

车用镁合金激光焊接质量控制及服役性能研究进展

刘泽宇^{1,2,3}, 胡佳其^{1,2,3}, 王 帅^{1,2,3}, 叶建林⁴, 刘 璐⁴, 郭阳阳⁵, 李 豪³, 曾荣昌^{1,2,3,6},
任凌宝^{1,2,3}, 单智伟^{1,2,3}

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 西安交通大学 陕西省镁基新材料工程研究中心, 陕西 西安 710049)

(3. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

(4. 西安优耐特容器制造有限公司, 陕西 西安 710200)

(5. 西安瑞鑫科金属材料有限责任公司, 陕西 西安 710200)

(6. 山东科技大学 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 镁合金在汽车轻量化方面应用潜力巨大, 可靠连接是其轻量化制造的关键技术问题之一。激光焊接因热输入小, 适用于镁合金连接技术开发。然而, 目前镁合金激光焊接接头的服役性能不足仍制约工程需要。本文总结了当前镁合金激光焊接研究进展, 重点讨论了镁合金激光焊接本征特性及焊接工艺参数对焊接接头质量的影响; 同时, 结合车用镁合金案例暴露出的问题, 归纳车用镁合金激光焊接接头服役性能的关键影响因素, 并对后续发展进行展望。

关键词: 镁合金; 激光焊接; 焊接参数; 焊接缺陷; 力学性能; 耐腐蚀性能

中图法分类号: TG146.22; TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)05-1377-20

1 引言

镁合金密度仅为 1.7~2.0 g/cm³, 是最轻的金属结构材料, 其比强度较高, 铸造性能良好, 适用于汽车轻量化零部件、3C 通讯器件及国防轻量化装备等领域^[1-3]。近年来, 随着新能源汽车工业的飞速发展, 镁合金轻量化材料的开发应用愈发受到重视^[4-5]。在一般情况下, 镁合金非承力构件(如仪表盘支架、减震塔、控制器封装壳体等)多采用压铸镁合金开发生产(如 AZ91D、AM60 等)^[6]。然而, 对于承载性能和安全要求较高的承力构件, 变形镁合金相较于压铸镁合金制件, 具有更优异稳定的力学性能, 可以更好地满足服役需求。

大承载车用变形镁合金轻量化部件往往需要简单可靠连接技术以实现复杂构件单元的制造装配^[7]。常见的汽车结构件连接技术包括: 胶接、焊接以及机械连接。表 1 总结了这些连接制造技术的优缺点^[8-9]。其中, 焊接作为轻量化程度及强度最高的连接技术是金属结构材料连接的重要方法, 在汽车行业应用广泛^[10-12]。以乘用车为例, 涉及焊接的连接件占有所有连接件的 90% 以上, 其余多为栓接以及铆接等机械连接。胶接因强度不足, 难以

满足构件承载的需要, 而仅在车辆内饰中使用^[1]。

目前常见的车用变形镁合金焊接技术主要有以下 4 种: 激光焊(laser beam welding, LBW)、搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)、非熔化极惰性气体保护电弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)及熔化极惰性气体保护焊(metal inert gas welding, MIG)。相关文献统计表明, 近年来镁合金焊接研究热度逐年增加(图 1a); 其中, 镁合金 LBW 的研究方兴未艾, 研究论文发表数量少于传统 TIG 及 FSW 研究(图 1b)。表 2 总结了常见镁合金焊接技术特点^[13]。对于氩弧焊技术, TIG 焊常用于镁合金铸造缺陷修复, MIG 焊目前尚未形成大规模实际应用, 上述两种氩弧焊技术常因大的热影响区(heat affected zone, HAZ)和熔合区(fusion zone, FZ)、较大的收缩率等特点导致焊接接头残余应力较高、变形较大, 进而劣化焊接接头性能、降低焊件形位精度, 难以满足快速精准焊接装配需要。FSW 属于固相焊接技术, 因其较小的热输入能够很大程度上缓解烧损、气孔等焊接缺陷的产生, 但其并不适合小型复杂精密构件的焊接。

LBW 作为一种高能密度焊接方式, 具有焊缝熔深大、精度高、焊速快、焊件变形小及环境适应性强等优点,

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(52031011, 52061040, 52371121); 陕西省自然科学基金(2024JC-YBQN-0604); 秦创原引用高层次创新创业人才计划(QCYRCXM-2023-020); 中国博士后科学基金(2021M692512); 府谷县人民政府(202109117, 20230332); 质子汽车科技有限公司(20221252, 202403149); 陕西省镁基新材料中试基地建设项目(2023ZSJD-05HZ)

作者简介: 刘泽宇, 男, 2000 年生, 硕士, 西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049, E-mail: liuzeyu20000220@163.com

表1 不同汽车连接制造技术的优势与劣势

Table 1 Advantages and disadvantages of different connection technologies used in vehicle body manufacturing

Technology	Advantage	Disadvantage
Welding	High intensity	Easy to deform and cause structural failure
	More flexible welding structures and sizes	Uneven welding joint structure and performance
Mechanical connection	Simple process, high yield rate, and high efficiency	Difficulty in disassembly and maintenance
	Excellent disassembly properties	Low strength, easy to loosen, wear or fatigue
	High degree of standardization	Requires additional components, increasing assembly weight and size
Adhesive bonding	Lower requirements for high-temperature resistance of connectors	Lower efficiency, need a designed installation plane
	Lightweight	Low intensity
	Low cost, simple process	Limited application in metal-to-metal bonding
	No stress concentration	Strongly environmental dependent

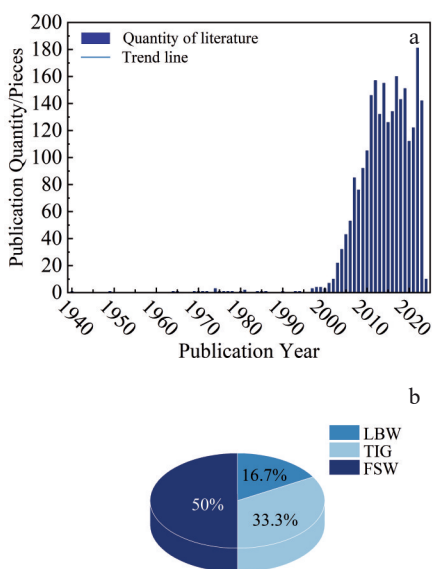


图1 镁合金焊接论文近年来增加趋势及常见焊接方法占比 (LBW、TIG、FSW)

Fig.1 Increasing trend of magnesium alloy welding-related research papers in recent years (a), and paper publication proportion of common welding methods (LBW, TIG, FSW) (b)

可显著改善焊缝裂纹、气孔、接头塌陷等缺陷,提高焊接接头力学性能。统计3种不同焊接方式下镁合金焊接接头力学性能(图2^[14-36]),变形镁合金LBW接头抗拉强度及延伸率与母材的比值要优于FSW及TIG,同时其抗疲劳性能仍存在较大的提升潜力。

尽管激光焊接多方面优势明显,但在实际变形镁合金焊接制造过程仍可能存在气孔、热裂纹、夹杂物等焊接缺陷,严重影响焊接质量。同时,焊接熔池的非平衡凝固过程往往伴随着晶粒尺寸、第二相、焊接缺陷等焊缝微观组织特征的同步演化。例如,常见Mg-Al系变形镁合金(如AZ31B、AZ61A等)激光焊缝组织常包括大量非平衡凝固产生的 β -Mg₁₇Al₁₂第二相,其存在形态对焊缝局部塑性变形协调和局部电化学均匀性的影响不可忽视。上

表2 常见镁合金焊接方式的优势与劣势

Table 2 Advantages and disadvantages of common magnesium alloy welding methods

Method	Advantage	Disadvantage
TIG/MIG	Low cost for equipment	Large heat input
	Wide applicability	Environmental pollution
	Easy to operate	Low efficiency
FSW	No phase change process	High cost
	High efficiency	High requirements for materials
	Wide applicability	Large welding size
	Environmental protection	
LBW	High precision	High equipment cost
	Small heat-affected zone	Strict requirements for the environment
	High efficiency	

述气孔、热裂纹、夹杂物焊接缺陷和非均匀组织特征极易成为疲劳裂纹源,而 β -Mg₁₇Al₁₂相易与 α -Mg基体形成电偶腐蚀,加速焊接接头的腐蚀,进一步弱化焊接可靠性^[34,37]。

当前,镁合金激光焊接研究大多集中在焊接参数对焊接质量的影响规律方面。然而,已有研究仍缺乏较为系统性分析和实践验证支撑,使得研究结果应用受限,难以满足镁合金在航空、汽车等领域中日益增长的广泛应用需求。车用镁合金激光焊接结构设计之初就需要对强度、刚度等基本机械性能,冲击韧性、疲劳寿命、耐蚀性能等耐久性能以及经济性、可加工性等多方面性能进行全面分析考察。

针对上述问题,本文深入分析并系统总结了激光焊接参数在焊接缺陷形成过程中的关键影响,并为后续优化工艺参数、提升焊接接头质量提供了重要的理论依据和实践指导。

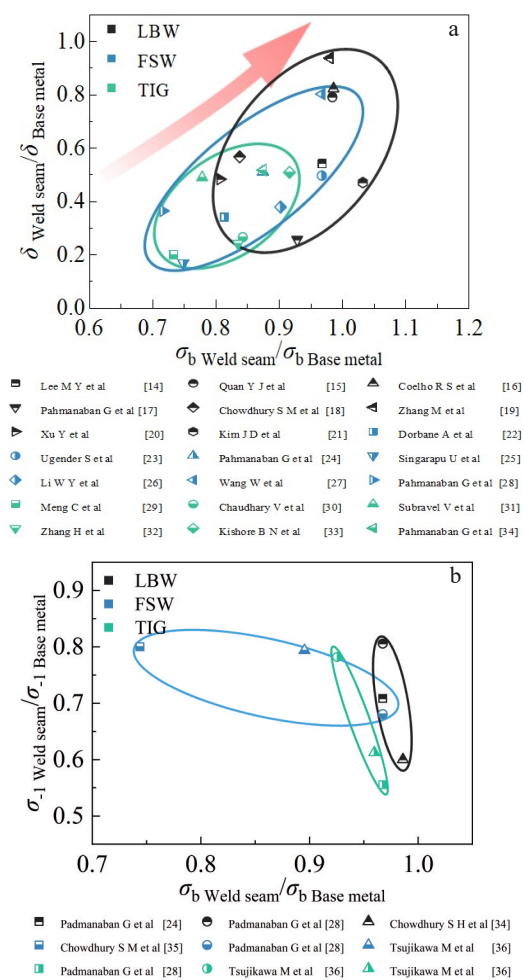


图2 不同焊接方式下AZ31镁合金抗拉强度、延伸率及疲劳强度对比图

Fig.2 Comparison of tensile strength and elongation (a), and fatigue strength (b) of AZ31 magnesium alloy under different welding methods

2 镁合金激光焊接原理及技术难点

激光焊接是一种通过高能量密度热源对焊件进行加热、熔化并接合的连接技术。其特点是热源集中、焊接速度高。根据激光焊接的功率密度,可分为两种主要模式:传导模式和深熔模式^[38]。

2.1 激光焊接的基本原理

激光束主要被材料表面吸收,穿透力较弱,焊接速度慢,焊缝的宽深比高,适用于对表面质量要求较高的焊接场景。在传导模式下,激光功率密度通常低于10⁴~10⁶ W/cm²。在深熔模式发生在功率密度大于10⁶~10⁷ W/cm²时,高功率激光作用使金属快速熔化并蒸发形成等离子体流,所产生的反作用力使熔池表面凹陷形成一个充满电离蒸汽的“锁孔”^[39-40]。锁孔提高了能量的吸收率,加快了焊接过程。从微观角度来看,激光通过高频电磁场与材料自

由电子之间的相互作用,将光能转变为热能,从而实现材料的快速熔化和接合。

2.2 镁合金激光焊接技术难点

镁合金的物理特性影响着激光焊接效率与质量,因此对激光焊接过程提出了较高的技术要求。表3总结了常见金属在其熔点温度下的物理性能,并据此归纳镁合金激光焊接可能面临的主要挑战^[41-42]。

(1) 熔池稳定性差

镁的表面张力和粘度在熔点附近显著低于铝和钢,导致焊接过程中的熔池容易发生不稳定现象,如飞溅、大熔池滴穿、凹陷以及咬边,这些问题直接影响焊缝的表面质量和力学性能^[42]。

(2) 烧损和氧化物夹杂

镁的饱和蒸汽压较高,焊接过程中易产生金属蒸汽,加之镁对激光的固体能量吸收率较低(锁孔形成后吸收率可接近100%),这使得焊接熔池内的温度快速升高,导致焊缝中出现多孔、氧化物夹杂和合金元素损失等缺陷^[42-43]。

(3) 低熔点第二相局部液化和凝固开裂

镁合金母材在激光焊接过程伴随快熔急冷的环境条件,焊缝附近母材低熔点共晶第二相(如Mg₁₇Al₁₂)容易随热输入增加而局部快速熔化,进而弱化焊件机械性能;在非平衡凝固时由于镁热膨胀系数高于铝和钢,残余应力较大,容易产生裂纹等焊接缺陷^[44-45]。

