

摘 要

镁合金以其密度低、比强度高、阻尼减震性好、易机械加工及良好的可回收性等优点，在航空航天、汽车等行业具有广阔的应用前景。作为镁合金焊接技术的核心内容之一，优质、高效镁合金焊接材料的制备和应用技术已成为制约镁合金产业化的“瓶颈”问题。因此展开对镁合金新型、高效焊接材料的研究，已成为一项有理论意义和现实意义的工作。本文研究了镁合金焊丝的挤压生产、活性焊丝的制备、活性焊丝增加焊接熔深的能力和机理、活性剂成分的选择。

研究表明，镁合金具有密排六方晶格，常温下滑移系少，塑性变形能力差，不能采用与铝合金类似的拉拔方法制备焊丝。本文采用热挤压的方法，自制了挤压装置，通过设定合理的预热温度、挤压速度等工艺参数，成功制备出了系列镁合金焊丝。

本文将镁合金焊丝与活性化焊接中应用的活性剂结合在一起，制成活性化焊丝。研究发现：应用镁合金活性焊丝焊接镁合金，焊接熔深得到显著增加，最大可达普通焊丝焊接熔深的 3 倍；活性剂增加焊接熔深的能力与其分解温度存在对应关系，分解温度在 900℃ 的活性剂增加熔深的作用最为明显；以氯化物为活性剂焊接时，电弧电压有明显的增加，电弧形态虽然向四周扩张但中心高温区却呈收缩趋势变化，电弧光谱分析结果显示在镁合金活性焊丝焊接中 Mg 代替 Ar 成为电弧的主要放电元素。活性焊丝焊接时，活性剂主要是通过压缩电弧导电通道，增加电弧电流密度和能量密度，提高电弧的热效率而起到增加焊接熔深的作用。

本文还对活性焊丝的填丝性能进行了研究，研究发现单一成分的活性剂降低了焊丝填丝的性能。通过对活性剂成分的优化，设计出一系列活性剂的复合配方，不仅更明显的增加了焊接熔深，而且改善了焊丝的填丝性能。

关键词：镁合金；热挤压；活性焊丝；复合配方

Study on the Welding of Magnesium with Flux Coated Wire

Abstract

For the characteristics of low density, high specific strength, good electromagnetic shielding and recyclable, Mg alloys are used in many fields, such as aerospace vehicle, automobile, consumer electronic productions. However, the filler wire of Mg and its alloy can't meet the demands of manufacturing at present and it has been the main problem which limits the application of magnesium alloy structural components. Hereby, the research on Mg filler wire is becoming a focal topic all over the world. In this paper, manufacture of the normal filler wire and flux coated filler wire, the effect of the flux coated wire on weld penetration, the complex formula of the fluxes were studied and the mechanism of weld penetration increase was discussed.

The results showed that magnesium alloy welding wire can't be fabricated by drawing method as aluminum alloy wire for its poor plasticity, which results in magnesium alloy's close-packed hexagonal lattice and few slip system. In this study, hot-extruding process has been adopted with proper process parameters, and magnesium alloy welding wire has been fabricated successfully.

Flux coated wire was prepared by coated the flux on the surface of the normal filler wire. The weld penetration was increased by the use of the flux coated wire, and the maximum increase level is the 300% of the weld penetration using normal wire. The boiling points of the fluxes that increased weld penetration most are mostly in the regions about 900°C. In flux coated wire weld, the welding arc constriction is generated by the dissociation of the constituent elements of the flux. The constricted welding arc leads to a increasing in arc voltage, current density and arc temperature.

The interdiffusion ability between the droplet metal and the welding pool metal became worse in the single flux coated wire weld than the normal wire, and that indicated filling ability of the filler wire became bad. The complex formula which is composed of oxide fluxes is designed with the uniform design. The use of the complex formula flux can not only increase the weld penetration but also improve the filling ability of the flux coated wire.

Key Words: Magnesium alloy; Hot-extruding; Flux coated wire; Complex formula

独创性说明

作者郑重声明：本硕士学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得大连理工大学或者其他单位的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

作者签名： 蔡本红 日期： 2007年12月20日

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 蔡东红

导师签名： 刘 黎 红

2007 年 12 月 20 日

1 绪论

1.1 选题意义及背景

镁是最轻的结构金属材料,密度为 1.738g/cm^3 ,为钢的 $1/4$,铝的 $2/3$ ^[1]。与钢和铝合金相比,镁具有较高的比强度、比刚度,良好的铸造、切削加工、导热、阻尼、电磁屏蔽性能和易于回收等优点^[2-6],因而在航空航天、汽车以及 3C 产品领域有广阔的应用前景,被认为 21 世纪最具开发和应用潜力的“绿色材料”^[7-8]。镁是地球上储量最丰富的元素之一,除地壳表层金属矿的含量外,在盐湖及海洋中的含量也十分可观^[3]。随着很多金属矿产资源日益枯竭,镁以其资源丰富而日益受到重视,特别是结构轻量化技术及环保问题的需求更加刺激了镁工业的发展。目前,镁合金的研究已成为世界性的热点。

现阶段,镁合金研究及其发展需要解决的问题主要包括,① 成分设计和性能的改善;② 高温蠕变强度;③ 先进的成形技术及装置;④ 表面处理技术;⑤ 连接技术^[9]。连接技术中以焊接的应用最为重要和广泛,目前 TIG 焊是应用最普遍的一种镁合金焊接方法,该方法具有成形美观,接头强度高等特点,在生产中得到了广泛的应用,但 TIG 焊的单道焊熔深浅,生产率低。活性剂焊接(Activating flux TIG welding 简称 A-TIG 焊)是由乌克兰巴顿焊接研究所(PWI)在 60 年代提出的一种焊接方法^[10,11]。这种技术是焊前在母材表面涂覆一层活性剂,在相同的焊接规范下,同常规 TIG 焊相比,可以大幅度地提高焊缝熔深。

在实际生产中无论是对接焊、角接焊还是补焊等,必要的焊接填充材料都是必不可少的,向焊接熔池中填充必要的焊接材料是提高焊缝性能的重要手段。填丝焊的优点如下:① 对母材的加工和装配精度要求降低,节约了成本。② 可以通过添加有用的合金成分方便地改变和控制焊缝的组分,提高接头质量。③ 可以焊接更厚的材料,而且容易实现多层焊^[12]。对于镁合金而言目前主要采用 TIG 焊冷填丝工艺进行焊接,该方法成型良好,接头质量高,焊接接头动、静载荷性能获得显著提高,达到与镁合金母材相匹配水平,完全满足动载服役环境对镁合金焊接结构件的需求^[13]。

