

镁合金激光焊接气孔形成机制及调控措施研究进展

王 帅^{1,2,3}, 刘泽宇^{1,2,3}, 叶建林⁴, 汪 舸⁴, 郭阳阳⁵, 蒲炫羽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 710201)

(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: 激光焊接具有变形量小、热影响区窄和焊接效率高等特点, 已成为镁合金轻量化装备最具潜力的连接技术之一。然而, 激光焊接接头组织中普遍存在多种气孔类缺陷。激光焊接气孔成因复杂, 其数量、大小及分布特征都会影响镁合金焊接接头的力学性能, 进而影响镁合金轻量化装备的安全应用。本文综述了镁合金激光焊接组织中的气孔形成机理, 探讨了气孔对力学性能的影响规律, 提出了气孔调控措施及对策, 展望了镁合金激光焊接基础研究和应用重点方向, 可为汽车和航空航天等领域的镁合金轻量化部件的连接制造技术开发提供参考。

关键词: 镁合金; 激光焊接; 气孔; 形成机理; 调控方法

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)06-1630-11

1 引言

镁合金具有密度小、比强度高、易回收等优点^[1-5], 为最轻的金属结构材料, 应用于航空航天、交通运输、电子通信等领域的轻量化装备、器件方面具有明显优势。相比栓接、铆接等机械连接方式, 镁合金焊接的轻量化优势明显、稳定性高且可避免电偶腐蚀等问题, 是最具应用前景的轻量化制造技术之一^[6]。

镁合金焊接的代表性技术主要包括钨极氩弧焊(tungsten inert gas arc welding, TIG)、搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)和激光焊(laser beam welding, LBW)等。其中, 钨极氩弧焊操作简便, 成本低且灵活性强, 但是焊接过程中的热输入较大, 焊后晶粒粗大, 不利于获得较强的接头性能^[7]; 搅拌摩擦焊过程中, 轴向剪切力和再结晶有助于形成细小的等轴晶和消除气孔缺陷, 适于平板类零部件的拼接成形, 应用场景有较大限制^[8-9]; 激光焊接的热源方向性好、能量密度高, 适度的激光热输入与较快的冷却速度能够改善镁合金的焊后塌陷、开裂和残余应力等连接缺陷^[10]。然而, 激光焊接组织中普遍存在的气孔会劣化接头的承载性能, 影响镁合金

轻量化焊接结构及装备安全应用。

镁合金激光焊接气孔缺陷的研究对轻量化装备安全服役意义重大。一方面, 气孔缺陷减少了焊缝有效承载体积, 破坏了微区结构的一致性, 引起局部应力集中进而诱发裂纹萌生, 导致激光焊接接头强度、塑性和耐久性能(如疲劳、腐蚀等)降低, 是焊接结构损伤的主要起源; 另一方面, 在厘清不同类型气孔缺陷形成机制的基础上, 通过优化焊接参数、控制热输入量, 或提高匙孔的稳定性以及焊前、焊后热处理减少气孔数量, 进一步提高焊接质量以减少激光焊气孔缺陷的不利影响, 是支撑镁合金轻量化应用的关键技术因素。

镁合金激光焊接气孔是多因素耦合作用的结果。一方面, 相较于钢或铝, 镁的沸点低(1090 °C)、饱和蒸气压^[11](40 Pa, $T=550$ °C)高, 激光作用于表层所产生的镁蒸气易引发匙孔(Keyhole)效应进而产生气孔^[12]; 另一方面, 氢元素(H)在金属铝熔点温度附近的溶解度仅为 0.7×10^{-2} mL/g, 而在金属镁中则大幅上升至 45×10^{-2} mL/g, 且在凝固过程会降至 28×10^{-2} mL/g, 其溶解度的剧烈变化导致镁中氢气孔形成倾向更大^[13]。因此, 气孔作为最

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(52031011, 52061040, 52371121); 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); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设(2022KXJ-178)

作者简介: 王 帅, 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: wangs@stu.xjtu.edu.cn

常见的镁合金激光焊接缺陷类型之一,其成因、分布、影响规律及调控措施亟待深入研究。

综上,当前镁合金激光焊气孔的研究难点主要集中在以下4方面:

1)焊接气孔的成因较为复杂,氢致气孔和匙孔坍塌型气孔两类气孔的判断需要根据合金成分、成形工艺、几何尺寸和焊接参数等多因素确定^[14];针对镁合金气孔的焊后检测方法有限,对孔内气体成分的定性和定量检测精度低、稳定性差。

2)在复杂服役工况下,镁合金焊缝中气孔数量、大小及分布特征对力学性能影响规律的定量研究需要进一步深入,且缺乏普适性理论模型预测焊后性能;

3)现有焊接工艺对气孔缺陷的调控成效仍显不足,结合气孔形成机理和影响机制,亟需探索行之有效的工艺调控方法;

4)现行镁合金焊丝标准仅规定了面向多种焊接方法的通用型丝材,难以满足激光焊接专用丝材的需求,涵盖专用丝材设计制备、焊接方法以及质量评价的全流程标准体系尚待建立。

本文将重点探讨镁合金激光焊接气孔的形成机理、气孔分布特征及其对力学性能的影响规律和气孔缺陷的调控措施,为镁合金轻量化装备的连接制造提供参考。

2 镁合金激光焊接气孔的形成机理

镁合金激光焊接气孔具有数量多、易聚集和形状复杂的特点,孔的直径跨度从几微米到数百微米不等,极易成为微裂纹萌生源^[15-16]。气孔的形成机制比较复杂,主要分为3类:氢致气孔、匙孔坍塌型气孔和环境杂质型气孔。

图1对2000年以来Web of Science核心合集库中有关镁合金焊接气孔类型的研究性论文进行统计^[16-32],研究热点主要集中在匙孔坍塌型气孔和氢致气孔,且Mg-Al系镁合金作为最成熟的商用镁合金,在众多研究对象中占据绝大部分。

此外,铸态镁合金在生产过程中容易产生H等可溶性元素的侵入和凝固收缩孔洞,且激光焊接过程中受熔体流动影响,因此气孔类型和分布特征较为复杂。

相比而言,变形镁合金经过挤压或轧制等塑性变形加工,有效消除了凝固缺陷,因此研究者多以匙孔坍塌型气孔缺陷为主要研究对象。

因此,从成因来讲,焊缝的气孔可能与氢气、低熔点金属蒸气或氢气-金属蒸气混合物有关,前两者分别为氢气孔和匙孔坍塌型气孔两类气孔形成过程^[33]的主要诱因。而从气体源头追溯,也分为内生和外源两种类型,内生气体主要包括上游铸造伴随遗传型氢气和匙孔中形成的金属蒸气;外源气体主要是预处理和焊接过程引入的水蒸气所致。

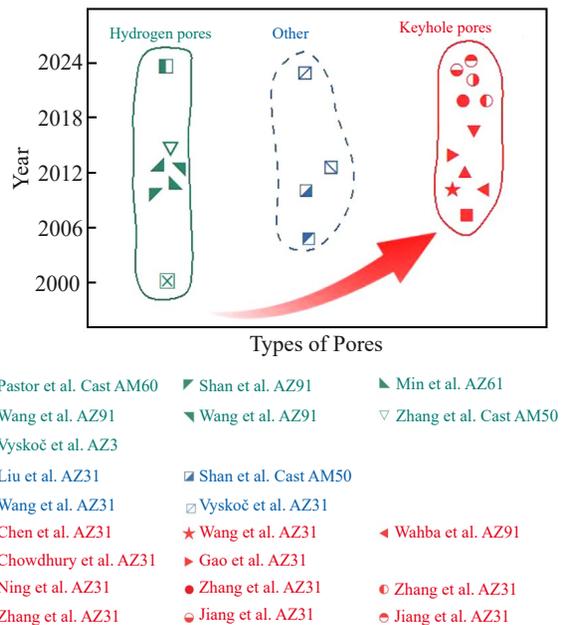


图1 近年来镁合金激光焊气孔的研究分类情况

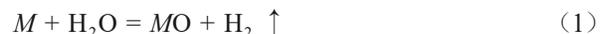
Fig.1 Categorization of laser welded pores in magnesium alloys in recent years^[16-32]

