

# 镁合金焊接技术的研究进展及应用

孙德新,孙大千,李金宝,李明高,殷世强

(吉林大学材料科学与工程学院,长春 130025)

**摘要** 镁合金有很多优异的性能,在航空航天、汽车、电子等领域具有广阔的应用前景,而镁合金的焊接技术是制约其发展的关键技术之一。简述了镁合金的性能及应用,着重讨论了镁合金钨极氩弧焊、激光焊、电子束焊、激光-TIG复合焊、搅拌摩擦焊、电阻点焊的焊接特点,综述了镁合金焊接技术的研究进展和应用。

**关键词** 镁合金 焊接技术 应用

## Research Progress and Application of Welding Technology of Magnesium Alloys

SUN Dexin, SUN Daqian, LI Jinbao, LI Minggao, YIN Shiqiang

(School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

**Abstract** Magnesium alloys have a wide application prospect in aerospace transportation, electronic engineering and other industries due to their multiple excellent properties. The welding technology of magnesium alloys is a key to their application in engineering. The research status of the welding technology of magnesium alloys is introduced in this review, and the emphases are placed on the characteristics of gas tungsten arc welding, laser welding, electron beam welding, laser-TIG welding, friction stir welding and resistance spot welding, etc. The future directions of research of magnesium alloys are pointed out.

**Key words** magnesium alloy, welding technology, application

## 0 前言

随着机械制造、航空航天、汽车工业的发展以及石油化工、电信、原子能及空间技术等新型工业的崛起,镁及镁合金的需求量日益增加,成为国民经济发展的重要基础原材料之一,在国民经济中占有重要的地位,是当今材料科学研究的重点方向之一<sup>[1,2]</sup>。镁合金是目前应用最广泛的合金,是理想的环保、节能材料,符合可持续发展的要求,被誉为21世纪绿色工程金属结构材料,并将成为21世纪重要的商用轻质材料<sup>[3,4]</sup>。随着对镁合金的进一步研究和在各个领域中更加广泛的应用,开展镁合金焊接技术的研究工作显得尤为重要和迫切,提高镁合金的焊接性、获得优质焊接接头是进一步拓宽镁合金应用范围的重要条件。

## 1 镁合金的性能及应用现状

### 1.1 镁合金的性能

镁合金是一种能够满足各种行业需求、发展前景可观的轻质材料,与铝和钢相比,镁合金材料具有以下特点<sup>[5~9]</sup>:

(1) 镁合金作为一种轻质金属结构材料,其密度仅为 $1700\text{kg}/\text{m}^3$ ,是铝合金的 $2/3$ ,钢的 $1/4$ ,因此结构件的轻量化,采用镁合金较合适。

(2) 镁合金的比强度和比刚度都高于铝合金和钢,在不降低零部件强度的前提下,镁合金零部件的质量比铝合金或钢的轻很多,而且镁合金的刚度随厚度的增加呈立方比增加,用镁合金制造刚性好的整体构件十分有利。

(3) 镁合金具有良好的抗冲击性,是塑料的20倍;拥有优良尺寸稳定性与良好的能量吸震性(在 $20\text{MPa}$ 应力水平下镁合金AZ91D的衰减系数为20%,而铝合金A380只有1%),是制造抗震零件的好材料,对于用作设备机壳减少噪音传递、提高防冲击与防凹陷损坏十分有利。

(4) 镁合金的传热和热膨胀系数较大,弹性模量在常用金属中是最低的。

(5) 镁合金具有良好的可回收性能,使镁合金比许多塑胶材料更具有吸引力。塑料类零件废弃时不利于环境保护,镁合金废料回收利用率高达85%以上。这种可再生利用的特性能够达到汽车节能、降低成本、可持续发展、减少排放、容易回收等目的。