综合镁合金焊接的上述现状,本文通过对焊丝成分的优化,采用热挤压的方法制备出高性能的镁合金焊接材料,并再此基础上将 A-TIG 焊接方法与填丝焊接进行复合,研制出镁合金活性化焊丝。采用活性焊丝进行焊接镁合金,焊接熔深可明显增加,大大提高焊接生产效率,同时保留填丝焊接的优点,实现了活性焊和填丝焊的优势互补。将这种焊丝应用于厚板焊接或构件补焊等场合,便可在一定条件下不需预先开坡口或打孔一

次性将工件焊透，从而减少重复焊接次数。活性焊丝的应用将会大大提高生产效率，改善接头性能。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 镁合金焊接现状及发展趋势

镁合金的熔点低、导热快，焊接时焊缝及近缝区金属容易过热，造成晶粒粗大现象。镁合金还具有高的蒸汽压、低的表面张力等性质，在焊接过程中易产生咬边、下塌等缺陷。由于镁合金的化学性质极其活泼，高温下容易氧化，易生成氧化镁（ MgO ），氧化镁熔点高（ $2500^{\circ}C$ ），密度大（ $3.2g/cm^3$ ），在熔池中易形成细小片状的固态夹渣，降低焊缝的性能。镁的沸点低，因此在焊接时蒸发严重。镁合金的线膨胀系数大，约为钢的 2 倍，铝的 1.2 倍，因而焊接热应力大，使得镁合金在焊接过程中容易产生变形、裂纹等缺陷。此外，镁合金易产生氢气孔，氢在镁中的溶解度随温度的降低而急剧减小，当氢的来源较多时，出现气孔的倾向较大^[14-16]。为了解决上面提出的镁合金焊接过程中的一系列问题，研究人员提出了很多焊接方法：

（1）不熔化极惰性气体保护焊（TIG）

TIG 焊是目前镁合金焊接生产研究中应用最为广泛的一种焊接方法，它是在惰性气体的保护下，利用钨电极与工件间产生的电弧热熔化母材和填充金属从而形成结合的一种方法^[17]。钨极氩弧焊焊接镁合金，在有无焊丝的情况下都可进行镁合金的焊接。在有焊丝的情况下，其电极与焊丝独立，克服了熔化极惰性气体保护电弧焊方法焊接规范窄的缺点，可以在大范围条件下进行稳定焊接，特别适合镁合金薄板的焊接。苗玉刚^[18-20]等人的研究发现镁合金 TIG 焊接接头强度可达到母材强度的 90% 左右，接头断口为混合断裂。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^[21]。

关于镁合金 TIG 焊的研究方面，美国在二战期间以及五六十年代就有相关研究报道，Lockwood L.F.进行了镁合金薄板的交、直流 GTA 焊接试验，并探讨了保护气体、电流性质、弧长等参数对焊缝成型的影响^[22]。Asahina T.等人对 5AM60 镁合金焊接工艺及组织性能和 AZ31 合金的 AC 脉冲 TIG 焊接工艺及接头组织进行了研究，得到了性能良好的焊接接头，试验还分析了焊接接头的特征，探讨了裂纹敏感性与脉冲频率的关系^[23,24]。Munitz A.等应用 GTA 焊接了 AZ91D 板材，研究了焊接接头的力学性能和显微组织，发现 AZ91D 板材焊接接头中存在着部分重熔区，并对其成因进行了探讨^[25,26]。Marya M.详细探讨了 GTA 焊接 AZ80 镁合金时保护气体对焊接接头的影响^[27]。有研究者对 AZ91 镁合金进行 TIG 焊接的研究^[28]发现，焊接接头的热影响区和焊缝区有连续的

β -Mg17Al12 析出。镁合金氩弧焊存在的主要缺陷是气孔和疏松, 研究者认为镁合金焊缝中气孔的形成与焊缝中的氢有密切联系。若焊接材料和保护气体中含有水分, 焊接过程中发生置换反应, 放出氢, 氢的溶解度随温度的下降而急速减小。当焊缝的凝固速度过快, 气泡来不及浮出焊缝金属表面时就形成了气孔。H.wang 等人^[29]认为氩弧焊接镁合金时, 添加焊丝的成分以及保护气体的流量都是影响焊缝中气孔含量的因素, 在焊接过程中通过增加保护气体的流量可以显著地减小气孔的数量、体积, 并能减小焊缝中镁含量的损失, 从而提高接头的力学性能。另外, 对于气孔的防止, 发现还可以通过焊接时尽量压低电弧(2mm 左右), 以充分发挥电弧的阴极破碎作用并使熔池受到搅拌, 从而使气体逸出熔池。镁合金氩弧焊时焊缝中存在的另一缺陷是热裂纹。镁合金属于典型的共晶合金, 易熔共晶体的存在是镁合金焊缝产生凝固裂纹的重要原因之一^[30]。

(2) 镁合金的等离子弧焊

等离子弧 (Plasma Arc) 是一种受到约束的非自由电弧, 温度和能量密度都显著高于普通电弧, 是一种高效的焊接方法。采用等离子弧焊焊接镁合金时, 可以在背面无垫板的情况下实现对接接头的连接。等离子弧焊平焊缝表面光滑, 在周期载荷作用下, 表现出良好的力学性能。沈勇^[31-33]等人系统的研究了 AZ31 镁合金的变极性等离子弧 (VPPA, Variable Polarity Plasma Arc) 焊。变极性等离子弧焊方法具有熔深大、焊前准备少、焊接质量高、工件变形小及焊道数目少等优越性, 尤其适合焊接铝、镁等有色金属。其小孔法焊接成形规范区间较窄, 对焊接工艺和规范参数的变化比较敏感, 其接头强度可以达到母材的 95% 以上^[31]。图 1.1 和图 1.2 分别给出了 AZ31 镁合金等离子弧焊接示意图和焊缝截面^[34]。研究表明, 阴极清理时间的增加使得焊缝接头性能下降。变极性等离子弧焊接头组织均匀, 晶粒细小, 熔合线清晰, 不存在明显的热影响区。硬度测试表明, 焊缝硬度稍高于母材^[33]。

