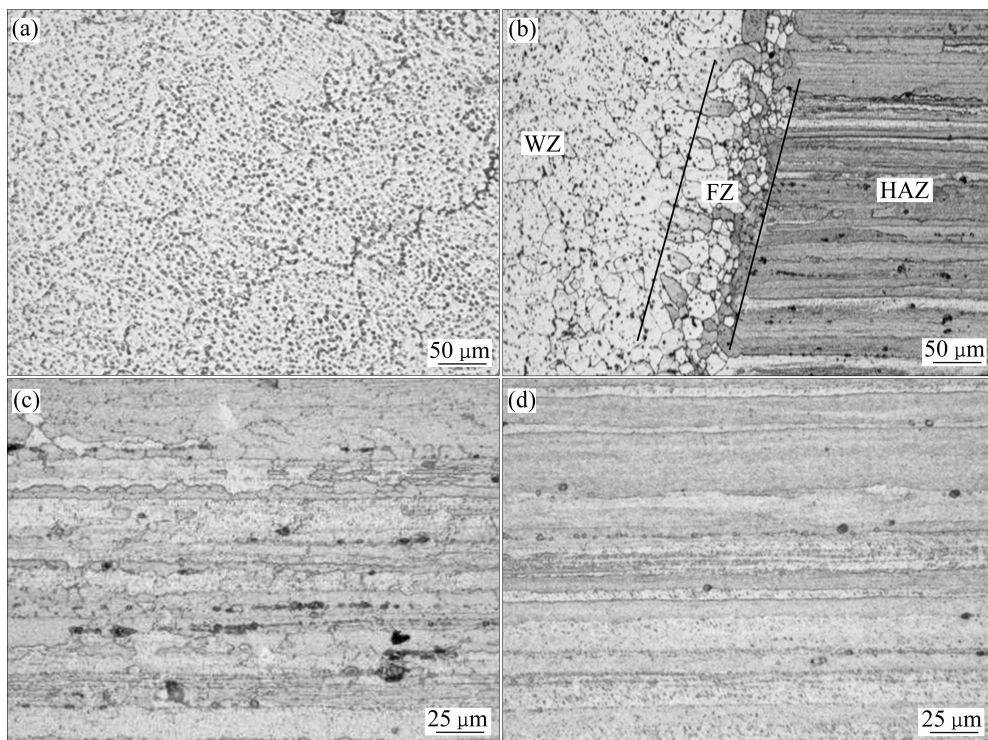


图 3 7020 铝合金焊接接头不同区域的显微组织

Fig. 3 Microstructures of welded joint of 7020 aluminum alloy at different areas: (a) Welded zone; (b) Transition zone; (c) Heat affected zone; (d) Base metal