(4) 气孔

在镁熔体凝固过程中,氢的溶解度会大幅地降低,导致氢气在熔池中溢出,形成气孔。此外,高能量密度激光作用下的锁孔会经历周期性、稳定性变化,伴随等离子体密度和温度的波动,进一步加剧熔池飞溅及锁孔缺陷^[46-48]。

针对上述技术难点,学者们进行了大量研究,重点探索激光焊接参数对镁合金焊接接头质量及力学性能的影响^[49-54]。研究发现,通过优化焊接参数,如激光功率、焊接速度、焦点位置及保护气流量,可以在一定程度上减少孔隙率、抑制凝固裂纹产生并提升焊缝表面质量和力学性能。

3 镁合金激光焊质量的影响因素及调控方法

激光焊接过程存在以下主要参数及辅助工艺变量,主要参数包括:激光功率、焦平面位置、焊接速度、入射角;辅助工艺变量包括:焊接器类型、表面质量、保护气、填充金属以及夹具。其对焊缝影响如图3所示,焊接功率、焊接速度、焦点位置等焊接参数的改变会影响整体热输入。保护气、表面质量、填充金属等辅助工艺变量则会改善熔池外部气氛及原材料质量。这些参数的改变均会对焊接区域的表面质量、焊接缺陷产生影响。

表 3 纯镁、铝、锌以及铁在其熔点下的性能

Table 3 Properties of pure magnesium, aluminum, zinc, and iron at their melting points^[41-42]

Performance	Mg	Al	Zn	Fe
Ionization energy/eV	7.6	6	9.2	7.8
Specific heat/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	1360	1080	380	795
Heat of fusion/J·kg ⁻¹	3.7×10 ⁵	4×10 ⁵	2.2×10 ⁵	2.7×10 ⁵
Melting point/°C	650	660	419	1536
Boiling point/°C	1090	2520	907	2860
Viscosity/Pa·s ⁻¹	0.00125	0.0013	0.0035	0.0055
Surface tension/N·m ⁻¹	0.559	0.914	0.78	1.872
Thermal conductivity/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	78	94.03	116	38
Thermal diffusivity/m ² ·s ⁻¹	3.73×10 ⁻⁵	3.65×10 ⁻⁵	4.14×10 ⁻⁵	6.80×10 ⁻⁶
Coefficient of thermal expansion/K ⁻¹	25×10 ⁻⁶	24×10 ⁻⁶	29.7×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶
Elastic modulus/GPa	44.7	70.6	130	210
Vapor pressure/Pa	360	10 ⁻⁶	23	2.3
Absorption rate/cm ⁻¹	1.06 μm	-	42×10 ⁵ (300 K)	11×10 ⁵
	10.6 μm	3×10 ⁵ (300 K)	10×10 ⁵	36×10 ⁵ (300 K)

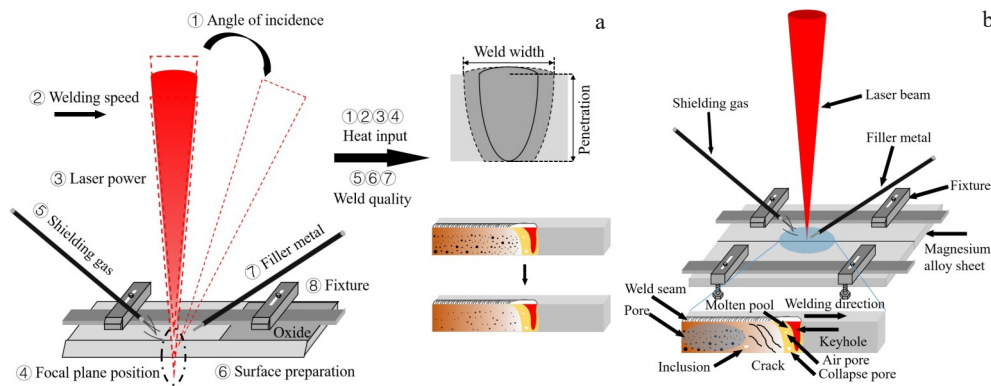


图 3 激光焊接参数及其对焊缝质量影响示意图和常见镁合金焊接缺陷示意图

Fig.3 Schematic diagrams of laser welding parameters and their impact on weld quality (a), and common welding defects in magnesium alloys (b)

已有研究通过响应面法、田口法、灰色关系分析法以及对对照组等统计分析方法对于镁合金激光焊接参数进行优化以及分析影响焊缝力学性能的关键因素^[49-54]。如图 4 所示,响应面法分析结果表明,各类参数对焊接强度的贡献大小存在以下的关系:(1)如图 4a~4c 所示,激光功率>照射角>焊接速度^[50];(2)激光功率>保护气>焦平面位置>焊接速度^[51];(3)图 4d~4f 焊接速度>激光功率>焦平面位置^[53];(4)激光功率>焊接速度>保护气流量^[54]。可见,选择合适激光功率对于焊缝强度改善的贡献最大。但也有研究指出,焊接速度对于焊缝强度、外观及组织的影响更大。例如,Bailey 等^[49]认为相较于激光功率而言,焊接速度对于焊缝宽度、熔深、平均晶粒尺寸以及平均二次枝晶臂间距(secondary dendrite arm spacing, SDAS)的影响更大,而这些因素更易对力学性能产生显著影响。而 Padmanaban 等^[53]通过响应面法发现焊接速度是影响抗拉强度较大的因素,其次是激光功

率和焦平面位置。因此,通常认为影响焊接质量的主要因素有激光功率、焊接速度及保护气等。后文将对这些因素对焊接质量的影响进行总结,对于其他焊接参数及变量,如入射角、焦点位置、填充金属及保护气等,如未特别提及则均默认为 90°、0 mm、无填充以及正面保护,焊接方式无提及均默认为对焊。

3.1 激光焊接参数优化

3.1.1 激光功率

激光功率会显著影响镁合金焊缝处的热输入大小。当热输入过小时,材料表面的激光功率密度降低,将导致焊接方式由深熔模式转为传导模式(图 5a)。在这种状态下,焊缝的宽度和熔深的跳跃式变化将导致焊接成型不均匀。因此,在焊接过程中,应避免能量密度处于 10⁶ W/cm² 附近^[55-57]。在传导模式下,随着热输入的增大,熔深和焊缝横截面积也随之增大;靠近熔合线附近 HAZ 处的晶粒呈现以下演变形式:胞状晶体→胞状、树枝状晶

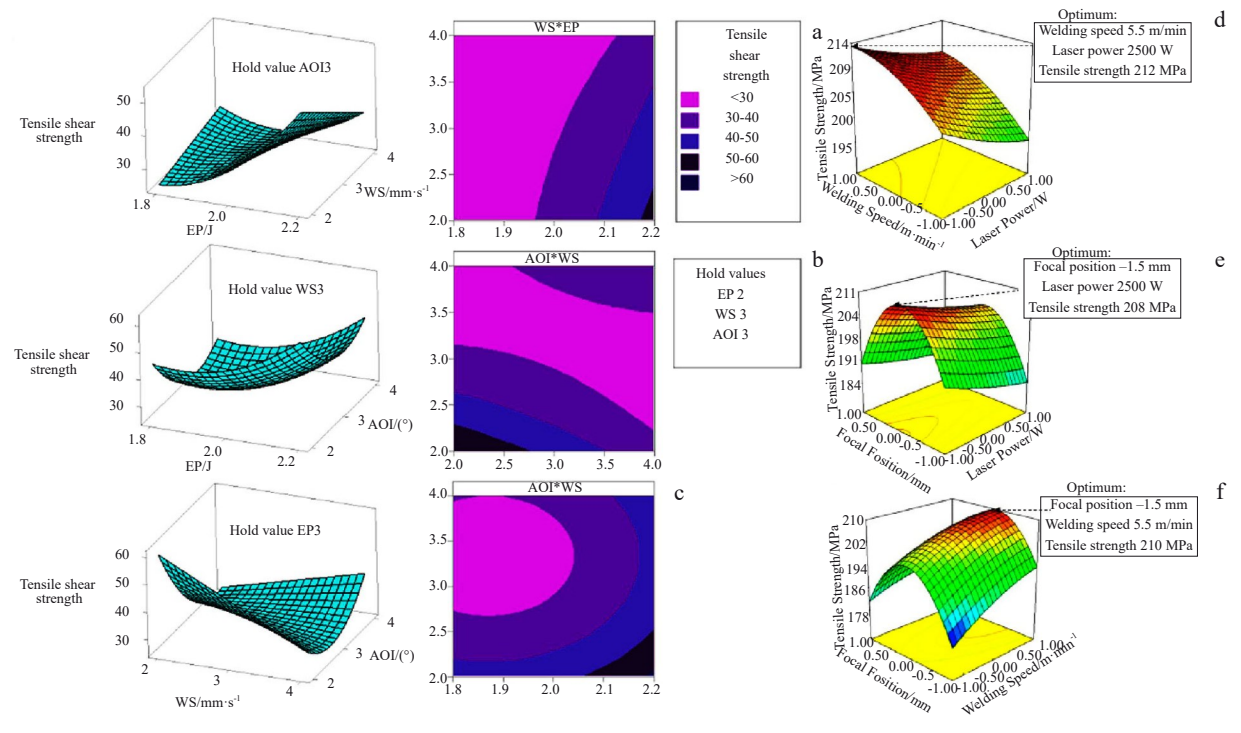


图4 AZ31 激光焊接剪切强度及抗拉强度的3种响应面图:激光功率及焊接速度,激光功率及入射角,焊接速度及入射角,激光功率及焊接速度,激光功率及焦平面位置,焊接速度及焦平面位置

Fig.4 Response surface plots for shear strength and tensile strength of AZ31 laser welding: (a) laser power and welding speed, (b) laser power and angle of incidence, (c) welding speed and angle of incidence^[50], (d) laser power and welding speed, (e) laser power and focal plane position, and (f) welding speed and focal plane position^[53]

体→树枝状晶体→等轴晶体。此外,气孔体积、焊缝凝固裂纹敏感性均与热输入密切相关^[57-58]。因此,气孔、凝固裂纹等缺陷也有所增加。

当功率密度超过 10^6 W/cm^2 时,激光束直径增大,焊接模式转为锁孔模式,进而导致焊缝的熔深和宽度逐渐变大,焊缝顶部与底部之间的宽度差逐渐减小(图5b~5d)。当热输入过小时,会出现焊缝未焊透等缺陷的产生;而过大则会出现陨石坑、气孔、咬边、熔池塌陷等缺陷^[15,59]。与热传导焊相比,锁孔焊接可以显著减小因焊接速度较小而形成的HAZ^[57-58]。热输入的增加会降低冷却速度,促进FZ晶粒的长大以及增加第二相沉淀物。在合适的热输入下,第二相含量适中并弥散在晶粒内可显著改善接头的力学性能。但仍需避免热输入过高,冷速下降导致大量第二相析出,并趋向于在晶界处富集导致晶界脆化劣化力学性能^[17]。

对于镁合金激光焊接,选择合适的激光功率至关重要。对于3 mm以上的薄板材料在保证焊接质量的前提下使用热传导焊可能难以焊透,需要降低焊接速度或者提高激光功率提升能量密度,但仍需避免过渡模式导致的焊接不稳定。

3.1.2 焊接速度

相比于激光功率,焊接速度的改变对于焊缝宽度、熔深、平均晶粒尺寸以及平均SADS的影响更大^[49]。这是因为焊接速度主要决定了熔池的冷却速度。冷却速度的快慢显著影响着焊缝区域的微观结构。较快的冷速能够产生得到焊缝更窄、晶粒尺寸更小的焊缝微观组织。相比于晶粒尺寸较大、焊缝更宽的粗大焊缝,这种细小的微观组织强度更高^[60-61]。

Bailey^[49]研究了焊接速度对2 mm厚镁合金AZ31板激光焊接接头外观及熔池和温度场的影响。焊接参数为焊接功率1000 W、保护气为Ar、流速为15 L/min以及入射角45°。如图6a、6b所示,降低焊接速度会增加焊缝宽度、熔深,并且促进低熔点合金组元的烧损。模拟结果表明,如图6d、6e所示,当焊接速度及激光功率均处于较高值时,锁孔壁温度较高,熔池内蒸发剧烈。蒸发产生的蒸汽流在前锁孔壁产生,并以高动量与后锁孔壁碰撞,导致后锁孔壁明显缩回。与此同时,蒸发产生的反冲压力,促使熔融材料快速流出前锁孔壁。但在低激光功率以及高焊接速度的条件下,虽然激光功率足以促进蒸发并产生锁孔,但整体过低的热输入很难维持锁孔的稳定,导致锁孔经常在完全穿透和部分穿透之间波动,这可能是焊