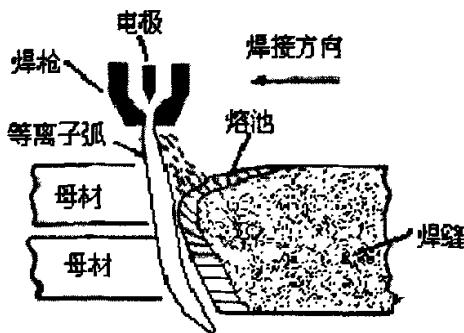


图 1.1 小孔变极性等离子弧缝焊示意图

Fig.1.1 Schematic drawing of VPPAW

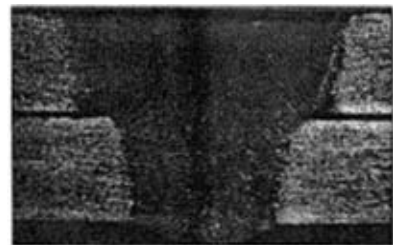


图 1.2 镁合金等离子焊接头宏观组织

Fig1.2 Maro-photograph of welded joint

(3) 激光焊

激光焊接是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法。镁合金在激光焊接中，激光束可将高密度能量集中在一个小点上，因而可使热输入熔化区，热影响区减至最小。因此激光焊与电子焊一样，有热输入低、焊道宽度及热影响区窄、可获得大熔深焊道的优点。同样激光焊的焊接装置也很昂贵，焊接成本较高。激光焊所用设备主要有 CO₂ 气体激光器和 Nd:YAG 固体激光器两种。激光焊可分为热导焊和小孔焊。

Sun^[35]等人对 CO₂ 激光、YAG 激光焊和 TIG 焊接 AZ31 镁合金进行了比较，研究发现激光焊可以得到较高的深宽比，和细小的焊缝组织，并且焊缝的硬度均低于母材。J.H. Zhu^[36]等人采用 1.5 千瓦二极管激光器和 2 千瓦 CO₂ 激光器焊接镁合金 AZ31，认为通过合理调整焊接参数，能够获得无缺陷的镁合金焊接接头。并发现由于热传导模式的不同，CO₂ 激光焊接接头的热影响区较小，而二极管激光焊接接头的热影响区较宽。宋刚^[37,39]等人研究了 YAG 激光器焊接 AZ31B 镁合金，发现焊接接头没有明显的热影响区存在，焊缝与母材分界非常明显；在最好的焊接条件下，拉伸强度达到了 95%。图 1.3 和图 1.4 分别给出了 AZ31 镁合金激光焊焊缝截面示意图和典型显微组织^[38]。



图 1.3 接头宏观组织照片

Fig.1.3 Macro-photograph of welded joint

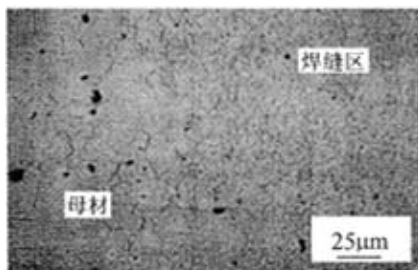


图 1.4 激光焊接 AZ31B 的焊缝显微组织

Fig.1.4 Microstructure of AZ31B magnesium weld in Laser welding

(4) 扩散焊

扩散焊是两焊件紧密贴合，在真空或保护气氛中在一定温度和压力下保持一段时间，使接触面之间的原子相互扩散完成焊接的一种压焊方法，它属于固态焊接技术的一种，具有无熔化过程、变形小、连接面积大、可以连接异种材料等诸多优点。

扩散焊的过程可用图 1.5 所示的模型进行描述，共分三个阶段。在室温下焊接表面无论焊前如何加工处理，贴合时只限于极少数凸出点接触，见图 1.5a。进入第一阶段，在温度和压力作用下粗糙表面上首先在微观凸起点接触的部位开始塑性变形，并在变形

中挤碎了表面氧化膜，于是导致该接触点的面积增加和被挤平，净面接触处便形成金属键连接。其余未接触部分就形成微孔（空隙）残留在界面上，见图 1.5b。第二阶段，原子持续扩散，而使界面上许多微孔消失。与此同时，界面处的晶界发生迁移而离开原始界面，但仍有许多小微孔遗留在晶粒内，见图 1.5c。第三阶段，继续扩散，界面与微孔最后消失形成新的晶界，达到冶金结合，最后接头的成分趋于均匀，见图 1.5d。

据报道，AZ31 合金在多种条件下可以成功地实现扩散焊。于彦东^[40]根据原子扩散理论对 MB15 超塑性镁合金进行了扩散连接工艺研究，结果表明 MB15 超塑性镁合金主要通过原始焊接表面晶界的移动（因原子扩散和晶粒长大造成的），促使接头表面原子充分扩散而形成固相连接。

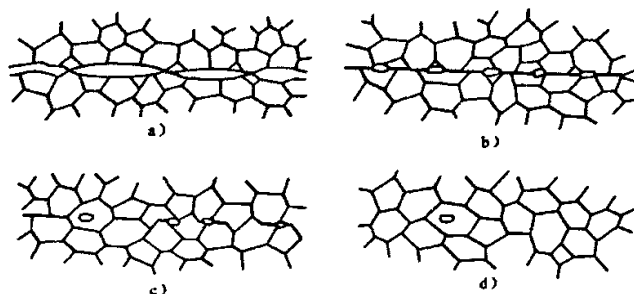


图 1.5 扩散焊的三阶段模型^[39]

- a) 凹凸不平的初始接触 b) 第一阶段：变形和交界面的形成
c) 第二阶段：界面迁移和微孔消除 d) 第三阶段：体积扩散，微孔消除

Fig 1.5 Three steps of the diffusion welding

- a) The original contact b) The first step: the deforming of the interface
c) The second step: the migration of the interface d) The third step: removing of the micropore

(5) 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊（Friction stir welding-FSW）是 20 世纪 90 年代初，由英国焊接研究所（The Welding Institute-TWI）发明的一种新兴的固态塑化连接方法。通过搅拌针和轴肩与工件间产生的摩擦热，使搅拌针接触面及其附近区域的金属达到粘塑性状态并产生适当的宏观塑性变形，发生塑性转变的金属层在搅拌头高速旋转的作用下填入搅拌针后方所形成的空腔内，然后通过材料间的相互扩散和动态再结晶，从而实现可靠的连接。FSW 具有如下优点：①焊接温度低，残余应力小；②接头机械性能好，不产生类似熔焊接头的铸造组织缺陷，并且其组织由于塑性流变而细化；③与其它焊接方法相比，焊接变形小，焊后无余高，调整、返修率低；④焊前及焊后处理简单，焊接过程中的摩擦和搅拌可以有效去除焊件表面氧化膜和附着杂质且焊接过程中不需要保护气、焊条及焊料；⑤能全方位焊接；⑥适应性好、效率高；⑦操作简单，焊接过程无烟尘、辐射、飞溅、

