

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.03.008

引用格式:童小山,黄佳欣,金希红,等.镁合金MIG焊研究现状[J].重庆大学学报,2026,49(3):84-93.



镁合金MIG焊研究现状

童小山¹,黄佳欣²,金希红¹,冯旭辉²,王阮玉²,谢娜²,彭建²

(1. 中车株洲电力机车有限公司,株洲 412001; 2. 重庆大学材料科学与工程学院国家镁合金材料工程技术研究中心,重庆 400044)

摘要: 熔化极惰性气体保护焊(metal inert gas, MIG)具有熔敷率大、热效率高、易于实现自动化高效生产等优点。镁合金因比强度高、阻尼性能好等优点,在交通工具、航空航天等行业具有广泛的应用前景,而MIG焊是镁合金适用的焊接方法,已有大量的研究和技术开发。介绍了镁合金MIG焊接的研究现状,对其熔滴过渡方式、显微组织和MIG复合焊等相关研究进行了综述,并展望了镁合金MIG焊的未来研究方向。

关键词: 熔化极惰性气体保护焊(MIG);镁合金;MIG-复合焊;焊接接头

中图分类号: TG444.73

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)03-084-10

Research status of MIG welding of magnesium alloys

TONG Xiaoshan¹, HUANG Jiaxin², JIN Xihong¹, FENG Xuhui², WANG Ruanyu²,
XIE Na², PENG Jian²

(1. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, P. R. China; 2. National Magnesium Alloy Materials Engineering Technology Research Center, School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Metal inert gas (MIG) welding provides advantages such as a high deposition rate, high thermal efficiency, and suitability for automated and efficient production. Due to their high specific strength and good damping performance, magnesium alloys have broad application prospects in transportation, aerospace, and other industries. MIG welding is considered a suitable joining method for magnesium alloys, and significant research efforts and technological developments have been devoted to this field. This paper presents the current research status of MIG welding of magnesium alloys, reviews related studies on droplet transfer modes, microstructure evolution, and MIG hybrid welding technologies, and discusses future research directions for MIG welding of magnesium alloys.

Keywords: metal inert gas (MIG) welding; magnesium alloys; MIG hybrid welding; welded joints

收稿日期: 2025-06-23

基金项目: 中国中车基金(2023CYB295); 国家重点研发计划项目(2021YFB3701100)。

Supported by CRRC Scientific Research Fund (2023CYB295) and China Key Research, and Development Program (2021YFB3701100).

作者简介: 童小山(1987—), 正高级工程师, 主要从事轨道交通车辆车体的研发工作, (E-mail)010200034543@crrecg.cc。

通信作者: 彭建, 研究员, 主要从事轻合金材料及加工研究, (E-mail)jpeng@cqu.edu.cn。

镁合金密度约 1.74 g/cm^3 , 是实际投入工程化应用的最轻的金属结构材料, 比强度高、阻尼性能好、资源可再生且可循环利用^[1-4], 被称为21世纪的绿色工程材料^[5], 尤其在航空航天、轨道交通及电子器件等工业领域具有显著的应用潜力^[6-7]。镁合金在实际工程应用中始终面临着连接技术的挑战, 焊接作为金属连接的核心手段, 包括熔焊和固相焊, 是突破镁合金规模化应用的关键途径^[8]。然而, 镁合金固有的化学性质活泼特性, 使其熔化焊面临诸多难题: 1) 熔池金属极易氧化, 导致熔池润湿性变差, 焊缝成型不良; 2) 镁的高蒸气压和氢溶解度变化大, 极易产生气孔; 3) 凝固温度区间宽、热膨胀系数大, 热裂纹倾向显著; 4) 焊接热循环作用下, 晶界低熔点共晶相粗化及析出相分布不均, 导致焊接接头力学性能显著劣化^[9]。这些问题严重制约了镁合金构件的高可靠性连接。熔化极惰性气体保护焊(metal inert gas welding, 简称MIG焊)因其独特的技术优势, 被视为解决镁合金焊接难题、实现高效优质连接的重要方法。MIG焊电流密度大, 可实现稳定射流过渡或脉冲过渡, 电弧穿透力强、热输入集中且可控, 有利于减小热影响区、控制晶粒长大和共晶相粗化; 同时, 熔滴过渡频率高、尺寸小, 熔池搅拌作用增强, 促进气体逸出和成分均匀化, 有效减少气孔倾向并改善微观组织均匀性。MIG焊的熔敷率大、热效率高, 易于实现自动化, 生产效率高^[10], 因采用焊丝作为电极完成连续熔化填充, MIG焊熔敷效率远高于TIG焊, 可适应镁合金焊接需较大坡口填充量的特点, 生产效率高, 可优化焊缝金属成分以调控凝固组织。

MIG焊在克服氧化、改善熔池行为、减少气孔/热裂纹、优化微观组织及提升接头性能等方面的研究已备受关注, 而镁合金MIG焊技术更亟待系统总结和评估, 包括熔滴精确控制、热输入优化、气孔和裂纹抑制机制、接头强韧化等问题。笔者主要对镁合金MIG焊接的研究现状进行回顾总结, 重点从熔滴过渡行为与精确控制、焊接接头微观组织演变规律与MIG复合焊等创新技术几个方面进行阐述, 并对未来镁合金MIG焊技术的研究发展进行展望。