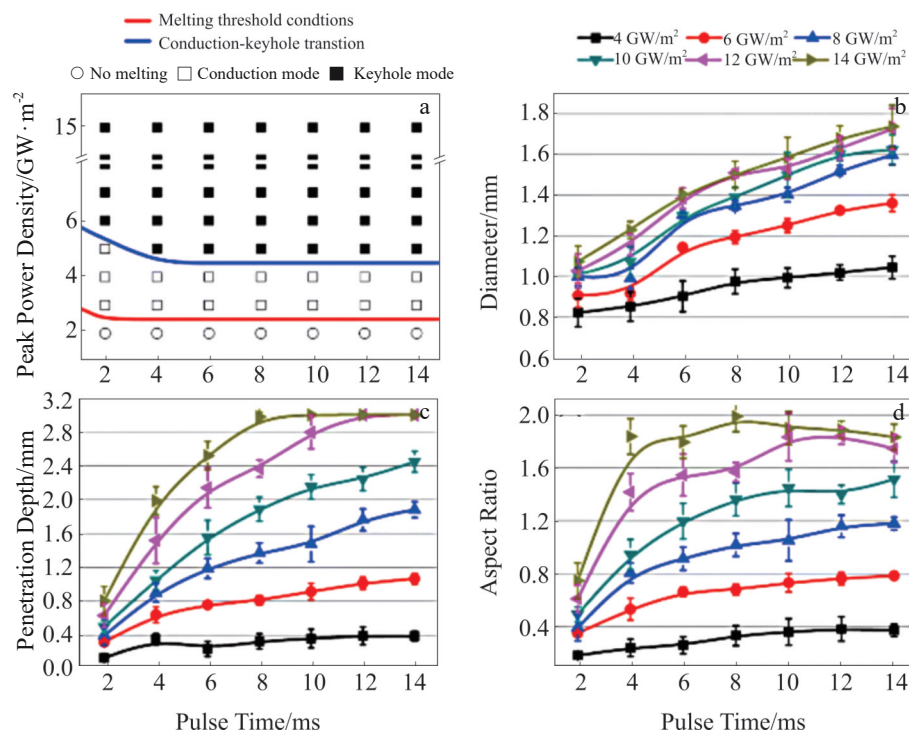


图 5 激光焊接模式与功率密度及脉冲时间的关系以及激光功率密度与激光束直径、熔深和长宽比的关系

Fig.5 Relationship between laser welding modes, power density and pulse duration (a), relationship of laser power density on the diameter of the laser beam (b), the penetration depth (or melt depth) (c), the aspect ratio (length-to-width ratio) (d)^[59]

缝粗糙的主要原因(图 6f)。

Min 等^[57]通过低功率 Nd:YAG 脉冲激光发生器对不同焊接速度下 3 mm AZ31 镁合金激光焊接微观组织进行研究,焊接参数设置为焊接功率为 40、60 W,保护气为 Ar,流速为 15 L/min。结果表明,随着焊接速度的加快,焊缝区域的宽度及熔深都有所降低,凝固裂纹产生倾向减小。Padmanaban 等^[17,28,53]研究发现使用 CO₂ 激光器在激光能量 2.5 kW、焦点位置 -1.5 mm、焊接速度 5500 mm/min、保护气 Ar、流速 20 L/min 的焊接参数下,第二相均匀分布在晶粒内部,尺寸为 100 nm 左右,提高了材料的力学性能。随着焊接速度的降低,熔合区晶粒内部析出相的含量随之增加,并且趋于向晶界处富集,这会显著劣化焊接接头的力学性能。上述研究证明了在一定的激光功率下,更高的焊接速度更易得到性能更好的接头。

上述研究证明了激光功率需要与焊接速度匹配。较大的热输入需要对应更高的焊接速度。Quan 等^[15]使用 CO₂ 激光器对 1.5 mm AZ31 镁合金进行焊接,焊接参数为焊接功率为 800、900、1000 W,保护气为 Ar,正反面流速均为 12 L/min。随着焊接速度的提升,焊缝熔深和焊缝宽度均减小。如图 7 所示,与激光功率不匹配的过慢或者过快的焊接速度会导致未熔透、熔池塌陷、表面凹坑等焊接缺陷的产生,严重影响接头的力学性能(如图 7i)。

在焊接过程中,焊接速度作为次要的影响因素通常除了需要与激光功率进行配合来保证焊缝的外观美

观、调控微观组织、抑制焊接缺陷。另外,还需要考虑待焊材料的物理性能、焊件尺寸、激光器类型、效率以及焊接工程师能力综合对焊接速度进行选择。

3.1.3 焦点位置

在其他参数确定的情况下,使待焊材料获得最大功率密度的位置被称为该条件下的焦点位置。当焦点位置沿待焊材料表面法线向外远离表面时称为欠焦,反之称为过焦。欠焦与过焦均会影响焊接的功率密度。当激光束处于焦点位置时,光斑具有最小的直径,能够得到最小的焊缝宽度。Belhadj 等^[55]使用 CO₂ 激光器以 3000 W 的焊接功率、4.2 m/min 的焊接速度以及 40 L/min 的 He 保护气流速对 3 mm AM60 镁合金进行焊接。结果发现,焦平面位置过大会增加焊缝的宽度,并且 3 mm AM60 镁合金在 +1 mm 焦平面的条件下所获得的焊缝表面更为光滑,没有明显的起伏和凹坑等不良表面,能够有效避免因应力集中所导致的裂纹萌生扩展。如图 8 所示,通过适当调整焦平面位置可以获得熔深更大、焊缝宽度更窄、表面质量优异的焊接接头。并且越高的功率密度会促进熔合区中的晶粒生长,导致焊缝处强度下降。因此,适当调整焦平面位置至焊件表面上方或下方时,可获得更为优异的焊接强度^[17,62-63]。

Padmanaban 等^[17,53]使用 CO₂ 激光器以 2500 W 的焊接功率、5.0 m/min 的焊接速度以及 20 L/min 的 Ar 保护气流速对 6 mm AZ31 镁合金进行焊接,并给出了预测激光

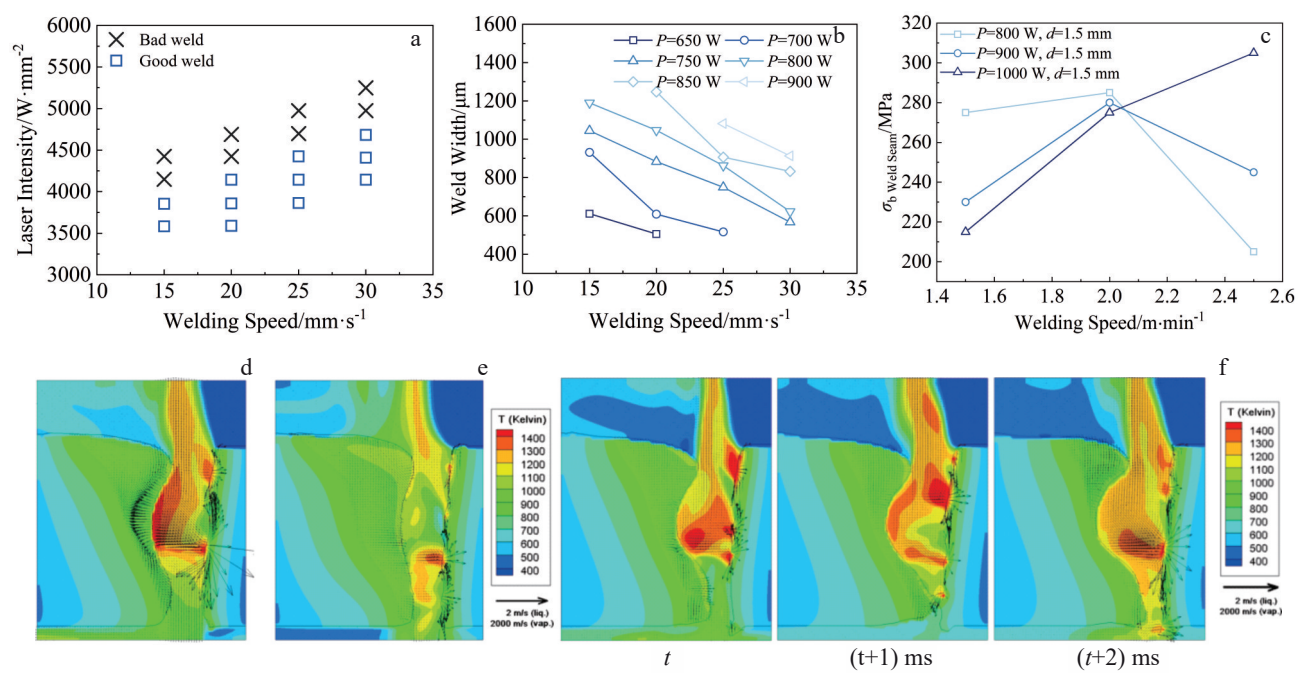


图6 不同激光功率下焊接速度对焊缝质量、焊缝宽度、力学性能的影响及高激光功率、高焊接速度，低激光功率、低焊接速度和低激光功率、高焊接速度下熔池模拟结果

Fig.6 Influence of welding speed on weld quality^[49] (a), weld width^[49] (b), and mechanical properties^[17] (c) under different laser powers; simulation results of the molten pool under high laser power and high welding speed (d), low laser power and low welding speed (e), low laser power and high welding speed^[49] (f)

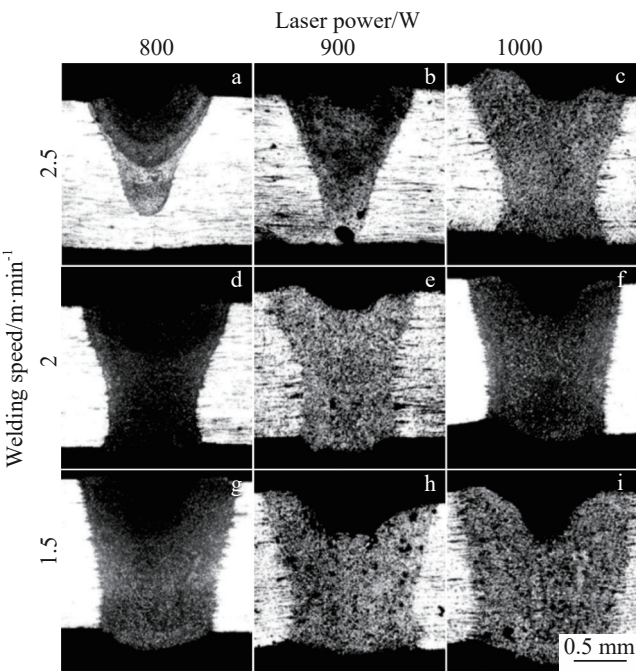


图7 不同激光功率下焊接速度对于焊缝截面形貌的影响

Fig.7 Influence of welding speed on weld cross-sectional morphologies under different laser powers^[53-54,60,92,63-66]

焊接对焊 AZ31 镁合金焊接接头抗拉强度的经验公式。预测显示，对于 6 mm 的板材，最佳焦平面为-1.19 mm。实验结果则如图 8c 所示，在-1.5 mm 的焦平面位置，焊接接头可获得最高的抗拉强度。

对于不同厚度的镁合金板件，需要对其焦平面进行调整。其板厚和最佳焦平面的位置大致遵循焦平面距离焊件表面的距离在 20%~50% 板厚之间的规律^[53-54,60,63-67]。相比于焦点在待焊件表面，一定的焦点位置偏差可以使焊缝整体热输入更加均匀，避免局部热量过大，产生熔池不稳定现象。

3.1.4 入射角

目前有关镁合金激光焊接入射角(入射方向与水平面之间的夹角)对焊接质量的研究还不足。Salleh 等^[50,68]通过光纤激光焊对 0.6 mm AZ31 镁合金进行焊接得到了搭接焊焊接接头。焊接参数设置为焊接功率为 1.8、2 和 2.2 J，焊接速度为 2、3 和 4 mm/s，以分析入射角对搭接接头宏观形貌以及剪切强度的影响。结果表明，当入射角由 98°降低至 97°时接头力学性能急剧下降，继续降低至 96°时强度有所回升但仍低于 98°时所得强度。并且较小的照射角可以减少低熔点合金组分的烧损，避免顶部的填充缺陷，但会使熔深降低。而对焊中对于入射角的研究较少，Murakami 等^[69]通过 80°的入射角激光焊焊接莲