噪音及弧光等有害物质产生，是一种环保型焊接工艺方法^[41]。搅拌摩擦焊接时，焊接温度相对较低，实现的是固态连接，所以利用此法焊接镁合金时更安全、便捷。图 1.6，1.7 是 AZ31B 型镁合金搅拌摩擦焊的接头及熔合区组织形貌^[42]。

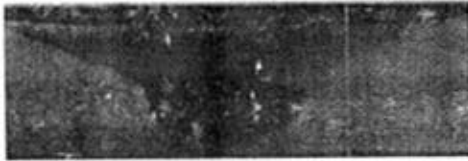


图 1.6 接头宏观组织照片

Fig1.6 Maro-photograph of welded joint

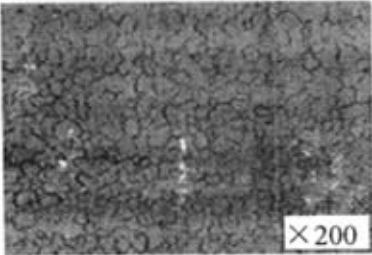


图 1.7 搅拌摩擦焊 AZ31B 的焊缝显微组织

Fig.1.7 Microstructure of AZ31B magnesium weld in FSW

1.2.2 镁合金焊接材料

镁合金焊接材料的开发随着镁合金结构件的广泛应用越来越多的受到材料工作者的重视，成为材料研究者的热点之一。在国内，大连理工大学也已展开了镁合金焊丝的热挤压、挤压-拉拔方面的研究，并取得了较好的成果^[43, 44]。在国外，主要有四种镁合金焊丝，并制订了其标准(ANSI/AWS5.19)，该四种镁合金焊丝主要为：ERAZ61、ERAZ101、ERAZ92、EREZ33，表 1.1 为这 4 种焊丝的成分。

表 1.1 镁合金焊丝的化学成分

Table 1.1 Composition of magnesium alloy welding wire

填充金属	成分 (%)											
	Al	Be	Mn	Zn	Zr	稀土	Cu	Fe	Ni	Si	其他	Mg
ER AZ61A	5.8-7.2	0.0002 -0.0008	0.15 min	0.40-1.5	...	...	0.05 max	0.005 max	0.005 max	0.05 Max	0.30 max	余量
ER AZ101A	9.5-10.5	0.0002 -0.0008	0.13 min	0.75-1.25	...	...	0.05 max	0.005 max	0.005 max	0.05 Max	0.30 max	余量
ER AZ92A	8.3-9.7	0.0002 -0.0008	0.15 min	1.7-2.3	...	...	0.05 max	0.005 max	0.005 max	0.05 Max	0.30 max	余量
ER EZ33A	...	...	...	2.0-3.1	0.45-1.0	2.5-4.0	...	...	...	...	...	余量

上述四种焊丝可作为电极和填充使用,可用于焊接绝大多数的镁合金,原则是:符合 ER AZ61A 或 ER AZ92A 成分的焊丝或填充金属可用于焊接 AZ10A、AZ31B、AZ31C、AZCOML、AZ61A、AZ80A、ZE10A 和 ZK21A 合金,这些合金可以自身互焊或者合金之间相互焊接;ER AZ61A 通常是以焊接含铝的加工产品,这是因为该合金具有抗裂纹敏感性的倾向;ER AZ92A 填充金属在焊接铸造 Mg-Al-Zn 和镁铝合金时,显示出极小的裂纹敏感性;上述合金之一与 EK41A、EZ33A、K1A、QE22A 和 ZE41A 焊接使用的焊丝或填充金属相同;但是当后一类合金相互焊接时,建议采用 ER EZ33A 填充金属;用 ER EZ33A 填充金属焊接变形镁合金或铸造镁合金之后,在高温下显示出极佳的机械性能;对于多数镁合金,均可以采用与母材同成分的焊丝、焊条焊接。

该协会还给出了针对于具体牌号镁合金的填充金属选择指南,如表 1.2 所示。尽管利用该四种焊丝可以焊接大部分的镁合金,但是该四种焊丝的成分跨度过大,可以完成焊接,却并不是最优的选择。所以,研究填充金属对焊接接头的影响仍具有重要的意义。

表 1.2 镁合金焊丝选择指南

Table 1.2 Selection of magnesium alloy welding wire

母材	推荐填充材																		
	AM100	AZ10A	AZ31 AZ31C	AZ61A	AZ63A	AZ80A	AZ81A	AZ91C	AZ92A	LK41A	EZ33A HK31A	K1A HZ32A	LA141A	M1A MG1	QE22A	ZF10A	ZL41A	ZK21A	ZK51A ZK60A ZK61A
AM100	AZ92A AZ101	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ10A	AZ92A	AZ61A AZ32A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ31B AZ31C	AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ61A	AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ63A	x	x	x	x	AZ92A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ80A	AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	x	AZ61A AZ92A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ81A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	x	AZ92A	AZ92A AZ101A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ81C	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	x	AZ92A	AZ92A AZ101A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	x	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ101A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
EK41A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	x	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	---	---	---	---	---	---	---	---	---
EZ33A HK31A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	x	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	EZ33A	---	---	---	---	---	---	---	---
K1A HZ32A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	x	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	---	---	---	---	---	---	---
M1A MG1	AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	x	AZ61A AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	—	AZ61A AZ92A	---	---	---	---	---
ZE41A	—	—	—	—	x	—	—	—	—	EZ33A	EZ33A	EZ33A	—	—	EZ33A	—	EZ33A	---	---
ZK21A	AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	AZ61A AZ92A	x	AZ61A AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	—	AZ61A AZ92A	AZ92A	AZ61A AZ92A	—	AZ61A AZ92A	---
ZK51A ZK60A ZK61A	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	EZ33

x: 不可焊接, —: 无焊接数据

在镁合金焊丝的制造工艺中,综合目前的生产方法主要有以下几种:

(1) 铸造成型

在小批量生产焊丝时可用铸造法,也可用条状的铸件的边角料作为焊丝使用。铸件焊接和焊补常采用铸造焊丝,但铸件的边角料及铸造焊丝在使用前应经选择,存在夹渣、疏松等铸造缺陷的焊丝不能使用^[45]。

