

AZ31B 镁合金 CMT Cycle Step 焊接接头组织和性能研究

黄昌军¹ 唐伟能¹ 吴磊¹ 韩明明²

(1. 宝钢金属有限公司技术中心, 上海 200940; 2. 伏能士智能设备(上海)有限公司焊接业务部, 上海 200940)

摘要: 为了研发镁合金新的焊接技术, 采用冷金属过渡循环步进(CMT Cycle Step)工艺, 以AZ81为焊丝焊接AZ31B镁合金挤压板材, 通过光学显微镜、维氏硬度计、拉伸试验机、扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)分析等手段, 研究了焊接接头的显微组织、力学性能及元素分布。试验结果表明: 焊缝表面形成了均匀且规则的鱼鳞纹; 焊缝区主要由 α -Mg相和晶界处不连续的共晶组织组成, Zn元素在母材、熔合区及焊缝区没有明显的浓度差异, Al元素在焊缝区域的浓度明显高于母材; 焊缝区域硬度最高, 热影响区(HAZ)中出现了硬度明显降低的软化现象; 焊接接头抗拉强度接近母材; 拉伸断裂于热影响区, 为纯剪切断面, 断面形貌表现出韧性断裂特征。

关键词: 镁合金 CMT Cycle Step工艺 金相组织 力学性能 断面形貌

中图分类号: TG444

文献标志码: B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240407

Research on the Microstructure and Properties of AZ31B Magnesium Alloy CMT Cycle Step Welded Joint

Huang Changjun¹, Tang Weineng¹, Wu Lei¹, Han Mingming²

(1. Technology Center, Baosteel Metal Co., Ltd., Shanghai 200940; 2. Welding Business Unit, Fronius Intelligent Equipment (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200940)

Abstract: This paper investigates the microstructure, mechanical properties and elemental distribution of welded joints using the CMT Cycle Step process with AZ81 filler wire for AZ31B magnesium alloy extruded plates to develop new welding technologies for magnesium alloys. Comprehensive characterization is performed through optical microscopy, Vickers hardness tester, tensile testing machine, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). The experimental results demonstrate that uniform and regular fish-scale patterns are formed on the weld surface. The weld zone primarily consists of α -Mg phase with discontinuous eutectic structures at grain boundaries. While Zn element distribution shows no significant concentration difference across the base metal, fusion zone, and weld zone, Al element exhibits markedly higher concentration in the weld region compared to the base material. The maximum hardness is observed in the weld zone, with a distinct softening phenomenon characterized by significant hardness reduction in the Heat-Affected Zone (HAZ). The tensile strength of the welded joint reaches levels comparable to the base material. Tensile fractures occur in the HAZ, presenting pure shear fracture surfaces with morphological features indicative of ductile fracture characteristics.

Key words: Magnesium alloy, CMT Cycle Step process, Metallographic structure, Mechanical properties, Fracture morphology

1 前言

镁合金作为最轻的金属结构材料, 具有较高

的比强度和比刚度、良好的阻尼性能、可循环再利用性、较好的电池屏蔽性和优异的加工性能, 在航空航天、交通运输、3C电子、军工和能源等领域展

作者简介: 黄昌军(1985—), 男, 工程师, 硕士学位, 研究方向为镁合金焊接。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3701100); 上海市科技创新项目资助项目(XTCX-KJ-2022-2-11)。

参考文献引用格式:

黄昌军, 唐伟能, 吴磊, 等. AZ31B 镁合金 CMT Cycle Step 焊接接头组织和性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2025(6): 15-20.

HUANG C J, TANG W N, WU L, et al. Research on the Microstructure and Properties of AZ31B Magnesium Alloy CMT Cycle Step Welded Joint[J]. Automobile Technology & Material, 2025(6): 15-20.

