AZ41M镁合金TIG焊接头组织与性能研究

韩伟[1] 黄昌军[2] 唐伟能[2] 吴磊[2]

（1.长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心，长春 130006；2.宝钢金属有限公司技术中心，上海 200940）

摘要：为研究AZ41M镁合金钨极惰性气体保护（TIG）焊接头的组织演化规律与力学性能响应，采用交流TIG焊，对直径3 mm的AZ81焊丝与AZ41M板材进行对接焊接，在优化后的工艺条件下获得了成形良好、无明显外观缺陷且完全焊透的焊缝。通过金相显微观测、室温拉伸、弯曲测试及疲劳试验，系统表征了接头组织与性能。结果表明：焊接接头屈服强度为124 MPa，抗拉强度为231 MPa，延伸率为17.4%，强度达到母材的89.9%；接头顺利通过了180°面弯及背弯测试，塑性良好；接头疲劳极限为65.2 MPa，高周疲劳裂纹优先萌生于试样表面或近表面，疲劳裂纹扩展区呈现清晰放射状条纹特征。

关键词：镁合金 TIG焊接 弯曲性能 疲劳极限 显微组织

中图分类号：TG442 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260107

Study on Microstructure and Properties of AZ41M Magnesium Alloy TIG Welded Joints

Han Wei[1], Huang Changjun[2], Tang Weineng[2], Wu Lei[2]

(1. National Railway Passenger Car Engineering Research Center, Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130006;
2. Technology Center, Baosteel Metal Co., Ltd., Shanghai 200940)

Abstract: To systematically investigate the microstructural evolution and mechanical property response of AZ41M magnesium alloy TIG welded joints, alternating-current TIG welding is employed to perform butt welding on AZ41M sheets with 3 mm-diameter AZ81 filler wire. Sound welds with uniform formation, free of apparent surface defects and achieving full penetration, are acquired under optimized process parameters. The microstructure and mechanical properties of the joints are systematically characterized using optical microscopy, room-temperature tensile testing, bending testing, and fatigue testing. The results demonstrate that the welded joint yields a yield strength of 124 MPa, an ultimate tensile strength of 231 MPa, and an elongation of 17.4%, with its strength reaching 89.9% of the base metal. The joint successfully passes 180° face-bend and root-bend tests, indicating favorable ductility. The fatigue limit of the joint is determined as 65.2 MPa. High-cycle fatigue cracks preferentially initiate at or near the specimen surface, and the fatigue crack propagation zone exhibits clear radial striation features.

Key words: Magnesium alloy, TIG welding, Bending property, Fatigue limit, Microstructure

1 前言

在全球“双碳”目标与制造业绿色转型的背景下，轻量化已成为汽车、轨道交通及航空航天装备升级的核心技术路径。镁合金作为商用结构金属中密度最低的材料，兼具高比强度、高比刚度与优异的阻尼性能，在装备能效提升方面具有不可替代的优势[1-3]。我国镁资源储量与原镁产量均居世界首位，具备发展高性能镁合金产业的独特资源优势。突破镁合金工程化应用中的关键制造瓶颈，将资源优势转化为产业竞争力，对推动高端装备轻量化与制造业高质量发展具

作者简介：韩伟（1982—），男，学士学位，正高级工程师，研究方向为轨道交通车辆轻量化及电气系统集成。

通信作者：唐伟能（1979—），男，博士学位，正高级工程师，研究方向为镁合金加工成型技术。

基金项目：工信部新材料重大专项项目（2024ZD0601400）；中国宝武钢铁集团有限公司技术创新重点支持项目（B24BSEC070）。

参考文献引用格式：

韩伟，黄昌军，唐伟能，等. AZ41M镁合金TIG焊接头组织与性能研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(8)：8-13.

HAN W, HUANG C J, TANG W N, et al. Study on Microstructure and Properties of AZ41M Magnesium Alloy TIG Welded Joints[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 8-13.