(2) 拉拔成型

对镁合金而言,在拉拔成形的过程中的应力状态对其塑性的发挥不利,因此镁合金难以进行拉拔成形。但是拉拔成形的产品具有尺寸精度和表面粗糙度高,特别是线材、管材拉拔易于实现高速、连续化生产,可以大大提高生产效率。已有的研究表明^[46],拉拔成形的线材具有更高的强度。因此,镁合金拉拔成形技术的研究逐渐受到关注。日本电气工业株式会社采用拉拔成形工艺制备了镁合金线材,其抗拉强度高达 400MPa,延伸率为 10%以上。此外,该公司对 AZ31、AZ61、AZ80 的拉拔线材进行了研究,得到了强韧性均好的优秀线材,也可以用于汽车、轮椅等,并可制作弹簧^[47]。

(3) 热挤压成形

镁合金的挤压条件没有轧制和锻造苛刻,因此对于晶粒粗大和不均匀而难以轧制和锻造的两相镁合金,一般都可以进行挤压加工。同样,一些存在于合金晶界上的可能影响铸造性能和轧制性能的氧化膜杂质对挤压过程不产生太大的影响,甚至还有可能提高产品的力学性能。此外,挤压生产对生产场地的要求也不高,挤压过程中速度范围也较宽。通常,采用低的挤压温度和慢的挤压速度获得的挤压产品力学性能最高,较高的挤压温度和快速挤压可以获得较高的表面质量。

① 镁合金热挤压成形时,在有专门的保温装置保证坯料温度和模具温度始终保持在恒定的温度范围内、采用合理的润滑剂等条件下,可以挤出各种高质量的镁合金制品。

② 镁合金热挤压生产最大的特点是高温和高挤压比。在镁合金制品的热挤压成形时,大比率挤压导致的晶粒细化引起的镁合金力学性能的提高幅度大于由于发生高温再结晶而导致的力学性能的降低幅度。

1.2.3 活性焊接技术研究现状

(1) 国外研究现状

活性焊是 20 世纪 60 年代中期,乌克兰巴顿焊接研究所发明的一种高效焊接方法。最初是在焊接钛合金时发现,某些卤化物的存在,能够造成电弧收缩,焊接熔深增加。到了 20 世纪 70 年代,由氧化物和氟化物组成的活性剂在工业上得到应用,主要用于焊接不锈钢,在采用直边坡口不加丝的情况下,可获得单道熔深 8-10mm 的焊缝。到了 90 年代,活性剂在焊接碳锰钢、低合金钢方面获得巨大成功。在进行钢板对接时,利用 A-TIG 焊接技

术所形成的单面焊双面成形焊缝独具特点,焊缝上下表面较宽,焊缝中部较窄,其树枝晶方向几乎与双面焊效果等同。目前,乌克兰焊接研究所已将该技术应用于航空航天、化工容器、核反应堆管子部件、能源电力设备等工业领域^[48]。

到了上世纪 90 年代,美国的爱迪生焊接研究所(EWI)与海军连接中心(NJC)也开始了活性剂的研究,该项目总投资 80 万美元,用以开发不锈钢、碳钢、镍基合金及钛合金用活性剂。其中不锈钢与碳钢用焊活性剂分项目的研究费用为 25 万美元,该分项目已于 1998 年基本完成,其中开发的不锈钢与碳钢用活性剂已经投入工业应用,不锈钢用活性剂 SS 系列实现了商品化。目前镍基合金用活性剂也已经开发出来,正在开发铝合金和钛合金用活性剂产品^[49]。美国开发的不锈钢活性剂已用于一艘双体船壳体及两艘油轮的建造,与常规焊接工艺相比,可节省工时。海军方面正使用该活性剂焊接舰船及潜艇用管道系统和某些零部件。该类活性剂也可用于航空航天、化学工业、压力容器、海洋工程等领域。

Marya M^[50]研究了单一氯化物活性剂对 AZ31 镁合金焊接后熔深、熔宽、深宽比和焊缝微观组织的影响,他发现涂敷活性剂可以增加电弧电压, CdCl_2 增加熔深的效果最为明显,他认为主要是由于 Cd 的第一电离能最高,所以增加熔深效果最明显。涂敷活性剂的焊缝组织比未涂敷活性剂的焊缝组织稍粗大些。

(2) 国内研究现状

我国近年来的 A-TIG 焊技术的研究也有了很大的发展。A-TIG 焊技术现已应用于航空、火箭制造和原子能等工业,对 A-TIG 焊的机理也有了较为深入的研究,活性剂的开发一是针对不同的材料,二是朝着高效化发展,此外活性剂应用在 A-TIG 焊的基础上也在向其他焊接方法拓展。

张兆栋等人对 AZ31B 镁合金进行了活性 TIG 焊^[51],他们在不同的电流条件下,研究了 9 种常见氧化物、氟化物、氯化物活性剂在镁合金交流氩弧焊及变极性等离子电弧中的行为。结果表明:活性剂 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 AlF_3 、 NiCl_2 、 CdCl_2 、 ZnCl_2 、 MgCl_2 使镁合金交流氩弧焊焊缝熔深增加; MgF_2 、 SiO_2 使镁合金交流氩弧焊焊缝熔深减小。在活性剂增加焊接熔深的机理方面张兆栋等人做了深入的研究,通过系统的试验分析,最终他们认为氯化物活性剂和氧化物活性剂的作用机理存在着差异。氯化物增加熔深的机理主要是影响焊接的电弧,氧化物增加熔深的机理主要是影响焊接的熔池。

哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室对活性剂的作用机理以及对不同材料(钛合金、铝合金和不锈钢等)的作用效果进行了研究。刘凤尧^[52,53]等人系统的研究了活性剂对 0Cr18Ni9 不锈钢和 TC_2 钛合金 TIG 焊接焊缝成形的影响,包括焊接参数、活性剂涂敷量的影响,结果表明:施加活性剂 SiO_2 后,随焊接电流的增加、焊接速度

的增加、弧长的增加，焊道深宽比比无活性剂时的焊道深宽比大得多； SiO_2 活性剂增加熔深是电弧等离子体收缩、阳极斑点收缩和表面张力温度梯度由负变正共同作用的结果； TiO_2 活性剂增加熔深只是表面张力温度梯度由负变正的作用。

兰州理工大学的樊丁、张瑞华、黄勇等人研究了低碳钢、不锈钢、铝合金等材料的活性焊接研究^[54,55]。分析了个单一活性剂对焊接熔深的影响规律，并利用正交（均匀）试验法对多组元配方进行了研究。在铝合金的研究方面，分别研究了直流和交流 A-TIG 焊接中活性剂和焊接参数对焊缝熔深的影响，认为热输入的变化是影响熔深变化的重要因素。采用多组元活性剂进行 A-TIG 焊时，交流焊时增加熔深的效果好于直流焊。