现出广阔的应用前景^[1-3]。然而,镁合金在焊接过程中易产生氧化物夹杂、焊缝下塌及微裂纹等缺陷,严重制约了镁合金的推广^[4]。冷金属过渡焊(Cold Metal Transfer, CMT)技术是以熔滴短路过渡为基础的改进型熔化极气体保护焊,具有热输入量低、熔敷率高以及焊接稳定性好的优点,在有色金属焊接中应用广泛^[5]。

吴晓明^[6]等对 AZ31B 镁合金进行了钨极惰性气体保护(Tungsten Inert Gas, TIG)焊研究,发现焊接接头平均抗拉强度达到 217 MPa,为母材的 87.96%,且焊接接头弯曲性能良好。Hu^[7]等利用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机及电信号采集系统研究了 AZ31B 焊丝 CMT 电弧特性,揭示了焊接电弧在熔池和熔滴之间呈不对称的钟形,以及直流(Direct Current, DC)-CMT 不同送丝速度下的稳定焊接条件。穆森^[8]等采用交流 CMT 焊接 AZ31B 轧制板材,以直径为 1.2 mm 的 AZ31 作为填充焊丝,获得了平直均匀的焊缝,并通过高速摄像机与焊接信号采集系统观察了焊接过程,发现交流 CMT 焊接为短路过渡,且熔化等量焊丝时负半波能量仅为正半波能量的 36%。

冷金属过渡循环步进(CMT Cycle Step)工艺作为一种在传统 CMT 基础上发展而来的技术,不仅能够精确控制 Cycle Step 内 CMT 循环熔滴的数量,还能设置熔滴间的间隔时间,从而实现极低的热输入^[9]。目前,将该技术应用于镁合金焊接的报道较少,本文拟采用 CMT Cycle Step 工艺,以 Al 元素质量分数较高的 AZ81 为焊丝,研究对 AZ31B 镁合金的焊接效果,探讨 AZ31B 镁合金焊接接头显微组织和力学性能。

2 试验材料与方法

本文焊接设备采用 Fronius 公司的 TPS 400i 焊机且具备 CMT Cycle Step 工艺许可,配套使用 Yaskawa 公司的 AR2010 型焊接机器人系统。在焊接过程中,采用纯度为 99.99% 的氩气作为保护气体,流量为 24 L/min,以充分保护焊缝区域,避免氧化和污染,确保焊接质量。

试验材料选用尺寸为 200 mm×100 mm×4.2 mm 的挤压态 AZ31B 镁合金板材,填充焊丝选用 AZ81 焊

丝,直径为 1.2 mm,构成母材及填充焊丝的化学元素如表 1 所示。在试验准备阶段,首先对 2 片板料的拼接处进行机加工,形成 70° 的 V 形坡口。去除板料距离拼接部位 20 mm 内的表层氧化皮,并用酒精擦拭去除杂质,确保焊接质量。为减小变形并更加精确地控制焊缝间隙,采用自制试验夹具,将 2 片板料固定成对接接头,确保焊缝间隙精确控制在 1.2 mm。在对接焊接时,焊缝长度方向与板料的挤压方向保持一致。

表 1 AZ31B 母材及 AZ81 焊丝化学元素(质量分数) %

元素	Al	Zn	Mn	Fe
AZ31B 母材	3.190	0.810	0.330	0.003
AZ81 焊丝	8.310	0.988	0.294	0.004
元素	Si	Cu	Ni	Mg
AZ31B 母材	0.121	0.006	0.001	余量
AZ81 焊丝	0.010	0.001	0.002	余量

通过大量工艺调试试验,确定了表 2 所示的工艺参数,获得了单面焊接双面成型的良好效果。焊接完成后,去除焊接过程中产生的焊渣和飞溅物。为对焊接接头的组织进行金相分析,使用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对焊缝进行腐蚀,然后使用基恩士 VHX-7000 金相显微镜进行观察。硬度测试采用 Buehler VH1102 维氏硬度机,载荷为 1.96 N,保持时间为 10 s。

表 2 CMT Cycle Step 工艺焊接参数

参数	送丝速度 /m·min ⁻¹	焊接电流/A	熔滴数量/个	间隔时间/s	焊接速度 /mm·min ⁻¹	间隙/mm
数值	10.6	176	10	0.11	400	1.2

