

镁合金焊接的研究与发展

徐 杰 刘子利 沈以赴 刘仕福

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

文 摘 综述了三种典型的镁合金焊接技术的研究现状,分别为钨极氩弧焊、激光焊和搅拌摩擦焊,分析了镁合金焊接的研究和应用现状,讨论了这些焊接方法的优缺点,并指出镁合金焊接研究中存在的问题和今后的发展方向。

关键词 镁合金,焊接,研究,发展

Study and Development of Welding of Magnesium Alloy

Xu Jie Liu Zili Shen Yifu Liu Shifu

(School of Material Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Development of research on three kinds of welding technologies of magnesium alloy are summarized. These technologies are gas tungsten arc welding, laser beam welding and friction stir welding. Furthermore, the latest study and applications of welding technologies are described, the excellences and the disadvantages of these techniques are discussed. The problems and development trends of welding of magnesium alloy are proposed.

Key words Magnesium alloy, Welding, Research, Development

1 前言

镁合金^[1-3]的密度是所有结构用金属及合金材料中最低的,且具有比强度高、比模量高、减震性、电磁屏蔽和抗辐射能力强、易切削加工、易回收等特点,在航空航天领域有极其重要的使用价值和广阔的应用前景。镁合金的焊接^[3]是一个很重要的课题,虽然取得了一定的进展,但仍存在很多困难,主要表现在:镁合金的熔点很低,在熔焊高温条件下,容易产生蒸发;镁合金导热快,焊接加热时需要大功率,加热面积大,热影响区宽且易于过热,组织晶粒长大,影响接头性能;镁合金的线膨胀系数较大,在焊接过程中易于变形,产生较大的热应力,易于产生热裂纹;在焊接加热条件下,高温中能大量地溶解氢,随温度下降,其溶解度急剧减少,析出大量氢气容易形成气孔。本文着重介绍钨极氩弧焊(TIG

焊)、激光焊和搅拌摩擦焊这三种具有代表性的方法焊接镁合金的研究现状,并对其发展作了适当的展望。

2 镁合金的 TIG焊

2.1 镁合金 TIG焊的典型组织结构

TIG焊是用于镁合金焊接的主要电弧焊方法,是气体保护焊的一种,为非熔化极惰性气体保护焊。电极采用了难熔金属钨或钨的合金制成的棒状金属体。电弧燃烧过程中,电极不熔化,故易维持恒定的电弧长度,使焊接过程稳定。变形镁合金 AZ31B的 TIG焊接接头的典型组织如图 1 所示,可见焊缝与热影响区(HAZ)分界较明显。HAZ是典型的过热组织,晶粒较粗大;焊缝区晶粒则明显比母材和 HAZ的细小,是典型的急冷铸造组织;母材晶粒为纤维状变形组织。这种组织的出现主要与 TIG焊热

收稿日期:2004-12-13

作者简介:徐杰,1980年出生,硕士,主要从事镁合金焊接工艺方面的工作

宇航材料工艺 2006年 第1期

— 21 —

循环过程和镁合金的物理特性有关^[4]。



图 1 变形镁合金 AZ31B 的接头典型组织

Fig 1 Typical microstructure of AZ31B alloy weld

2.2 焊接参数的影响

TIG焊的主要工艺参数有焊接速度、电流、电压大小、脉冲频率和保护气流量。

焊接电流和焊速过小,会引起种种缺陷。研究发现,采用交流 TIG焊方法焊接 AZ31 镁合金薄板后主要存在波浪变形、焊后错边、焊瘤和弧坑裂纹等缺陷,通过调整焊接顺序,采用大电流、快速焊和刚性固定等措施可以避免上述缺陷,获得优质的焊接接头^[5-6]。其接头强度可达到母材强度的 80% 以上,接头断口为脆性断裂。硬度测试表明,除热影响区硬度有所下降外,焊缝硬度与母材相当。通过调整热输入值可以引起接头组织的变化,从而得到优良的接头。刘黎明等^[7]在焊接 1.7 mm 厚 AZ31B 镁合金时,通过调整焊接速度对焊缝接头的微观组织的影响而引起接头力学性能的变化,当焊接电流为 60 A、焊接电压为 9 V、焊速为 9 mm/s、热输入值为 60 J/mm 时焊缝性能最佳。