北京航空制造工程研究所的张连锋、李晓红等人^[56]采用自制的 FT-01 钛合金活性焊剂进行了 A-TIG 焊接研究，结果表明，钛合金活性焊剂对焊接接头的宏观组织形貌有明显影响，但对焊接接头的化学组成没有影响。

1.2.4 活性焊熔深增加原理

根据这些年对于钛合金和不锈钢焊接熔深增加机理的研究，研究人员先后提出了一些理论，其中比较有代表性的理论主要有“电弧收缩理论”及“表面张力温度梯度改变理论”。但是到目前为止究竟是哪种理论是合理的在国际上还没有统一的看法。

(1) 电弧收缩理论

电弧收缩理论认为：活性剂在电弧高温下蒸发后以原子形态包围在电弧外围区域，由于电弧外围区域温度较低，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，如图 1.8 所示。而在电弧的中间部分，由于温度很高，足够用于原子的电离，而且粒子与电子复合成负离子是一个放热反应，故负离子一般不在电弧的中间部分形成。

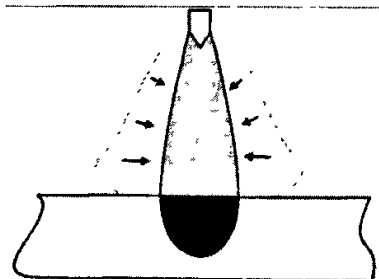


图 1.8 负离子引起的电弧收缩

Fig.1.8 The arc contraction by the negative ion

张兆栋等人采用高速摄像机对镁合金活性焊接时的电弧进行了详尽的拍摄,结果发现:活性剂涂敷在镁合金表面,与焊接电弧发生交互作用,改变了焊接电弧的形态。活性剂改变焊接电弧的形态主要有两种形式:电弧收缩和电弧拖尾^[51]。Howes D.S^[49]等人通过采用激光、TIG、电子束、等离子的焊接方式分别测定了活性剂增加熔深的作用,结果发现采用焊接电弧的收缩是焊接熔深增加的必要前提。Wilma Middel^[57]通过大量的低碳钢 TIG 实验研究了活性剂对电弧电压的影响并试图作出解释,如表 1.3 所示。从表 1.3 中可以看出,所选氯化物和碳酸盐对电弧电压的影响较小。在电弧的高温作用下,碳酸盐发生分解,结果是相应的金属氧化物和二氧化碳混合在电弧中。在氯化物和这些金属氧化物分解后,电弧中就有相应的金属蒸汽,这一点可以从金属粒子特有的波长检测出。表中数据还显示出氧化物对电弧电压的影响是最大的,这从电弧中的负离子形成方面解释可能更为合理一些。

表 1.4 活性剂对电弧电压的影响及其机理

Table 1.4 The effect of flux on the arc voltage

活性剂	电弧电压改变量	可能的影响机理
SiO ₂	1.72V±0.12	负离子的形成
TiO ₂	0.38V±0.20	负离子的形成
Cr ₂ O ₃	0.84V±0.17	负离子的形成
K ₂ CO ₃	-0.32V±0.30	低电离能阳离子
Na ₂ CO ₃	0.16V±0.30	低电离能阳离子
CaCO ₃	0.23V±0.21	低电离能阳离子
KCl	-0.33V±0.22	低电离能阳离子+负离子的形成
NaCl	0.03V±0.21	低电离能阳离子+负离子的形成
CaCl ₂	0.10V±0.22	低电离能阳离子+负离子的形成
AlF ₃	0.72V±0.18	低电离能阳离子+负离子的形成

(2) 表面张力温度梯度改变理论

表面张力理论认为:熔池金属流动状态对所形成的熔深起到相当大的作用。普通焊接金属熔化状态下表面张力具有负的张力梯度,熔池表面的金属从中心流向四周,所得到的熔深较浅;当熔池金属中存在某种微量元素(含量达到一定数值以上)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张力梯度,从而使熔池金属形成从熔池周边向着熔池中心区的流动,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,对熔池底部的加热效率提高,从而形成更大的熔深^[58],如图 1.9 所示。

根据 N.Perry 的研究^[59], 当在焊缝的一侧涂有活性剂时, 在活性元素的作用下, 熔池内液态金属的流动方向会发生改变。在涂敷活性剂的一侧, 活性元素的作用使得表面张力梯度为正, 液态金属从边缘流向中心; 在未涂敷活性剂的一侧, 表面张力梯度为负, 液态金属在表面张力的作用下由焊缝中心流向边缘。这样形成的焊缝截面形状将偏向于一侧, 如图 1.10 所示。为了验证该理论, 大连理工大学的张兆栋^[51]等人进行了如下试验。采用尺寸为 100 mm×50 mm×2.5mm 的变形镁合金 AZ31B 板材, 活性剂涂敷在焊道的一侧, 所选活性剂为 TiO_2 , 经烘干后进行激光焊接。焊后得到的焊缝截面如图 1.11 所示。说明 TiO_2 活性剂确实改变了熔池的表面张力, 引起熔池的流动方向发生改变。

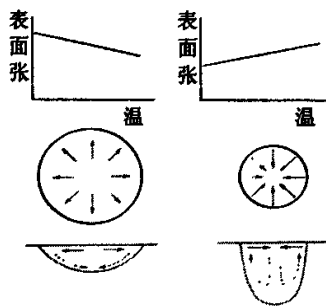


图 1.9 熔池表面张力分布与熔池液态金属流动的关系

Fig.1.9 The theory of the surface tension

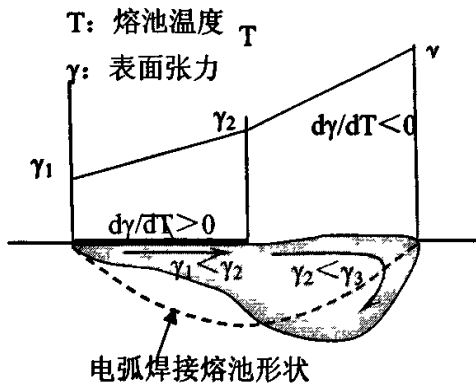


图 1.10 活性剂元素对焊缝熔池形状的影响示意图

Fig. 1.10 The effects of the fluxes on the weld shape



图 1.11 涂敷 TiO_2 后的焊缝形状

Fig.1.11 The weld shape with TiO_2

哈尔滨工业大学的刘凤尧等^[60]以不锈钢为研究对象, 涂敷含有 Bi 的活性剂。通过薄钨板挡住熔池流动的方法, 对钨板两侧的颗粒的分布进行了测量, 通过对比分析涂敷 SiO_2