采用 Zwick Z100 材料试验机,以 1 mm/min 的拉伸速率对试样进行拉伸试验,以评估焊接接头的力学性能。试样拉伸断裂后,采用蔡司热场发射扫描电镜 SIGMA 500 对断口形貌进行分析,同时,为精确分析化学成分,采用 EDAX EDS 设备进行焊缝的能谱分析。

3 试验结果与分析

3.1 接头组织分析

焊缝的外观形貌如图 1a 所示,表面形成了较

为规则鱼鳞纹,无咬边、气孔、裂纹等明显缺陷,图 1b 为焊缝截面,焊缝背呈水滴状隆起。

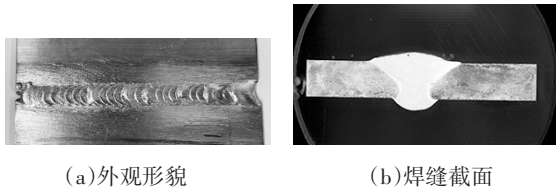


图 1 CMT Cycle Step 焊缝

图 2 为 AZ31B 的 CMT Cycle Step 焊接接头金相显微组织,其中,图 2a 为焊缝中心区域,其放大图像如图 2b 所示。在焊缝区域中,可观察到细小且均匀的等轴晶,此外,焊缝中心区域还存在大量共晶组织,多以不连续的网状结构沿等轴晶的晶界处分布,这与 Liu^[10]所研究的情况相吻合。同时,焊缝区还散布有细小的颗粒状析出相,零星分布在晶粒内部或晶界处。

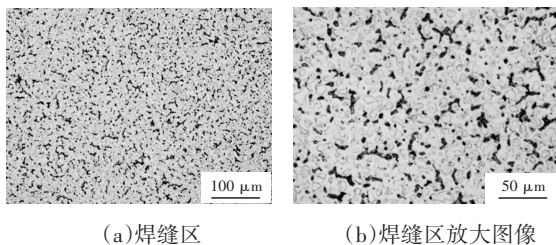


图 2 AZ31B CMT Cycle Step 焊接接头金相显微组织

在焊接过程中,由于冷却速度非常快,合金以较高速度结晶,导致结晶过程为非平衡状态,最终形成了远离平衡态的组织结构。特别是在 L 相到 α 相的转变过程中, α -Mg 中的 Al 元素未能扩散均匀,在尚未凝固的液相中富集,并超过了溶解度极限,进而在凝固组织中形成共晶结构。

图 3 为熔合区显微组织,其左侧为热影响区,右侧为焊缝区。在熔合区附近的焊缝中,未观察到明显的柱状晶组织,在左侧的热影响区内,可明显观察到晶粒长大,同时第二相颗粒也出现了粗化的迹象。这是由于焊接热循环中,组织受过热影响,其温度远高于母材的再结晶温度,导致晶界发生迁移,进而长大。

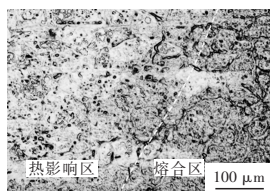


图 3 热影响区及熔合区

图 4 为 AZ31B 母材的显微组织,母材为热挤压的 AZ31B 型材,其微观组织均匀,晶粒尺寸约为 20~50 μm 。母材的晶粒内以 α -Mg 为基体,第二相颗粒 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相弥散分布在晶粒内部和晶界处。

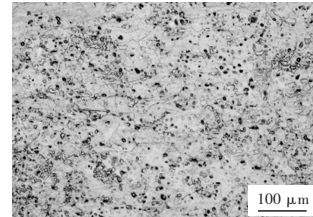


图 4 AZ31B 母材显微组织

当焊缝中熔池凝固时,晶粒形核首先以非自发方式依附于熔合区附近加热至半熔化状态的母材晶粒表面。由于使用了 AZ81 焊丝,其较高的 Al 含量使焊丝熔滴与母材混合后形成的熔池具有更高的溶质浓度,导致固-液界面前的液相出现更大的成分过冷。同时,镁合金的高热导率促使焊接产生的热量迅速传导,熔池中形成更高的冷却速率,从而促使结晶形态向等轴晶转变。