(6) 镁合金是常用金属中容易加工的材料,具有比铝合金及钢的切削阻力小、机械加工速度快、刀具使用寿命长等优点。

(7) 镁合金还具有好的焊接性能,焊接接头的强度约为其自身强度的95%,可以制造复杂结构零件。

### 1.2 镁合金的应用

镁合金由于具有优异的性能而成为备受关注的新型材料。迄今为止,镁合金在汽车行业、电子设备、航空航天、自行车及日常生活等方面都得到了广泛的应用,具体如下:

(1) 镁合金产品广泛应用于汽车始于20世纪90年代,目前,汽车工业中镁合金用量较大的国家和地区主要有北美、日本、韩国和欧洲,其用量在1991年仅为24000t,到1997年增至64000t,年增长率达20%,预计2006年这些国家和地区的汽车工业对镁合金的需求量将达20万吨。东风汽车公司早在“七

孙德新:1977年生,博士研究生,研究方向为先进材料连接

五”、“八五”期间就开展了镁合金研究工作,“九五”期间与北京有色金属研究总院合作,完成了国家科技攻关项目为“镁合金在汽车上的应用研究”。德国大众汽车公司1980年全年的“甲壳虫”汽车用了大量镁合金,达到批量生产汽车中镁合金用量的最高纪录。镁合金消费量最大的福特汽车公司仍在继续增加用镁量来减轻汽车重量,在2001年使用了2.0万吨。发展镁合金的主要动力是汽车工业的发展需求,目前已经开发出60多种镁合金零件,对推动镁合金的进一步应用具有重要的意义<sup>[10~14]</sup>。

(2) 镁合金在电子领域的应用具有很大的潜力,数字化技术的发展带动各类数字化电子产品的不断涌现。电子元器件越来越趋于高度集成化和小型化,便携式电脑、数码摄像机、数码相机、手机等材料也日益更新,而镁合金正是这些电子产品的最佳外壳选择。日本和中国台湾在这一领域保持着领先地位,除生产笔记本电脑、MD随身听和数码相机三大用镁合金最多的产品外,还开发出投影机、CD播放机、电视机外壳、掌上电脑和音响等。随着消费者对时尚的要求越来越高,在电子产品的材料上镁合金有逐渐取代ABS、PC等材料的趋势<sup>[15~17]</sup>。

(3) 镁及镁合金从20世纪50年代起在航空工业中就已经被广泛使用<sup>[18,19]</sup>。在B-36轰炸机上,共使用8600kg的镁,其中1/2是用作结构材料。在GAR-1型Falcon(空对空导弹)中的弹体是由0.040英寸(0.1016cm)的AZ32B-H24合金和AZ91B制成的。前苏联用火箭送上月球的第一架月球车就是采用镁合金制造的。目前,将已经研究出的高温镁合金WE43、WE54应用在新型航空发动机齿轮箱和直升机的变速系统中,能在振动、沙尘、腐蚀、高温等比较恶劣的环境中使用。可见镁合金在航空航天工业中具有广阔的应用前景。

此外,镁合金还应用在自行车、建筑装饰等行业中,逐渐成为新的市场热点<sup>[20]</sup>。

## 2 镁合金焊接特点

由于镁合金具有独特的物理化学性质,焊接时必须充分考虑以下镁合金的性质对焊接性能的影响<sup>[21,22]</sup>:

(1) 镁是很活泼的金属,与氧的亲合力大,在常温下即可形成氧化镁、氢氧化镁等化合物,氧化镁的熔点约2500,与镁熔点650相差很大,在焊接过程中形成的氧化膜混杂在比重较轻的熔融金属中不易被排除,易使焊缝产生夹渣,存在夹渣的焊缝易产生电化学腐蚀。焊接过程中由于高熔点的氧化膜覆盖熔池,温度不易控制(镁的表面张力小,氧化膜在熔化时与镁合金并无颜色区别,很难观察到熔化的程度),易造成焊接热影响区大块塌陷,破坏焊缝金属的形状及性能。

(2) 镁蒸发温度较低,约为1107,由于镁在高温下的蒸发、燃烧易氧化等作用,形成一定数量的氢和氧。氢和氧在镁中的溶解度随温度的降低而减小,在焊缝凝固过程中气体不易逸出而形成气孔。