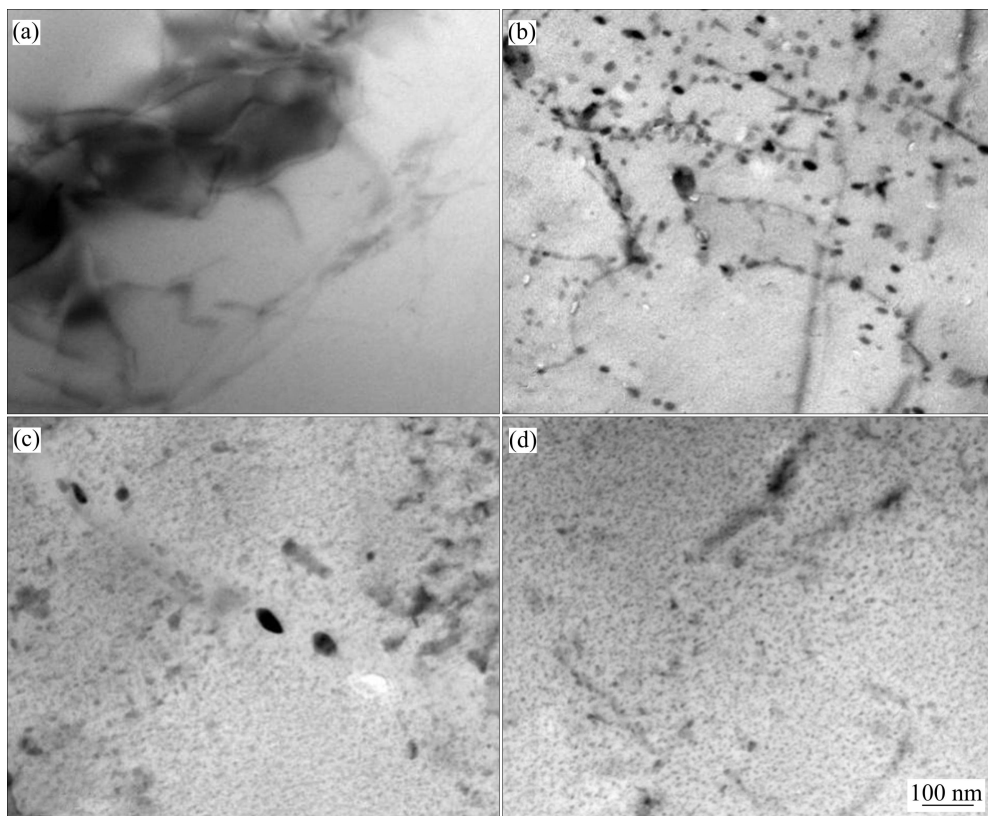


图 4 7020 铝合金焊接接头不同区域的 TEM 像

Fig. 4 TEM images of welded join of 7020 aluminum alloy at different areas: (a) Weld zone; (b) Quenching zone (15 mm away from welding seam); (c) Overaging zone (35 mm away from welding seam); (d) Base metal

取决于焊丝的化学成分和结晶过程。焊缝区的急冷结晶组织使得该区硬度较低、塑性较差,加之没有强化相析出,焊缝区强度不高,成为焊接接头的薄弱环节。从图 4 中可以看出,热影响区和基材区均弥散分布细小的纳米级颗粒状 η' 相,其中图 4(b)、(c)的 η' 相均明显发生了粗化,且过时效区中 η' 相的粗化程度较淬火区的要大。淬火区的形成是由于在焊接热的作用下,原有的析出相固溶到 Al 基体中,冷却时形成了过饱和固溶区。该区域固溶浓度高,空位密集。Mg 和 Zn 原子在铝基固溶体偏聚形成一个 GP 区,放置一段时间后, Mg 和 Zn 原子进一步偏聚, GP 区聚集长大形成亚稳相 η' 相。 η' 相是 7020 铝合金的主要强化相,淬火区析出 η' 相的过程实质上进行自然时效强化。但由于自然时效进行的不够充分,基材人工时效后析出的 η' 相较之更为细小。过时效区温度较淬火区的低,强化相溶解不充分,只有少量固溶在基体中,同时晶格中的空位浓度也较低,在接下来的时效过程中, η' 相在较大的生长空间聚集长大、粗化。

2.4 微区 XRD 物相分析

图 5 所示为 7020 铝合金焊接接头的微区 XRD 物相分析结果,测试时的取点位置如图 5 所示,其中 A 位于焊缝区, B 位于熔合区, C 位于热影响区。由图 5 可知,焊缝区、熔合区以及热影响区内除了基体相外,没有发现其他明显的析出相。这主要是因为焊接过程中形成的 Al_3Zr 和 Al_6Mn 等许多微量相含量太低;热影响区和基材中, η' 相虽高度弥散分布,但其粒子平均直径约为 5~10 nm,因此,采用 X 射线衍射方法无法观察到它们明显的衍射峰。从图 5 还可以发现,熔合区和热影响区的衍射谱出现衍射双峰现象,而在焊缝区不存在这个现象。这主要是由于熔合区由焊丝和基材两种不同成分的固溶体组成,存在严重的化学不均匀性和物理不均匀性。而靠近焊缝的热影响区,焊接时温度略高或者接近于基材的熔点, Mg 和 Zn 原子固溶到 Al 基体中,冷却后偏聚形成 GP 区,引起晶格畸变。经过自然时效强化后, GP 区扩大有序化,其共格畸变区域也随之扩大,从而引起衍射峰部分偏移形成双峰。

2.5 焊接接头拉伸断口的 SEM 观察

图 6 所示为 7020 铝合金基材和焊接接头拉伸断口的 SEM 像。从图 6(a)和(b)中可以看出,两者断口均呈现韧性断裂的特征。图 6(a)中基材的断口形貌较均

匀,说明断裂过程比较均匀。从图 6(b)中的断口形貌中可以看出,焊接接头的拉伸断口上较均匀地分布着一些尺寸大小不同的气孔,气孔的存在减小了焊接接头的有效承载面积,造成应力集中,降低了强度和塑性,使得焊缝区成为最薄弱的环节。从图 6(c)和(d)中也可以看出,基体断口中的韧窝较大,且较深,而焊接断口的韧窝尺寸较小,且深度较浅,说明基材的塑性较焊接后的更好。