图 5 为焊缝区共晶组织及基体元素分布情况,共晶组织中 Mg 元素浓度相对较低,Al 元素浓度相对较高,Zn 元素在共晶组织与基体中的浓度没有明显差别。Liu 对焊缝区进行了分析,认为该共晶组织主要为 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相^[11]。

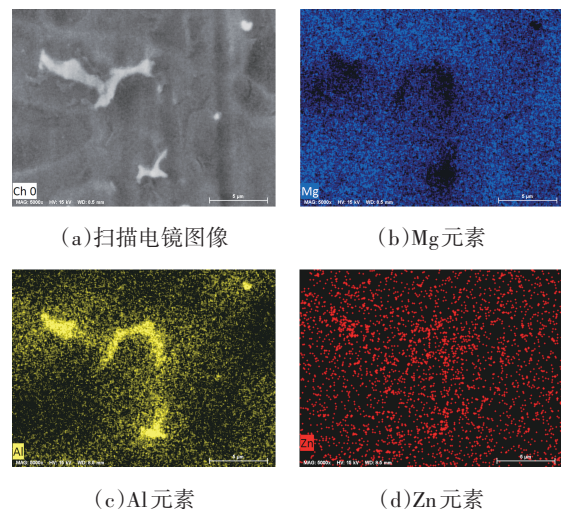


图 5 共晶组织主要元素浓度分布

图 6 为焊缝熔合区能谱仪 (Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy, EDS) 面扫描分析结果,可知 Mg、Al 及 Zn 元素在熔合区的浓度。Mg 元素和 Zn 元素在母材、熔合区及焊缝区浓度没有明显差异。Al 元素在焊缝区域的浓度显著高于母材,母

材中存在零星高亮的Al元素聚集区,结合图4a分析,该高亮的聚集区很可能为 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 析出相颗粒。

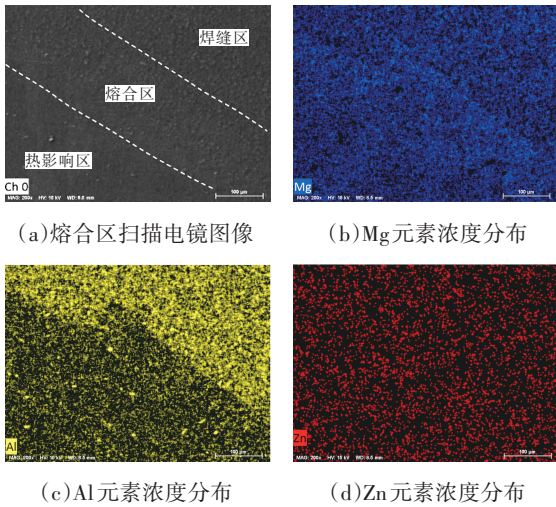


图6 熔合区EDS面扫描结果

3.2 焊接接头的硬度分布

图7为焊接接头的硬度分布,由图7可知,焊缝中心区域的硬度最高,平均硬度为62.8 HV,随着位置逐渐靠近熔合区,硬度值急剧下降。在靠近熔合区的热影响区内,出现了1个硬度明显降低的软化区,其硬度值约为45.4 HV,明显低于母材(52.3 HV)。整体而言,焊接接头的硬度分布呈中间焊缝区高、两边低的趋势。焊缝区获得了更加细小的等轴晶组织,由于镁合金强度对晶粒尺寸非常敏感,且Hall-Petch关系式中镁合金具有较高的晶界强化系数,因此,晶粒的细化有效提高了焊缝区的强度^[12]。相反,在焊接热循环作用下,热影响区的晶粒发生粗化,局部区域强度降低,从而出现焊接接头软化区。此外,焊接过程中热输入量对焊缝区和热影响区晶粒尺寸的大小有影响^[13]。