(3) 镁及镁合金的热膨胀系数大(约为铝的1.2倍),导热系数高,弹性模量较小,在焊接过程中镁合金变形较大、冷却速度快、熔池一次结晶速度快,其线膨胀系数大,凝固时体积收缩率达4.6%,使焊缝的内应力和焊接接头的刚性拘束度较大,易引起较大的内应力。

(4) 镁合金的电阻率低,导电导热性好,在焊接镁合金时要用大功率热源、高速焊接,易造成焊缝近缝区金属过热和晶粒长

大,这是镁合金焊接时的显著特点之一。

(5) Al和Zn对镁合金材料焊接性影响很大。由Mg-Al及Mg-Zn二元系合金相图可知,在镁合金焊接中,由于凝固时的冷却速度快,呈现非平衡凝固,固溶线下降约2%,因此,即使少量的铝在最终的晶界作为晶体也结晶出相( $Mg_{17}Al_{12}$ ),凝固温度扩展到共晶温度;Zn在镁中的最大固溶限为6.2%,在非平衡凝固中即使是更少量的添加量也结晶出共晶,结晶温度只有340左右,大大低于Mg-Al系的结晶温度。由于增加合金含量会增加金属间化合物的生成量,增宽凝固温度范围,因此,必须控制合金的添加量。Zn添加量的增加会提高凝固裂纹的敏感性,小于10%的Al可使焊接部位的晶粒微细化,并能有效防止焊接裂纹。

(6) 镁合金易与其他金属形成低熔共晶体,当接头温度过高时,接头组织中的低熔点共晶体在晶界处会融化出现空穴、晶界氧化、过烧等现象。

此外,焊接镁合金时应注意:利用背衬保护熔融金属;采用夹板保护;需要强力排风系统排除焊接烟气;坡口进行预处理;采用熔化焊焊接镁合金时需采用惰性气体或焊剂的保护等。

## 3 镁合金焊接方法

几乎与镁合金材料的研究开发同时,许多从事焊接研究工作的学者就对镁合金材料的焊接问题作了大量的研究,焊接方法有:钨极氩弧焊(TIG焊)、激光焊、电子束焊、激光-TIG复合焊、摩擦搅拌焊、电阻点焊,现将国内外这方面的研究工作综述如下。

### 3.1 钨极氩弧焊(TIG焊)

钨极氩弧焊(TIG焊)是最早用于镁合金材料焊接的方法之一。采用TIG焊焊接AZ91D镁合金时发现,在临近熔合线处产生一较宽的热影响区,沿晶界可观察到连续的 $Al_{12}Mg_{17}$ 相析出,接头的主要缺陷是气孔和疏松。气孔的形成与焊缝中氢含量有关,与焊接过程中焊丝的成分及保护气体的纯度等有关,在熔池金属凝固时,氢在镁中的溶解度急剧下降,熔池冷却速度快,在焊缝金属中气泡来不及逸出而形成气孔,降低了接头的强度。因此,在焊接过程中要严格控制气孔的形成<sup>[23~26]</sup>。

采用TIG焊焊接AZ31B镁合金,焊缝附近的纤维组织消失,焊缝区和热影响区的分界较为明显:热影响区是典型过热组织,晶粒较粗大;焊缝区由细小的等轴晶组成,晶粒明显比母材和热影响区的细小,是典型的铸造急冷组织;母材晶粒呈纤维状。这是由于镁合金的熔点低、导热快,焊接时需要大功率、电弧加热面积大、焊接速度慢、熔池金属液态停留时间短,造成热影响区宽且晶粒粗大,焊接脉冲搅拌熔池的作用促进了焊缝区等轴晶粒的形成。拉伸试验时接头断裂发生在热影响区部位,这表明热影响区的晶粒严重粗化,成为导致镁合金焊接接头力学性能下降的主要原因<sup>[27]</sup>。