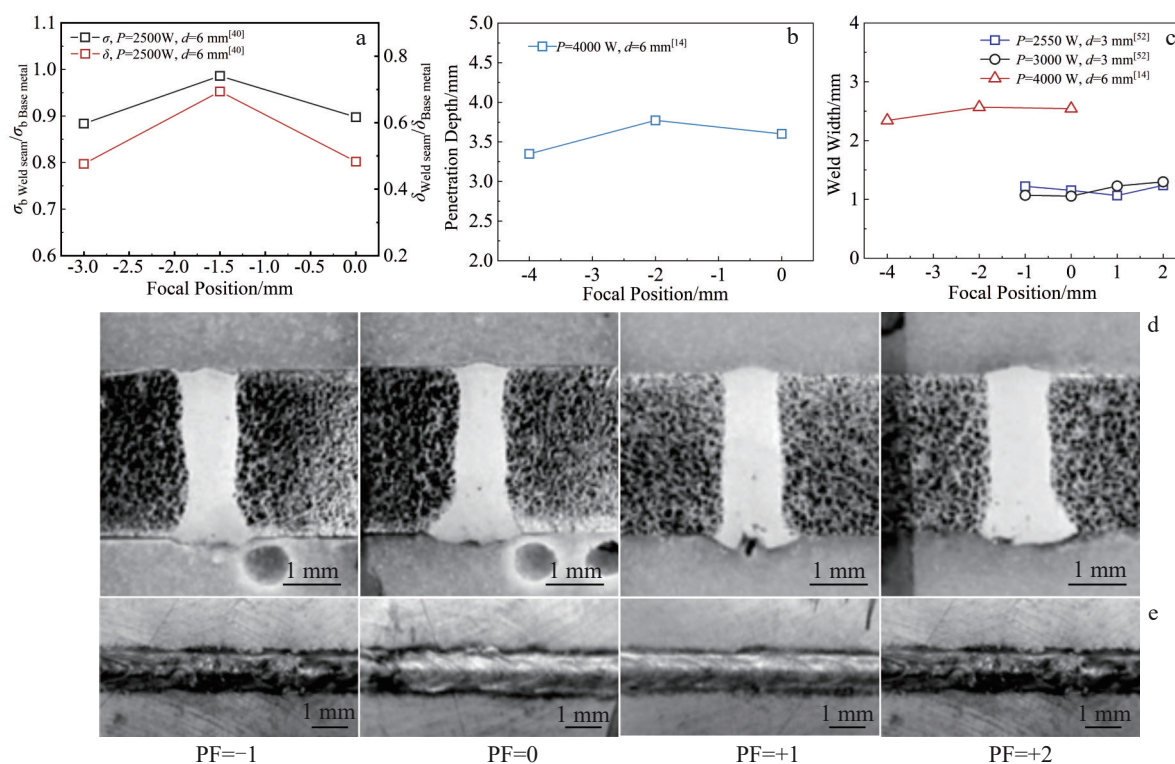


图 8 焦平面位置对镁合金焊缝的影响

Fig.8 Influence of the focal plane position (PF) on magnesium alloy weld seams: (a) mechanical properties^[17], (b) penetration depth^[17,55], (c) weld width^[17], (d) weld surface morphology as illustrated in Ref.[55] from Fig.8a, and (e) weld cross-sectional morphology as illustrated in Ref.[55] from Fig.8a

花型多孔镁,其焊接接头截面出现了不对称以及鼓包的现象。入射角较大可能会导致未焊透及锁孔不稳定等现象的产生,但一定的与焊接方向的夹角能对未焊接部位进行预热,分解在预处理后产生的氧化膜,降低气孔率及夹杂物。

3.2 激光焊接质量调控措施

3.2.1 激光器类型选择

目前常用的镁合金激光焊接器有以下 5 种:二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)、光纤(fiber)、掺钕钇铝石榴石(neodymium-doped yttrium aluminum garnet, Nd:YAG)、圆盘(disk)以及二极管(diode)激光器。其波长分别为 10.6、1.075、1.064、1.030 μm 以及 0.9~1.07 μm 。研究表明,许多金属在较短波长下具有更高的吸收率。因此,能够产生较短波长的激光器,可以降低深熔焊所需的热输入阈值,产生更稳定的熔池^[70]。

图 9a 展示了不同材料对于激光的吸收率,对于具有较高反射率的镁、铝等工程结构材料,镁对波长约为 1 μm 的红外激光器的吸收率约为 14.7%,约为钢的 2/5,大部分激光照射到材料上其中绝大部分激光均因反射而浪费,使得能量耦合率极低,从而阻碍激光热源发挥其能量密度的优势^[71]。图 9b 展示了不同反射率材料的深熔激

光焊接中锁孔壁上吸收的激光能量示意图。虽然镁的固有吸收率要远低于铁,但通过多次反射之后其对激光的吸收率与铁相比可由单次吸收的 40% 提高到 73%。

如图 9c、9d 所示,对于 Mg-Al 系镁合金而言,其主要组成元素 Mg 与 Al 对激光的吸收系数均会随着激光波长的增加而提高,绝大部分金属对于 10.6 μm 波长红外光反射强烈,而对于 1.06 μm 波长的红外光反射较弱^[72]。因此,对于高反射材料,激光束在锁孔中的多重反射吸收是提升高反射材料激光吸收率的主要机理。对于高反射材料而言,深熔焊接可极大改善焊接过程的能量耦合效率。但是,仍然存在沿锁孔深度方向能量不平衡分布这一问题,这将导致锁孔的不稳定性加剧,从而产生孔隙率和下垂等低质量焊接缺陷^[71]。

通常通过以下两个参数来衡量光束质量的好坏:光束参数乘积(beam parameter product, BPP)以及光束质量因子(beam quality factor, M^2)。BPP 定义为束腰半径乘以远场发散角; M^2 定义为光束参数乘积与基模高斯光束的光束参数乘积之比。表 4 总结了常见激光器的参数。当 BPP 越小, M^2 越趋近于 1 时,光束质量越高(disk>Nd:YAG>CO₂),光斑尺寸越小,焊透率越高,光斑尺寸对表面质量以及锁孔的依赖性越小,焊接接头的缺陷更少。如表

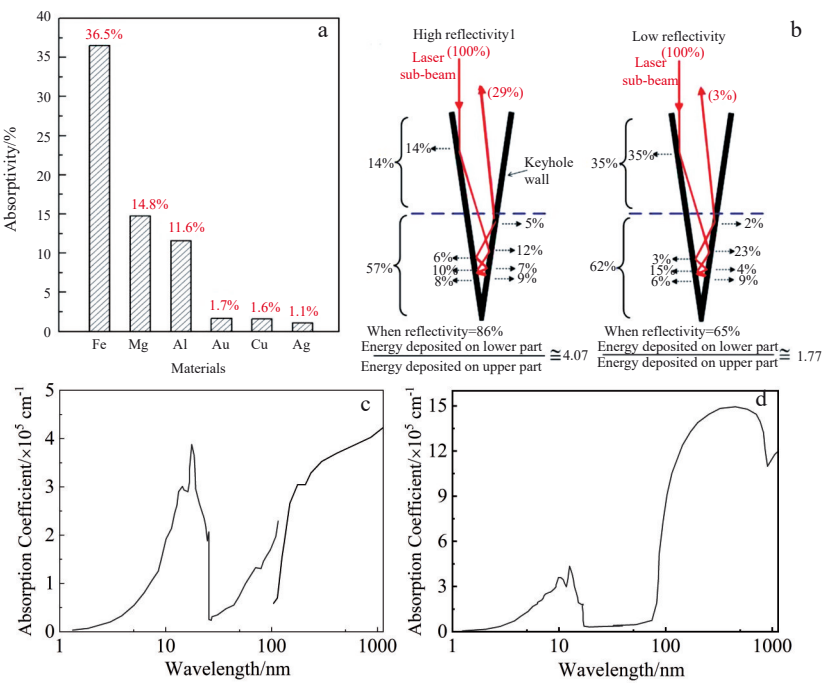


图9 不同材料对红外激光的吸收率;不同反射率材料在激光焊接时锁孔内壁吸收能量分布;镁与铝对不同波长激光的吸收系数
Fig.9 Absorptivity of infrared lasers for different materials (a), energy absorption distribution diagram within the keyhole wall during laser welding for materials with different reflectivity (b)^[71], Absorption coefficients of magnesium (c) and aluminum (d) for lasers of different wavelengths^[72]

4所示,将公式(2)、(3)代入公式(1),在理论条件 $M^2=1$ 时,计算5种激光器的BPP分别为0.328、0.342、0.338、3.38、0.287~0.341。因此,对于镁合金的焊接,具备理论最小BPP的二极管激光器是最适合的焊接方式,其次分别为圆盘激光器、掺钕钇铝石榴石激光器、光纤激光器以及二氧化碳激光器^[15,18,43,72-81]。

从理论来看,二极管激光器具备更低的BPP值、更小的激光波长。且实验表明,在焊接1 mm板材的情况下,相较于二氧化碳激光器,二极管激光器在接头中产生的孔隙率更小。然而,二极管激光器散焦的特性导致其只适合进行热传导焊。因此,无法焊接较厚的板件,并且存在较大的HAZ,从而降低接头力学性能。因此,二极管激光器的适用性较差,还需进一步研究改善^[58]。

$$BPP = W\theta$$

(1)

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{W_0\pi}$$

(2)

$$M^2 = \frac{W\theta}{W_0\theta_0}$$

(3)

式中: W 是束腰半径, θ 是远场发散角, $W_0\theta_0$ 是基模高斯光束的光束参数乘积。显然,使用波长较短的激光器对镁合金进行深熔焊是最适合的激光焊模式。但相比于传导焊而言,深熔焊会使得大量镁及合金元素蒸发,通常需要填充金属对熔池进行补充。若处理不当,可能会引入夹杂,以及形成填丝层间凝固裂纹,影响焊接接头性能。因此,需要根据实际情况对焊接方式进行合理取舍。

3.2.2 填充金属材料选择

使用填充金属可改善镁合金焊接本身的固有顽疾:

- (1)可以补偿烧损的低熔点合金元素组元;
- (2)降低气孔率;

表4 常见激光器参数					
Table 4 Parameters of common lasers					
Types	Wave length/ μm	BPP/mm·mrad ($M^2=1$)	Maximum power/kW	Photoelectric conversion efficiency/%	Ref.
Disk	1.030	0.328	24	25-35	[77]
Fiber	1.075	0.342	100	25-35	[78]
Nb:YAG	1.064	0.338	4	5-25	[79]
CO ₂	10.6	3.38	20-45	10	[80]
Diode	0.9-1.07	0.287-0.341	40	45	[81]

(3)控制焊缝区域的合金成分避免应力腐蚀开裂和焊接接头脆性;

(4)保证焊接过程的稳定性;

(5)形成焊接余高,增加接头的有效承载面积,提高接头强度^[36]。

截至目前,应用于镁合金激光焊接填充金属的开发仍处于起步阶段,主要以线材为主。关于镁合金填充丝焊接的微观组织和力学性能已有报道,通过填充金属可以有效减少 Zn 的烧损并且优化焊道的形状^[82-83]。

在激光填丝焊接过程中,需要对焊接参数进行精确的控制,包括:送丝速度、角度及位置以及填充丝与焊接速度以及激光功率的匹配程度^[64]。例如:使用粗填充丝可能难以被小激光束熔化,容易导致焊接工艺不稳定甚至焊接失败^[39]。此外,受限于镁合金的塑性变形能力,制造直径小于 2 mm 的镁合金的填充丝非常困难且昂贵,而直径越小的焊丝往往被认为越适用于镁合金激光焊接^[64]。因此,使用 LBW 工艺和填充丝通常被认为是一个复杂而困难的工艺,其对焊接的精度要求很高。

Chen 等^[84]通过使用 CO₂ 激光器对 4 mm AZ31 镁合金进行焊接,焊接参数为焊接功率 1500 W、焊接速度 3 mm/min、保护气为 Ar、流速为正面 10 L/min 以及背面 12 L/min。在焊接区域上方放置填料条带代替填充丝进行焊接。因为通过轧制生产薄板相较于小直径的焊丝而言工艺更加成熟,通过这种方式制备的焊接接头可以避免凹坑等表面质量缺陷。同种成分的填充金属可以使接头效率(焊接接头抗拉强度/母材抗拉强度)达到 90%;通过添加 1.5wt% 的 Mn 元素可以促进晶粒细化,使接头效率达到 99%。对于镁合金焊丝的成分设计,目前主流思路是通过使用同种金属或成分稍高的过匹配金属进行填充以补偿焊接强度的损失^[85]。对于不含铝的合金一般使用含铝的焊丝进行焊接;对于铸造镁合金一般使用更为便宜的 AZ91 代替 AZ61,而 AZ61 通常被用作锻造合金的填充金属^[39]。

对于高铝含量的 AZ 系镁合金,焊接的主要问题是由于 β -Mg₁₇Al₁₂ 第二相的连续及网状沉淀分布导致力学性能下降^[86]。因此,使用低铝含量的 AZ 系镁合金焊丝以降低焊缝熔融区 β -Mg₁₇Al₁₂ 沉淀相数量是提升 AZ 系镁合金力学性能的常见措施^[87]。

上述分析发现,目前激光填丝焊对镁合金组织及力学性能的研究较少,且并不成体系。对于填充金属的研究主要集中在 TIG 焊上,已有利用 TIG 焊及不同 Al 含量的焊丝对 2 mm AZ80 镁合金进行焊接^[88],后续对于镁合金激光填丝焊研究可以借鉴 TIG 焊相关研究展开并进一步深入研究。

3.2.3 保护气应用

镁的活性很活泼,需要在焊接过程中进行气体保护。孔隙是造成焊接接头裂纹扩展的重要原因之一。因此,

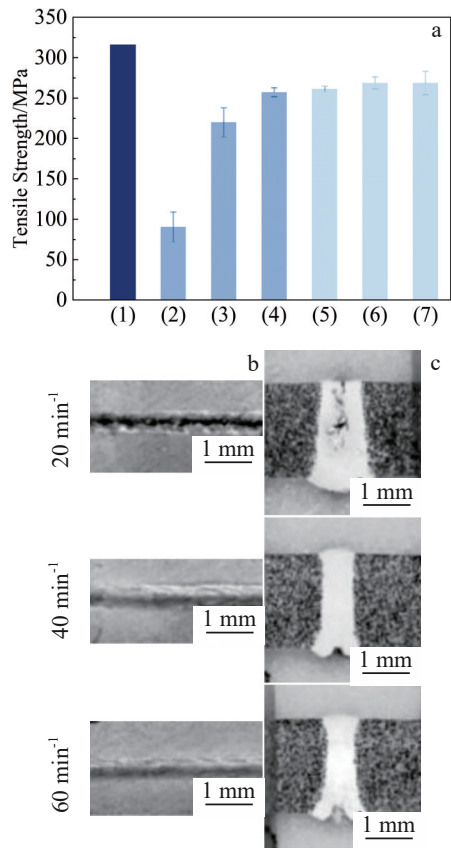
通过使用合适的焊接气体可以显著减少接头中的孔隙数量,从而抑制接头在服役过程中的裂纹萌生和扩展^[64]。不同的保护气可能会导致接头处不同的熔深、焊缝宽度以及孔隙率。