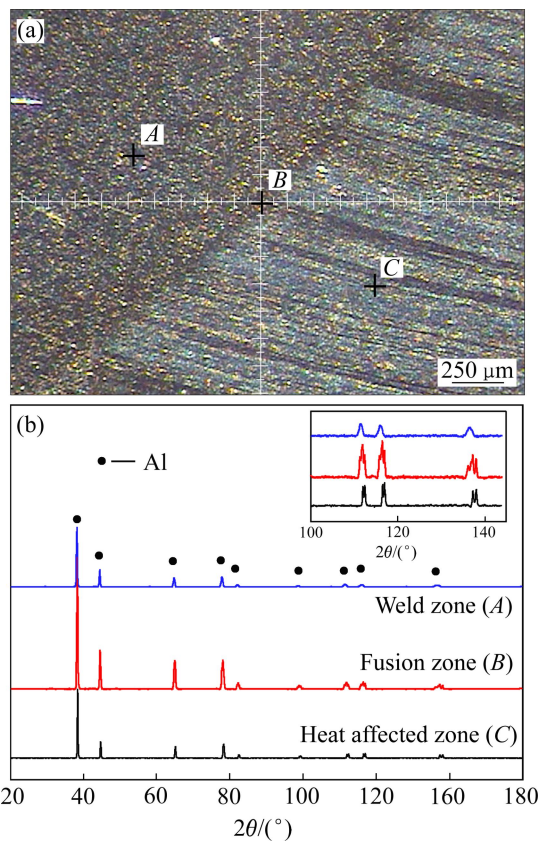


图 5 7020 铝合金焊接接头的 OM 像和微区的 XRD 谱
Fig. 5 OM image(a) of welded joint of 7020 aluminum alloy and XRD patterns in microstructure(b)

3 结论

1) 7020 铝合金 MIG 焊接接头的抗拉强度为 268 MPa, 屈服强度为 231 MPa, 伸长率为 4.5%, 焊接系数约为 0.7, 拉伸性能符合使用条件。

2) 焊接接头硬度曲线以焊缝中心为对称轴, 近似呈对称分布。焊缝宽度约 10 mm, 且焊缝中心硬度最低(67HV 左右)。距焊缝中心 15 mm 区域, 硬度随着距离焊缝中心的增大而升高, 达到 118HV 左右; 距离焊缝中心 15~30 mm 范围硬度逐渐下降, 最低值约为

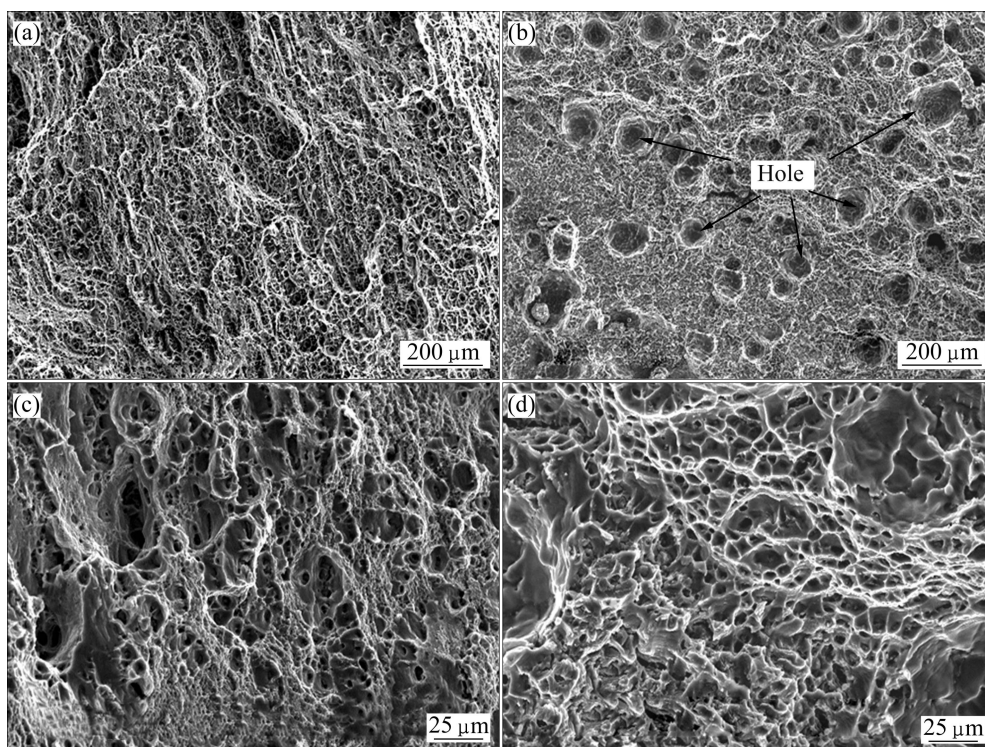


图6 7020 铝合金基材和焊接接头拉伸断口的 SEM 像

Fig. 6 SEM images of base metal ((a), (c)) and tensile fracture of welded joint ((b), (d)) of 7020 aluminum alloy