采用填丝TIG焊焊接变形镁合金AZ31B,与非填丝TIG焊相比,填丝TIG焊的焊接工艺更加复杂,接头强度有了很大提高,组织更均匀,热影响区较窄,熔合线清晰。针对采用不同焊丝的焊接接头分析结果表明,随着焊丝含铝量的增加,热影响区及焊缝区的共晶相逐渐增多并有呈连续分布的趋势。该共晶体的逐渐增多对接头性能的影响较为复杂,一方面由于脆性相 $Al_{12}Mg_{17}$ 的增多而降低了接头强度,另一方面又由于晶粒的细

化及铝元素的固溶而提高了接头强度<sup>[28]</sup>。

### 3.2 激光焊

激光焊是利用高能激光束作为热源的一种高效精密焊接方法,具有高能密度、高焊速、小变形、深穿透、高效率、高精度、强适应性等优点,在航空航天、汽车制造、轻工电子等领域得到广泛应用。

文献[29]采用CO<sub>2</sub>激光焊焊接镁合金,结果表明采用激光焊可以焊接相同成分或不同成分的厚度为2.5~8mm的镁合金试样,对于铸造合金AZ61、ZK30和ZK71可以得到较窄的焊缝、熔融区和热影响区。由于激光焊的光束能量密度大,焊接速度高,熔池金属冷却速度大,接头组织晶粒细化,且熔深较深,对接头强度的提高较为有利。激光焊焊接镁合金时,由于激光与母材的作用时间短,熔融金属凝固快,金属气体和吸入的其它气体(如氧、氢等)来不及逸出,易形成气孔、热裂纹、疏松等缺陷,深熔焊时根部还可能出现空洞,降低了接头力学性能。

文献[30]采用激光焊焊接AZ31变形镁合金,结果表明,激光脉宽是影响焊接接头性能的主要因素,通过控制激光脉冲宽度可以获得高质量的镁合金焊接接头。激光焊缝连续、狭窄、变形小、背面熔透均匀,无裂纹、气孔等缺陷。对组织进行观察发现,母材为粗大的等轴晶;焊接接头组织致密,晶粒细小;焊缝由细小的等轴晶组成,是因为激光焊冷却速度快使晶粒细化;热影响区没有晶粒长大现象,是因为在焊接过程中激光能量高度集中,镁合金导热系数高,致使焊接接头处的温度梯度很大限制了晶粒长大。母材、热影响区、焊缝的硬度变化不大,邻近熔合线处的硬度值略有上升。

### 3.3 电子束焊

电子束焊是一种能量密度高、焊接效果好、适应范围广的焊接方法,在焊接过程中不受氧气等气体的影响,在真空状态下热损失很小,加热速度快。

文献[31]采用电子束焊焊接纯镁和AZ31镁合金,结果表明,纯镁和AZ31镁合金焊缝的表面无缺陷,未发现气孔和裂纹,在不同的焊接速度下也未出现起弧现象。纯镁的熔融区与热影响区界面模糊,晶界不明显,熔融区晶粒比母材粗大;AZ31镁合金的熔融区与热影响区的界面清晰可见,晶粒尺寸明显不同,熔融区的等轴晶远比母材组织细小。纯镁和AZ31镁合金熔融区的硬度与母材的硬度值基本一致,在焊缝处硬度无明显变化。纯镁焊接接头的拉伸强度和冲击性能基本和母材相当,并与焊接速度无关;AZ31镁合金在焊接速度5mm/s和5.83mm/s时,接头拉伸强度和冲击性能优良。

文献[32]采用电子束焊焊接AZ91D镁合金时发现,热影响区很小,焊缝表面光滑,没有缺陷,由于高的冷却速度,晶粒细化,焊缝和热影响区的强度提高,获得了高的延伸率。焊接时增加电流可以增大熔融区和热影响区的宽度。