1 镁合金MIG焊的熔滴过渡方式

熔化极惰性气体保护焊是通过电弧热效应实现金属连接, 工艺核心为: 焊丝作为阳极、工件为阴极, 促使焊丝末端熔化为熔滴并向熔池转移; 同时, 氩气或氦气等惰性气体通过焊枪喷嘴形成保护屏障, 从而确保焊缝成形质量^[11]。控制镁合金MIG焊的熔滴过渡方式, 可减小飞溅并使接头良好成形, 有大量研究通过优化焊接工艺、添加助焊剂以及增加辅助热源等方式, 改善熔滴过渡方式。

Zhang等^[12]研究了通过脉冲电流控制提升焊接质量和适应性的PMIG(pulsed MIG)焊, 发现镁合金直流PMIG焊熔滴过渡形式主要包括球状过渡、凸出过渡和喷射过渡(见图1, 基本参数: $I_b=30 \text{ A}$, $t_p=3 \text{ ms}$, $f=83 \text{ Hz}$), 当填充焊丝线能量为 $242\sim 271 \text{ J/cm}$ 、熔滴直径为 $1.6\sim 0.9 \text{ mm}$ 、过渡频率为 $30\sim 69 \text{ Hz}$ 时, 球状过渡会产生较大尺寸的焊接飞溅, 而凸出过渡和喷射过渡可获得飞溅少的优质接头, 焊缝的平均极限抗拉强度为母材的 94.2% 。Song等^[13]对AZ31的PMIG焊研究表明, 熔滴过渡为球状转移方式时, 随着脉冲电流增加熔滴直径变小, 液滴过渡周期变短, 但填充焊丝被加热到汽化温度以上将导致大量飞溅产生。为解决直流单脉冲MIG焊易出现大尺寸断弧和飞溅, Zhang等^[14]采用直流双脉冲熔化极惰性气体保护焊, 得到的镁合金焊缝单面焊双面成形, 出现无飞溅、裂纹、焊道不连续现象。Zhang等^[15]通过添加KCl焊剂来提高焊接电流, 研究表明, 添

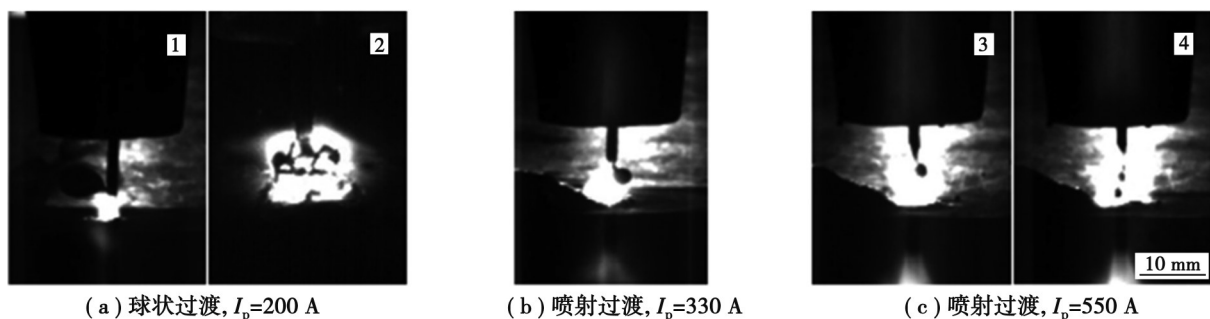


图1 镁合金直流PMIG焊熔滴过渡形式^[12]

Fig. 1 Droplet transfer mode in DC PMIG welding of magnesium alloys^[12]

加 KCl 焊剂可使熔滴尺寸减小、熔滴过渡时间缩短,进而促进熔滴脱离、减少焊接飞溅。曹全金^[16]采用复合活性剂进行镁合金 MIG 焊,研究表明复合活性剂可显著提升焊缝表面平整度,并通过减小熔滴的尺寸和过渡周期,优化熔滴向熔池过渡的稳定性,抑制飞溅产生。Gao 等^[17]通过添加激光稳定电弧,激光通过形成小孔固定电弧根部,提高了电弧的引燃性能,此外,激光与电弧的相互作用强化了向下的电磁力,有效抑制了熔滴过热现象,并优化了熔滴从焊丝向熔池的过渡过程。

综上所述,MIG 焊可通过工艺优化和添加助焊剂等方式,缩小熔滴尺寸、减少熔滴过渡时间,从而提高熔滴过渡稳定性,获得成形良好的焊缝。

2 镁合金 MIG 焊的接头组织

镁合金 MIG 焊接接头由焊缝区、热影响区和母材区 3 个区域构成,研究焊接接头组织可揭示焊接缺陷及工艺问题。通过对焊接接头组织的机理分析,能够深入理解组织演变规律及缺陷形成机制,为优化焊接工艺参数、调控接头性能提供理论依据。