脉冲 TIG焊时,凝固裂纹的出现和电流频率有关。Asahina Toshikatsu 等^[8-9]对 AZ31 合金的 AC 脉冲 TIG焊研究也发现,熔化区晶粒最细,接头性能较好,疲劳极限为母材的 92%。他们还发现凝固裂纹的出现与电流频率有关:当电流频率为 30 Hz 时,凝固裂纹的敏感性会显著降低;凝固裂纹的长度取决于焊缝区晶粒的大小,焊缝区晶粒细小,将很难出现凝固裂纹,因为作用应力分散在晶粒中;凝固裂纹是由于焊接过程中变形引起的约束应力而产生的。

通过焊缝背面加垫板以提高冷速,减小热影响区,是避免热影响区断裂的有效方法。TIG焊焊接镁合金拉伸实验的断口总是发生在热影响区,这是由于热影响区组织较为粗大,晶界有大量二次相析出。A. Munitz 等^[10]研究了 TIG焊焊接 AZ91D 板材的组织 and 力学性能,发现 L 试样(从焊缝金属中沿焊缝长度取样)的屈服强度、拉伸强度和伸长率比

铸态母材高(表 1),这主要与熔化区相对较高的冷速引起组织细化有关。此外,T形试样(垂直于焊缝处取样)的拉伸强度和伸长率较低。断口分析表明断裂总发生在热影响区的晶界处,即 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相连续分布的晶界,见图 2。作者采用背面加垫板的方法有效地减小了热影响区。

表 1 AZ91D 镁合金 TIG 焊的力学性能

Tab 1 Summary of mechanical properties of TIG welded Mg - AZ91D

试样	强度 /MPa		伸长率 /%	
	屈服	拉伸	均匀变形阶段	全过程
加工态	97	165	2.5	无
铸态无气孔	105 ±5	201 ±10	4.0 ±0.3	4.4 ±0.3
铸态有气孔	90 ±20	90 ±20	0	0
TIG 焊 T 形	105 ±5	131 ±10	0.7 ±0.1	0
TIG 焊 L 形	125 ±5	235 ±15	7.2 ±0.5	7.3

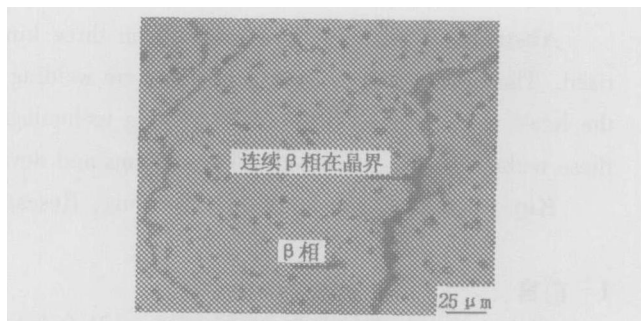


图 2 拉伸试样的断面金相照片

Fig 2 Optical micrograph of tensile specimen after fracture

2.3 焊丝化学成分的影响

焊丝的化学成分对接头的组织有很大的影响,一般选取 Al 含量低于母材组织的焊丝,因为如果 Al 含量过高,会引起接头二次相的量过高,接头硬度会增大,但会降低接头的强度。徐锦锋等^[11]研究了 AZ91B 镁合金 TIG 焊时选用不同焊丝时的焊缝组织区别,使用 ERAZ61 和 ERAZ91 焊丝均可获得组织致密、焊缝与母材结合良好的焊接接头。但使用 AZ91 焊丝时,接头铝含量较高,二次相含量较多,使用 ERAZ61 焊接 AZ91B 合金更易获得抗热裂性能高、与母材成分和组织一致性好的接头,而且接头拉伸强度和伸长率也较高。

2.4 活性 TIG 焊

表 2 焊缝性能对比

Tab 2 Characteristics of weld metals produced via various processes

焊接过程	熔合比		晶粒尺寸 /μm
	(熔深 熔宽)		
TIG - 氩气	0.36		约 70
TIG - 氦气	0.37		约 50
CO ₂ 激光	0.88		20 ~ 30
YAG激光	0.80		10 ~ 20