2.1 氢致气孔

氢致气孔是薄壁铸件或变形镁合金薄板激光焊接气孔缺陷最为主要的成因^[14,18],其依据氢的来源又可分为铸造缺陷伴随遗传和氢溶解度差异两种。

2.1.1 铸造缺陷伴随遗传型气孔

砂型铸造过程中,高温的镁合金熔体(一般大于700℃)与潮湿模腔壁或涂料的残留水分发生反应:



M表示金属,产生的氢气汇聚在铸件内形成内壁光滑的类椭圆形气孔^[34],属于侵入性气孔。万谦等^[35]通过X射线断层扫描技术(CT)观察了压铸铝合金的微观缺陷,并根据(2)式计算出87%的微孔洞圆整度 α 高于0.5,据此认为是气孔。

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{36\pi V^2}{S^3}} \quad (2)$$

式中,V代表与孔洞等体积球的体积,S代表孔洞的实际表面积。

图2展示了高压铸造产生的3类微孔洞类型:第1种是气孔和凝固缩孔的混合型气缩孔(gas-shrinkage pores),尺寸较大(图2a);第2种是高速充填过程的气体夹带型气孔(gas pores),形状较为规则,边界清晰(图2b);最后1种为凝固缩孔(shrinkage pores),由于凝固收缩和局部补缩不足造成的,常呈中心向四周扩张的撕裂状态(图2c~2d)。这3类缺陷均可能成为裂纹萌生源^[36]。

此外,铸态合金的气孔不仅会随凝固过程而发生移动、形状拉长和尺寸增大^[37],且后续热处理还会使气孔形态发生演变,如存在小气孔聚集合并等^[38]。

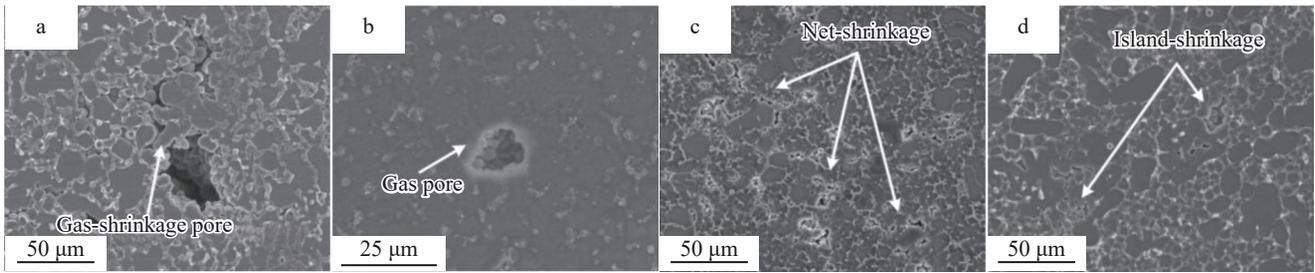


图2 高压铸造镁合金显微孔洞类型及形貌

Fig.2 Types and morphologies of micropores in high-pressure casting magnesium alloys: (a) gas-shrinkage pores, (b) gas pores, and (c-d) shrinkage pores^[36]

2.1.2 合金熔体凝固过程氢元素溶解度差异

氢作为镁合金熔体内最主要的溶解性气体元素^[39],其在液态熔体和固态合金中的溶解度差异十分显著^[40],是产生氢致气孔的主要原因之一。氢在镁合金中的存在形式主要有3种:原子氢([H])、分子氢(H₂)和氢化物(MH_n),前者作为间隙原子固溶在镁的晶格中;分子氢可能促进气孔或位错缺陷的生成^[41],并聚集在微裂纹和晶界等位置^[42-43];[H]还会与镁及其它合金元素反应,生成氯化镁等氢化物:



单际国等^[44]认为,分子氢以气孔内的高压气体形式存在,而[H]大多数固溶于晶格中。氢元素不同的存在形式导致以下变化:当激光束作用于微区,首先是晶格内的[H]受热向外扩散,同时MgH₂分解释放氢气:



进一步地,升温并逐渐熔化的镁合金会以H₂形式释放存储于诸多缺陷处的分子氢,通过扩散重新溶解进入镁液中。此后,熔池中的镁液快速冷却凝固,氢在固态镁中的溶解度骤降,如图3a所示,氢在650℃的溶解度由镁液中的37 μg/g骤降至固态镁中的28.2 μg/g^[45],这一过程中析出的[H]在凝固界面汇聚形成富氢区,随后形核、

生长,与此前释放的H₂共同形成氢气泡。由于氢气泡多聚集在枝晶间隙,并随二次枝晶生长而长大^[46],最后因不能克服熔融镁的表面张力而无法上浮逸出^[47],从而残留在合金组织中形成氢气泡^[14,48-49],其形成过程示意图如图3b所示。

随着熔池凝固和邻近晶粒的不断生长,氢气泡不断受到压缩。由于凝固速度较快,气泡内的氢气分子来不及向缺陷扩散或形成氢化物,导致气泡内的压力不断增加至临界值,最终促使气泡形成形状规则、球形度高的气孔。Zhang等^[31]采用以气泡临界形核半径的有限元模型计算了气泡逸出和微熔池凝固的时间大小。结果表明最短上浮逸出时间($t_f=11.35 \text{ ms}$)大于最长熔池凝固时间($t_s=9.5 \text{ ms}$)。这意味着气泡没有逸出熔池而是留在了焊缝内,该工作定量地解释了氢致气孔形成的原因。

2.1.3 氢致气孔逸出动力学分析

氢致气孔的形成是涉及传热和界面特性的复杂过程,基本遵循氢气泡形成→气泡形核点增加→气泡生长、上浮的顺序,同时须满足3个基本条件:镁液中具有过饱和和气体、气泡胚核形成及一定的孕育期^[50-51]。这3个条件在镁合金激光焊接过程中很容易达成:熔点附近,氢的溶解度发生骤降,在固液界面前沿,释放的氢会在高能量微区形成气泡胚核。孕育期吸收的能量提供气泡生长所

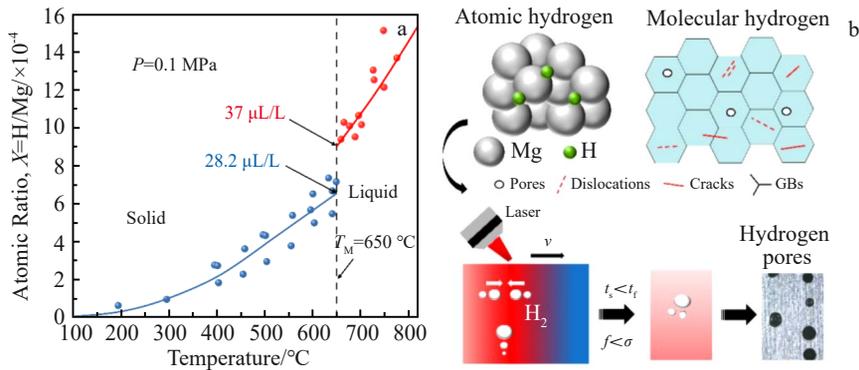


图3 氢在镁中的溶解度随温度变化情况和氢气孔形成过程示意图

Fig.3 Variation of hydrogen solubility with temperature in magnesium (redrawn from Ref. [45]) (a) and schematic diagram of the formation process of hydrogen pores (b)

需,如式(5)。根据公式推断,气泡容易出现在焊件原始间隙、氧化物表面、晶粒凹坑及晶界或枝状晶间隙等位置^[50]。

$$L = -(P_b - P_L)V + \sigma F \left[1 - \frac{F_a}{F} (1 - \cos\theta) \right] \quad (5)$$