刘珍良^[18]对 4 mm 厚的 AZ31B 变形镁合金薄板的 MIG 焊对接工艺展开研究。显微组织分析显示,焊缝区主要由初生 α -(Mg) 固溶体构成,晶界处均匀分散着 β -($Mg_{17}Al_{12}$) 析出相,焊缝区、母材和热影响区的硬度依次略微降低。孙德新^[19]采用透射电镜对镁合金焊缝金属的微观组织特征进行了深入研究(见图 2~3),发现焊缝晶界区域存在 α -Mg 固溶体与 β - $Al_{12}Mg_{17}$ 金属间化合物组成的层片状共晶结构,两相呈周期性交替排列;同时, α -Mg 固溶内部观察到 β - $Al_{12}Mg_{17}$ 析出相;此外,随着焊缝 Al 含量的降低,晶界共晶结构完全消失,仅残余少量细粒状 β - $Al_{12}Mg_{17}$ 相析出晶界。

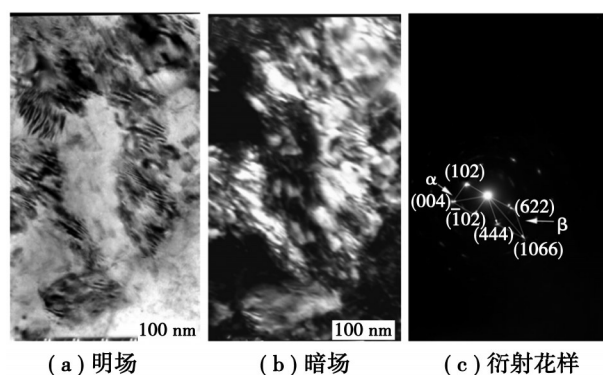


图 2 焊缝晶界处透射电镜微观组织^[19]

Fig. 2 TEM microstructure at the weld grain boundaries^[19]

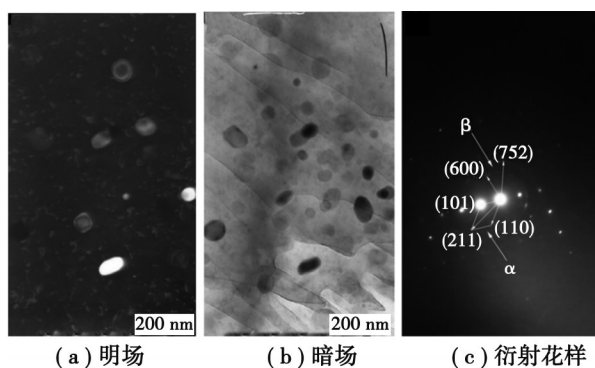


图 3 焊缝 α -Mg 晶内透射电镜微观组织^[19]

Fig. 3 TEM microstructure within the α -Mg grains in the weld^[19]

为了提升焊接接头性能,研究者采用异质焊丝或在焊丝中添加其他元素来改变接头组织。王翠^[20]在 AZ31B 焊丝中添加 0.10%~0.41%(质量分数)的铈进行 MIG 焊,焊缝中心形成未等轴树枝晶,靠近熔合线为柱

状树枝晶,且焊缝区析出针状 $Al_{11}Ce_3$ 相;随着铈含量增加,晶粒尺寸增大,焊接接头的强度和延伸率降低,抗拉强度最大为210 MPa,断裂位置均位于焊缝内部。金煜庭等^[21]采用AZ61A焊丝焊接AZ31B镁合金,发现采用合金化程度更高的AZ61A镁合金焊丝可使焊缝区晶粒内分布更多的 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 强化相,显著提高了焊缝区的强硬度,焊接熔化后的FZ区域硬度值高达77.4 HV,焊接接头抗拉强度达到227.5 MPa,为母材强度的92.9%。田如娜^[22]对铸态和热处理态ZM6镁合金进行MIG焊接,发现焊缝组织由 $\alpha-Mg$ 相和 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 相组成,晶粒呈等轴晶,相比于铸态,焊缝组织 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 相形态更细小、分散,且数量较少(见图4);热影响区晶粒内产生缠结位错,团簇状析出相数量减少;铸态ZM6镁合金焊接接头的抗拉强度为144 MPa,而热处理态ZM6镁合金焊接接头抗拉强度为178 MPa。