TIG焊在控制电弧热输入,获得高质量焊缝成形方面有明显的优势,但其缺点是生产效率低,一次可焊熔深较浅。近年来国外对活性化 TIG焊(A-TIG)方法给予了很大的重视,该方法在活性剂成分(通常可以选取 TiO₂、SiO₂、MgO、NaCl和 CaF₂等常见的氧化物和卤化物作为基础活化剂)及涂敷量适宜的情况下,可以增加焊接熔深,提高焊接效率。

张兆栋^[12]等人对 AZ31B 镁合金进行了活性 TIG焊,他们选取 TiO₂作为活性剂,研究了单一活性剂 TiO₂对镁合金焊后组织的影响。实验结果表明,涂敷活性剂可以使焊缝熔深比常规 TIG焊增加 2 倍,微观组织与未涂敷焊剂的接头没有区别, Ti元素只分布在焊缝表面附近,呈弥散分布状态。涂敷焊剂可以影响焊接的熔深,一方面,涂敷焊剂可以引起“电弧收缩效应”^[13-14]:活性剂在电弧高温下蒸发后以原子形态包围在电弧周边区域,由于电弧周边区域温度较低,活性剂蒸发原子捕捉该区域中的电子形成负离子并散失到周围空间,使电弧中的电子数呈现减少趋势,电弧导电性能减弱,其最终结果造成电弧自动产生收缩,热量集中、电弧力集中,从而使焊接熔深增加。另一方面,涂敷焊剂可以改变熔池表面张力^[13-14]:普通焊接金属熔化状态下其表面张力具有负的温度系数,这种情况下,熔池表面形成从熔池中心区域向熔池周边的表面张力流,所得到的熔深较浅;当熔池金属中存在某种微量元素(含量达到 3×10^{-4} 以上)或接触到活性气氛时,熔池液态金属的表面张力数值降低并且转变为正的温度系数,从而使熔池金属形成从熔池周边向着熔池中心区的表面张力流,熔池中心区的电弧热量通过液态金属的流动直接传向熔池底部,使熔池底部的加热效率提高,从而形成更大的熔深。

3 镁合金的激光焊

与传统的 TIG焊相比,用激光来焊接镁合金具有以下优点:(1)能量密度高,热输入量小,焊接变形小,能得到熔化区和热影响区窄而熔深大的焊缝;(2)冷却速度快,能得到组织微细的焊缝,故焊接接头性能良好。Z Sun^[15]等人对 AZ31 镁合金进行了 TIG焊和激光焊,表 2 为焊接方法和焊缝性能对比。可以看出,激光焊由于功率密度大,所以熔合比较大,又由于冷却速率较快,所以晶粒细小,保护气起隔绝氧气作用。

宇航材料工艺 2006年 第 1期

3.1 焊缝组织

王继锋^[16]等对 AZ31B 镁合金薄板进行了 YAG 激光焊接,激光功率为 500 W。接头没有明显的热影响区,焊缝狭窄,接头成形好,焊缝为细小的等轴晶,但靠近上表面存在大晶粒;没有发现区域偏析,无脆晶相(Mg₁₇Al₁₂)存在;镁的蒸发损失导致焊缝金属中的铝含量升高,而锌基本不变,同时熔深方向的镁损失增大;断口表现为混合断裂,没有气孔和裂纹存在;焊缝硬度比母材高,这是由于焊缝区晶粒比母材细小,硬度沿熔深方向增大。

3.2 焊接参数的影响

Pan Lung Kwang^[17]等人对 AZ31B 镁合金进行了 Nd: YAG激光焊接,通过正交实验和综合因素考虑,当激光功率为 360 W,焊速为 25 mm/s,离焦距为 0,电流频率为 160 Hz,采用特定的脉冲波形,可以得到最佳接头。宋刚等^[18]采用 YAG激光焊对 AZ31B 镁合金进行了焊接,他们发现在脉宽为 4.5 ms,在一定的规范下,接头的拉伸强度达到母材的 95%。