其中, L 为形成气泡所需的能量, P_b 为气泡内的压力, P_L 为液体压力, V 为气泡的体积, σ 为气液两相的相间张力, F 为气泡核的表面积, F_a 为吸附力的作用面积, θ 为浸润角。

假设气泡为球形,且不考虑吸附力,气泡长大速度遵循式(6),即气泡长大速度与气泡半径成反比。

$$\frac{dR}{dt} = D \frac{\Delta C_L}{RC_b} \quad (6)$$

其中, R 为氢气泡半径, t 为时间, D 为扩散系数, C_L 和 C_b 分别为单位体积气泡中的气体量。

$$V_e = \frac{2(\rho_L - \rho_G)gr^2}{9\eta} \quad (7)$$

其中, V_e 为氢气泡上浮速度, ρ_L 为金属液体密度, ρ_G 为气泡密度, g 为重力加速度, r 为气泡尺寸, η 为液态镁合金的粘度。随着气泡的长大、浮力增大,最终导致气泡逐渐上浮。通过式(7)对氢气泡上浮速度的理论计算分析发现^[50],较小的焊缝凝固速度、较大的镁合金熔池液体密度、较小的气泡密度和液态镁合金粘度以及较大的气泡尺寸都有利于气泡从熔池逸出。相应地,镁合金激光焊接熔池具有更大的凝固速度和更小的密度等特点。因此,镁合金生成气孔的敏感度比较高。

2.2 匙孔坍塌型气孔

由于镁及其合金具有熔沸点低、液态表面张力小和

饱和蒸气压高等特点,当小功率激光作用时,只有表层部分金属熔化而无明显蒸发,最终在激光束的中心位置形成下凹的半球形熔池,也被称为传导(conduction)模式;随着能量输入继续增加,更深层的金属开始熔化,而表层的熔融金属则开始蒸发为气体,形成高压区域,此时表现为过渡(transition)模式^[52];当产生的蒸气反冲压力大于镁液的表面张力和重力时,高压气体作用会向下排开熔池中心的部分镁液,形成深且窄的空腔,此时被称为匙孔(keyhole)模式^[53-54],其过程示意图见图4a^[55]。匙孔的形状利于激光束在孔内进行多次反射,使镁对激光的吸收率最高可增加至90%以上,从而提高能量利用率^[52],可以获得更大的熔深以连接厚板。然而,熔池的流动行为非常复杂,伴随着金属蒸发、气体反冲压力、毛细管力、Marangoni效应和激光反射等多物理机制共存,如此复杂的环境下匙孔形状很难自发保持稳定^[56]。如图4b中的 t_2 时刻,激光在匙孔内壁的能量分布并不均匀,有些部位长期缺乏能量输入,这是导致匙孔失稳的直接原因^[57]:激光束在前壁的凸起位置被反射,其下方区域缺少维持匙孔通道开放的能量输入,熔融液体便在表面张力的作用下开始从凸起充填,直至与后壁相连,导致匙孔根部向内凹陷、坍塌进而形成小孔(t_3 时刻)^[58]。由于坍塌过程和发生位置的随机性较大,因此根部小孔也更倾向于形成不规则的形状^[59]。在此过程中,被卷入熔池的金属蒸气、惰性保护气体及空气也容易汇聚为气泡^[60-61],一小部分气泡可以随熔池的流动逸出,而来不及逸出的气泡则会残留在焊缝中形成气孔^[62](负压型),一般多出现在匙孔后

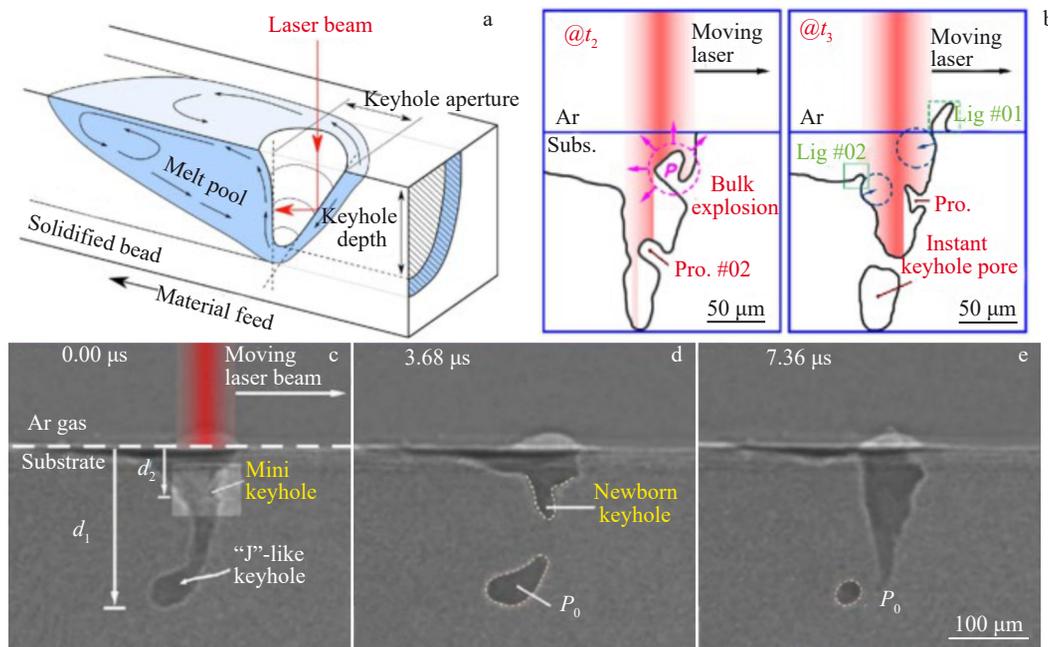


图4 激光作用匙孔形成过程示意图,匙孔坍塌过程示意图以及高速X射线成像捕捉到的气孔照片

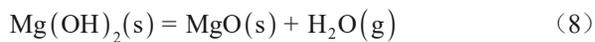
Fig.4 Schematic diagrams of the formation process of keyhole when the laser is applied^[55] (a) and process of keyhole collapse^[61] (b); photographs of pores captured by high-speed X-ray imaging (c-e)^[63]

壁根部^[53],如图 4c 所示^[63]。由此可见,只要形成的匙孔直径足够大,其前后壁凝固连接的几率将减小,气泡内的气体就有充足的时间逸出^[30]。也有学者^[64]提出另外一种模式,即激光能量持续增大将导致匙孔穿透熔池,直接接触下层基板,匙孔根部较好的热导条件促进凝固,根部和顶部的通道被封闭,从而在熔池下方形成气孔。

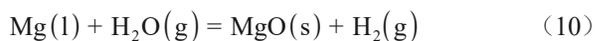
针对匙孔坍塌型气孔,提高匙孔在复杂多相环境中的稳定性是消除气孔的关键途径。匙孔的关闭形式主要有两种:一种是理想的填充方式,即液态金属从匙孔底部逐步回填,孔内气体或蒸汽持续上行并稳定逸出,有利于降低气孔形成几率,然而液态金属的流动行为本身就十分复杂,很难进行调控;另外一种是最为普遍的,匙孔从内壁凸起部位开始凝固相连,进而坍塌形成小孔^[27]。由于大的深宽比决定了匙孔具有较低稳定性,因此后者是匙孔坍塌型气孔的主导成因。

2.3 环境杂质型气孔

除了铸造过程的内生氢气外,焊接过程中外界环境的杂质也容易诱发气孔。镁合金表面形成的多孔疏松的氧化镁膜层具有较大的比表面积,容易吸附水分,尤其是在潮湿环境中^[65]。当激光束作用于镁合金表面,多孔膜中吸附的水分受热分解^[50],产生的氢气附着在熔池表面的氧化膜进入熔池,最终导致气孔。也有研究者认为,激光作用的短时间内应该是氢氧化镁首先分解^[66](300 °C 即可发生^[67]),所产生的水蒸气再分解为氢分子,经过解离后以[H]的形式扩散进入熔池:



许四祥等^[68]则认为,表层氧化膜的吸附水直接与镁液反应也会释放氢气,同时反应的产物还有氧化镁渣。



Bakke 等^[69]提出,氢进入熔体分 5 个阶段:

- (1) 镁熔体表层水蒸气扩散至气液边界;
- (2) 水分子吸附于气液表面;
- (3) 镁与吸附的水分子反应生成 H_2 ;
- (4) 生成的 H_2 在界面上解离为 [H];
- (5) [H] 通过扩散和传质进入镁熔体中,形成的 H_2 聚集为氢气泡。

此外,熔池表层存在紊乱的高压气流和等离子体流,也会捕捉邻近的气体卷入,如空气、氢气、低熔点金属蒸气和氩气等^[11,14,70],最终导致气孔。还有学者^[31]认为,表层金属蒸气从匙孔逸出时,会在开口附近形成低压区,内外压差促使大气环境中的气体进入匙孔,从而诱发气孔。

综上所述,环境杂质型气孔是基于熔体和外环境的杂质之间的交互作用而形成的,因此通过对熔体和外界环境除杂净化可有效减少此类气孔的形成,如对试样表面进行充分的预处理(表面打磨和预热除湿等)、选择合

理的保护气输入角度和流量等参数^[71]。

针对气孔成因的判断,可以从气孔形状大致区分气孔类型:氢气泡趋于形成球形度高的气孔,而匙孔的坍塌则容易产生蜿蜒曲折的不规则孔洞。由于形状判断具有较强的主观影响,而采用化学成分检测则更为客观准确。因此,针对气孔内氢含量的检测方法也引起了研究者的关注。

现有的定量检测方法主要为热脱附质谱法(thermal desorption spectrometry, TDS)和惰性气体熔融法(inert gas fusion, IGF)。TDS 主要在熔点以下收集固溶于晶格和氢陷阱中的表层扩散氢,而后者在试样熔融后可收集所有的氢元素。就效果而言,两种检测方法的精确性和稳定性较难满足氢致气孔判断的需求。

3 气孔分布特征及其对力学性能的影响

变形镁合金部件的常规生产加工流程为:熔炼→半连续铸造→变形处理→焊接成型。根据前文提到的气孔成因分析,气孔主要产生于铸造和焊接过程。在铸造过程中,铸胚的中心部位往往容易出现集中的侵入性气孔^[72],此类气孔可能与铸造过程的凝固缺陷结合,形成割裂基体的不规则孔洞^[73],降低承载面积、产生应力集中和萌生微裂纹。姜巍等^[74]通过实验和有限元模拟证明,铸造 AZ91D 合金气孔的数量和尺寸自铸件边缘向心部逐渐递增,而气孔与基体的界面处会率先产生应力集中,随载荷进一步增大出现微裂纹从而断裂。在载荷持续增大过程中,应力场最大强度位于垂直加载方向的气(缩)孔根部,小尺寸但密集分布的气孔也会与相邻气孔的应力场重叠,容易发生断裂^[75]。一方面,焊接时形成的气孔形态区分度更高,分为球形度高、内壁光滑的氢气泡和由于匙孔坍塌形成的不规则孔洞^[59];另一方面,Shen 等^[76]则认为镁合金激光焊接组织的气孔分布从焊缝表层到底部呈现梯度特征:焊缝的上表面是气泡主要的逃逸通道,且受熔池的压力和生长环境类似,因此焊缝上层的气孔为尺寸相近且呈线性分布的小气孔;中层的气孔具有较差的逸出动力学条件,相互合并后形成了大小不一、线性间距不等的大尺寸气孔;由于相邻气泡的压力差远小于气泡与熔体间的,因此底层的气泡生长行为最为复杂,其分布和尺寸的差异性也更大。

目前,针对显微组织的气孔率对延伸率^[77]和强度^[78]的影响研究已经比较成熟,可以根据 CT 或者射线探伤(RT)的结果近似估算工件的力学性能变化规律。这一类研究在铝合金激光焊接中较为多见,在镁合金中很少有相关报道。Liu 等^[78]的研究表明,随着气孔率从 13.6% 增加到 24.2%,接头的抗拉强度衰减幅度达 25.7%。与之类似,Wang 等^[79]的研究表明,当气孔率从 2.2% 增加到 39.3%(RT 中孔隙面积占比),接头的延伸率由 12% 降至低约 9%。此外,气孔也容易成为疲劳裂纹的萌生

源^[80-81],影响焊件的长久服役。宋哲等^[82]结合同步辐射X射线原位成像和疲劳实验,发现焊缝中疲劳裂纹的萌生源主要位于焊缝(近)表面的气孔处,相邻疲劳辉纹的间距也随远离气孔表面的距离而增加^[83]。无气孔缺陷的合金展现更优越的耐疲劳性,表现为疲劳寿命成倍提高的同时,性能分散度也大幅下降^[84]。综上所述,降低激光焊组织的气孔率,将有利于提高接头的抗拉强度、延伸率和疲劳强度等综合力学性能。

除了匙孔根部及链状分布特征之外,气孔还容易集中产生于焊缝与母材之间的熔合线附近^[50,85],这与熔池中高浓度的氢向熔合线基体侧的热扩散行为有关:熔合线处温度较低且换热条件更佳,来自熔池中心的扩散氢在此形成的氢气泡无法在凝固前排出,导致气孔密集分布。Li等^[86]在熔合线根部观察到了大量氢气孔和匙孔型气孔,其中氢气孔为形状清晰、边缘光滑的球形;而匙孔型气孔则表现为随机的不规则形状。孙正阳等^[87]通过模拟计算证明了气孔与晶界的交互作用:气孔的移动速率远小于晶界,因此二者在受载时并不会立即分离。与第二相颗粒对晶界的钉扎作用类似,气孔同样会抑制周围晶粒的长大行为。至今,有关气孔形态、数量与分布特点对镁合金接头力学性能影响的研究仍显不足。

4 镁合金激光焊气孔缺陷调控方法

根据调研结果,气孔的成因复杂多变,需结合多因素进行综合分析。尽管在个例研究中也得到了质量较高、气孔缺陷非常少的优质焊缝^[88],然而实际工业生产中的气孔缺陷调控依旧十分困难,目前常采用的调控措施主要有以下几种:

4.1 氢固化调控

从原始含气量分析,铸件中的气孔主要来自于合金熔体与铸造模具腔壁的残留水分反应形成的氢气及成型过程中卷入的气体,此类气孔可以通过型腔充分干燥和铸造工艺优化的方式予以消除。曹韩学等^[89]采用真空压铸工艺获得了比普通压铸更致密、内部气孔小且分散的合金。许四祥等^[90]列举了镁合金制备工艺流程除氢的3种方法,分别是:

(1) 通惰性气体进入镁液,由于氢分压差($[H] = K \sqrt{P_{H_2}}$)的存在,熔体保温静置后可将镁液内的氢气排出,但对于低浓度氢气的消除效果并不理想。

(2) 利用 C_2Cl_6 分解的 Cl_2 与氢反应,将氢以HCl的形式排出,但 C_2Cl_6 和 Cl_2 作为致癌物质和腐蚀性含毒气体,对人体健康和生产设备都有强烈的危害,并不适宜工业生产。

(3) 真空环境下镁液的吸气倾向趋于零,内部的氢会加速析出,但高昂的设备成本和较低的生产效率限制了该工艺的大面积推广。

单际国等^[90]认为镁合金焊接气孔主要是由铸态母材

的原始含气量造成的。高Al含量Mg-Al系合金丝材含有较多的 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相。此相的氢固溶度非常低,在凝固阶段会增加气孔形成倾向。因此,应该优先选用低Al含量的镁合金丝材或母材进行焊接。比如,在满足较低强度的工况要求下,选用AZ31焊丝制备AZ61接头。