综上,MIG焊可通过采用含有异质元素焊丝或调控母材元素含量,从而改变焊缝中的第二相种类及形态,提高焊缝性能。

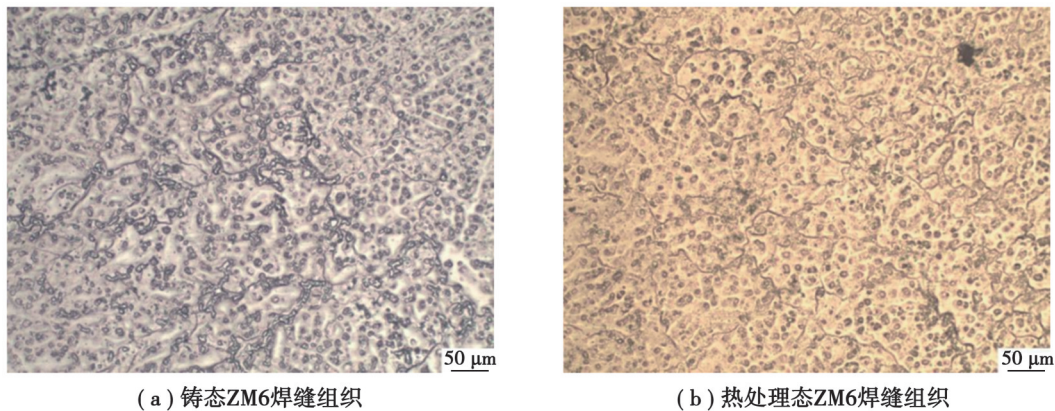


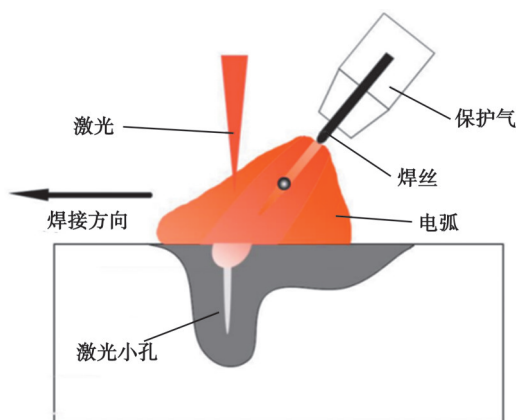
图4 焊缝微观组织^[22]

Fig. 4 Weld microstructure^[22]

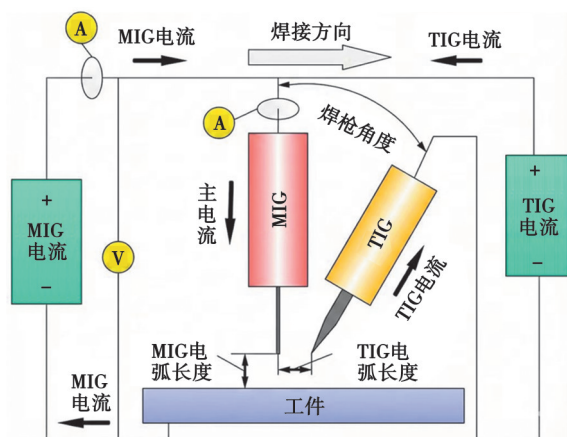
3 镁合金MIG复合焊

近年来,复合焊技术在航空航天、船舶制造、工程机械等领域成为研究与应用的热点^[23-26]。与单一焊接技术相比,复合焊接技术并非两种焊接技术的简单叠加,而是通过协同作用实现优势互补,从而实现避免焊缝缺陷、优化力学性能、提高焊接效率的目的^[27]。

激光-电弧混合焊接技术将激光和电弧作为双热源,融合了2种热源的优点,产生协同能量效应,显著提高了焊接效率,有效降低了焊缝中的气孔率^[28-32]。王誉静^[33]研究了激光-电弧复合焊,如图5所示,研究表明随着激光功率的提升,焊缝熔深显著增加,然而,由于镁合金的可调焊接参数范围较窄,且对激光的吸收功率有限,接头各区域的硬度值变化并不明显。谭兵等^[34]通过AZ31B变形镁合金激光-MIG复合焊实验,发现焊缝形状呈现上部区域宽、下部区域窄的漏斗形,焊缝组织主要由Mg、Al及少量MgO这3种相组成,未检测到 $Mg_{17}Al_{12}$ 相。此外,电弧作用区域的晶粒平均尺寸较激光区域更为细小,电弧区晶粒为15~20 μm ,激光区晶粒为20~25 μm ,热影响区的最大宽度位于激光热源作用区,可归因于电弧力和熔滴的促进作用。Gao等^[35]进一步揭示了激光-MIG复合焊技术降低气孔率的机理,电弧压力使气泡逃逸速度增加,熔池表面凹陷缩短了气泡逃逸距离,熔池表面宽而大增加了气泡逃逸面积,同时,缓慢的凝固速度延长了气泡逃逸时间。高明等^[36]的研究表明,激光-MIG复合焊接工艺优化,可显著改善镁合金焊缝表面质量,焊接效率大幅提升和熔深大幅度提升,相比较于单纯MIG焊接,其焊接熔深提高近10倍;相比较于激光焊接,其焊接速度提高50%。电弧燃烧和熔滴过渡的稳定性显著增强。李娜等^[37]进一步揭示了焊接接头的组织特征,研究表明,电弧区晶粒尺寸大于激光区,且接头软化区较小。此外,焊接接头沿焊接方向的疲劳性能呈现出“先减后增,而后再减”的变化规律。

图 5 激光-电弧复合焊原理图^[33]Fig. 5 Schematic diagram of laser-arc composite welding^[33]