由于镁合金具有大的热传导性,对于纯镁、AZ31、AZ61、AZ91D合金,随着含铝量和热输入的增加,熔深变深。这是由于镁合金中铝溶入量的增加,使镁铝合金固液状态的温度更低、范围更宽,合金的导热性也更低。在相同的焊接热输入条件下,随着铝溶入量的增加或镁溶解成分的减少,焊缝的表面变得光滑,波纹也变得有规则。在以上4种材料的快速熔化状态下,熔融的液态变得稳定,飞溅减少,熔融区的晶粒均由等轴晶粒组成,没有明显的长柱状晶颗粒,这是由快速熔化和冷却引起的,

且随焊接热输入的减小晶粒细化。由于熔融区的晶粒细化,熔融区的硬度值几乎与母材相同<sup>[33]</sup>。

### 3.4 激光-TIG复合焊

激光-电弧复合热源焊接是由英国的W. Steen在20世纪70年代末提出的,它是将能量传输机制、物理性质截然不同的两种热源同时作用在一个加工位置。激光-电弧复合热源焊接可以增大焊接熔深、提高焊接速度、增大装配间隙,并可以改变功率密度在时间和空间上的分布,改善母材热作用和热影响区域的温度分布,从而改善焊缝及热影响区的冷却条件、组织转变和应力状态<sup>[34,35]</sup>。

利用混合热源焊接的方法焊接镁合金是相对较新的方法,在激光-TIG复合焊的方法中,TIG焊的喷嘴安装在激光束的轴线上,喷嘴和激光束与焊接方向排在一起,前面是TIG,这种焊接方法无方向性,焊接过程比较稳定,焊接速度也大大增加。

文献[36~38]以AZ31B变形镁合金为研究对象,采用激光-TIG复合焊对其进行焊接,结果表明激光-TIG复合焊的焊接速度比TIG的焊接速度快,激光-TIG复合焊的熔深是TIG焊熔深的2倍,是激光焊熔深的4倍。与单独的TIG焊相比,特别是在焊接速度快、TIG焊接电流低的情况下,激光-TIG复合焊的电弧的稳定性提高。激光-TIG复合焊的焊缝为明显的“钉头型”形貌,上部分为TIG电弧焊接成形,下部分为典型的激光焊接成形,其焊缝表面连续、平稳、深宽比大、热影响区窄、组织晶粒细小均匀、基本无下凹现象。采用激光-TIG复合焊镁合金能在较宽的工艺参数范围内焊接,得到质量良好的焊缝和抗剪强度较高的焊接接头。

### 3.5 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊是英国焊接研究所1991年发明的一种新型固态连接技术<sup>[39]</sup>。它是利用一种特殊形式的搅拌头边旋转边前进,通过搅拌头与工件的摩擦产生热量,使该部位金属处于热塑性状态,并在搅拌头的压力下从其前端向后部塑性流动,从而使待焊件压焊为一个整体。在焊接过程中不需要填充材料,焊前没有复杂的准备工作,焊接时不存在熔焊时的各种缺陷,因而有利于镁合金的焊接<sup>[40,41]</sup>。

目前已实现了AZ61<sup>[42]</sup>、AZ81A<sup>[43]</sup>、AZ91D<sup>[44]</sup>等镁合金的搅拌摩擦焊接。焊接镁合金时不会产生与熔化有关的缺陷,如气孔、裂纹等,相反,由于焊接过程中的快速机械搅拌作用,塑化连接的接头有动态再结晶的过程,焊缝宽度均匀,表面成型美观无任何缺陷。观察接头组织发现,在接头处产生了一个椭圆形的搅拌区域,该区域由具有高密度的混乱微小的再结晶颗粒组成;焊缝中心晶粒细小,且在靠近焊缝的上表面和下表面晶粒更加细小,这是因为在搅拌头的作用下,产生变形和摩擦热导致该部位金属在较低温度下发生动态再结晶过程,从而形成细小的等轴晶粒;热影响区晶粒较粗短,逐渐向等轴晶、微细晶粒转变。整个接头的综合机械性能几乎与母材完全相同,接头抗拉强度达母材强度的90%左右,接头韧性与母材相比降低很少。