106HV; 最后硬度随着离焊缝中心距离的增大而升高, 到达基材后达到稳定状态(约为 123HV)。焊缝区的铸态组织导致其成为焊接接头最薄弱的位置, η' (MgZn₂) 相粗化导致热影响区内离焊缝中心约 30 mm 的位置形成硬度较低的软化区。

3) 7020 铝合金焊接接头的焊缝区为树枝状铸造组织; 熔合区靠近焊缝一侧为柱状晶, 靠近热影响区一侧为细小的等轴晶组织; 热影响区为发生了部分再结晶的纤维组织; 基材为明显的纤维组织。

REFERENCES

- [1] 栗山敬, 李伟平. 日本为国外开发的新型高速铁道车辆“efSET®”[J]. 国外铁道车辆, 2011, 48(4): 12-17.
KURIYAMA W, LI Wei-ping. The new type high speed rolling stock “efSET®” developed in Japan for foreign countries[J]. Foreign Rolling Stock, 2011, 48(4): 12-17.
- [2] ANDERSON T. New developments within the aluminum shipbuilding industry[J]. Svetsaren, 2003, 58(1): 3-5.
- [3] 乔英忍. 世界铁路动车组的技术进步、水平和展望[J]. 国外铁道车辆, 2007, 44(2): 1-7.
QIAO Ying-ren. Technology progress, level and prospects of railway multiple units in the world[J]. Foreign Rolling Stock, 2007, 44(2): 1-7.
- [4] 商宝川, 尹志民, 周 向, 何振波, 林 森. 固溶-时效对 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金板材组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(11): 2063-2069.
SHANG Bao-chuan, YIN Zhi-min, ZHOU Xiang, HE Zhen-bo. Effects of solution and aging on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(11): 2063-2069.
- [5] HASANNEJAD H, ALIOFKHAZRAEI S M. Effects of acetic acid on microstructure and electrochemical properties of nano cerium oxide films coated on AA7020-T6 aluminum alloy[J]. Rare Metals, 2009, 28(1): 98-101.
- [6] 金龙兵, 赵 刚, 冯正海, 路丽英. 高速列车用中强可焊 Al-Zn-Mg 合金材料[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(12): 47-51.
JIN Long-bing, ZHAO Gang, FENG Zheng-hai, LU Li-ying. Weld-able moderate strength Al-Zn-Mg alloy used for high speed train[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010, 38(12): 47-51.
- [7] OLAF E. Welded structures of the railway vehicles, railway technology international[M]. New York: Pergamon Press, 1992: 111-120.
- [8] MA T, OUDEN Q D. Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 266(1/2): 198-204.
- [9] GUR C H, YILD Z I. Non-destructive investigation on the effect of precipitation hardening on impact toughness of 7020

- Al-Zn-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 382: 395–400.
- [10] MOUSAVI M G, HERMANS M J M, RICHARDSON I M, den OUDEN G. Grain refinement due to grain detachment in electromagnetically stirred AA7020 welds[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2003, 8(4): 309–312.
- [11] CAM G, KOCAK M. Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded Al-alloy 7020[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(17): 7154–7161.
- [12] RAM G D J, MITRA T K, SHANKAR V, SUNDARESAN S. Microstructural refinement through inoculation of type 7020 Al-Zn-Mg alloy welds and its effect on hot cracking and tensile properties[J]. Journal of Material Processing Technology, 2003, 142: 174–181.
- [13] DUDZIK K. Mechanical properties of 5083, 5059 and 7020 aluminum alloys and their welded by MIG[J]. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2011, 17(3): 73–77.
- [14] DUDZIK K. Influence of joining method for hardness distribution in joints of AlZn₅Mg₁ alloy[J]. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2010, 17(4): 137–141.
- [15] ARES A E, GUEIJMAN S F, CARAM R, SCHVEZOV C E. Analysis of solidification parameters during solidification of lead and aluminum base alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(1): 319–327.
- [16] YELAGIN V I, ZAKHANOV V V, ROSTOVA T D. Aluminum alloys alloying with scandium[J]. Metal Sci Heat Treat, 1983, 25: 546.
- [17] 李慧中, 郭菲菲, 梁霄鹏, 李 洲. 焊丝成分对 2519 铝合金焊缝组织与性能的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 77–82.
- LI Hui-zhong, GUO Fei-fei, LIANG Xiao-peng, LI Zhou. The effects of welding wire composition on microstructure and properties of 2519 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 77–82.
- [18] 许良红, 田志凌, 彭 云, 张晓牧. 微量元素对高强铝合金焊缝组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(6): 959–966.
- XU Liang-hong, TIAN Zhi-ling, PENG Yun, ZHANG Xiao-mu. Effects of trace elements on microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy welds[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(6): 959–966.

(编辑 李艳红)