TIG焊具有焊接过程稳定、焊缝质量好等优点,但存在焊接速度低、熔透能力低等缺点^[38]。TIG-MIG复合焊接技术结合了TIG和MIG焊接技术的优点,不仅实现了电弧的稳定性,还兼具MIG焊接的高焊丝熔化效率,可获得与钨极氩弧焊相同质量的焊接接头^[39-41]。Shen等^[42]研究了AZ31B镁合金的TIG-MIG双弧焊,发现TIG-MIG双弧焊中旁路电流的增加会导致熔深减小、焊缝宽度增加,同时细化焊缝晶粒,并提高焊缝的显微硬度。刘宝栓等^[43]通过对比不同焊速下AZ31镁合金TIG-MIG复合焊接头的显微组织与力学性能,揭示了焊速对焊缝质量的影响规律。分析表明,高焊速接头的焊缝区和热影响区晶粒尺寸比低焊速接头的小,其焊缝区 β -Mg₁₇Al₁₂析出相含量也较低焊速接头少,高速焊接接头硬度、抗拉强度和延伸率均高于低速焊接接头。平奇文^[44]研究了主电流、电压及旁路电流对AZ31B镁合金TIG-MIG双弧焊接接头性能及成型的影响,其TIG-MIG双弧焊原理如图6所示。主电流增加能显著提升熔深和热影响区宽度,电压增加会扩大熔宽、减小熔深和余高;旁路电流增加减少热输入,从而减小熔深和热影响区宽度;TIG旁路降低MIG焊母材热输入,有助于细化接头晶粒。

图 6 TIG-MIG 双弧焊原理简图^[44]Fig. 6 Schematic diagram of TIG-MIG double arc welding principle^[44]

外加磁场可减少MIG焊缝成形缺陷,通过调控外加磁场强度和方向优化焊接质量^[45]。通过改变磁场形态、频率以及励磁电流等参数,可调控焊接电弧的特性及熔池金属的凝固过程,提升焊接接头的性能^[46-49]。刘新童^[50]引入纵向直流磁场,如图7所示,研究了不同磁场强度对AZ91镁合金MIG焊接接头的影响。结果表明,纵向直流磁场有利于气泡的逸出,使Al元素分布更均匀,提高了其在熔池中的溶解度。此外,随磁场强度的升高,电弧稳定性增强,但过高的磁场强度会导致磁偏吹,使接头强度降低。张玉红等^[51]通过外加纵向磁场辅助的MIG焊工艺,系统研究了AZ61A镁合金焊接接头的组织调控机制。实验表明,电磁场搅拌可

细化组织,破碎粗大柱状晶,诱导共晶相以球状形态均匀分布于晶界,减少焊接缺陷,提高 AZ61A 镁合金焊接接头的力学性能,其中通过外加磁场焊接接头硬度升高,热影响区硬度为 66~72 HV,焊缝区硬度为 72~79 HV。

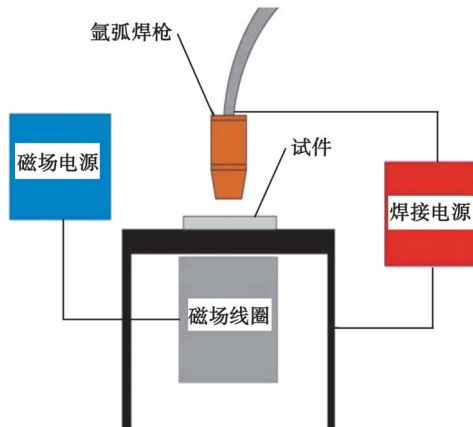


图 7 纵向直流磁场 MIG 复合焊^[50]

Fig. 7 Longitudinal direct current magnetic field MIG composite welding^[50]

等离子-MIG 焊通过协同融合 MIG 焊的高熔敷特性与等离子弧焊的高能量密度特性,不仅实现了焊接效率与精度的双重提升,且有效规避了传统 MIG 焊的变形倾向、焊缝熔宽大以及单一等离子焊焊接范围窄等缺点,是一种高效率的特种焊接方法^[52-55]。刘正^[56]对 AZ31 型材进行了直流等离子-MIG 复合焊研究,如图 8 所示,发现适当的等离子电流可显著提升焊接质量,过小的电流会导致未熔合和未焊透,过大的电流则会引起焊漏。此外,等离子电流的优化不仅能细化焊缝组织,还能提高接头硬度,同时减少第二相的粗化现象。

综上,采用 MIG-复合焊接通过协同作用实现优势互补,从而实现避免焊缝缺陷、优化焊接接头力学性能、提高焊接效率的目的。

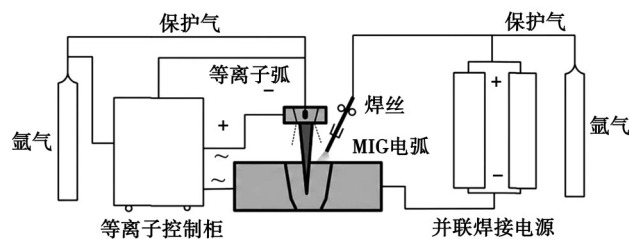


图 8 等离子-MIG 复合焊系统原理示意图^[56]