### 3.6 电阻点焊

电阻点焊是镁合金众多连接方法中具有较大潜力的一种,电阻点焊时熔核周围被高温塑性金属环包围,与外界气体隔绝,防止空气中气体与熔核中的金属发生冶金反应,以保证熔核成分基本不变,从而实现在无保护气体条件下进行焊接。

文献[45~47]对AZ31B镁合金的点焊进行了研究。结果

表明,镁合金表面状态的不同对焊接质量的好坏有显著的影响。未经过表面处理的焊件由于表面氧化膜的存在使焊件与电极间的接触电阻增大或减小,产生裂纹或飞溅。为了获得良好的焊点,避免产生裂纹和飞溅等缺陷,必须对镁合金焊件进行焊前清理。由于镁合金的电阻率较低,导热系数较大,金属在非常短的时间内被熔化,且冷却速度快,分析 AZ31B 镁合金交流点焊中的焊接电流、电极压力及焊接时间等工艺参数对接头拉剪力的影响规律,确定的最佳工艺参数为焊接电流 17000A、电极压力 2475N、焊接时间为 10 个周波、预压时间为 20 个周波,在这种条件下焊接接头的抗剪强度为 1980N,可以得到质量较好的焊点,力学性能较好。

#### 4 结语

随着人们对镁合金材料研究的进一步深入,镁合金在各个领域的广泛应用以及对镁合金性能和加工技术的要求不断提高,镁合金材料的焊接成为该领域的研究重点。

采用 TIG 焊焊接镁合金是较为传统的焊接方法,热影响区晶粒粗大是接头性能下降的主要原因。搅拌摩擦焊和激光-TIG 复合热源缝焊镁合金是较新的焊接方法,可以获得优质的焊接接头,对推动镁合金连接技术的发展具有良好的应用前景。

镁合金焊接性能优良,但对于镁合金的实际应用来说,如何克服焊缝处明显的脆性,减少气孔、裂纹的产生和热影响区的晶粒粗大,镁合金与其它金属的连接等许多问题还有待进一步研究。由于镁合金焊接研究刚刚起步,研究和开发高技术含量的镁合金焊接技术对利用我国丰富的镁资源和镁工业基础具有重大意义。