此外,向焊缝熔池中适当添加Zr元素(如采用含Zr的焊丝、含Zr活性剂或Zr粉的方式),在组织中形成 ZrH_2 化合物,可以将凝固过程析出的过饱和氢以化合物的形式固定下来,以减少氢气孔的数量^[44]。焊接时,镁合金熔池的温度或许不足以完全熔化金属Zr(熔点为1852℃),产生的作用有限,因此目前该措施的应用还较为少见。

4.2 焊前预处理调控

镁合金型材表面的多孔 MgO 和 $Mg(OH)_2$ 具有很强的吸水性^[91],容易在激光束的作用下分解为水蒸气,进而与镁熔体反应生成氢气。因此,焊丝及接头位置的外层氧化膜须经化学/机械打磨等方式去除。Harooni等^[91]通过机械去除表层 $Mg(OH)_2$,得到的焊缝均未在表层观察到明显的气孔缺陷,证明了表面清理措施抑制氢气孔的可行性。另外,焊前预热可以降低焊缝熔池与母材间的温度梯度,延长熔池的存在时间,内部气体的逸出时间更为充足,可以较好地消除气孔。Zhao等^[92]研究了AZ31合金焊前预热的影响,如式(11)和(12)所示,适当的预热温度不仅可减缓液态金属密度 ρ 和粘度 η 的增长、延长镁液凝固时间,还大幅增加了匙孔上方等离子体流的反冲压力,熔池湍流和匙孔稳定性得以改善,有利于消除气孔。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (11)$$

$$\rho = \rho_m + \frac{\partial \rho}{\partial T}(T - T_m) \quad (12)$$

式中, η_0 和 E 是镁(合金)的属性常数, R 为气体常数, T 为熔池温度, ρ_m 为熔点温度时镁熔体的密度, $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ 是密度随温度变化的系数, T_m 为镁的熔点。

然而,预处理并不能消除母材内部的氢,因此气孔消除效果相对受限^[90]。

4.3 焊接工艺参数调控

相对而言,在不显著增加成本的前提下,工艺参数优化是最容易抑制焊接组织缺陷的方式。尽管优化工艺参数无法完全消除焊接缺陷,但得益于方法简单可行且易推广,在工业领域大规模应用的普适性更强。其中,热输入量是影响显微组织以及力学性能^[93]最重要的物理量之一,主要取决于功率大小和焊接速度两个参数(热输入量为二者之比^[94])。研究表明,气孔率随焊接速度先增后降:较低的焊速延长了焊缝熔池的凝固时间,气泡有足够的时间上浮逸出;焊速增加,非平衡凝固组织快速形成,气泡来不及逸出,气孔生成倾向增加;随着焊速继续增大,熔池很快凝固,其中的氢气泡形核和生长受到抑制,

气孔率反而降低^[50,95-96]。实际生产中也更注重热输入量的影响,以避免未焊透和烧损塌陷等严重缺陷^[94]。在低功率、小熔深的热导焊模式下,仅在镁合金表层形成较小的半球形熔池,尚未吸纳母材中过多的氢含量,表层氢气泡也更容易逸出;高功率、大熔深的匙孔模式下,气泡逸出条件佳,但同时熔池内丰富的氢析出、聚集和长大成氢气泡的可能性也更大,多因素共同作用导致气孔率具有较大的波动性^[50]。

为抑制焊接气孔等缺陷的产生,研究者们引入脉冲激光焊(pulsed laser welding)^[92]、振荡激光焊(oscillating laser welding)^[49]、双束激光焊(dual-beam laser welding)^[97]和真空激光焊(vacuum laser welding)^[98]代替单束连续激光焊(continuous laser welding)。

为避免匙孔诱发气孔,Min等^[18]采用低功率脉冲激光传导焊探究了热输入对气孔形成的影响。如图5a所示,由于热输入增加导致镁液粘度降低,氢气泡上浮顺畅,因此在最高 $122\text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的热输入下,焊缝内的气孔尺寸及气孔率都是最小的。振荡激光焊和双束激光焊主要是通过影响匙孔稳定性调控接头缺陷,将在下一小节重点讨论。包海涛等^[98]在 0.1 Pa 的真空环境下获得了表面成型良好、焊接缺陷少的AZ31镁合金接头,因为真空的对流换热条件差,液态熔池存在时间长,气泡得以充分逸出;同时,等离子体羽辉(指激光作用使低熔点金属气化后形成的金属蒸汽)受到强烈抑制甚至消失,对激光束的逆韧致辐射吸收作用降低,匙孔内部激光吸收量增加,有助于获得熔深大、熔池宽度小且稳定的匙孔,气孔率因此降低^[99-100]。真空激光焊能够有效地提升材料的力学性能,Jiang等^[28]采用 10 kPa 的真空条件和 2.5 kW 的激光功率,成功获得低气孔率和组织细小的焊缝,接头强度和延伸率显著增加(图5b)。

低纯净度的保护气或者密封性差的气体管路本身也会引入其他杂质,增加气孔形成倾向^[10,50]。因此,采用合适的惰性气体输送条件,也有助于提高激光焊接头组织的质量。

4.4 匙孔调控

匙孔的不稳定坍塌是诱发起孔的重要原因,其稳定性取决于多种因素。Deng等^[101]发现,低熔点元素含量较高的焊丝更容易在激光填丝焊过程中引入气孔,因为低熔点元素蒸发会增大反冲压力,更容易诱发起孔坍塌。

另外,现有激光焊接工艺优化也可提高匙孔稳定性,如采用双激光束能够降低维持匙孔稳定的蒸汽压力大小^[102],而开口更大的匙孔也能够延长匙孔波动周期,镁液的凝固速度相对缓慢,气泡有较为充分的逸出条件,能够降低气孔的形成倾向^[103-104]。

如图6所示,Zheng等^[105]通过模拟计算对比了双激光束不同光斑距对气孔形成的影响。随着光斑间距增大,匙孔深宽比降低、内壁突起减少,稳定性显著改善;匙孔根部变形小,坍塌的空腔所形成的气孔体积也更小,气孔率最低可降至 0.18% 。

在焊接过程引入振荡激光束也是抑制气孔的有效措施:激光束来回振荡形成湍流,产生强烈的搅拌作用,可以获得开口宽和深度小的匙孔,为气泡逸出创造有利条件^[55]。Fetzer等^[49]发现匙孔位置会随振荡光束的轨迹前后跃动,而气孔往往出现在匙孔前后转弯的位置。Meng等^[106]采用内切双圆振荡激光束焊接,获得了气孔缺陷显著减少、力学性能超过AZ31B合金母材的接头。研究表明,摆动激光焊接(即双光束的轨迹为“ ∞ ”形)具有更大的搅拌范围,气泡向后的迁移运动受抑,在匙孔快速往复移动过程中便已逸出^[56,107],气孔消除效果更显著。

4.5 其它调控方法

激光重熔以其高能密度可以在金属表面形成一层薄薄的熔化-凝固层,易于实现部件的局部加工,可作为合金表面改性、消除孔隙率和提高化学均匀性的一种后处理工艺^[108]。重熔后的金属表层会形成一层重新流动的熔池,气泡受热膨胀、聚集、上浮和逃逸^[109],表层组织致密度大幅提高,可获得几乎没有气孔缺陷的表层组织^[110]。Xie等^[111]采用较高功率对Ti6Al4V合金进行激光