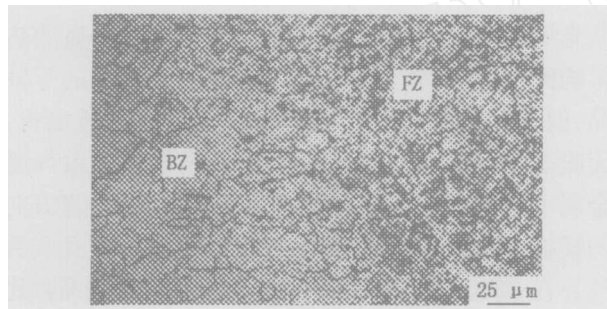
3.3 难点的解决

镁合金在激光焊接中容易出现气孔,可能是由于杂质气体的混入或是原母材中的气孔含量较多,特别是焊接压铸镁合金时气孔产生的现象比较严重。H. Zhao等^[19]对压铸镁合金 AM60B 激光焊过程中气孔的形成机理进行了系统研究。在大多数焊接条件下,焊缝区气孔体积分数与母材相比有大幅度增加,这是因为母材中原始小气孔在焊接时由于受热膨胀和聚集形成大气孔。焊缝气孔数量随热输入量的减少而减小。对焊缝重熔进行控制将可以消除部分气孔,减少焊缝的气孔。

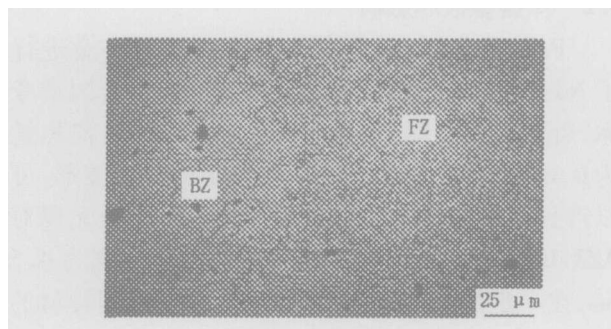
3.4 复合焊的研究

用激光和电弧复合焊接方法^[20]来焊接镁合金

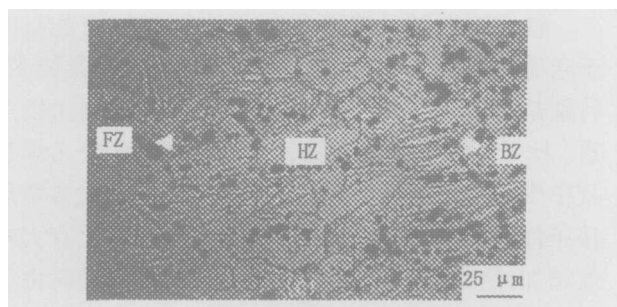
时,激光与电弧的相互影响,可以克服单用激光或电弧焊方法自身的不足,产生良好的复合效应。刘黎明等人^[20]对 AZ31B 镁合金进行了 TIG焊、激光焊、复合焊,每组实验的试样相同。他们对实验结果进行了对比:(1)氩弧焊的焊缝是最宽的,激光焊的焊缝最窄;(2)复合焊的熔深是 TIG焊的两倍,激光焊的四倍;(3)在复合焊过程中,其稳定性明显高于 TIG焊,特别是在高焊接速度和低的电流情况下;(4)激光焊焊缝的晶粒最小,TIG焊的焊缝晶粒最大。他们得到的焊缝组织见图 3。



(a) 复合焊接头组织



(b) 激光焊接头组织



(c) TIG焊接头组织

图 3 焊缝组织对比

Fig 3 Microstructures of weld metals produced via various processes

复合焊的工艺参数选择,比激光焊要复杂,因为

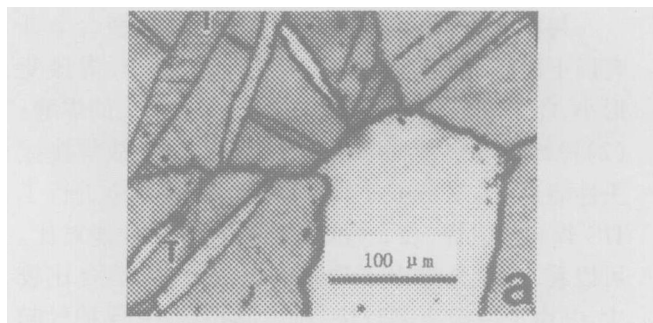
复合焊牵涉的参数更多。宋刚等^[21]对 AZ31B 镁合金进行了复合焊,得到了预期效果,接头性能优良。焊接参数有焊接电流、激光频率、激光脉宽、焊接速度、离焦量、激光钨极间距。他们发现:激光频率对表面成形影响最大,其次是 TIG焊电流;TIG焊电流对熔深影响最大,其次是激光钨极间距。如果没有保护气对激光保护,焊缝中可能会有比较多的气孔,这是由于空气中氧和氮进入的结果。刘黎明等^[22]对 AZ31B 镁合金复合焊气孔出现的原因和解决方案进行了分析和研究。他们发现:气孔中的氧和氮含量分别占 24.8%和 9.4%。主要是由于没有气体对激光进行保护,他们设计了两种保护方案:(1)与激光束同轴的气体保护法;(2)侧面气体保护法。第二种方法的保护效果较好,气孔的数量大大减少,第一种方法中保护气会扰动激光束,效果不是很好。