#### 参考文献

- 潘洪平,丁志勇,谢永生. 镁合金加工技术的研究现状与应用. 轻合金加工技术,2002,30(7):7
- 张同俊,李兴国. 镁合金的应用与中国镁工业. 材料导报,2002,16(7):11
- 于琨,黎文献,王日初,等. 变形镁合金的研究、开发及应用. 中国有色金属学报,2003,13(2):277
- 张高会,张平则,潘俊德. 镁及镁合金的研究现状与进展. 世界科技研究与发展,2003,25(1):72
- 宋银川. 镁合金材料在客车轻量化中应用的探讨. 铁道车辆,2003,41(5):25
- Cole G S. Issues that influence magnesiums use in the automotive industry. Mater Sci Forum, 2003,419-422:43
- Mordike B L, Ebert T. Magnesium properties applications potential. Mater Sci Eng, 2001,A302(10):37
- 张同俊,李星国. 镁合金应用和中国镁工业. 材料导报,2002,16(7):11
- 乐启枳,张新建,崔建忠. 镁合金及成型工艺与应用现状. 材料导报,2002,16(12):12
- 刘静安. 镁合金加工技术发展趋势与开发应用前景( ). 稀有金属快报,2003,2:6
- Aghion E, Bronfin B, Friedrich H. The environmental impact of new magnesium alloys on the transportation industry [A]. Alan A L. Magnesium Technology 2004 [C]. USA: TMS (The Materials, Metals & Materials Society), 2004. 167
- 陈力禾,刘正,林立,等. 镁——汽车工业通向新世纪的轻量化之路. 铸造,2004,53(1):5
- Luo A, Renaud J, Nakatsugawa I, et al. Magnesium casting for automobile applications. JOM, 1995,47(7):28
- 刘新宽,向阳辉,胡文彬. 镁合金汽车零部件的腐蚀与防护. 材料导报,2003,17(8):8
- 翟春泉,曾小勤,丁文江,等. 镁合金的开发与应用. 机械工程材料,2001,25(1):6
- 张琦. 镁合金产业的现状与发展. 世界有色金属,2002,9:10
- 王渠东,吕宜振,曾小勤,等. 镁合金在电子器材壳体中的应用. 材料导报,2000,14(6):22
- 白丁. 俄罗斯镁合金生产技术进展. 世界有色金属,2003,4:62
- 钟皓,刘培英,周铁涛. 镁及镁合金在航空航天中的应用与前景. 航空工程与维修,2002,4:41
- 周海涛,马春江,曾小勤,等. 变形镁合金材料的研究进展. 材料导报,2003,17(11):16
- 国翔. 镁合金的焊接. 有色金属与稀土应用,2002,3:25
- 冯吉才,王亚荣,张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用. 中国有色金属学报,2005,15(2):165
- Munitz A, Cotler C, Stem A, et al. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates. Mater Sci Eng A, 2001,302(1):68
- Stern A, Mujnetz A. Partially melted zone microstructural characterization from gas tungsten-arc bead on plate welds of magnesium AZ91 alloy. J Mater Sci Lett, 1999,18:853
- 孙德新,孙大千,殷世强,等. 镁合金 AZ91D 焊接接头组织与性能. 焊接,2006,(1):35
- Kazuyhiro N. Weldability of magnesium alloy. J Light Metal Welding Constr,2001,39(12):26
- 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
- 董长富,刘黎明,赵旭. 变形镁合金填丝 TIG 焊接工艺及组织性能分析. 焊接学报,2005,26(2):33
- Weisheit A, Galun R, Mordike B L. CO<sub>2</sub> laser beam welding of magnesium-based alloys. Welding Res,1998,Suppl:149
- 宋刚,刘黎明,王继锋,等. 变形镁合金 AZ31B 的激光焊接工艺研究. 应用激光,2003,23(6):237
- 张英明 编译. 纯镁和 AZ31 镁合金的电子束焊接性能. 稀有金属快报,2003,4:25
- Munitz A, Cotler C, Shaham H, et al. Electron beam welding of magnesium AZ91D plates. Welding Res,2000,Suppl:202
- Su S F, Huang J C, Lin H K, et al. Electron beam welding behavior in Mg-Al-based alloys. Metall Mater Trans, 2002,33A:1461

- 34 吕高尚,史春元,董春林,等. 激光-电弧复合热源焊接研究及应用现状. 航空制造技术, 2005, 5: 86
- 35 Barrallier L, Fabre A, Masse J E, et al. Residual stress measurements using neutron diffraction in magnesium alloy laser welded joints. Mater Sci Forum, 2002, 404-407: 399
- 36 宋刚,刘黎明. 镁合金焊接技术研究. 科学中国人, 2005, 2: 54
- 37 Liu L M, Wang J F, Song G. Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy. Mater Sci Eng A, 2004, 381: 129
- 38 迟鸣声,刘黎明,宋刚. 镁合金 AZ31B 的激光-TIG 复合热源焊工艺. 焊接学报, 2005, 26(3): 21
- 39 Thomas W M, Nicholas E D. Friction stir welding for the transportation industries. Mater Design, 1997, 18(4/6): 269
- 40 张华,吴林,林三宝,等. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊研究. 机械工程学报, 2004, 40(8): 123
- 41 Esparza J A, et al. Friction stir welding of magnesium alloy AZ31B. J Mater Sci Lett, 2002, 21: 917
- 42 Seung H C P, Yutaka S S, Hiroyuki K. Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test. Scr Mater, 2003, 49: 161
- 43 柯黎明,邢丽,徐卫平. AZ81A 镁合金焊接接头的组织与性能. 材料工程, 2005, 1: 41
- 44 Park S H C, et al. Improvement of mechanical properties in thixomolded MG alloy AZ91D by friction stir welding [A]. Indacochea J E, DuPont J N. Lienece: Trends in Welding Research. Columbus, Ohio: ASM, 2002. 267
- 45 王亚荣,张忠典,冯吉才. 交流点焊工艺参数对 AZ31B 镁合金接头性能的影响. 焊接, 2003, 7: 18
- 46 张晓宏,蔡智鹏,等. 镁合金 AZ31B 的电阻点焊. 焊接, 2003, 10: 20
- 47 Tomiharu O. Resistance welding of aluminum alloy to dissimilar metals. Light Metal Welding Constr, 2004, 42(1): 2
- (责任编辑 张明)