常见的保护气种类有 Ar、He 两种。He 具有 24.5 eV 的高电离电势以及较高的等离子体形成阈值,这在一定程度上会影响等离子体的形成,从而很少应用于激光焊接^[39,68]。与 He 相比,Ar 成本更低。因此,在实际研究中,通常使用 Ar 气作为保护气体^[15,57,60,63-64]。在 He 中混入少量的 Ar 在降低成本的同时,也可以降低散焦,改善电离难的特性,因而也成为激光焊接保护气选择之一^[89]。

为了确定最适合 AZ31 镁合金的保护气,Hiraga 等^[73]使用 2 kW CO₂ 和 Nd:YAG 激光器对 AZ31-H24 镁合金进行了焊接,采用 2000 W 焊接功率、50 mm/min 焊接速度、正面 3 L/min Ar 和背面 4.8 L/min He 的保护气速率,获得了焊接质量更好的焊缝;在背面无保护措施的情况下,正面使用 He 保护相较于 Ar 会使焊缝表面恶化。Ar 和 He 正面保护的强度差异源于更细的晶粒尺寸以及更小的枝晶臂间距使得焊接接头的强度更高。且 Nd:YAG 激光器因为产生等离子体的倾向小于 CO₂ 激光器,因而即使在正面 He 保护,背面无保护的条件下也可得到表面质量较好的焊缝。如图 10a 所示,Nd:YAG 激光器能够得到强度更高、更稳定的焊接接头。Dhahri 等^[65]使用 5 kW CO₂ 激光器设定焊接参数为 2000 W、焊接速度为 2 m/min、焦点位置为 +1 mm 或 -1 mm 对 4 mm 厚 WE43 镁合金进行了焊接,发现当 He 气流流量低于 50 L/min 时可能导致熔池飞溅或塌陷。为了得到表面质量更好的焊缝,需要提高气流量超过 50 L/min。Belhadj 等^[54]以 3000 W 的焊接功率和 4.2 m/min 的焊接速度对 3 mm AM60 镁合金进行焊接,并研究了不同保护气流速 20、40、60 L/min 对于焊缝形貌的影响。如图 10b 和 10c 所示,当保护气流速较小(20 L/min)时会产生轴向的裂纹,而当流速增加时会提高等离子体密度,获得更窄的焊缝。Bannour 等^[55]设定焊接参数为焊接功率 1000 W、焊接速度 7 m/min、入射角 45°模拟了不同流速 10、20 和 30 L/min 对于焊缝的影响。当气体流速达到一定阈值时,能够加速焊缝的凝固,从而获得更高的熔深和更窄的焊缝。并且这样也可以避免由于气体流速过低导致不能较好地保护熔池,使得熔池被氧化得到黑色的焊缝的现象^[90]。因此,对于 AZ 系镁合金中心及背面使用较高流速的 Ar 保护可以获得好表面质量、窄焊缝、高力学性能的激光焊接头。

3.2.4 表面质量控制

镁合金的表面状况会影响入射激光束的能量吸收和锁孔的阈值功率密度。相对于铁,镁具有较低的固体吸收率(表 3)。在室温下,CO₂ 激光束吸收率约为 3%(熔点时吸收率略高),但在形成锁孔后吸收率可接近 100%^[91]。



(1) AZ31 base material; (2) front gas Ar, no back gas; (3) front gas Ar, back gas Ar; (4) front gas Ar, back ga: Ar; (5) front gas Ar, no back gas; (6) front gas Ar, back gas Ar; (7) front gas Ar, back gas Ar, shielding box gas Ar^[73]

图 10 保护气体对镁合金焊缝的影响

Fig.10 Influence of shielding gas on magnesium alloy welds: (a) the effect of shielding gas and position on the mechanical properties of welded joints; (b, c) the influence of different welding gas flow rates on the surface and cross-sectional morphology of the welds^[54]

在室温下,Nd:YAG激光束的吸收率为8%~20%,其激光波长为1.06 μm 恰好处在MgO的零吸收区间范围内(其有3个透明波段,分别为:0.2~0.4 μm 的紫外波段、0.7~3.0 μm 的红外波段以及>10³ μm 的波段)。因此,表面的MgO层不会影响基体对激光的吸收^[67,92]。研究表明,MgO对激光的吸收率大约为20%。但对于10.6 μm 的CO₂激光器,MgO的吸收率甚至可以达到93%~98%。这表明氧化膜可以提高对CO₂激光束的吸收率。但是,由于MgO十分稳定,且具有较高的熔点(2852 ℃),在焊接过程中,MgO难以分解,常常随着熔池凝固而遗留在焊缝中,成为镁合金焊接过程中的主要夹杂物之一。因此,在焊接前,需要对氧化膜进行预处理^[93]。因为MgO极易吸水形成Mg(OH)₂,其在焊接过程中容易分解成MgO和

H₂O,以致形成气孔^[39]。

Harooni 等^[94-98]有关氧化层对零间隙搭接接头配置AZ31B 镁合金焊接质量的影响研究也证实了这一观点,通过使用光纤激光器对1.5 mm AZ31 镁合金进行了搭接焊,焊接参数分别为焊接功率1000、2000和3000 W、焊接速率30 mm/s、预热速率100 mm/s、无保护气。如图11所示,搭接焊过程中AZ31 镁合金表面的氧化成会导致界面处形成气孔,并且氧化层的存在会影响基体对激光的吸收率导致锁孔的失稳。在激光焊接之前引入等离子弧预热源进行预处理,随着Mg(OH)₂分解,焊缝区域会产生明显的气孔;而通过双光束激光焊焊接所得到的焊接接头的表面质量及强度均优于单光束焊接,且焊接过程更加稳定。

在焊接之前,可通过物理或者化学方法对表面进行预处理以降低表面氧化层对焊接的影响,从而降低气孔和夹杂物等非连续组织的形成,能够对焊接接头的力学性能产生一定的改善效果。

3.2.5 物理场辅助焊接

目前,有关外部物理场对于镁合金激光焊接的研究主要集中在磁场对于镁与异种合金之间的连接。Zhou

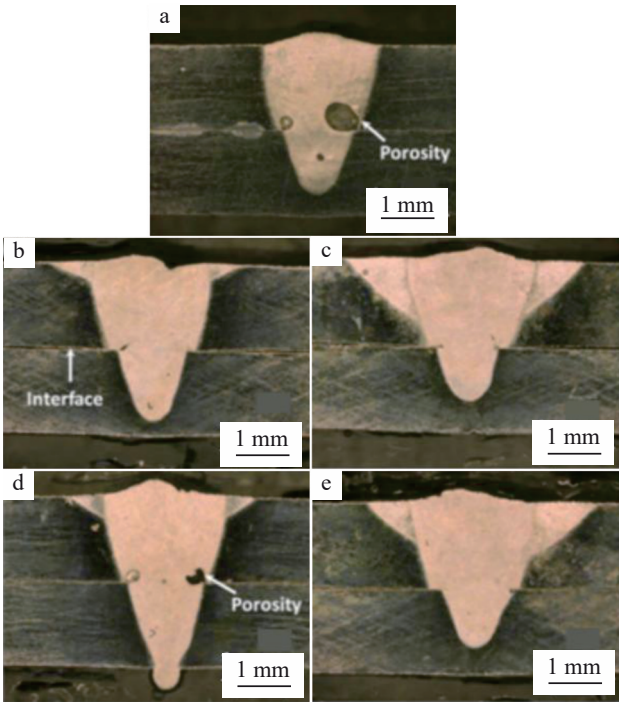


图 11 激光焊接 AZ31 镁合金搭接接头抛光后的横截面照片

Fig.11 Polished cross-sectional images of lap joints in AZ31 magnesium alloy welded by laser welding: (a) without preheating and (b–e) all welds were performed using a two-pass process with preheating, where power 2000 W, focal length 40 mm (b); power 3000 W, focal length 40 mm (c); power 2000 W, focal length 35 mm (d); power 3000 W, focal length 35 mm (e)^[95]

等^[99]通过模拟及试验研究了外加磁场作用对镁/铝异种合金激光焊接质量的影响,通过使用光纤激光器对 1.2 mm 厚的 AZ31 镁合金及 1.4 mm 厚的 6061 铝合金进行了搭接焊,焊接参数分别为焊接功率 1400 W、焊接速度 1500 mm/min、焦点位置为 0 mm、保护气为高纯 Ar,流速为 25 L/min,保护气入射角为 45°、磁场由 Nd₂Fe₁₄B 磁体在焊接熔池下供给。模拟结果显示,熔池的温度场梯度减小,热量分布均匀,锁孔面积扩大。这表明磁场促进了熔池的传热。此外,洛伦兹力提高了熔池的流速,扩大了液态金属的流动区域,促进了熔池中的传质能力(图 12a~12d)。图 12e、12f 显示,随着磁场的引入,熔池的渗透变得更深,熔池的形状变得对称,气孔和裂纹等缺陷减少。

此外,Tao 等^[100]通过模拟及实验研究了外加磁场对镁/钢异种合金激光焊接质量及力学性能的影响。在 0、150、250 和 350 mT 磁场强度下,通过使用光纤激光器进行 1.5 mm 厚 AZ31 镁合金与 1.4 mm 厚 DP590 钢的搭接焊。焊接参数分别为焊接功率 900 W、焊接速度 30 mm/s、焦点位置为 +2 mm、保护气为高纯 Ar,流速为 15 L/min、磁场由永磁体在焊接熔池下方提供。与 Zhou 等^[99]结果类似,外部磁场可以削弱等离子体的屏蔽作用,提高熔体对激光的吸收率,产生的热电磁力促进了熔池的流动,加强了熔池的搅拌作用。不同磁场强度下最大负载为 1200、1900、2103 以及 1745 N。可见,外加磁场在一定程度上可以提高焊接接头的力学性能。性能劣化的原因为过渡

磁场导致热裂纹的产生。

随着镁合金在轻量化领域的应用日渐广泛,对于镁与异种金属的研究至关重要。由于异种合金之间物理性能、冶金相容性的差异往往使得异种合金焊接接头力学性能较差。因此,如何低成本获得高性能的异种合金焊接接头是制约镁合金轻量化应用的关键。

3.2.6 焊接夹具的应用

由于镁合金的弹性模量较低,焊接冷却过程中易因收缩不均匀产生翘曲、较大残余应力或弹性变形。因此,在镁合金的焊接过程中,往往需要使用合适的夹具进行变形约束^[101-102]。激光作用时会在镁合金表面 200 μm 产生高达横向 78 MPa 以及纵向 45 MPa 的残余应力,而在背面的残余应力仅有 23 和 7 MPa。这种残余应力分布在非均相和多相材料中会导致力学性能产生复杂的变化。例如:在循环载荷的作用下,残余应力较大的区域更易诱发裂纹萌生^[103]。

与电弧焊相比,LBW 较低的热输入可以将残余应力以及变形控制在比较小的范围。此外,残余压应力可以抑制服役过程中裂纹的扩展,相较于 FSW 以及 TIG, LBW 具有更大的残余压应力场,具有更为优异的抗疲劳性能^[104]。因此,通过合适的夹具控制焊接接头处的变形从而使焊接接头获得较大的均匀残余压应力场分布,是提高镁合金激光焊接接头疲劳性能的潜在途径之一。

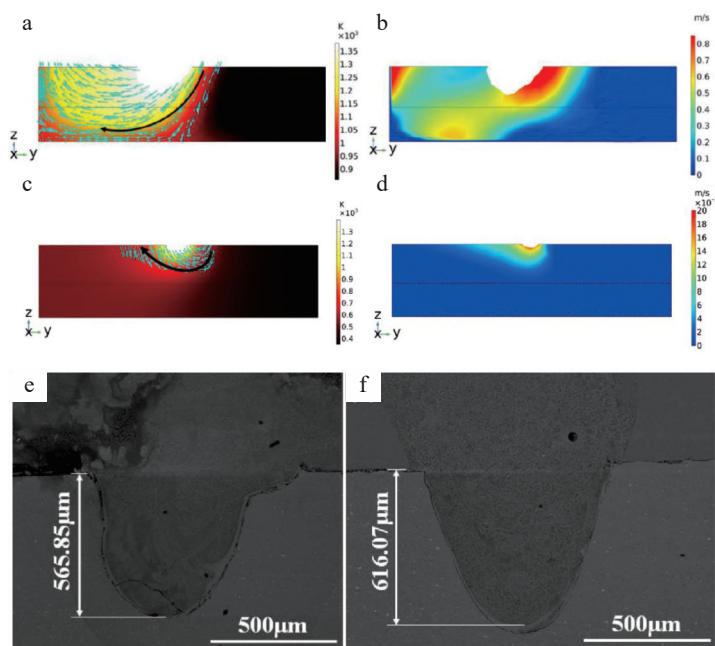


图 12 外加磁场对 AZ31 镁合金与 6061 铝合金焊接质量的影响

Fig.12 Effect of an external magnetic field on the welding quality of AZ31 magnesium alloy and 6061 aluminum alloy: (a) external magnetic field, temperature distribution and velocity vectors; (b) external magnetic field, velocity distribution; (c) no external magnetic field, temperature distribution and velocity vectors; (d) no external magnetic field, velocity distribution; (e) no external magnetic field, cross-sectional view of the lap weld; (f) external magnetic field, cross-sectional view of the lap weld^[99]