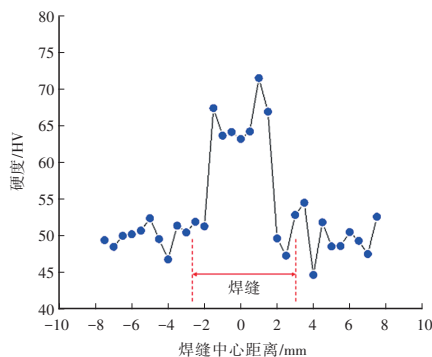


图7 AZ31B CMT Cycle Step 焊接接头硬度分布

3.3 焊接接头拉伸性能

图8为AZ31B母材及焊接接头的应力-应变曲线,其拉伸性能数据如表3所示。采用CMT Cycle Step工艺焊接AZ31B镁合金,并以AZ81为填充焊丝,所得焊接接头的抗拉强度为264.4 MPa,母材抗拉强度为266.4 MPa,焊接接头的抗拉强度达到母材强度的99.2%,与母材几乎相当。此外,焊接接头的屈服强度为99.6 MPa,延伸率为12.8%。

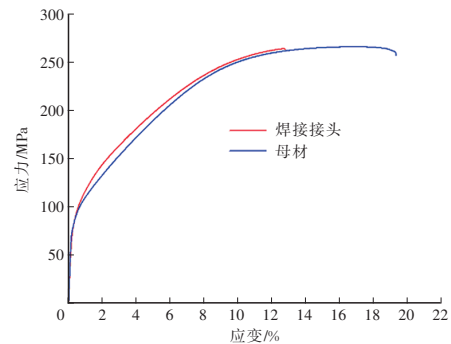


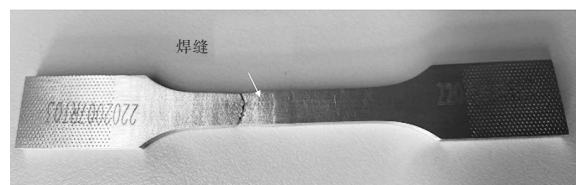
图8 AZ31B母材及焊接接头应力-应变曲线

表3 AZ31B母材及焊接接头力学性能

试样类型	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率/%
AZ31B母材	266.4	93.2	19.3
焊接接头	264.4	99.6	12.8

3.4 断口形貌分析

对焊接接头进行拉伸测试,断裂发生在焊接接头焊缝附近的热影响区,如图9a所示,在热影响区的断裂部位观察到明显的颈缩纹理,断口面与拉伸轴向约成45°,如图9b所示。试样表面断口处的明显颈缩是塑型变形的重要标志。由于镁合金具有较低的抗剪切强度极限,在拉伸力作用下,45°平面上的切应力达到最大,因此,断裂沿此平面发生,形成纯剪切断口。拉伸断裂出现在热影响区,说明该区域为焊接接头的薄弱位置,焊接热循环是导致热影响区成为薄弱位置的根本原因。



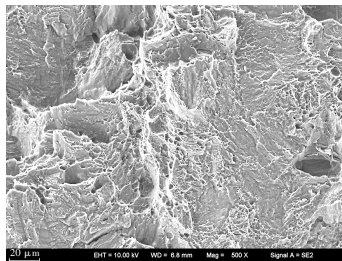
(a)试样断裂于热影响区



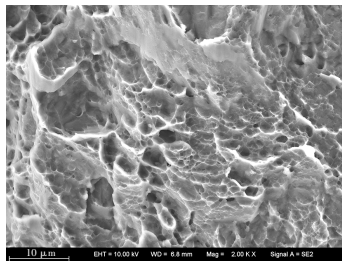
(b)拉伸断后试样断裂面角度成近似45°

图9 拉伸断裂试样

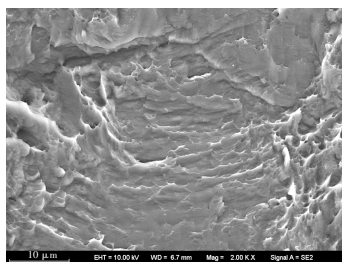
图10a为焊接接头拉伸试样断裂后的断口,存在大量被拉断的纤维“小峰”形貌,在纤维“小峰”顶部观察到的韧窝如图10b所示,可观察到明显的韧性断裂特征,韧窝是材料在微区范围内发生塑性变形时产生的显微空洞,这些空洞经过形核、长大和聚集,最终相互连接导致断裂,并在断口表面留下的痕迹。韧窝特征的形成机理为空洞聚集,即材料内部分离形成空洞,在滑移的作用下空洞逐渐长大并与其他空洞连接,形成韧窝断口。纤维“小峰”的腰部或底部观察到的台阶纹理是在应力作用下滑移系滑移的结果,如图10c所示。