### (上接第 121 页)

(2) 高强高韧镁合金。采用喷射沉积技术制备的镁合金晶粒细小,合金强度和塑性明显得到改善,同时由于喷射沉积镁合金中含有最低程度的快速凝固工艺污染物,合金断裂韧性有了大幅度提高。

(3) 变形镁合金。室温滑移系少、冷加工困难是限制变形镁合金材料发展的关键因素。晶粒细化到一定程度可以保证多晶镁合金具备充分的延性转变能力。喷射沉积镁合金中,晶粒明显细化,从而可以调整材料的组织和性能,获得变形性能优良的材料。

### 参考文献

- 1 Singer A R E. The principle of spray rolling of metals. Metal Mater, 1970, 4: 246
- 2 王建强. 喷射成形技术的研究发展与展望. 世界科技研究与发展, 2002, 22(1): 62
- 3 王文明,潘复生,曾苏民,等. 喷射成形技术的发展概况及展望. 重庆大学学报, 2004, 27(1): 101
- 4 范洪波,沈军,李庆春. 喷射成形快速凝固技术在铝合金中的应用. 轻合金加工技术, 1998, 26(9): 1
- 5 田世藩. 国外快速凝固喷射成形技术. 航空科学技术, 1996, 10(1): 29
- 6 崔成松,李庆春,沈军,等. 喷射沉积快速凝固材料的研究及应用状况. 材料导报, 1996, 10(1): 21
- 7 Leatham E J, Lawley A. The spray process: principles and applications. Int J Powder Metall, 1993, 29: 321
- 8 刘刚,王磊,石力开,等. 喷射沉积工艺研究. 中国有色金属学报, 1995, 5: 99
- 9 Lavernia E J, Grant N J. Spray deposition of metals: a review. Mater Sci Eng, 1988, 98: 381
- 10 王军,严彪,许政. 喷射成形技术的发展应用. 上海有色金属, 2002, 23(3): 133
- 11 李忠盛,潘复生,张静. AZ31 镁合金的研究现状和发展前景. 金属成形工艺, 2004, 22(1): 54
- 12 余琨,黎文献,王日初,等. 变形镁合金的研究、开发及应用. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 277
- 13 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金. 北京:化学工业出版社, 2004. 5
- 14 陈刚,陈鼎,严红革. 高性能镁合金的特种制备技术. 轻合金加工技术, 2003, 31(6): 40
- 15 Faure J F, Nussbaum G, Regazzoni G. Process for obtaining magnesium alloys by spray deposition. US Pat, 5073207. 1991
- 16 Faure J F, Nussbaum G, Regazzoni G. Process for obtaining magnesium alloys by spray deposition. Eur Pat, 414620A1. 1991
- 17 白丽华,马宏生,张谦. Mg-Zr-Zr-Y 合金的雾化沉积及其对性能的影响. 兵器材料科学与工程, 1994, 17(2): 47
- 18 胡丽萍,甄立玲,王智慧. 喷射沉积稀土镁合金材料工艺研究. 金属成形工艺, 2000, 18(2): 39
- 19 Chen C Y, Tsao, Chi Y A. Spray forming of silicon added AZ91 magnesium alloy and its workability. Mater Sci Eng A, 2004, 383(1): 21
- 20 曾小勒,王渠东,丁文江. 镁合金熔炼阻燃方法及进展. 轻合金加工技术, 1999, 27(9): 5
- 21 往渠东,丁文江. 镁合金研究开发现状与展望. 世界有色金属, 2004, (9): 9
- (责任编辑 张明)