4 镁合金激光焊接构件的显微组织与性能研究

4.1 微观组织

对于较高功率、高能量密度的激光焊而言,热影响区很窄,宽度通常只有几个晶粒大小。热输入的增大,导致焊缝区域热影响区的增大以及晶粒尺寸的长大。并且,较快的焊接速度使得Al元素在液-固界面处的偏析,诱发更多 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 析出,但其尺寸有所下降^[105]。

如图13所示,镁合金激光焊接接头的熔合线附近温度梯度较大,附近的微观组织主要以柱状晶为主^[106-107]。而在激光焊内部的微观组织主要以 $\alpha\text{-Mg}$ 为基础形成的等轴晶粒,随着Al含量的逐渐增加激光焊内部诱发了更多 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的析出。当Al含量为6%时,如图13d所示, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相以球状为主,Al含量进一步增加至8%时, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相有球状和片层状两种存在形式。当Al含量达到9%时, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相以片层状形式析出^[105,108-110]。同时,我们的前期研究结果显示,具有一定织构强度的镁合金通过激光焊焊接,织构强度会有一定的削弱,但并不会完全消失;而激光填丝焊的组织无织构产生。

Zn元素含量较高的镁合金,如ZK60镁合金,可焊性较差,极易诱发凝固裂纹。Zn元素含量偏高,晶粒容易在焊接过程中液化。同时,由于Zn含量增加导致较宽的凝固范围和较低的融化温度,导致低熔点元素烧损增加^[111]。

4.2 硬度

因为激光焊接的高焊速及高能量密度,使得焊缝区域热输入较低,晶粒尺寸不会过度长大。基于Hall-Pitch关系,激光焊接接头区域硬度往往要大于母材,热影响区通常存在软化硬度最低^[112]。

Shen等^[105]使用3 kW CO₂激光器研究了3 mm AZ91镁合金在1 kW的激光功率及1800~2800 mm/min的焊接速度下激光焊接显微硬度,BM、HAZ和FZ的平均显微硬度分别为58、56以及64 HV(图14)。

Marya等^[113]使用1.2 kW Nd:YAG激光器对2 mm AZ91镁合金在900 W的激光功率及64和110 mm/s的焊接速度下激光焊接显微硬度进行了研究。结果表明,随着焊接速度的增加,焊缝中心的硬度也随之增加。这是由于提升焊接速度,细化了焊缝区域的晶粒尺寸,进而提升硬度。

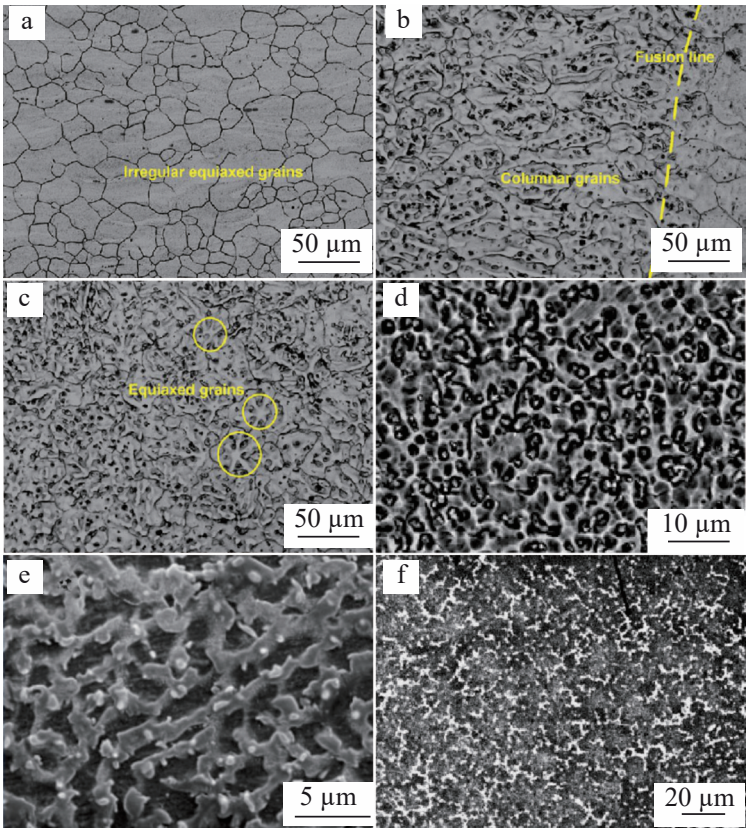


图13 不同Al含量的变形Mg-Al系镁合金焊接微观组织

Fig.13 Microstructures of welded deformed Mg-Al series magnesium alloys with varying aluminum contents: (a) base metal of AZ31, (b) near the fusion line of the AZ31 weld, (c) laser-welded zone in the AZ31 weld^[108], (d) laser-welded zone in the AZ61 weld^[109], (e) laser-welded zone in the AZ80 weld^[110], and (f) laser-welded zone in the AZ91 weld^[105]

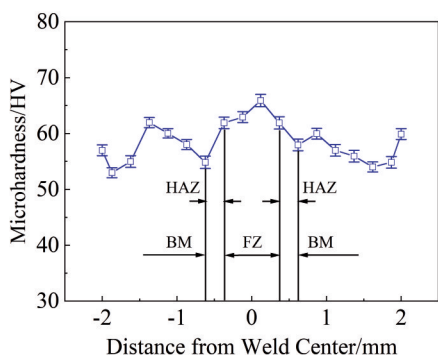


图 14 焊接速度 2200 mm/min, AZ31 镁合金激光焊接接头的典型硬度分布

Fig.14 Typical hardness profile across the laser welded joint at a welding speed of 2200 mm·min⁻¹[105]

4.3 抗拉强度

十几年前,研究人员开展镁合金激光焊接抗拉强度的研究主要集中于焊接参数对抗拉强度的影响。例如,Padmanaban 等^[17]发现随着焊接速度的下降,第二相会区域晶界处富集,劣化接头的力学性能。同时,较快的焊速会导致焊接参数不匹配,焊缝区域热输入降低而导致焊接质量的下降,影响接头的抗拉强度。上述影响在第三部分焊接参数内已经涉及,在此不再进一步赘述。

表 5 以 AZ31 镁合金为例,总结了目前镁合金母材及焊接接头的力学性能,目前,AZ31 镁合金激光焊接可以保证焊接效率($\sigma_{\text{Weld seam}}/\sigma_{\text{Base metal}}$)可以达到 80% 以上,但延伸率目前波动较大($\delta_{\text{Weld seam}}/\delta_{\text{Base metal}}$)在 20%~80% 之间,仍有很大的提高空间,后续研究可以向提高焊接接头塑性集中。

近年来,研究人员逐渐关注焊接熔池对于接头力学性能的改善研究。Hao 等^[114]使用光纤激光器对 2 mm AZ31 镁合金在 2 kW 及 2 m/min 的焊速下的光束震荡辅助激光焊接接头力学性能研究。结果表明,所有焊缝都会沿着焊缝区域开裂。一定的光束震荡对焊接接头力学性能的改善并不明显,但随着震荡半径和震荡频率的增加,焊缝的力学性能均会降低。在 50 Hz 的频率下,当振荡半径从 0.5 mm 增加到 2.0 mm 时,最大抗拉强度(UTS)从 240 MPa 降低到 208 MPa,延伸率(EL)从 9.6% 降低到 7.5%。随着震荡半径为 1.0 mm 时的震荡频率增加,EL 在 75 Hz 时达到最大值 9.2%,而当频率低于 75 Hz 时,UTS 约为 232 MPa,当频率增加到 100 Hz 时降低到 222 MPa。

Lei 等^[115]使用 CO₂ 激光器对 3 mm AZ31 镁合金在不同激光功率及焊接速度下的超声波辅助激光焊接接头的力学性能进行研究。结果表明,在激光功率为 1.4 kW、焊接速度为 1000 mm/min、焦平面为 -1 mm 及超声波偏移量为 35 mm 的情况下,随着预紧力的提高,试样的抗

拉强度及伸长率均得到了提高。如图 15 所示,当预紧力为 377.1 N 时,强度和伸长率达到最大值,相较于未施加超声辅助时抗拉强度提高了 7%,约为母材的 87%。伸长率从 3.2% 增加值 9.1%,达到了母材的 64%。

4.4 疲劳强度

与其他常见结构件材料铝(60 MPa)、铁(190 MPa)以及钛(350 MPa)相比,纯镁(16.5 MPa)具有极低的疲劳极限^[116-119]。因此,镁的抗疲劳潜力要远远低于其他结构件金属。如图 16 所示,常用 AZ31 镁合金与常用钢、铝合金以及钛合金相比疲劳数据较少,疲劳强度较低。因此,在商用车尤其是挂车行业中镁合金及其焊接部件通常适用于非承载或受载荷较小的零部件。

目前,对于 AZ 系镁合金激光焊接接头疲劳的研究大多集中在 AZ31 镁合金上,表 6~7 以 AZ31 镁合金为例,总结了其母材及焊接接头的疲劳强度。其疲劳强度受组织特征及加载条件的影响较大,通常镁合金激光焊接接头疲劳强度要低于相对应的母材,约为其母材强度的 60%~80%^[25,31]。激光焊接较小的热输入及较快的冷却速度会细化熔合区内晶粒。而局部合金元素富集可能导致 β

表 5 AZ31 镁合金母材及焊接接头力学性能

Table 5 Mechanical properties of base metals and welded joints of AZ31 magnesium alloy

UTS/MPa		EL/%		Ref.
Base metal	Weld seam	Base metal	Weld seam	
315	305	12	6.5	[14]
251	247	24	19	[15]
215	212	14.7	12.1	[16]
280	260	19, 9.5	5	[17]
293	237	12.8	7.26	[18]
202	198	6.4	6	[19]
274	221	12	5.8	[20]
247	225	28.86	13.59	[21]

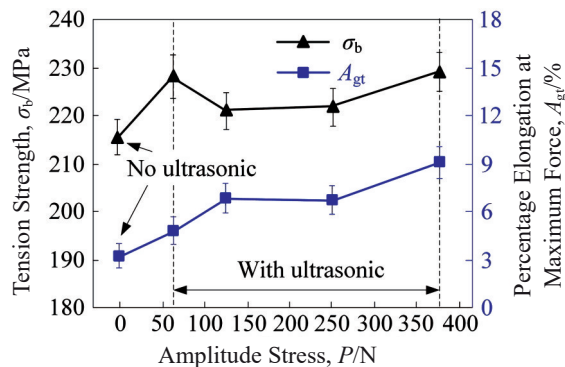


图 15 预紧力对拉伸强度和延伸率的影响

Fig.15 Effect of amplitude stress on tension strength and elongation^[115]

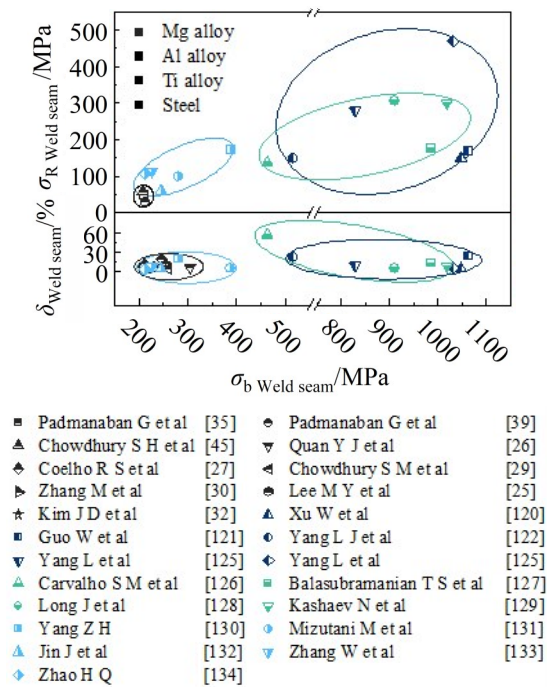


图 16 AZ31 镁合金激光焊接力学性能与常见钢、铝合金及钛合金对比(R 为应力比)

Fig.16 Comparison of mechanical properties of laser welded AZ31 with common steel, aluminum, and titanium alloys (R denotes the stress ratio)

-Mg₁₇Al₁₂及Al₈Mn₅两种第二相析出,存在于晶内均匀分布的第二相及晶间富集的第二相对于材料的影响是截然相反的^[28];同时熔合线附近晶粒受热量梯度的影响,存在很窄的柱状晶区域,晶粒在热源的作用下会有一定程度的长大,这种HAZ的组织特征会劣化接头性能;而在焊接过程中,由于表面处理不当、保护不充分等原因会引入