和 TiO_2 后熔池流动方向的变化,认为 SiO_2 增加熔深是等离子体收缩、阳极斑点收缩和表面张力温度梯度由负变正共同作用的结果; TiO_2 增加熔深只是表面张力温度梯度由负变正的作用结果。Tanaka 等^[60] TiO_2 作为活性剂,对不锈钢焊的电弧等离子体进行了光谱测量,电弧中没有测量到活性剂原子的存在,说明活性剂的蒸发对电弧收缩无影响,对熔池表面温度进行了测量,发现在涂有活性剂时的温度分布较陡,他们认为,这是焊接电弧与熔池表面相互作用的结果。从而认为活性剂增加熔深的原因是:在活性剂作用下进行焊接时熔池里液态金属的表面张力温度梯度发生了变化所引起的。

1.3 本文的主要研究内容

随着镁合金的被广泛关注,镁合金的焊接技术作为生产中一项关键技术也在被逐渐重视起来。作为镁合金焊接技术的核心内容之一,优质、高效镁合金焊接材料的制备和应用技术已成为制约镁合金产业化的“瓶颈”问题。本文研制了一种热挤压的镁合金焊丝并且在此基础上开发了镁合金活性焊丝。本文的主要内容:

1. 熔炼镁合金铸锭并采用热挤压方法制备镁合金焊丝。
2. 采用不同种活性剂与镁合金焊丝复合制成镁合金活性焊丝,进行镁合金活性焊丝焊接试验,研究不同种活性剂对焊接熔深的影响。
3. 采用双组元活性剂研究活性焊丝填丝性能,分析不同成分活性剂对填丝性能的影响。
4. 分析活性焊丝焊接接头组织及力学性能。借助电子探针等分析设备对接头的元素分布进行分析。
5. 设计活性剂复合配方,采用均匀设计方法复合焊剂的配方进行试验研究,得到增加熔深效果优于单一活性剂的复合配方,并提高焊接接头的综合性能。

2 镁合金活性焊丝的制备

随着镁合金的广泛应用的,作为结构件制作的一项重要工艺——镁合金焊接技术也备受关注,在要求节能高效生产的今天,研制镁合金高效焊丝也成了个极为有意义的研究方向。本文研制了一种镁合金活性焊丝,该焊丝能在焊接时增加焊接的熔深,且不影响接头性能。镁合金活性焊丝的制备主要分两个步骤:首先镁合金普通挤压焊丝的制备;其次将镁合金普通焊丝制成活性焊丝。

2.1 普通焊丝的制备

2.1.1 试验方法及设备

本试验采用热挤压法生产镁合金焊丝,具体的方法是:①熔炼镁合金挤压坯料。熔炼并浇铸直径 $\Phi 45\text{mm}$ 、长80mm的镁合金铸锭;将浇铸好的镁锭进行机械加工,加工成 $\Phi 42\text{mm}$ 、长70mm的挤压坯料。②坯料及挤压模具的预热。将加工好的镁锭与挤压模具装配好一同放入电阻炉中预热,预热温度400-500 $^{\circ}\text{C}$,保温30-40分钟。③挤压镁合金焊丝。将预热好的镁锭和挤压模具连同保温装置一起放置到挤压机上,通过热挤压法制备焊丝。挤压过程要合理控制挤压力,并控制出丝速度。因为挤压力过大极易造成模具损坏,过小又会常常由于镁锭降温而使出丝困难。出丝速度过快时,由于挤压模内金属流动变形加快,在摩擦与剪切力的作用下温度会上升,会造成焊丝熔断现象。另外,在挤压时要维持挤压筒温度在400-450 $^{\circ}\text{C}$,这是由于镁合金的热导率高,对温度的变化极其敏感,挤压时温度的下降极易造成出丝困难。



图 2.1 挤压机

Fig.2.1 The extruding machine

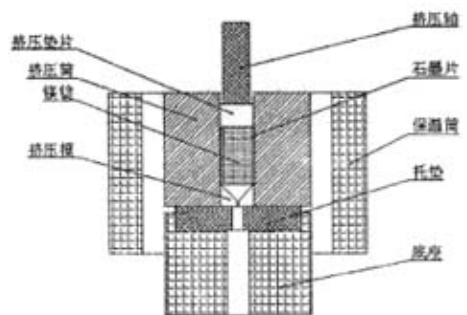


图 2.2 镁合金焊丝挤压装置

Fig.2.2 Hot-extruding devices of magnesium alloy welding wire

本试验采用的设备主要有：THP34-3001 框式液压机挤压，最大压力 3000KN，实物图如 2.1 所示。自制镁合金焊丝挤压装置，示意图如图 2.2 所示。图中挤压轴、挤压垫片、挤压筒、挤压模、托垫的材料为 H13 热作模具钢，并经过调质处理。挤压垫片外壁与挤压筒内壁光滑并严格匹配，以减小挤压阻力并防止在挤压过程中镁合金反向渗漏，挤压模与挤压筒内壁采取过盈配合；底座为 45#钢；保温筒采用电阻丝自制，通过自藕变压器可以实现温度调节；石墨片用以减小镁合金坯料与挤压筒内壁的摩擦。熔炼装置采用井式电阻炉作为加热设备，电炉的额定功率为 3KW，使用铠装热电偶测温，并与 ZK-1 精密控温装置配合使用，实现对熔体温度的控制。采用低碳钢坩埚进行熔炼，坩埚尺寸为 $\Phi 85\text{mm} \times 110\text{mm}$ 。采用铸铁金属铸模，铸模内径尺寸为 $\Phi 45\text{mm} \times 80\text{mm}$ 。熔炼装置实物如图 2.3 所示。挤压坯料预热炉和温度控制器如图 2.4 所示，预热炉功率为 20KW。



图 2.3 镁合金熔炼装置
Fig.2.3 Smelting equipments of
magnesium alloy

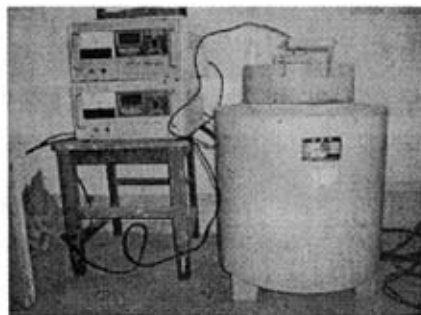


图 2.4 挤压坯料预热炉和温度控制器
Fig.2.4 Preheating furnace of ingot and
its temperature controller