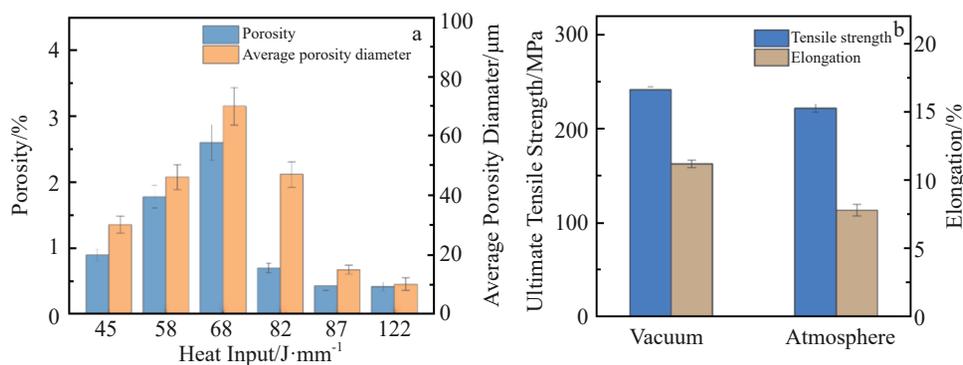


图5 热输入量对气孔率和尺寸的影响以及真空环境与大气环境激光焊AZ31镁合金的性能对比

Fig.5 Effect of heat input on porosity and size^[18] (a) and mechanical properties of laser welded AZ31 magnesium alloy^[28] (b) under vacuum and atmosphere conditions

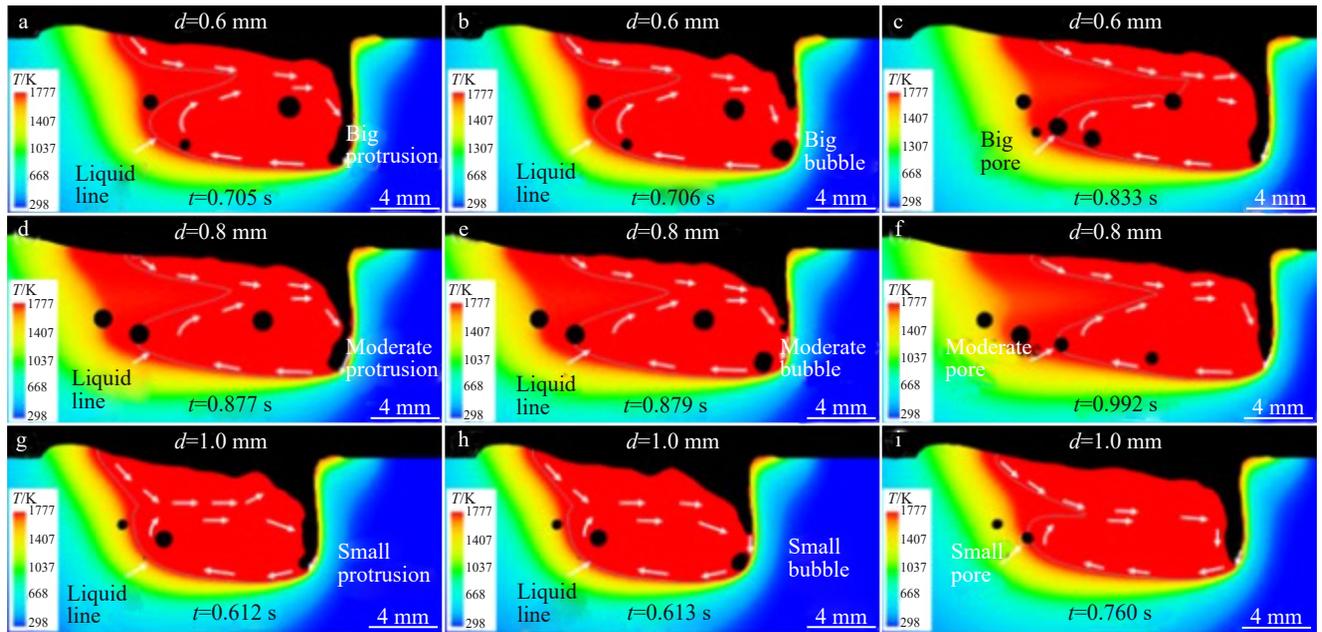


图6 不同激光束光斑间距的气孔形成过程

Fig.6 Pores formation process for different laser spot spacing^[105]: (a-c) $d=0.6$ mm, (d-f) $d=0.8$ mm, and (g-i) $d=1.0$ mm

重熔,经 μ -CT检验发现,表层组织无气孔缺陷,且合金的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别提升11.4%、11.2%和40.9%。同时,在疲劳断口处还观察到更小的疲劳辉纹扩展距离,这意味着激光重熔处理能够增加对大尺寸裂纹的容限。但是,激光重熔在促使气体二次逸出的同时,也促进了内部气泡的聚集及长大^[109],可能会恶化接头的服役性能。由于重熔工艺窗口的调控难度大^[100],一般也只适合铸件表层小范围的加工和修补,尚未发现有焊缝重熔处理的应用研究。

合适的焊接辅材(焊丝和活性剂等)也能在一定程度上改善焊缝性能。焊丝能够吸收多余的激光能量,避免低熔点合金元素烧损或减少金属蒸气孔,有利于获得致密度高的焊缝组织。在焊丝成分选择时,含Er和Zr的焊丝大幅减少了AlMgSi合金的氢气孔尺寸和数量,接头的强度得到改善^[112]。研究表明,不同的镁合金焊丝(AZ31、AZ61和AZ91)对AZ系合金的焊缝组织及性能影响也有显著差异:从Mg-Al二元相图看,低Al含量的AZ31丝材固液区间温度较高,焊接过程能吸收多余热量、抑制低熔点元素蒸发以减少气孔,提高焊接强度^[113]。活性剂不仅可以增加材料对激光的吸收率和焊缝的深宽比,还可降低熔体表面张力^[114],利于气泡顺利逸出。杨格^[115]的研究表明,CdCl₂活性剂的添加可以提升AZ31B镁合金激光焊接接头的力学性能,从母材抗拉强度的84.2%升高至92.4%。

5 总结与展望

面对不断增长的汽车轻量化需求,镁合金及高效的

激光焊接技术在现代制造业中的重要性愈发提升。然而,目前镁合金激光焊接却面临标准规范匮乏和焊接质量低下等问题,成为制约其进一步工业化应用的瓶颈。未来的镁合金激光焊接技术的科学研究和规模化应用还需要重点关注以下3点:

1)内外复合控氢除气,双管齐下提升质量。氢气孔是影响镁合金焊接质量的典型缺陷之一,其来源涉及铸造和焊接等多道工序的氢元素。因此,如何有效控制内生和外源氢气,对于减少焊接缺陷、提高焊接质量具有重要意义。对合金设计及制备思路进行优化,通过合金自身组分固氢以减少液固转变过程中因氢溶解度骤降产生的氢气泡,能够有效降低气孔数量;另外,在生产过程中采用更完善的保护措施,如采用完全的惰性气体保护环境,避免焊接过程可能引入的外界杂质,将有效改善镁合金焊接及增材制造过程的氧化烧损、焊接缺陷和工艺稳定性差等问题。

2)焊接工艺开发优化,确保构件稳定连接。镁合金焊接技术正朝着多元化的方向发展,不同工况下的气孔成因及分布均有变化,对力学性能的影响差异较大。目前缺乏有效的成分定量分析,根据气孔形态等特征推断气孔形成类型的方法难以满足生产及应用端需要。此外,镁合金焊丝的化学成分、表面质量和尺寸均匀性等因素也会影响焊接接头的质量。因此,针对镁合金激光焊接缺陷调控必须从高品质焊丝制备、合金成分和焊接技术优化开发等多方面同时进行。

3)气孔缺陷形状特征与特殊承载工况下镁合金结构件寿命的关联性研究。在复杂的服役环境中,汽车的焊

接件常出现循环拉伸、压缩和弯扭等载荷,此类工况下气孔对接头力学性能的影响尚无详实的研究。此外,具有尖锐棱角的气孔和微裂纹都容易造成过早的(脆性)断裂失效,大幅降低镁合金焊接结构的服役寿命。因此,焊接时不仅要严格控制气孔的数量和体积分数,还要尽量调控气孔的形状为球形,以减少气孔周围应力集中程度,最大程度减少裂纹在气孔边缘萌生和扩展。