4 镁合金的搅拌摩擦焊

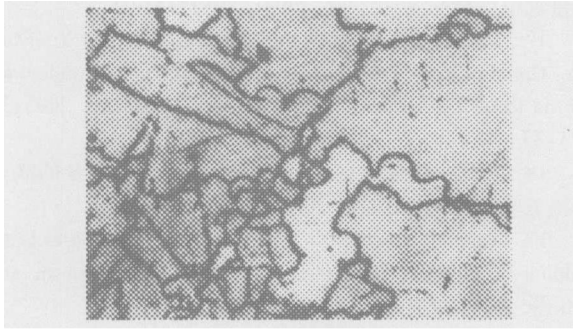
搅拌摩擦焊焊接镁合金时,由于连接温度低,所以形成塑化连接接头后,板材几乎无任何变形,接头的上、下表面光滑,无堆高,没有裂纹、气孔和反面未焊透等缺陷。由于搅拌头的搅拌作用,且焊接时温度较低,一般为 $0.8T_m$ ^[23] (T_m 为镁合金的熔点),超过了镁合金的再结晶温度(一般为 $0.5T_m \sim 0.7T_m$),所以接头处的镁合金经历了动态再结晶,但由于搅拌温度不高,晶粒没有发生再长大,所以焊缝晶粒细小。

4.1 镁合金搅拌摩擦焊的典型组织

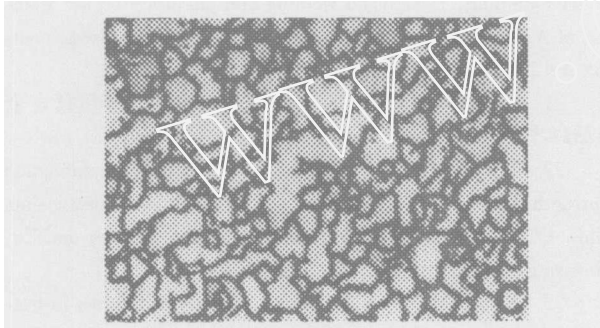
Trillo^[24]等研究了 AZ31B 镁合金的搅拌摩擦焊接头组织,母材中含有大量的变形孪晶,由于搅拌头的作用,消除了母材的强化机制,焊缝区的晶粒为动力学再结晶的等轴细晶,晶粒内位错密度很大,过渡区晶粒比焊缝区粗大,但小于母材,且没有变形孪晶存在。图 4为各部分组织图。



(a) 母材组织



(b) 过渡区组织



(c) 焊缝组织

图 4 AZ31B 搅拌摩擦焊接头各区域的显微组织

Fig 4 Microstructures of AZ31B weld after FSW

4.2 焊接参数的影响

搅拌摩擦焊的工艺参数有搅拌速度、焊接速度,在实际焊接时,选用合适的焊接参数可以使接头得到良好的组织和力学性能。W h Lee等^[25]研究了4 mm厚 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接时焊接参数与接头拉伸强度的关系,当焊速为 125 mm/min,转速为 1 800 r/min时,接头力学性能最好,拉伸强度为 240 MPa。张华^[26]等人研究了 2.5 mm厚 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接时焊接参数与接头力学性能的关系。当焊接速度为 95~150 mm/min、旋转速度为 900~1 500 r/min时,可以得到性能良好的接头。