有重要战略意义[4-6]。

焊接是镁合金构件集成制造的关键工艺,其接头质量直接决定了镁合金轻量化结构的可靠性与服役寿命。然而,镁合金的物理化学特性使其焊接面临诸多问题:熔点低、热导率高导致热输入难以精准调控,易引发焊缝及热影响区晶粒粗化;热膨胀系数大,焊接残余应力高,热裂纹敏感性显著;镁在高温下极易氧化生成高熔点MgO夹杂,且氢在液/固态镁中溶解度差异大,焊缝易形成气孔缺陷[7-8]。上述问题长期制约镁合金焊接结构的规模化应用。

在众多焊接方法中,镁合金钨极惰性气体保护(Tungsten Inert Gas,TIG)焊凭借优良的氩气保护效果与稳定的焊接过程,能够有效缓解镁合金的氧化问题,且焊缝成形美观、质量可控,是目前镁合金构件制造的首选工艺之一[9-11]。吴晓明[12]等研究了AZ31B镁合金TIG焊接头组织和性能,TIG焊焊缝区晶粒相对细小,晶界弥散分布着黑色β-$Mg_{17}Al_{12}$沉淀相,热影响区组织晶粒较母材有所长大。何炀[13]等研究了AZ31镁合金TIG焊接头的疲劳性能,发现焊接接头的疲劳强度远低于母材的疲劳强度,对接接头的疲劳裂纹萌生于焊缝表面的气孔位置。有研究者设计了一套可对焊缝进行激振的TIG焊装置[14],发现激振使AZ31镁合金的TIG焊缝熔合区的组织显著细化,第二相β-$Mg_{17}Al_{12}$的析出减少,焊缝区域显微硬度及试样的整体抗拉强度得到了提高。现有研究多集中于AZ31、AZ61等常见镁合金,针对AZ41M镁合金TIG焊接的研究相对较少。AZ41M镁合金作为一种综合性能更优的中强度变形镁合金,其Al含量介于AZ31镁合金与AZ61镁合金之间,兼具良好的塑性与强度,在汽车和轨道交通领域具有巨大的应用潜力,目前针对其TIG焊接性能的研究十分有限。

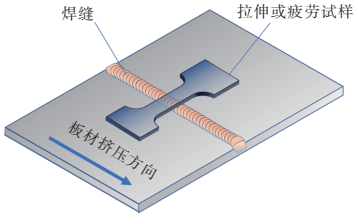
基于上述背景,本文采用AZ81焊丝对AZ41M镁合金进行交流TIG对接焊,系统研究接头显微组织特征、拉伸性能、弯曲塑性及高周疲劳行为,揭示组织与性能关联机制,为AZ41M镁合金焊接结构在汽车和轨道交通轻量化装备中的可靠应用提供试验依据与技术支撑。

2　试验材料与方法

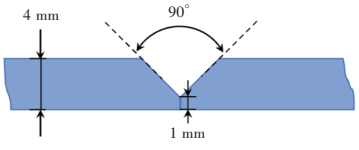
试验母材为挤压态的AZ41M镁合金板材,尺寸为170 mm×60 mm×4 mm。填充材料选用直径为3 mm的AZ81焊丝,母材与焊丝化学成分如表1所示。焊接保护气为99.999%高纯氩气,流量为15 L/min。焊接设备为OTC ADP400全数字IGBT逆变TIG焊机,采用交流模式手工施焊。试样沿挤压方向对接,坡口角度设计为90°、钝边宽度为1 mm,以获取垂直于挤压方向的力学性能试样,取样与坡口示意如图1所示。

表1　AZ41M板材及AZ81焊丝的化学元素(质量分数)%

元素	Al	Zn	Mn	Fe
AZ41M母材	3.793	0.51	0.332	0.003
AZ81焊丝	8.362	0.788	0.294	0.004
元素	Si	Cu	Ni	Mg
AZ41M母材	0.121	0.006	0.002	余量
AZ81焊丝	0.017	0.001	0.003	余量



(a)拉伸或疲劳取样示意



(b)焊接坡口示意

图1　AZ41M镁合金板焊接

为避免母材表面氧化膜对接头性能造成不利影响,焊前采用钢丝刷去除待焊区的氧化膜,再用丙酮擦拭去除表面油污及杂质。焊接电流分别选取105 A、110 A、115 A、120 A进行对比试验,结果表明:当焊接电流为105 A、110 A时,热输入不足,板材无法完全焊透;当电流为115 A时,焊缝正面成形均匀,熔合良好,背面轻微凸起,实现了优质单面焊接双面成形;当电流提升至120 A时,热输入过大,熔池稳定性降低,焊缝金属出现严重塌陷,最终造成板材烧穿。因此,确定115 A焊接电