(a)断口总体形貌



(b)韧窝



(c)台阶纹理

图10 拉伸试样断口形貌

4 结论

a. AZ31B 镁合金采用 CMT Cycle Step 工艺焊接后,接头焊缝区呈现细小的等轴晶组织,且存在大量共晶组织,这些共晶组织多以不连续的网状结构分布于等轴晶晶界处。同时,焊接接头的热影响区晶粒出现明显的粗化现象。

b. 元素分布方面,Zn 元素在母材、熔合区及焊缝区之间的浓度无明显差异,而 Al 元素在焊缝区域的浓度显著高于母材。

c. 焊缝中心区域的硬度最高,平均硬度达到 62.8 HV,随着靠近熔合区,硬度值急剧下降。热影响区出现了硬度明显降低的软化区,其硬度值约为 45.4 HV,明显低于母材(52.3 HV)。

d. 采用 CMT Cycle Step 工艺,以 AZ81 作为填充焊丝焊接 AZ31B 镁合金,所得焊接接头的抗拉强度为 264.4 MPa,强度达到母材的 99.2%。

e. 焊接接头在拉伸试验中于热影响区发生断裂,表现为纯剪切断裂模式,断口存在大量被拉断的纤维“小峰”形貌,其顶部布满大量韧窝,显示出明显的韧性断裂特征,此外,在纤维“小峰”的腰部或底部观察到断裂台阶纹理。

参考文献:

- [1] SONG J, SHE J, CHEN D, et al. Latest Research Advances on Magnesium and Magnesium Alloys Worldwide[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 1-41.
- [2] ZHANG H, HU S, WANG Z, et al. The Effect of Welding Speed on Microstructures of Cold Metal Transfer Deposited AZ31 Magnesium Alloy Clad[J]. Materials and Design, 2015, 86(5): 894-901.
- [3] ZHANG Z D, LIU L M, SONG G. Welding Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy Using DC-PMIG Welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 315-322.
- [4] 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.
- [5] BALASUBRAMANIAN M, CHOUDARY M V, NAGARAJA A, et al. Cold Metal Transfer Process -A Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33(1): 543-549.
- [6] 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.

- [7] HU S, ZHANG H, WANG Z, et al. The Arc Characteristics of Cold Metal Transfer Welding with AZ31 Magnesium Alloy Wire[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24: 298–306.
- [8] 穆森, 刘丽敏, 张瑞英, 等. AZ31B 镁合金薄板交流 CMT 焊能量分配与接头力学性能[J]. *焊接技术*, 2014, 43(11): 20–23+6.
- [9] PENG M, LIU H, LIANG Y, et al. CMT Welding–Brazing of Al/Steel Dissimilar Materials Using Cycle–Step Model[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 1267–1280.
- [10] LIU L, DONG C. Gas Tungsten–Arc Filler Welding of AZ31 Magnesium Alloy[J]. *Materials Letters*, 2005, 60(17): 2194–2197.
- [11] LIU L M, ZHANG Z D, SONG G, et al. Mechanism and Microstructure of Oxide Fluxes for Gas Tungsten Arc Welding of Magnesium Alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(3): 649–658.
- [12] TODA–CARABALLO I, GALINDO–NAVA E I, RIVERA–DIAZDEL–CASTILLO P E J. Understanding the Factors Influencing Yield Strength on Mg Alloys[J]. *Acta Materialia*, 2014, 75: 287–296.
- [13] 刘宝栓, 蒋莹龙, 李龙, 等. AZ31B 镁合金型材 TIG–MIG 复合焊接头的组织与力学性能[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(23): 16–18+22.