搅拌摩擦焊焊接镁合金时,焊缝中不会有二次相出现,由于搅拌过程温度低,在接头冷却时不会析出二次相。J. A. Esparza等人^[27]对 2 mm厚压铸镁合金 AM60进行了搅拌摩擦焊接,最佳工艺参数为焊接速度 2 mm/s,转速 2 000 r/min,晶粒细化作用很明显,焊缝处为再结晶连续等轴细晶,晶界处无二次相出现。焊缝力学性能优良,断口为韧性断裂。在研究 AM60合金与 AZ91D合金的搅拌摩擦焊接中,选择参数为焊速 1.5 mm/s,转速 2 000 r/min, A. C. Somasekharan等^[23]得到了等轴细晶组织

宇航材料工艺 2006年 第1期

缝,焊缝晶界处无二次相出现。

搅拌作用使焊缝区组织均匀化,包括晶粒尺寸和位错密度,使晶粒位向分布很随意,这些对接头的力学性能都有影响。Park Seung Hwan C等^[28]研究了 AZ91D 镁合金搅拌摩擦焊接时焊接参数对接头晶粒细化和接头硬度的影响,得到了晶粒尺寸与硬度的关系式: $Hv = 64 + 27d^{-1/2}$,当焊接速度 800 mm/min,转速为 750 r/min时,焊缝晶粒尺寸最为细小。Park Seung Hwan C等^[29]研究了 AZ61 镁合金搅拌摩擦焊接接头的微观组织与力学性能之间的关系,微观组织观察发现焊缝区具有均匀分布的晶粒尺寸和位错密度,晶粒位向分布不均匀,这些使得焊缝区的硬度值分布很均匀。通过取向成像电子显微镜分析,断裂总发生在(0002)面,断口与受力方向成 45°。

4.3 焊核成型过程的模型建立及影响因素

搅拌摩擦焊焊接镁合金接头焊核区域成型过程模型的建立对于选择合理的工艺参数有指导意义。目前的研究只是建立了一些简单的模型,不够深入。张华等^[30]建立了一些简单的模型并提出:焊接压力对 AZ31 镁合金 FSW 焊核成型过程具有重要的作用,只有当焊接压力适当,才能保证充足的塑性材料及良好的成型、焊透及焊核形状规则;焊接速度决定塑性材料被搅拌的次数,材料被搅拌次数越多,越接近于二维的平面流动,焊核可以看到清晰的“洋葱”圆环,焊接速度增加时,塑性材料的流动变得无序和复杂,沿板厚的方向也存在着很大的塑性材料流动;倾斜角适当可以防止搅拌头的折损和利于焊核成型,影响塑性材料的流动,一般倾斜角为 2°~5°为宜。倾斜角增加,对塑性材料的流动影响增大。焊核成型的简易模型可以用来解释焊接参数对焊核成型过程的影响,尤其是倾斜角的影响。

5 结语

在现有的镁合金焊接方法中,传统的 TIG 焊焊接质量良好,应用范围相当广,适合各种接头的焊接,但由于能量密度不高,熔深比较浅,热影响区较宽,而活性 TIG 焊则弥补了许多不足,值得深入研究;激光焊热影响区较小,焊缝美观,但易产生气孔,成本较高;搅拌摩擦焊焊缝晶粒细小,接头力学性能优良,但是接头形式受限制,成本较高。

在镁合金焊接的研究中,有几方向研究得很少,

但很有潜在意义: (1)镁合金的活性 TIG焊的研究; (2)镁合金的复合焊研究; (3)镁合金熔焊过程中温度场模型的建立,对凝固过程了解很重要; (4)镁合金搅拌摩擦焊的焊核成型过程模型的建立和完善。