Fig. 8 Schematic diagram of the plasma-MIG composite welding system principle^[56]

4 结束语

根据镁合金熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)的最新研究动态,综合国内外实验结果,MIG 焊因其熔敷效率高及工艺可控性强,已成为镁合金规模化连接的核心技术。然而,当前单一 MIG 焊仍面临接头强韧性不足等瓶颈,未来的研究重点亟须聚焦于以下几个核心方向的技术成熟化与工程应用:1)深入研究激光-MIG 复合焊接的能量协同分配与熔池动态行为控制机制,利用激光的深熔、高能量密度特性与 MIG 的高效填丝形成优势互补,显著改善焊缝成形、抑制缺陷并细化组织;2)加速开发适用于镁合金 MIG 焊的低成本活性焊丝,通过在焊丝中添加微量活性元素(如稀土、碱土金属等),有效调控熔池表面张力、改善润湿铺展性并净化焊缝,从而提升接头力学性能;3)探索磁场(如纵向/横向磁场、交变磁场)辅助 MIG 焊技术,优化熔滴过渡形态(如促进射流过渡)、稳定电弧并搅拌熔池,达到细化晶粒、减少飞溅和气孔的目的。这些关键技术的突破与集成将推动镁合金在航天轻量化构件与交通工具部件中的广泛应用。

参考文献

- [1] Li C X, Wei J X, Jin J F, et al. The effect of precipitates on the fracture behavior and tensile properties of Mg-14Gd-0.5Zr (wt.%) alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 180: 226-242.
- [2] Rezaei A, Mahmudi R, Cayron C, et al. Microstructural evolution and superplastic behavior of a fine-grained Mg-Gd-Y-Ag alloy processed by simple shear extrusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 806: 140803.
- [3] Huang W S, Chen J H, Yan H G, et al. Microstructure, mechanical properties and damping behavior of novel Mg-Ga-Zn alloys fabricated by medium-high strain rate rolling[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, 13(12): 6236-6251.
- [4] Jiang C X, Lu B H, Pan H C, et al. Effect of Al addition on microstructure and mechanical property of Mg-Mn-Ca-Ce based alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1005: 175975.
- [5] Liang H X, Cai G F, Huang Z Q, et al. The mechanism of electric field control in the solidification of welding lines in magnesium alloy casting-rolling[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110850.
- [6] 马宗义, 商乔, 倪丁瑞, 等. 镁合金搅拌摩擦焊接的研究现状与展望[J]. *金属学报*, 2018, 54(11): 1597-1617.
Ma Z Y, Shang Q, Ni D R, et al. Friction stir welding of magnesium alloys: a review[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 1597-1617. (in Chinese)
- [7] Bai J Y, Yang Y, Wen C, et al. Applications of magnesium alloys for aerospace: a review[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(10): 3609-3619.
- [8] 贺艳明, 赵小强, 郎红专, 等. 先进镁合金材料钎焊技术进展[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(11): 3662-3688.
He Y M, Zhao X Q, Lang H Z, et al. Progress of brazing technology for advanced magnesium alloy materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(11): 3662-3688. (in Chinese)
- [9] 王鹤. AZ31B 镁合金 TIG 焊焊接接头组织与性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
Wang H. Study on microstructures and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy by TIG welding[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [10] 刘金胜. 基于谐振原理的铝合金 MIG 焊熔滴过渡行为及电弧特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Liu J S. Research on droplet transfer behavior and arc characteristics of MIG welding of aluminium alloy based on resonance principle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [11] 盛立康. 20mm 厚铝合金激光-MIG 复合焊工艺及接头组织性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2024.
Sheng L K. Welding process, microstructure and mechanical properties of laser-MIG hybrid welded joints for 20 mm thick aluminum alloy plates[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2024. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] Song G, Wang P. Pulsed MIG welding of AZ31B magnesium alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27(2): 518-524.
- [14] Zhang Z D, Kong X Y. Study on DC double pulse metal inert gas (MIG) welding of magnesium alloy[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27(4): 462-466.
- [15] Zhang Z D, Cao Q J. Study on metal transfer behaviour in metal inert gas arc welding with activating flux for magnesium alloy[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(7): 550-555.
- [16] 曹全金. 镁合金活性 MIG 焊接研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
Cao Q J. Study on MIG welding with activating flux for[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [17] Gao M, Mei S W, Wang Z M, et al. Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(6): 1338-1346.
- [18] 刘珍良. 镁合金熔化极气体保护焊焊接工艺与性能分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
Liu Z L. Study on MIG welding technology and property of magnesium alloys[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [19] 孙德新. 镁合金(AZ91D、AZ31B)焊接性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Sun D X. Study on weldability of magnesium alloys (AZ91D and AZ31B)[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)