流及对应参数为本试验的最佳工艺，如表 2 所示。

表 2 AZ41M 板材手工 TIG 焊最佳工艺参数

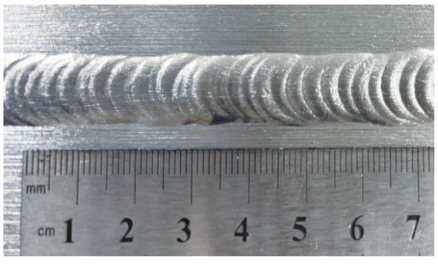
参数	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/mm·min^{-1}	保护气体流量/L·min^{-1}	焊丝直径/mm
数值	115	15.6	100~110	15	3.0

对使用最佳工艺的焊板切取试样，分别进行金相分析、拉伸测试、弯曲测试和疲劳测试。采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对抛光后的焊接接头进行腐蚀，利用基恩士 VHX-7000 数码显微镜进行金相观测。拉伸试验在 Zwick Z100 万能试验机上进行，拉伸速率为 2 mm/min。弯曲试验采用三思检测 EWZ106 立式弯曲试验机。疲劳性能测试采用 MTS 809 型拉扭一体动态试验机进行拉-压试验。利用蔡司 SIGMA 500 场发射扫描电镜（Scanning Electron Microscope，SEM）分析疲劳断口形貌。

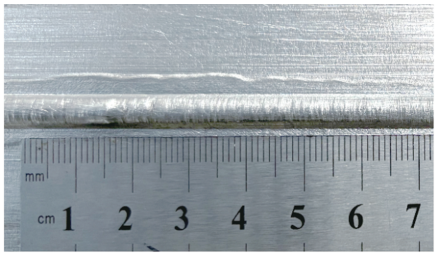
3 试验结果与分析

3.1 焊接接头外观

最佳工艺条件下的焊缝正反面形貌如图 2 所示。焊缝成形均匀连续，表面无气孔、裂纹、咬边、凹陷等缺陷，正面成形美观，背面轻微均匀凸起，实现单面焊接双面完全焊透，表明热输入匹配合理，焊接过程稳定。



（a）正面

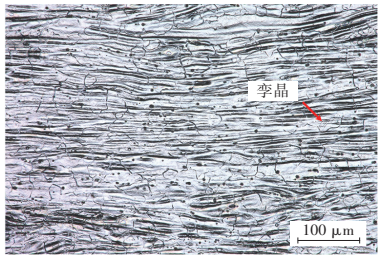


（b）背面

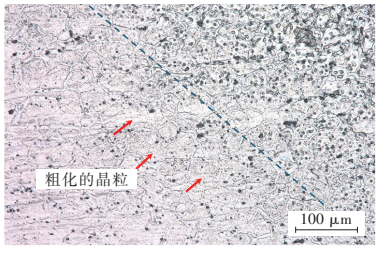
图 2 AZ41M 镁合金板焊缝

3.2 焊接接头金相显微组织

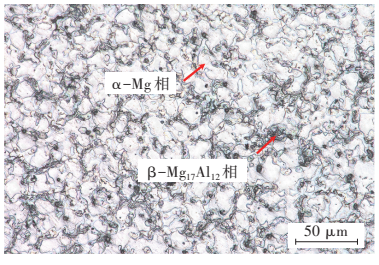
AZ41M 焊接接头典型显微组织如图 3 所示。图 3a 为 AZ41M 挤压板材垂直于挤压方向截面的显微组织，母材为典型的动态再结晶组织[15]，在一些晶粒内部出现了孪晶（箭头所示），第二相颗粒均匀分布于晶粒内部和晶界处，第二相颗粒可能为 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相和 Al_8Mn_5 相[16]。



（a）母材



（b）熔合区



（c）焊缝

图 3 AZ41M TIG 焊接头显微组织

图 3b 为焊接接头的熔合区，虚线为熔合线，为母材与焊缝的过渡区域。在熔合线右侧焊缝中的第二相颗粒显著多于熔合线左侧的热影响区，原因为 AZ81 焊丝 Al 含量更高，凝固过程中析出大量 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 金属间化合物，提升了第二相体积分数[17]。焊接热循环使熔合线附近的热影响区在焊接过程中被加热到接近熔点的温度，在这种高温下晶界的迁移能力急剧增强，加上 AZ41M 镁合金再结晶温度较低，晶界扩散迁移能力强，热影响区晶粒易发生明显粗化[18]。图 3c 为焊缝组织，由 α-Mg 相和 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相组成，不连续的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 共晶相位于晶界处。