参考文献 References

- [1] Jin Zhongzheng, Zha Min, Wang Siqing *et al. Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2022, 10(5): 1191
- [2] Zhao Yanjie, Zhang Fen, Cui Lanyue *et al. Smart Materials in Manufacturing*[J], 2024, 2: 100045
- [3] Liu Yingzong(刘英宗), Li Yuanxing(李远星), Zheng Xiangbo(郑向博) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2022, 51(12): 4757
- [4] Liu Changyang, Wang Jinghong, Yang Yujie *et al. Smart Materials in Manufacturing*[J], 2024, 2: 100039
- [5] Cai Lei, Guo Haoran, Zhu Yongqiang *et al. Smart Materials in Manufacturing*[J], 2023, 1: 100014
- [6] Maurya S K, Kumar R, Mishra S K *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2022, 63: 623
- [7] Meng Chao, Yang Juntao, Zhang Zhengqiang *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 839: 142864
- [8] Zeng Rongchang, Chen Jun, Dietzel W *et al. Corrosion Science*[J], 2009, 51(8): 1738
- [9] Zhang Yunlong(张云龙), Li Ruolin(李若琳), Zhu Bin(朱彬) *et al. Materials China(中国材料进展)*[J], 2024, 42(2): 174
- [10] Yu Yingxia(于影霞), Sheng Jingfeng(盛敬峰). *Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2017, 46(7): 12
- [11] Yang Chengbo, Tian Yang, Qu Tao *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(2): 561
- [12] Peng Liming(彭立明), Deng Qingchen(邓庆琛), Wu Yujuan(吴玉娟) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2023, 59(1): 31
- [13] Li Yanxiang(李言祥), Liu Xiaobang(刘效邦). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2018, 54(5): 727
- [14] Shan Jiguo(单际国), Zhang Jing(张婧), Zheng Shiqing(郑世卿) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2009, 38(S3): 234
- [15] Zhao Hailiang, Tarasankar D. *Welding Journal*[J], 2001, 80: 204
- [16] Wang Zemin, Gao Ming, Tang Haiguo *et al. Materials Characterization*[J], 2011, 62(10): 943
- [17] Vyskoč M. *Metals*[J], 2023, 13(3): 460
- [18] Min Dong, Shen Jun, Lai Shiqiang *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2011, 49(1): 89
- [19] Wang Xiangjie(王向杰), You Guoqiang(游国强), Zhang Juncheng(张均成) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2012, 48(12): 1437
- [20] Wang Xiangjie(王向杰), You Guoqiang(游国强), Yang Zhi(杨智) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(12): 2144
- [21] Liu Liming, Song Gang, Liang Guoli *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 390(1-2): 76
- [22] Zhang J, Shan J G, Ren J L *et al. Welding Journal*[J], 2013, 92: 101
- [23] Pastor M, Zhao Hailiang, Debroy T *et al. Journal of Laser Applications*[J], 2000, 12(3): 91
- [24] Zhang Xiaobin, Cao Zhanyi. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 104(5): 3053
- [25] Jiang Peizuo(姜沛佐), Dong Hao(董昊), Gao Mingyue(高明月) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2023, 50(12): 1202103
- [26] Zhang Xiaobin, Cao Zhanyi. *Optics and Lasers in Engineering*[J], 2019, 119: 1
- [27] Gao M, Zeng X Y, Tan B *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2009, 14(4): 274
- [28] Jiang Yumo, Jiang Meng, Chen Xi *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2024, 169: 110115
- [29] Chowdhury S H, Chen D L, Bhole S D *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43: 2133
- [30] Chen Minghua, Xu Jiannan, Xin Lijun *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2017, 93: 139
- [31] Zhang Xiaobin, Bian Shuwang, Zhao Pengfei *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2022, 149: 107894
- [32] Ning Jie(宁杰), Zhang Linjie(张林杰). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(5): 1437
- [33] Huang Lijin, Hua Xueming, Wu Dongsheng *et al. Journal of Manufacturing Process*[J], 2018, 33: 43
- [34] Hu Bo(胡波), Yu Ning(余宁), Li Dejiang(李德江) *et al. Foundry Technology(铸造技术)*[J], 2019, 40(11): 1174
- [35] Wan Qian(万谦), Zhao Haidong(赵海东), Zou Chun(邹纯). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2013, 49(3): 284
- [36] Li X, Xiong S M, Guo Z. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2016, 32(1): 54
- [37] Yousefian P, Tiryakioglu M. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2018, 49: 563
- [38] Ma Yihu, Yu Wenbo, Yuan Zihao *et al. Materials Characterization*[J], 2023, 197: 112710
- [39] Xu Sixiang(许四祥), Wu Shusen(吴树森), Mao Youwu(毛有武) *et al. Foundry Technology(铸造技术)*[J], 2005, 26(7): 594
- [40] Wu Guohua, Xie Min, Zhai Chunquan *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2003, 13(6): 1260
- [41] Gong P, Nutter J, Rivera-Diaz-De-Castillo P E J *et al. Science Advances*[J], 2020, 6(46): 2375
- [42] You Guoqiang(游国强), Du Juan(杜娟), Tan Xia(谭霞) *et al. Journal of Functional Materials(功能材料)*[J], 2013, 44(4): 463
- [43] Gu Jianglong, Gao Minjie, Yang Shouliang *et al. Additive Manufacturing*[J], 2019, 30: 100900
- [44] Shan Jiguo(单际国), Zhang Jing(张婧), Zheng Shiqing(郑世卿) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2009, 45(8): 1006
- [45] San-Martin A, Manchester F. *Journal of Phase Equilibria*[J], 1987, 8: 431
- [46] Zha Jili(查吉利), Long Siyuan(龙思远), Wu Xingyu(吴星宇) *et al. Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2013, 6: 29