- [20] 王翠. AZ31B镁合金MIG焊接工艺及组织性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
Wang C. The study on MIG welding procedure, microstructure and property of AZ31B magnesium alloys[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [21] 金煜庭, 林光磊, 林茂春, 等. 焊接电流对AZ31B镁合金MIG焊接接头组织与性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(8): 54-60.
Jin Y T, Lin G L, Lin M C, et al. Effect of welding current on microstructure and properties of AZ31B magnesium alloy MIG welded joint[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48(8): 54-60. (in Chinese)
- [22] 田如娜. ZM6铸造镁合金MIG焊接工艺与性能分析研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
Tian R N. Study on process and properties of ZM6Cast magnesium alloy MIG welding[D]. Taiyuan: North University of China, 2015. (in Chinese)
- [23] 韩蛟, 韩永全, 洪海涛, 等. 铝合金等离子-MIG复合焊接电弧行为[J]. 焊接学报, 2022, 43(2): 45-49, 116.
Han J, Han Y Q, Hong H T, et al. Arc behavior of plasma-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 45-49, 116. (in Chinese)
- [24] Han Y Q, Han J, Chen Y, et al. Stability of fiber laser-MIG hybrid welding of high strength aluminum alloy[J]. China Welding, 2021, 30(3): 7-11.
- [25] 刘甲, 徐家磊, 马照伟, 等. 钛合金等离子和MIG复合焊接技术研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 358-360.
Liu J, Xu J L, Ma Z W, et al. Research on hybrid welding technique based on plasma and MIG of titanium alloy[J]. Materials Review, 2021, 35(S2): 358-360. (in Chinese)
- [26] 张鸿昌, 李一楠, 于江, 等. 等离子弧-MIG焊丝振荡式复合焊接工艺[J]. 焊接学报, 2023, 44(2): 61-66, 82, 132-133.
Zhang H C, Li Y N, Yu J, et al. PAW-MIG wire oscillating hybrid welding technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(2): 61-66, 82, 132-133. (in Chinese)
- [27] 张子傲, 张知航, 黄继华, 等. 高速列车铝合金车体焊接工艺研究进展[J]. 轨道交通材料, 2023, 2(1): 1-7.
Zhang Z A, Zhang Z H, Huang J H, et al. Advance in the research of welding procedures for aluminum car bodies of high speed train[J]. Materials for Rail Transportation System, 2023, 2(1): 1-7. (in Chinese)
- [28] Li L Y, Liu W, Gong Q L, et al. Numerical analysis of the dynamic behavior of arc by rotating laser-GMAW hybrid welding of T-joints[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109802.
- [29] Huang H X, Zhang P L, Yan H, et al. Research on weld formation mechanism of laser-MIG arc hybrid welding with butt gap[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 133: 106530.
- [30] Vorontsov A, Zykova A, Chumaevskii A, et al. Advanced high-strength AA5083 welds by high-speed hybrid laser-arc welding[J]. Materials Letters, 2021, 291: 129594.
- [31] Cai C, Yu J, Chen Z L, et al. Welding process stability in narrow-gap oscillating laser-MIG hybrid welding of titanium alloys with various oscillating patterns[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133: 151-162.
- [32] 刘自刚, 徐睦忠, 李洋, 等. 铝合金激光-MIG复合焊研究现状与展望[J]. 材料导报, 2023, 37(S2): 362-366.
Liu Z G, Xu M Z, Li Y, et al. Research status and prospect of laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Materials Reports, 2023, 37(S2): 362-366. (in Chinese)
- [33] 王誉静. AZ33镁合金激光-MIG复合焊的工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Wang Y J. Research on laser-MIG hybrid welding process of magnesium alloy profiles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [34] 谭兵, 陈东高, 高明, 等. AZ31B变形镁合金激光-MIG复合焊焊接组织和性能分析[J]. 航空材料学报, 2008, 28(6): 36-40.
Tan B, Chen D G, Gao M, et al. Microstructure and properties of welding joints for laser-MIG welding of AZ31B transformative magnesium[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(6): 36-40. (in Chinese)
- [35] Gao M, Zeng X Y, Tan B, et al. Study of laser MIG hybrid welded AZ31 magnesium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(4): 274-281.
- [36] 高明, 谭兵, 冯杰才, 等. 工艺参数对AZ31镁合金激光-MIG复合焊缝成形的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(2): 222-227.