3.3 焊接接头拉伸性能

采用高精度电火花线切割机床制备焊接接头拉伸试样,为消除焊缝余高对应力分布的影响,使用SiC砂纸逐级打磨至焊缝表面与母材表面齐平。试样制备及测试过程依据ISO 6892-1: 2019《Metallic Materials—Tensile Testing Part 1: Method of Test at Room Temperature》执行。对焊接接头进行拉伸性能测试,共测试3个样品,结果如表3所示,焊接接头的平均屈服强度为124 MPa,平均抗拉强度为231 MPa,平均断后伸长率为17.4%。焊接接头抗拉强度达到了母材的89.9%。拉伸试样均断于焊缝位置,主要与焊缝晶粒相对粗大、晶界存在大量β-$Mg_{17}Al_{12}$脆性共晶相有关。

表3 AZ41M母材及焊接接头的拉伸性能

试样		抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
焊接接头	试样1	121	229	17.2
	试样2	128	237	18.6
	试样3	124	226	16.5
	平均值	124	231	17.4
母材		141	257	19

3.4 焊接接头弯曲性能

对AZ41M镁合金对接焊接接头进行三点弯曲测试,试样制备与试验过程遵循ISO 5173: 2023《Destructive Tests on Welds in Metallic Materials—Bend Tests》执行。弯曲试样尺寸为180 mm×24 mm×4 mm,制备时将焊缝正反面余高加工至与母材表面齐平,确保无凹陷、毛刺等表面缺陷。同时对试样所有长度方向边缘做倒圆角处理,以消除应力集中,避免试验过程中发生非预期的早期开裂。试验采用直径25 mm的圆柱形压头与支撑辊,两支撑辊筒间距设定为35 mm,压头以2 mm/min的恒定速率加载,将试样弯曲至180°。试验合格判定标准为:试样弯曲至规定角度后,受拉表面无长度大于3 mm的裂纹。

试验结果如表4所示,所有试样经180°弯曲后均未发生断裂,焊接接头区域无肉眼可见裂纹。面弯和背弯试样各3件试样全部合格,弯曲角度均达到180°。试验结果表明,优化工艺制备的AZ41M焊接接头塑性变形能力优异,满足工程结构对弯曲成形性的要求。

表4 弯曲试验结果

弯曲方向	试样	弯曲角/(°)	结果
面弯	试样1	180	合格
	试样2	180	合格
	试样3	180	合格
背弯	试样4	180	合格
	试样5	180	合格
	试样6	180	合格

3.5 焊接接头疲劳性能

根据ISO 1099: 2017《Metallic Materials—Fatigue Testing—Axial Force-Controlled Method》制备AZ41M TIG焊接疲劳试样,使用线切割从焊接试板中切取试样,去除焊缝余高后用砂纸打磨,保证试样表面光滑。对试样进行疲劳测试,设置应力比R=-1,加载频率为20 Hz,测试波形使用正弦波,试验结果如表5所示。

表5 AZ41M镁合金疲劳试验结果

试样编号	应力幅值σ_a/MPa	循环次数N/次	断裂位置
1	96	30 605	工作段
2	96	53 439	工作段
3	96	79 817	工作段
4	80	340 968	工作段
5	80	225 202	工作段
6	80	539 898	工作段
7	75	703 549	工作段
8	75	1 654 534	工作段
9	75	1 355 667	工作段
10	75	824 939	工作段
11	70	2 546 787	工作段
12	70	4 567 835	工作段
13	70	1×10^7	未断
14	70	6 789 327	工作段
15	64	1×10^7	未断
16	64	1×10^7	未断
17	64	1×10^7	未断