参考文献

- 1 Mordike B L, Ebert T. Magnesium properties applications potential Materials Science and Engineering A, 2001; 302(1): 37 ~ 45
- 2 刘正,张奎,曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用. 北京:机械工业出版社, 2002: 16 ~ 38
- 3 顾颜熹. 特种工程材料焊接. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1998: 254 ~ 278
- 4 苗玉刚,刘黎明,赵杰. 变形镁合金熔焊接头组织特征分析. 焊接学报, 2003; 24(2): 63 ~ 66
- 5 曲广学,刘庆忠,郭厚道. AZ31 镁合金薄板的焊接. 焊接, 2002; 46(2): 44 ~ 45
- 6 郑荣,林然. AZ31B 镁合金薄板的焊接. 焊接, 2003; 47(4): 43 ~ 44
- 7 Liu Lining, Miao Yugang, Song Gang et al Effect of heat input on microstructure and properties of welded joint in magnesium alloy AZ31B. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004; 14(1): 88 ~ 92
- 8 Asahina Toshikatsu, Tokisue Hiroshi Some characteristics of TIG welded joints of AZ31 magnesium alloy Journal of Japan Institute of Light Metals, 1995; 45(2): 70 ~ 75
- 9 Asahina Toshikatsu, Tokisue Hiroshi Solidification crack sensitivity of TIG welded AZ31 magnesium alloy Journal of Japan Institute of Light Metals, 1999; 49(12): 595 ~ 599
- 10 Munitz A, Cotler C, Stern A. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates Materials Science and Engineering A, 2001; 302(1): 68 ~ 73
- 11 徐锦锋,翟秋亚. AZ91B 镁合金 TIG焊接头组织与性能. 特种铸造及有色合金, 2004; 15(4): 23 ~ 25
- 12 张兆栋,刘黎明,王来. 镁合金活性 TIG焊焊接头组织特征分析. 焊接学报, 2004; 25(4): 55 ~ 58
- 13 Takeuchi Y, Takagi R, Shinoda T Effect of bismuth on weld joint penetration in austenitic stainless steel Welding Journal, 1992; 71(8): 283 ~ 289
- 14 Mechev V S Mechanism of contraction of the welding arc in the presence of electronegative particles Welding International, 1993; 7(2): 154 ~ 156
- 15 Sun Z, Pan D, Wei J. Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy. Science and Technology of Welding and Joining, 2002; 7(6): 343 ~ 351
- 16 王继锋,刘黎明,宋刚. 激光焊接 AZ31B 镁合金接

头微观组织特征. 焊接学报, 2004; 25(3): 15 ~ 18

- 17 Pan Lung Kwang, Wang Che Chung, Hsiao Ying Ching Optimization of Nd: YAG laser welding onto magnesium alloy via taguchi analysis Optics & Laser Technology, 2005; 37(1): 33 ~ 42
- 18 宋刚,刘黎明,王继锋. 变形镁合金 AZ31B 的激光焊接工艺研究. 应用激光, 2003; 23(6): 326 ~ 329
- 19 Zhao H, DebRoy T. Pore formation during laser beam welding of die-cast magnesium alloy AM60B mechanism and remedy Welding Journal 2001; 80(8): 204 ~ 210
- 20 Liu Lining, Wang Jifeng, Song Gang Hybrid laser TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy. Materials Science and Engineering A, 2004; 381(1): 129 ~ 133
- 21 宋刚,刘黎明,王继锋. 激光—TIG复合焊接镁合金 AZ31B 焊接工艺. 焊接学报, 2004; 25(3): 31 ~ 34
- 22 Liu Lining, Song Gang, Liang Guoli Pore formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B mechanism and remedy Materials Science and Engineering A, 2005; 390(1): 76 ~ 80
- 23 Somasekharan A C, Murr L E Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy, Materials Characterization, 2004; 52(1): 49 ~ 64
- 24 Esparza J A, Davis W C, Trillo E A. Friction-stir welding of magnesium alloy AZ31B. Materials Science, 2002; 21(12): 917 ~ 920
- 25 Lee W b, Yeon Y M, Jung S B. Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy. Materials Science and Technology, 2003; 19(6): 785 ~ 790
- 26 张华,林三宝,吴林. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头力学性能. 焊接学报, 2003; 24(5): 65 ~ 68
- 27 Esparza J A, Davis W C, Murr L E Microstructure property studies in friction-stir welded thixomolded magnesium alloy AM60. Material Science, 2003; 38(5): 941 ~ 952
- 28 Park Seung Hwan C, Sato Yutaka S, Kokawa Hiroyuki Microstructural evolution and its effect on Hall-Petch relationship in friction stir welding of thixomolded Mg alloy AZ91D. Materials Science, 2003; 38(21): 4 379 ~ 4 383
- 29 Park Seung Hwan C, Sato Yutaka S, Kokawa Hiroyuki Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test Scripta Materialia, 2003; 49(2): 161 ~ 166
- 30 张华,林三宝,吴林等. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头焊核区域成型过程及影响因素. 航空材料学报, 2004; 24(2): 6 ~ 10

(编辑 任涛)