- Gao M, Tan B, Feng J C, et al. Effects of welding parameters on weld shape of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(2): 222-227. (in Chinese)
- [37] 李娜, 马志华, 陈东高, 等. AZ31 镁合金激光-MIG 复合焊接接头组织和疲劳性能研究[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(7): 221-222, 226.
- Li N, Ma Z H, Chen D G, et al. Study on microstructure and fatigue performance of AZ31 alloy laser-MIG hybrid welded joints[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(7): 221-222, 226. (in Chinese)
- [38] 陈东升, 王恒, 陈茂爱, 等. 极性比对高速方波交流 TIG-MIG 复合电弧稳定性及焊缝成形的影响[J]. *电焊机*, 2022, 52(7): 39-44.
- Chen D S, Wang H, Chen M A, et al. Effect of polarity ratio on the arc stability and weld formation of high speed square wave AC TIG-MIG hybrid welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(7): 39-44. (in Chinese)
- [39] 孙茂龄, 宋昌洪, 吉荣亮, 等. TIG-MIG 复合焊研究现状与展望[J]. *焊接*, 2016(12): 33-36, 7.
- Sun M L, Song C H, Ji R L, et al. Research status and perspective of TIG-MIG hybrid welding[J]. *Welding & Joining*, 2016(12): 33-36, 7. (in Chinese)
- [40] Cui X F, Chen J, Xia C Y, et al. The mechanism study of TIG-MIG hybrid welding process based on simulation[J]. *Vacuum*, 2023, 215: 112341.
- [41] Chen J, Wu C S, Chen M A. Improvement of welding heat source models for TIG-MIG hybrid welding process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(4): 485-493.
- [42] Shen X, Ma G H, Chen P. Effect of welding process parameters on hybrid GMAW-GTAW welding process of AZ31B magnesium alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5): 2811-2819.
- [43] 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.
- Liu B S, Jiang Y L, Li L, et al. Microstructure and mechanical properties of TIG-MIG hybrid welded joints of AZ31B magnesium alloy profile[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(23): 16-18, 22. (in Chinese)
- [44] 平奇文. AZ31B 镁合金 TIG-MIG 双弧焊接头性能分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- Ping Q W. Microscopic structure and property of TIG-MIG welded joint of AZ31B magnesium alloy[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016. (in Chinese)
- [45] 魏国宏. 高纯铝合金外加纵向磁场 MIG 焊熔滴过渡行为研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.
- Wei G H. Study on droplet transfer behavior of MIG welding high-strength aluminum alloy assisted by longitudinal magnetic field[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021. (in Chinese)
- [46] 刘玉项, 王启伟, 朱胜. 励磁电流对 6061 铝合金 MIG 焊熔敷层组织及性能的影响[J]. *焊接技术*, 2021, 50(5): 12-16, 179.
- Liu Y X, Wang Q W, Zhu S. Effects of exciting current on microstructure and properties of welding cladding on 6061 aluminum alloy by MIG welding under longitudinal magnetic field[J]. *Welding Technology*, 2021, 50(5): 12-16, 179. (in Chinese)
- [47] 龙琼, 钟云波, 余正平, 等. 外加磁场下焊接技术的研究现状[J]. *中国材料进展*, 2020, 39(6): 472-479.
- Long Q, Zhong Y B, Yu Z P, et al. Recent progress in welding technology under external magnetic fields[J]. *Materials China*, 2020, 39(6): 472-479. (in Chinese)
- [48] 王启伟, 朱胜, 徐胜良, 等. 纵向磁场对铝合金电弧熔敷成形表面精度的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(4): 11-14.
- Wang Q W, Zhu S, Xu S L, et al. Effect of longitudinal magnetic field on forming accuracy for arc additive manufacturing aluminum alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(4): 11-14. (in Chinese)
- [49] 王强, 董蒙, 孙金妹, 等. 强磁场下合金凝固过程控制及功能材料制备[J]. *金属学报*, 2018, 54(5): 742-756.
- Wang Q, Dong M, Sun J M, et al. Control of solidification process and fabrication of functional materials with high magnetic fields[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(5): 742-756. (in Chinese)
- [50] 刘新童. 纵向直流磁场对 AZ91 镁合金 MIG 焊接头组织及性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- Liu X T. Effect of longitudinal DC magnetic field on microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy MIG welded joints[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023. (in Chinese)

- [51] 张玉红,李明,刘华. 汽车车架用AZ61A镁合金的外加磁场MIG焊研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(5): 47-49.
Zhang Y H, Li M, Liu H. Research on MIG welding of AZ61A alloy used for chassis frame under magnetic field[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(5): 47-49. (in Chinese)
- [52] 纪昂. 等离子-TIG复合焊接电弧物理特性及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Ji A. Research on arc physical properties and welding processing performance of PAW-TIG hybrid welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [53] 洪海涛,韩永全,童嘉晖,等. 铝合金VPPA-MIG复合焊接电弧形态及伏安特性[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 65-69, 131-132.
Hong H T, Han Y Q, Tong J H, et al. Study of arc shape and voltage-current characteristics in variable polarity plasma arc-MIG hybrid welding of aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 65-69, 131-132. (in Chinese)
- [54] 张义顺,刘磊,董晓强,等. 等离子-MIG焊接设备的设计与研制[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(2): 135-138.
Zhang Y S, Liu L, Dong X Q, et al. Design and development of plasma-MIG welding equipment[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(2): 135-138. (in Chinese)
- [55] 胡子鑫,曾敏,袁松,等. 等离子-MIG焊在有色金属焊接中的应用研究现状及展望[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 37-46.
Hu Z X, Zeng M, Yuan S, et al. Current status and prospect of applying plasma-MIG welding in nonferrous metals[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(4): 37-46. (in Chinese)
- [56] 刘正. AZ31B镁合金型材等离子-MIG复合焊工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
Liu Z. Research on plasma-MIG hybrid welding process of AZ31B magnesium alloy profiles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)

(编辑 郑洁)