将测试点拟合S-N曲线,以1×10^7次循环下的循环应力为疲劳极限,最终确定AZ41M镁合金TIG焊对接接头拉-压疲劳试验的中值S-N曲线,

如图 4 所示。在室温条件下，对接接头指定寿命为 1×10^7 次循环的疲劳极限为 65.2 MPa，为抗拉强度的 0.28 倍，具备良好的高周疲劳抗力。

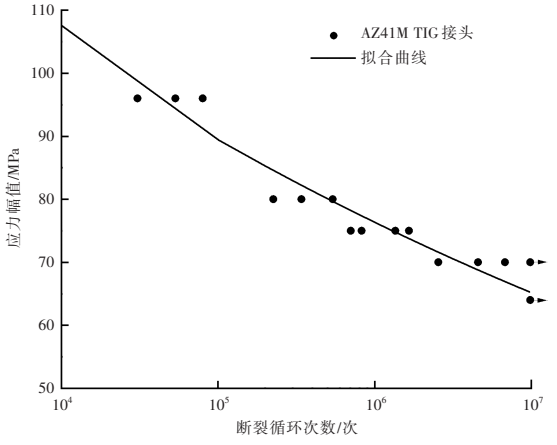
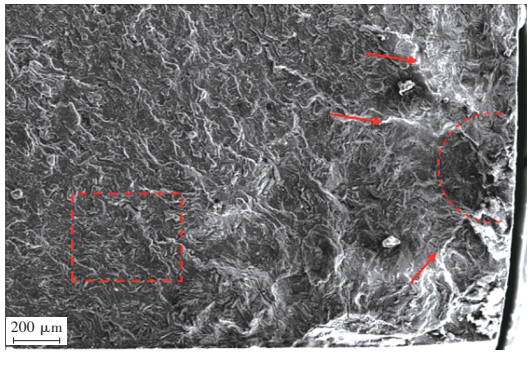


图 4 AZ41M 镁合金 TIG 焊对接接头 *S*–*N* 曲线

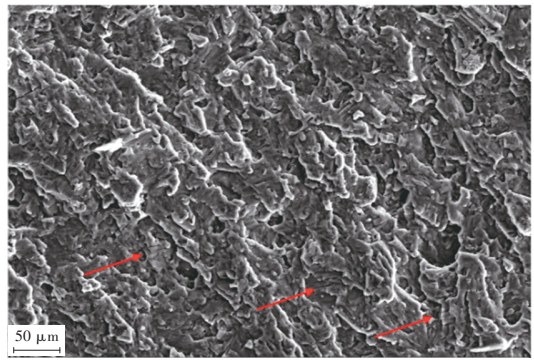
3.6 疲劳断口分析

图 5 所示为最大应力为 70 MPa 条件下的 AZ41M 镁合金 TIG 焊接头疲劳断口形貌，试样断裂于焊缝区，从宏观形貌可以看出，断口展现出典型的疲劳断裂特征，可清晰划分为 3 个区域：疲劳源区（图 5a 红色虚线圈所示）、疲劳裂纹扩展区（图 5b）和瞬时断裂区（图 5c）。疲劳源区位于试样表面或近表面，形貌相对粗糙，是裂纹萌生的起始点。焊缝表面或近表面存在气孔、夹杂等冶金缺陷，诱发局部应力集中，促使裂纹优先萌生[19]。

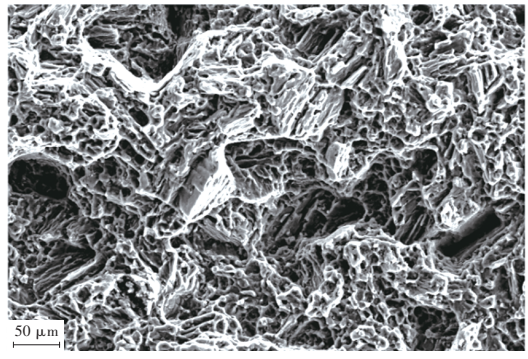
如图 5a 所示，疲劳源区向外延伸为疲劳裂纹扩展区，以疲劳源区为中心呈放射状分布的条纹（如图 5a 箭头所示），该区域整体较为平整。图 5b 所示为图 5a 红色虚线框的放大图，该区可观察到平行规整的疲劳条带（如图 5b 箭头所示），对应单次载荷循环下的裂纹扩展行为。



（a）疲劳源区



（b）疲劳裂纹扩展区



（c）瞬时断裂区

图 5 高周疲劳断裂试样的断口形貌

远离疲劳源的区域为瞬时断裂区（图 5c），当裂纹扩展至临界尺寸后，试样剩余截面无法承受外加载荷，发生快速失稳断裂。该区域断口粗糙，表面形貌起伏大，与裂纹扩展区形貌分界明显，存在少量韧窝，以解理断裂为主。