的从底部到顶部逐渐减少的夹杂物以及从顶部到底部逐渐减少的气孔,其分布呈现中心多大气孔、熔合线附近多小链状气孔的分布特征^[140-141]。表面尖锐的夹杂物与基体之间非连续的组织特征通常导致较大的应力集中易于裂纹形核,虽然气孔的形状较为规则但其表面晶粒多是由于定向凝固所形成的多孔隙柱状晶,其晶粒之间结合强度低于等轴晶粒,在垂直于晶粒生长方向上力学性能较差,因此可能成为裂纹的形核的潜在位点^[142]。

4.5 耐蚀性能

在镁合金的车体应用中,除了必须考虑的力学性能外,雨、雪等复杂的服役环境往往影响着材料的服役寿命。镁通常被认为是耐腐蚀性较差的材料^[143-145],其耐腐蚀性能受杂质的影响显著,尤其是在材料表面的杂质。然而使用杂质含量元素较低原理制备镁合金可以极大地提高镁合金的耐腐蚀性^[146]。同时,因为合金化的作用导致AZ系镁合金有Al-Mn相及 β -Mg₁₇Al₁₂相的存在,而有研究表明AZ系镁合金表面Al-Mn相通常作为阴极诱发 α -Mg基体的微电偶腐蚀^[147]。对于焊件,除了表面杂质外,腐蚀行为主要是由于第二相及氢原子促进的基体溶解造成的,并且还可能受到晶粒尺寸、焊缝金属成分、微观成分分布和残余应力等的影响。因此,腐蚀问题尤其是应力腐蚀问题在镁合金中尤为突出^[148]。研究认为,低能量密度的传统焊接方式相较于高能量密度的激光焊而言,焊接构件的耐腐蚀性较差^[149]。

主流观点认为,高能量密度所导致的熔合区细晶组织及网状分布的 β -Mg₁₇Al₁₂相是导致激光焊接接头耐腐蚀性能较好的原因^[149]。而FZ中由于镁蒸发导致的大量富铝第二相析出使得FZ拥有高于母材区域的电势,稳定氧化膜的形成使得熔合区相较于母材具有更好的耐蚀性能,两区域间的电偶效应使得熔合线附近的HAZ区域腐

表 6 AZ31 镁合金疲劳强度

Table 6 Fatigue strength of AZ31 magnesium alloy

Processing condition	Specimen size/ mm	Fatigue type	Frequency/ Hz	Number of cycle	Stress ratio	Fatigue strength/MPa	Ref.
Extruded	$d=0.03$	Bending	250-700	10^8	-1	160	[132]
Extruded	$\phi=5.6$	Bending	30	10^8	-1	120	[133]
Extruded	$\phi=5\&6$	Bending	66.67	10^8	-	90	[134]
Extruded	$\phi=4$	Tension	20000	10^9	-1	88.7	[135]
Hot rolling	$d=12$	Tension	25	10^7	0.1	130	[136]
Hot rolling	$d=5$	Tension	1	10^7	0.1	90	[137]
Rolling	$d=5(\text{parallel})$	Tension	10	10^7	-1	95	[138]
Rolling	$d=5(\text{vertical})$	Tension	10	10^7	-1	85	[138]
Extruded	$d=5$	Tension	20	10^7	0.1	97	[139]
Rolling	$d=6$	Tension	10	2×10^6	0.1	72	[28]
Rolling & annealing	$d=2$	Tension	50	10^7	0.1	50	[34]

表 7 AZ31 镁合金激光焊接接头的疲劳强度

Table 7 Fatigue strength of laser-welded AZ31 magnesium alloy joint

Processing condition	Specimen thickness/mm	Fatigue type	Frequency/ Hz	Number of cycle	Stress ratio	Fatigue strength/MPa	Ref.
Rolling	4	Tension	10	2×10^6	0.1	-	[28]
Rolling & annealing	2	Tension	50	10^7	0.1	30	[34]

蚀更为严重,极易成为裂纹萌生的位点^[150-152]。同时在易腐蚀环境中,表面薄膜破裂导致氢气的进入通常被认为是镁合金脆性穿晶断裂的原因;气孔缺陷本身对于焊件的力学性能以及腐蚀性能影响较少,但其内部可能存在的氢气气氛会对镁合金在腐蚀条件下的服役产生影响^[150-152]。

对于镁与异种合金焊接的焊接接头,Mg的电极电位要低于铝和钢铁。因此,相较于同种焊接接头而言,异种焊接接头更易遭受腐蚀的影响。Liu等^[153]研究了镁-钢搭接接头的腐蚀行为,结果表明,耐腐蚀性能:镁-钢融合界面<焊缝区域<镁基体<铁基体,因此,在腐蚀环境作用下,焊缝更容易在连接界面处失效;同时,Ni、Cu等常用填充层并不能对焊接接头的耐蚀性能起到改善作用;通过喷涂铝防护涂层能够改善接头的耐蚀寿命。

5 结论与展望

镁合金激光焊接在新能源汽车轻量化制造领域应用潜力巨大,焊接质量是保障镁合金轻量化结构安全服役的关键。目前主流研究主要集中在(1)焊接参数对焊缝质量及静态力学强度的影响;(2)激光与熔池的交互作用。未来镁合金激光焊接研究重点主要集中在以下3方面:

1)目前对于镁合金激光焊接的疲劳强度研究匮乏,已有研究主要针对微观组织对疲劳强度的影响。但其不足之处在于对于实际生产,通常使用激光焊与填丝焊结合制备焊接接头,对于激光焊而言其组织较为致密,影响疲劳强度的影响因素主要为近表面处的氧化夹杂物;对于填丝焊而言,极易出现热裂纹严重劣化接头的疲劳强度。因此,后续研究应主要针对镁合金激光填丝焊焊接参数对焊接质量的影响,同时气孔对疲劳强度的影响研究也待进一步开展。

2)激光焊接是能够改善镁合金接头耐腐蚀性能的焊接方式,但目前其仍面临受电偶效应腐蚀严重的HAZ在承受载荷的作用下极易成为裂纹形核的位点的问题。可能的解决措施是使用较高铝含量的焊丝以提高熔合区内网状 β 相的分布;同时,降低熔合区氢含量(气孔率)可在一定程度上提高焊接接头在腐蚀环境下服役的寿命。因此,后续研究应当明确:(i)不同Al含量的焊丝对于不同AZ系合金内第二相分布的影响;(ii)焊缝组织内气体成分及气孔内氢气对服役的影响。

3)针对目前镁合金激光焊接应用表现出的问题,目前可靠的解决措施是:(i)优化焊接工艺参数,减少诸如气孔、热裂纹、氧化夹杂等与基体非连续的焊接缺陷组织,抑制疲劳裂纹的萌生与开裂;(ii)建立镁合金激光焊接数据库,建立起焊接缺陷与疲劳寿命、载荷、接头类型之间的对应关系;(iii)通过原料除杂、过程除杂等手段降低镁合金中的Fe、Si等杂质元素来抑制其腐蚀速率。

为了更高效地生产性价比高的镁合金激光焊接接头,后续仍需朝以下方面努力:

1)建立起适用于不同焊件成分、尺寸的焊接工艺数据库。同时,在实际生产中,应进一步调控不同镁合金的激光焊接参数,以适应于实际的生产环境。

2)建立镁合金激光焊接数据库及其焊接接头焊接标准和评价标准迫在眉睫,以此避免因沿用其他金属焊接标准所带来的质量隐患,并基于此来指导实际工业生产。

3)验证纯惰性气体环境对于焊接接头力学性能的改善作用,目前本团队已完成惰性气体厂房的初步建设,后续将研究纯惰性气体环境对镁合金激光焊接接头性能的影响。

4)最后需对镁合金专用焊丝进行研发和制备。

基于此来拓宽镁合金在汽车行业的应用范围,推动镁合金更好更快的发展。

参考文献 References

- [1] Zhang Wen, Xu Jun. *Materials & Design*[J], 2022, 221: 110994
- [2] Guo Chuanpin(郭传平), Gao Dongfang(高冬芳), Li Xian(李 羨) et al. *Rare Metal Material and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(8): 2390
- [3] Liu Jianglin(刘江林), Zheng Renhui(郑仁辉), Zhao Linchao(赵林超) et al. *Rare Metal Material and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(9): 2493
- [4] Hu Bin. *Journal of Precision Forming Engineering*[J], 2020, 12(3): 120
- [5] Powell B R, Krajewski P E, Luo A A. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021
- [6] Liu Bo, Yang Jian, Zhang Xiaoyu et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2023, 11(1): 15
- [7] Yang Yan, Xiong Xiaoming, Chen Jing et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2021, 9(3): 705
- [8] Barnes T A, Pashby I R. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2000, 99(1-3): 62