- [47] Yan Hongge, Zhao Qiang, Chen Ping *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(2): 389
- [48] Wang Xiangjie(王向杰), You Guoqiang(游国强), Yang Zhi(杨智) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(12): 2144
- [49] Wang Jifeng(王继锋), Liu Liming(刘黎明), Song Gang(宋刚). *Transactions of China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2004, 3: 15
- [50] Deng Caiping(邓彩萍). *Study on Formation Mechanisms of Porosity and the Cracks in Laser Welding of Magnesium Alloy Thin Plates*(镁合金薄板激光焊气孔及裂纹形成机理研究)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010
- [51] Wang Bo(王波). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2018, 47(3): 230
- [52] Ke Wenchao, Zeng Zhi, Oliveira J P *et al.* *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2023, 203: 123821
- [53] Hojjatzadeh S M H, Parab N D, Guo Qilin *et al.* *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2020, 153: 103555
- [54] Guo Qilin, Zhao Cang, Qu Minglei *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 31: 100939
- [55] Mayi Y A, Dal M, Peyre P *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2023, 158: 108811
- [56] Bayat M, Thanki A, Mohanty S *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2019, 30: 100835
- [57] Liu Tongtong, Mu Zhongyan, Hu Renzhi *et al.* *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2019, 140: 346
- [58] Ke Wenchao, Bu Xianzheng, Oliveira J P *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2021, 133: 106540
- [59] Zhang Mingjun, Duan Wei, Zhang Jian *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2024, 179: 111421
- [60] Martin A A, Calta N P, Khairallah S A *et al.* *Nature Communications*[J], 2019, 10(1): 1987
- [61] Zhao Cang, Guo Qilin, Li Xuxiao *et al.* *Physical Review X*[J], 2019, 9(2): 021052
- [62] Hu Jing, Guo Lei. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2024, 132(7): 3313
- [63] Wang L, Zhang Y M, Chia Y H *et al.* *NPJ Computational Materials*[J], 2022, 8(1): 22
- [64] Guo Liping, Wang Hongze, Liu Hanjie *et al.* *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2023, 184: 103977
- [65] Wang Yuecun, Liu Boyu, Zhao Xinai *et al.* *Nature Communications*[J], 2018, 9: 4058
- [66] Harooni M, Kong Fanrong, Carlson B *et al.* *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*[J], 2012, 3: 919
- [67] Halikia I, Neou-Syngouna P, Kolitsa D. *Thermochimica Acta*[J], 1998, 320(1–2): 75
- [68] Xu Sixiang(许四祥), Wu Shusen(吴树森), Wan Li(万里) *et al.* *China Foundry Machinery & Technology*(中国铸造装备与技术)[J], 2005, 05: 9
- [69] Bakke P, Lauritzen J L, Engh T *et al.* *Light Metals*[J], 1991, 41: 1015
- [70] Huang Yuze, Fleming T G, Fleming, Clark S J *et al.* *Nature Communications*[J], 2022, 13(1): 1170
- [71] Quan Yajie(全亚杰). *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2012, 49(5): 5
- [72] Chai Shaochun(柴韶春), Zhao Dazhi(赵大志), Chai Shengyue(柴生樾) *et al.* *Foundry*(铸造)[J], 2020, 69(10): 1039
- [73] Prakash D G L, Regener D, Vorster W J J. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 470(1–2): 111
- [74] Jiang Wei(姜巍), Cao Zhanyi(曹占义), Sun Xu(孙旭) *et al.* *Abstracts of the 10th National Academic Conference on Materials Science and Image Technology*(第十届全国材料科学与图像科技学术会议暨校企产学研合作创新论坛论文摘要集)[C]. Luoyang: Materials Science Committee, Chinese Society for Stereology, 2016: 26
- [75] Sun X, Cao Z Y, Liu H F *et al.* *Applied Mechanics and Materials*[J], 2014, 670–671: 90
- [76] Shen Yanjin, Zhou Jing, Liu Qian *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*[J], 2020, 1605(1): 012116
- [77] Liu Ruxue, Zheng Jiang, Godlewski L *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 783: 139280
- [78] Liu Yang, Li Shaohua, Li Mingxuan *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2023, 32(18): 8040
- [79] Wang Zhimin, Oliveira J P, Zeng Zhi *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2019, 111: 58
- [80] Murugan G, Raghukandan K, Pillai U T S *et al.* *Materials & Design*[J], 2009, 30(10): 4211
- [81] Liu Mabao(刘马宝), Lei Jun(雷军), Gao Yuxia(高玉侠) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2007, 27(1): 76
- [82] Song Zhe(宋哲), Wu Shengchuan(吴圣川), Hu Yanan(胡雅楠) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2018, 54(8): 1131
- [83] He Yang(何炆), Wen Jun(温军), Wang Changliu(王长柳). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2018, 47(9): 173
- [84] Hu He(呼和). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(11): 1199
- [85] Pang Ming(庞铭), Fu Yixuan(浮艺旋), Liu Quanxiu(刘全秀) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2019, 48(18): 95
- [86] Li Kai, Lu Fenggui, Guo Songtao *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(8): 2516
- [87] Sun Zhengyang(孙正阳), Wang Yutian(王昱天), Liu Wenbo(柳文波). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(12): 1643
- [88] Xu Yulang, Qian Peng, Qiao Yanxin *et al.* *Transactions of the Indian Institute of Metals*[J], 2022, 75(11): 2905
- [89] Cao Hanxue(曹韩学), Jia Congbo(贾从波), Tang Haoxing(唐浩兴) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2016, 37(2): 20
- [90] Shan Jiguo(单际国), Zhang Jing(张婧). *Welding & Joining*(焊接)[J], 2009, 7: 34
- [91] Harooni M, Carlson B, Strohmeier B R *et al.* *Materials & Design*[J], 2014, 58: 265
- [92] Zhao Pengfei, Zhang Xiaobin, Bian Shuwang *et al.* *Materials Letters*[J], 2024, 355: 135438
- [93] Lin C M, Tsai H L, Lee C L *et al.* *International Journal of*

- Minerals, Metallurgy, and Materials*[J], 2012, 19(12): 1114
- [94] Sun Liren(孙立人). *Study of Microstructure and Mechanical Properties of CO₂ Laser Welded Joint on AZ31B Magnesium Alloy*(AZ31B 镁合金 CO₂ 激光焊接接头组织性能分析)[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2016
- [95] Tao Wu, Yang Shanglu. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2020, 286: 116826
- [96] Marya M, Edwards G R. *Weld World*[J], 2000, 44: 31
- [97] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R. *Optics & Laser Technology*[J], 2014, 56: 247
- [98] Bao Haitao(包海涛), Liu Jintai(刘金合), Liu Kun(刘 锟) *et al. Applied Laser*(应用激光)[J], 2008, 5: 366
- [99] Wang Huacong(王化聪). *Analysis on Vacuum Laser Welding Characteristics of TC4 Titanium Alloy Medium Plate*(TC4 钛合金中厚板真空激光焊接特性分析)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022
- [100] Zou Jipeng(邹吉鹏), Huang Ruisheng(黄瑞生), Wu Pengbo(武鹏博) *et al. Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2023, 53(8): 28
- [101] Deng Ailin, Chen Hui, Zhang Yingbo *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2023, 159: 109000
- [102] Yang Haifeng(杨海锋), Wang Xuyou(王旭友), Wang Wei(王威) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2016, 37(6): 13
- [103] Han Xiaohui(韩晓辉), Ma Yin(马 寅), Ma Guolong(马国龙) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2020, 41(2): 93
- [104] Lei Zhenglong(雷正龙), Li Ying(李 颖), Chen Yanbin(陈彦宾) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2013, 34(2): 405
- [105] Zheng Zhengang, Shao Chendong, Lan Ling *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2024, 130: 6011
- [106] Meng Yunfei, Fu Jiangwang, Zhang Shuai *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2023, 93: 208
- [107] Liu Min, Shao Chendong, Zheng Zhengang *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2024, 175: 110795
- [108] Yongang Zhang, Xiangfei Gao, Xiubing Liang *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 398: 126099
- [109] Zhang Jing(张 婧), Shan Jiguo(单际国), Wen Peng(温 鹏) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2011, 32(5): 17
- [110] Li Xiang, Liu Yunzhong. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2023, 963: 171287
- [111] Xie Deqiao, Lv Fei, Shen Lida *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2023, 125(9): 4779
- [112] Peng Zhibo, Cui Li, He Dingyong *et al. Materials Characterization*[J], 2022, 190: 112070
- [113] Li Hui, Zhang Jiansheng, Ding Rongrong. *Materials Research Express*[J], 2017, 4(11): 116503
- [114] Xu Aiping(许爱平). *Effect of Active Flux on Process and Microstructure of TC4 Titanium Alloy Laser Welding*(活性剂对 TC4 钛合金激光焊工艺及组织性能的影响)[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2022
- [115] Yang Ge(杨 格). *Study on Laser Welding with Activating Flux for Magnesium Alloy*(镁合金活性激光焊接研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015

Advance in Formation Mechanisms of Porosity Defects and Regulatory Measures in Laser Beam Welding of Magnesium Alloys

Wang Shuai^{1,2,3}, Liu Zeyu^{1,2,3}, Ye Jianlin⁴, Wang Ge⁴, Guo Yangyang⁵, Pu Xuanyu³, 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 710201, 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: Laser beam welding (LBW) has emerged as one of the most promising connection techniques for lightweight equipment fabricated by magnesium alloys due to the less deformation, narrow heat-affected zone, and excellent welding efficiency. However, a variety of porosity defects are commonly found in the laser welded joints. The causes of laser-welded pores are complicated. The number, size and distribution characteristics of porosity affect the mechanical properties of magnesium alloy joints, and thus seriously affecting the reliable applications of magnesium alloy lightweight equipment. This study reviewed the mechanism of pores formation in the microstructure of laser welding joints of magnesium alloys, and discussed the influence of porosity on mechanical properties. The pore manipulation was proposed. The key basic research and applications of LBW of magnesium alloys were pointed out. This review may provide valuable insights for the development of joining and manufacturing technology of magnesium alloy lightweight parts in automotive and aerospace fields.

Key words: magnesium alloy; laser beam welding; pores; formation mechanism; manipulation

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