4 结论

a. 采用交流 TIG 焊搭配 AZ81 焊丝可获得成形优良、完全焊透且无明显外观缺陷的 AZ41M 镁合金焊接接头。焊缝组织由 α–Mg 相和 β–$Mg_{17}Al_{12}$ 相组成，不连续的 β–$Mg_{17}Al_{12}$ 共晶相位于晶界处。焊接过程中的热循环作用使热影响区晶粒出现明显粗化现象。与母材相比，焊缝区第二相含量明显增加，这主要归因于 AZ81 焊丝中较高的铝元素含量。

b. 拉伸力学性能测试结果显示，焊接接头的平均屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为 124 MPa、231 MPa、17.4%。焊接接头的抗拉强度达到母材的 89.9%，表现出良好的强度匹配性。

c. 以 ISO 5173: 2023 为依据，采用直径 25 mm 的圆柱形压头与支撑辊，AZ41M 镁合金 TIG 焊接

头通过了180°角面弯和背弯弯曲试验,焊接接头弯曲性能良好。

d. 应力比*R*=−1条件下,AZ41M镁合金TIG接头疲劳极限为65.2 MPa。高周疲劳裂纹萌生于试样表面或近表面缺陷处,疲劳裂纹扩展区呈现典型放射状条纹与疲劳条带特征。

参考文献:

[1] SONG J F, SHE J, CHEN D L, et al. Latest Research Advances on Magnesium and Magnesium Alloys Worldwide[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 1−41.

[2] SONG J F, CHEN J, XIONG X M, et al. Research Advances of Magnesium and Magnesium Alloys Worldwide in 2021[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(4): 863−898.

[3] AMANDA L, RAJA K M, DOHERTY R D, et al. Influence of Deformation Twinning on Static Annealing of AZ31 Mg alloy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(16): 5966−5978.

[4] 谭军, 王芳磊, 蒋斌, 等. 镁合金结构材料应用现状与展望[J]. 自然杂志, 2023, 45(2): 93−105.

[5] 王亦楠. “镁经济”前景广阔,我国应抓住引领机遇[J]. 中国经济周刊, 2024(8): 100−103.

[6] 刘艳飞, 张艳, 于汶加, 等. 全球原镁需求预测及中国合理产能分析[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 1047−1058.

[7] MAJID P. Critical Review on Fusion Welding of Magnesium Alloys: Metallurgical Challenges and Opportunities[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2021, 26(8): 559−580.

[8] 马孝斌, 朱厚国. 镁合金及其焊接技术[J]. 上海有色金属, 2008, 29(4): 184−189+193.

[9] 陈怡, 郭龙涛, 祁同福, 等. 镁合金铸件氦−氩保护TIG焊修复工艺[J]. 焊接学报, 2021, 42(9): 35−41+99.

[10] 冯吉才, 王亚荣, 张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. 中国有色金属学报, 2005(2): 165−178.

[11] 苏允海, 林金梁, 蒋焕文, 等. 磁场下镁合金A−TIG接头成形性及显微组织分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 13−16+113.

[12] 吴晓明, 陈丽园, 景锋, 等. AZ31B镁合金TIG焊接接头组织与性能[J]. 电焊机, 2018, 48(3): 246−249.

[13] 何炀, 温军, 王长柳. AZ31镁合金TIG焊接接头疲劳性能试验研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(9): 173−176.

[14] TONG W, SHI Y L, SHI C, et al. Influence of High Frequency Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of TIG Welding Joints of AZ31 Magnesium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2): 397−404.

[15] 王凌浩, 杨斌, 伍先明, 等. 变形参数对挤压态AZ41M镁合金热变形行为和组织演变的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(1): 50−57.

[16] WANG S R, MA R, YANG L Y, et al. Precipitates Effect on Microstructure of As−Deformed and As−Annealed AZ41 Magnesium Alloys by Adding Mn and Ca[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(9): 3060−3065.

[17] 张广俊, 龙思远, 曹凤红. Al含量对AZ系镁合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(9): 848−850.

[18] 宰乐, 童鑫, 王云, 等. 低合金化镁合金熔化焊接组织调控的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(10): 3193−3208.

[19] 宋哲, 吴圣川, 胡雅楠, 等. 冶金型气孔对熔化焊接7020铝合金疲劳行为的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(8): 1131−1140.