- [9] Barnes T A, Pashby I R. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2000, 99(1–3): 72
- [10] Wu Pengbo(武鹏博), Feng Zhiqiang(冯志强), Fang Naiwen(方乃文) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(2): 401
- [11] Lin Chunfa(蔺春发), Li Xiang(李响), Han Yuqiang(韩雨蔷) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(2): 524
- [12] Zhang Wenxin, Zhang Xiankun, Shi Lei *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2025, 54(2): 311
- [13] Dada M, Popoola P. *Discover Materials*[J], 2024, 4(1): 1
- [14] Lee M Y, Chang W S, Yoon B H. *ICALEO 2006: 25th International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*[C]. Scottsdale: AIP Publishing, 2006
- [15] Quan Y J, Chen Z H, Gong X S *et al. Materials Characterization*[J], 2008, 59(10): 1491
- [16] Coelho R S, Kostka A, Pinto H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 485(1–2): 20
- [17] Padmanaban G, Balasubramanian V. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(9): 1917
- [18] Chowdhury S M, Chen D L, Bhole S D *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2011, 42: 1974
- [19] Zhang Mingjun, Wu Jie, Mao Cong *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2022, 156: 108490
- [20] Xu Yulang, Qian Peng, Qiao Yanxin *et al. Transactions of the Indian Institute of Metals*[J], 2022, 75(11): 2905
- [21] Kim J D, Lee J H, Kim J S. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*[J], 2009, 33(4): 517
- [22] Dorbane A, Ayoub G, Mansoor B *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 649: 190
- [23] Ugender S, Kumar A, Reddy A S. *Procedia Materials Science*[J], 2014, 6: 1600
- [24] Padmanaban G, Balasubramanian V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2010, 49: 111
- [25] Singarapu U, Adepu K, Arumalle S R. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2015, 3(4): 335
- [26] Li W Y, Fu T, Hütsch L *et al. Materials & Design*[J], 2014, 64: 714
- [27] Wang Weideng, Deng Dean, Mao Zhitao *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 88: 2191
- [28] Padmanaban G, Balasubramanian V. *Materials & Design*[J], 2010, 31(8): 3724
- [29] Meng Chao, Yang Juntao, Zhang Zhengqiang *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 839: 142864
- [30] Chaudhary V, Bharti A, Azam S M *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2021, 45: 4575
- [31] Subravel V, Padmanaban G, Balasubramanian V. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(9): 2776
- [32] Zhang Huijing, Guo Baosong, Du Wenbo *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 18: 3664
- [33] Kishore B N, Cross C E. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43: 4145
- [34] Chowdhury S M, Chen D L, Bhole S D *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43: 2133
- [35] Chowdhury S M, Chen D L, Bhole S D *et al. Procedia Engineering*[J], 2010, 2(1): 825
- [36] Tsujikawa M, Somekawa H, Higashi K *et al. Materials Transactions*[J], 2004, 45(2): 419
- [37] Abbas G, Liu Z, Skeldon P. *Applied Surface Science*[J], 2005, 247(1–4): 347
- [38] Liu Zhenyu, Zhang Peilei, Yan Mingliang *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 303: 117490
- [39] Zou Jianglin, Ha Na, Xiao Rongshi *et al. Optics Express*[J], 2017, 25(15): 17650
- [40] Lin Runqi, Wang Huiping, Lu Fenggui *et al. International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2017, 108(a): 244
- [41] Cao X, Jahazi M, Immariageon J P *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 171(2): 188
- [42] Leong K H, Kornecki G, Sanders P G *et al. Journal of Laser Applications*[J], 1998, 11(2): 96
- [43] Zhao H, Debroy T. *Welding Journal*[J], 2001, 80(8): 204
- [44] Zhang Xiaobin, Cao Zhanyi, Zhao Pengfei. *Optics & Laser Technology*[J], 2020, 126: 106132
- [45] Liu Kun, Wang Hao, Li Jie *et al. Metals and Materials International*[J], 2024: 1
- [46] Fotovvati B, Wayne S F, Lewis G *et al. Advances in Materials Science and Engineering*[J], 2018, 2018(1): 4920718
- [47] You D Y, Gao X D, Katayama S. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2014, 19(3): 181
- [48] Chen Minghua, Xu Jiannan, Xin Lijun *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2017, 93: 139
- [49] Bailey N S, Tan W D, Shin Y C. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2015, 137(4): 041003
- [50] Salleh M N M, Ishak M, Quazi M M *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 99: 985
- [51] Pan L K, Wang C C, Hsiao Y C *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2005, 37(1): 33
- [52] Pan L K, Wang C C, Shih Y C *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2005, 10(4): 503
- [53] Padmanaban G, Balasubramanian V. *Optics & Laser Technology*[J], 2010, 42(8): 1253
- [54] Belhadj A, Masse J E, Barrallier L *et al. Journal of Laser Applications*[J], 2010, 22(2): 56
- [55] Bannour S, Abderrazak K, Mhiri H *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2012, 44(8): 2459
- [56] Zhang Xudong, Ren Jialie, Chen Wuzhu. *China Welding: English Edition*[J], 1997, 1: 64
- [57] Min Dong, Shen Jun, Lai Shiqiang *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2011, 49(1): 89
- [58] Zhang Xiaobin, Cao Zhanyi. *The International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 104: 3053
- [59] Zhu Jinhong, Li Li, Liu Zhu. *Applied Surface Science*[J], 2005, 247(1–4): 300
- [60] Al-Kazzaz H, Medraj M, Cao X *et al.* *Materials Chemistry and Physics*[J], 2008, 109(1): 61
- [61] Marya M, Edwards G R. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2001, 10: 435
- [62] Weisheit A, Galun R, Mordike B L. *Welding Research Supplement*[J], 1998, 77: 149
- [63] Dhahri M, Masse J E, Mathieu J F *et al.* *High-Power Lasers in Manufacturing, CO₂ Laser Welding of Magnesium Alloys*[C]. Osaka: SPIE, 2000
- [64] Vyskoč M. *Metallic Materials/Kovové Materiály*[J], 2021, 59(6): 401
- [65] Dhari M, Autric M, Masse J E *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2001, 3(7): 504
- [66] Giammarinaro S. *Thesis for Master Degree*[D]. Milano: Politecnico di Milano, 2012
- [67] Richerson D W, Lee W E. *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*[M]. Boca Raton, Florida: CRC press, 2018
- [68] Salleh N M, Ishak M, Romlay F R. *The 2nd International Conference on Automotive Innovation and Green Vehicle, Effect of Fiber Laser Parameters on Laser Welded AZ31B Magnesium Alloys*[C]. Paris: EDP Sciences, 2017
- [69] Murakami T, Tsumura T, Ikeda T *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 456(1–2): 278
- [70] Chen Jun(陈君), Zhang Qunli(张群莉), Yao Jianhua(姚建华) *et al.* *Journal of Applied Optics(应用光学)*[J], 2008, 29(5): 793
- [71] Ning Jie, Na S J, Zhang Linjie *et al.* *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2022, 10(10): 2788
- [72] Hagemann H J, Gudat W, Kunz C. *JOSA*[J], 1975, 65(6): 742
- [73] Hiraga H, Inoue T, Kamado S *et al.* *Welding International*[J], 2002, 16(6): 442
- [74] Kramár T, Vondrouš P, Kovačócy P. *TMS 2014: 143rd Annual Meeting & Exhibition, Research of Weldability of Magnesium Alloy by Nd: YAG and Disc Laser*[C]. Cham: Springer, 2016
- [75] He Shi, Liu Liyuan, Zhao Yanqiu *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2021, 141: 107121
- [76] Wahba M, Katayama S. *Trans JWR*[J], 2012, 411: 11
- [77] Papastathopoulos E, Baumann F, Bocksrocker O *et al.* *Solid State Lasers: Technology and Devices*[C]. Washington: SPIE, 2021, 11664: 57
- [78] Fomin V, Gapontsev V, Shcherbakov E *et al.* *2014 International Conference Laser Optics, 100 kW CW Fiber Laser for Industrial Applications*[C]. St Petersburg: IEEE, 2014: 1
- [79] Kaplan A F H. *Optical Engineering*[J], 2011, 50(5): 054201
- [80] Demaria A J. *Proceedings of the IEEE*[J], 1973, 61(6): 731
- [81] Zediker M S, Zucker E P. *High-power Diode Laser Technology XX: A Retrospective on 20 Years of Progress*[J]. San Francisco, SPIE, 2022, 11983: 1198302
- [82] Song Gang, Diao Zhuo, Lv Xinze *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 34: 204
- [83] Li Chenbin, Liu Liming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 65: 27
- [84] Chen Qiong, Yan Hongge, Chen Jihua *et al.* *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2010, 25(11): 1227
- [85] Hou Guangjin, Xu Yuling, Wang Shiwei *et al.* *Vacuum*[J], 2022, 199: 110919
- [86] Zhu Tianping, Chen Zhan, Gao Wei. *Materials Characterization*[J], 2008, 59(11): 1550
- [87] Gao Deming, Li Zhijun, Han Qingyou *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 502(1–2): 2
- [88] Li Hui, Zhang Jiansheng, Ding Rongrong. *Materials Research Express*[J], 2017, 4(11): 116503
- [89] Cai Chuang, He Shuang, Chen Hui *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2019, 113: 37
- [90] Carmignani C, Mares R, Toselli G. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*[J], 1999, 179(3–4): 197
- [91] Sanders P G, Keske J S, Leong K H *et al.* *Journal of Laser Applications*[J], 1999, 11(2): 96
- [92] Palik E D, Ghosh G. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. New York: Academic Press, 1997
- [93] Liu L. *Welding and Joining of Magnesium Alloys to Aluminum Alloys*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010: 38
- [94] Harooni M, Kong F, Carlson B *et al.* *Mitigation of Pore Generation in Laser Welding of Magnesium Alloy AZ31B in Lap Joint Configuration*[C]. Houston: ASME, 2012, 45196: 919
- [95] Harooni M, Carlson B, Ma Junjie *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 216: 114
- [96] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R *et al.* *Optics and Lasers in Engineering*[J], 2014, 56: 54
- [97] Harooni M, Carlson B, Strohmeier B R *et al.* *Materials & Design*[J], 2014, 58: 265
- [98] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2014, 56: 247
- [99] Zhou Jiafu, Zhou Dianwu, Liu Jinshui. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 116(1): 545
- [100] Tao Tao, Zhou Dianwu, Liu Jinshui *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 79: 270
- [101] Zhou Weiyang, Le Qichi, Ren Liang *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2023, 872: 144954
- [102] Meng Chao, Zhang Zhengqiang, Qiu Xinlei *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 24: 7475
- [103] Kouadri A, Barrallier L. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2011, 42: 1815
- [104] Padmanaban G, Balasubramanian V, Reddy G M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(7): 1224
- [105] Shen Jun, Wen Libiao, Li Yang *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 578: 303
- [106] Jiang Yumo, Jiang Meng, Chen Xi *et al.* *Optics & Laser*

- Technology[J], 2024, 169: 110115
- [107] Meng Yunfei, Fu Jiangwang, Zhang Shuai *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2023, 93: 208
- [108] Gao Yongkang, Hao Kangda, Xu Lianying *et al.* *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2024, 12(5): 1986
- [109] Liu Yu, Zhu Gaoming, Wang Yaqi *et al.* *Scientific Reports*[J], 2024, 14(1): 22993
- [110] Kouadri A, Barrallier L. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 429(1–2): 11
- [111] Yu Z H, Yan H G, Chen J H *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2010, 45: 3797
- [112] Klenam D E P, Ogunwande G S, Omotosho T *et al.* *Manufacturing Review*[J], 2021, 8: 29
- [113] Marya M, Edwards G R. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2002, 7(5): 286
- [114] Hao Kangda, Wang Hekang, Gao Ming *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(3): 3044
- [115] Lei Zhenglong, Bi Jiang, Li Peng *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2018, 105: 15
- [116] Yamagishi H, Fukuhara M. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(12): 4759
- [117] Wang B B, An X H, Xue P *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2023, 170: 107556
- [118] Favier V, Blanche A, Wang Chong *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2016, 93: 326
- [119] Semenova I P, Salimgareeva G K, Latysh V V *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 503(1–2): 92
- [120] Xu W, Westerbaan D, Nayak S S *et al.* *Materials & Design*[J], 2013, 43: 373
- [121] Guo Wei, Wan Zhandong, Peng Peng *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 256: 229
- [122] Yang Lijun, Gao Shuling, Huang Yiming *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 754: 535
- [123] Carvalho S M, Baptista C A R P, Lima M S F. *International Journal of Fatigue*[J], 2016, 90: 47
- [124] Balasubramanian T S, Balasubramanian V, Muthumanikkam M A. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2011, 20: 1620
- [125] Long Jian, Zhang Linjie, Zhang Lixu *et al.* *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2022, 45(4): 991
- [126] Kashaev N, Ventzke V, Horstmann M *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2015, 17(3): 374
- [127] Yang Zhihua(杨智华). *Research on Microstructure and Fatigue Property of 7075 Aluminum Alloy by Laser Welding*(7075 铝合金激光焊接组织及疲劳性能研究)[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016
- [128] Mizutani M, Yamaguchi Y, Katayama S. *Welding International*[J], 2008, 22(10): 705
- [129] Jin Jiewen, Lu Qinghua, Zhang Peilei *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2020, 29: 4197
- [130] Zhang Wei(张巍), Lu Qinghua(卢庆华), RenXinhui(任新怀) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2019, 46(3): 115
- [131] Zhao Huaqing(赵华清). *Research on Laser Hybrid Welding on Microstructure and Mechanical Properties of 6N01 Aluminum Welding Joints*(6N01 铝合金激光复合焊接接头组织与性能的研究)[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2015
- [132] Tsushida M, Shikada K, Kitahara H *et al.* *Materials Transactions*[J], 2008, 49(5): 1157
- [133] Ishihara S, Nan Z, Goshima T. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 468: 214
- [134] Masaki K. *Procedia Structural Integrity*[J], 2019, 19: 168
- [135] Yang F, Yin S M, Li S X *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 491(1–2): 131
- [136] Chamos A N, Pantelakis S G, Haidemenopoulos G N *et al.* *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2008, 31(9): 812
- [137] Yan Zhifeng, Wang Denghui, He Xiuli *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 723: 212
- [138] Morita S, Ohno N, Tamai F *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20: s523
- [139] Li Chenghao, Yan Zhifeng, Dong Peng *et al.* *Materials Science and Technology*[J], 2018, 34(12): 1480
- [140] Shen Yanjie, Zhou Jing, Liu Qian *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*[J], 2020, 1605(1): 012116
- [141] Zhang Xiaobin, Bian Shuwang, Zhao Pengfei *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2022, 149: 107894
- [142] Jian Haigen, Wang Yedong, Yang Xiaomei *et al.* *Engineering Failure Analysis*[J], 2021, 120: 105034
- [143] Esmaily M, Svensson J E, Fajardo S *et al.* *Progress in Materials Science*[J], 2017, 89: 92
- [144] Mei Di, Li Yapien, Ma Xiaoshuang *et al.* *Smart Materials in Manufacturing*[J], 2024, 2: 100020
- [145] Sheng Yulong, Li Weijie, Chai Yaru *et al.* *Smart Materials in Manufacturing*[J], 2023, 1: 100003
- [146] Shalomeev V A, Greshta V L, Papirov I I *et al.* *Journal of Alloys and Compounds Communications*[J], 2024, 3: 100011
- [147] Zhao Yanjie, Zhang Fen, Cui Lanyue *et al.* *Smart Materials in Manufacturing*[J], 2024, 2: 100045
- [148] Winzer N, Atrens A, Song G *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2005, 7(8): 659
- [149] Liu Liming, Xu Rongzheng. *Corrosion Science*[J], 2010, 52(9): 3078
- [150] Kannan M B, Dietzel W, Blawert C *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 444(1–2): 220
- [151] Srinivasan P B, Riekehr S, Blawert C *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(1): 1
- [152] Srinivasan P B, Riekehr S, Blawert C *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 517(1–2): 197
- [153] Liu Liming, Xu Rongzheng. *Corrosion Science*[J], 2012, 54: 212

Advance in Quality Control and In-Service Performance of Laser Welding for Magnesium Alloys in Automotive Applications

Liu Zeyu^{1,2,3}, Hu Jiaqi^{1,2,3}, Wang Shuai^{1,2,3}, Ye Jianlin⁴, Liu Lu⁴, Guo Yangyang⁵, Li Hao³, Zeng Rongchang^{1,2,3,6}, Ren Lingbao^{1,2,3}, Shan Zhiwei^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Strength of Metal Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Engineering Research Center for Magnesium-Based New Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(4. Xi'an United Pressure Vessel Co., Ltd, Xi'an 710200, China)

(5. Xi'an Rarealloys Co., Ltd, Xi'an 710200, China)

(6. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Magnesium alloys hold tremendous potential for applications in automotive lightweighting, with reliable joining being one of the key technical issues for lightweight manufacturing. Laser welding is a suitable joining technology for the development of magnesium alloys due to its low heat input. However, the insufficient in-service performance for laser-welded joints of magnesium alloys, currently restricts their engineering applications. This paper summarizes the cutting-edge research progress in laser welding of magnesium alloys, with a focus concentrated on the intrinsic characteristics of laser welding of magnesium alloys and the influence of welding process parameters on the quality of welded joints. Meanwhile, taking into consideration the critical issues found in the cases of magnesium alloys for automotive utilization, the core influencing factors, regarding the service performance of laser-welded joints of magnesium alloys for automotive applications, are reviewed, and the prospect for future development is proposed.

Key words: magnesium alloy; laser welding; welding parameters; welding defects; mechanical properties; corrosion properties

Corresponding author: Shan Zhiwei, Ph.D., Professor, State Key Laboratory of Strength of Metal Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: zwshan@xjtu.edu.cn; Ren Lingbao, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory of Strength of Metal Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R.China, E-mail: renlingbao@xjtu.edu.cn