2.1.2 镁合金焊丝的制备工艺

1. 镁合金熔炼工艺

本试验采用熔剂熔炼法进行镁合金熔炼。选用熔剂为 RJ-2 型镁合金熔炼剂，熔剂主要由氯化物和氟化物组成，具体的成分如表 2.1 所示。各主要成份的作用为： MgCl_2 是镁合金熔剂中的主要成分，对 MgO 、 Mg_3N_2 等夹杂物具有良好的吸附作用，与 MgO 结合组成复杂化合物，形成致密、牢固的 $\text{MgCl}_2 \cdot \text{MgO}$ ，有效去除氧化夹渣； KCl 能降低熔剂的表面张力和粘度，改善熔剂的铺开性能，使熔剂能均匀覆盖在镁合金液体表面； NaCl 与 $\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl}$ 组成三元系，降低熔剂的熔点。 BaCl_2 主要提高熔剂的密度，使熔

剂与镁合金液分离，提高精炼效果。 CaF_2 提高熔渣与镁合金液的分离性能，具有良好的聚渣作用，覆盖熔剂中加入 CaF_2 可以很方便地去除表面熔渣。

表 2.1 镁合金熔炼剂化学成分 (WT%)

Table 2.1 Composition of fluxing agent

主要成分						杂质	
MgCl_2	KCl	BaCl_2	CaF_2	$\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$	不溶物	MgO	水
38-46	32-40	5-8	3-5	8	1.5	1.5	3

镁合金焊丝坯料的具体工艺流程如图 2.5 所示：

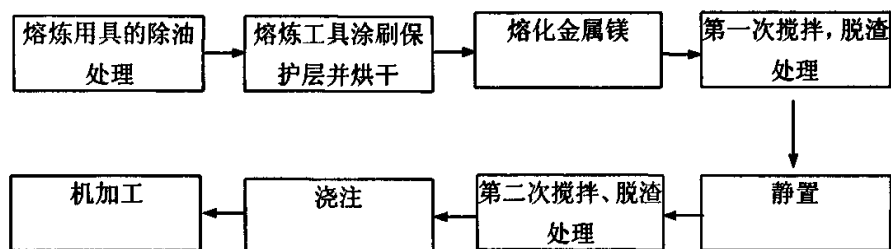


图 2.5 镁合金焊条坯料的熔炼及浇注工艺图

Fig.2.5 The flow process chart of melting of magnesium alloy

镁合金性质活泼，尤其是在高温条件下，镁合金极其容易氧化，这使得对熔炼过程的液态镁合金进行防氧化保护成为镁合金熔炼中的重要内容。另外，在高温条件下镁合金遇到水和油质均可能发生爆炸，因此对熔炼工具进行烘干和除油处理也就成为一项重要的安全工序。各部工艺过程应注意事项：

(1) 熔炼用具的烘干、除油处理

将熔炼工具包括坩埚、搅拌勺、坩埚钳、铁铲、锭模等采用丙酮或酒精等除油剂进行除油处理。由于在高温条件下镁合金可以和油质发生激烈的反应甚至可能发生爆炸，所以可能接触到高温镁合金液体的工具必须进行除油处理。

(2) 熔炼容器及工具表面涂刷保护层

将滑石粉用水玻璃混合成糊状，用刷子将混合物涂覆在熔炼过程中将要接触液态镁合金的工具表面，如坩埚、锭模、搅拌棒等。作用有三：①保护工具减轻氧化；②防止

液态镁合金粘于工具表面；③方便脱模。涂好保护层的工具要进行严格烘干处理，因为水分的存在极有可能引发爆炸。

（3）熔化镁合金

首先在坩埚底部散少量覆盖剂，然后将金属放入坩埚，而后再在金属镁上面散一定量覆盖剂，覆盖剂要求使用前在 120~150℃ 下干燥 1 小时，最后将金属镁和坩埚一块发入炉中加热到 700℃ 并保温待镁合金完全熔化。覆盖剂的作用主要是防止液态镁氧化、燃烧。

（4）第一次搅拌、脱渣处理

用事先经过干燥的搅拌勺搅拌添加了合金元素的镁液，而后用搅拌勺将翻起的熔渣扒出，并迅速放入砂箱中用细砂覆盖，然后在液态镁表面散一层覆盖剂。扒出的熔渣必须迅速用细砂掩盖防止其燃烧起火，并且所用细砂必须进行预先的烘干处理。

（5）静置

将上一工序中的镁合金熔液静置 20 分钟，静置的目的在于使得熔渣完全浮出熔化的镁合金液面。

（6）第二次搅拌、除渣处理

用搅拌勺轻轻搅拌镁合金熔液，而后将产生的熔渣扒出并用细砂覆盖。本次搅拌、除渣的目的在于取出静置过程产生的氧化物杂质。保证浇注时不产生氧化物夹杂。

（7）浇注

将第二次搅拌、除渣处理后的镁合金熔液使用坩埚钳联同坩埚一起迅速从熔炼炉中提出，将液态镁合金浇到锭模中。浇铸过程中应注意：①铸型要预热到 500~550℃；②镁合金的浇铸温度为 700~750℃；③浇铸前铸型内要通入氩气排出其中的空气，防止进入铸型的镁液氧化；④浇铸时注意挡渣。

（8）机加工

将铸造获得镁合金坯料进行机械加工以获得合适的尺寸（小于挤压套筒内径 2mm）和表面质量。镁锭表面光滑，无夹杂、气孔等缺陷，镁锭实物如图 2.6 所示。

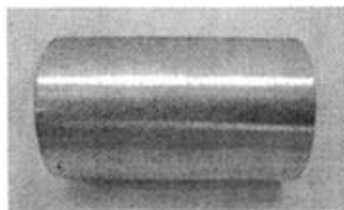


图 2.6 镁合金铸锭照片

Fig.2.6 Picture of magnesium alloy ingot casting

2. 镁合金焊条的挤压工艺

挤压步骤为：将挤压模、外包片状石墨的镁合金锭、挤压垫片依次放入挤压筒中，然后连同托垫放到电炉中加热到 500~550℃，保温 1~1.5 小时，保证坯料及模具温度彻底均匀；保温的同时将底座预热至 350~400℃，避免挤压过程中挤压模具的温度下降过快；将保温筒升温并维持套筒内温度在 400~450℃左右，确保挤压过程中坯料及模具的停留在较高的温度；然后将挤压筒连同托垫取出置于底座上，套上保温筒，上置挤压轴，进行挤压，挤压时采用氮气保护出丝口。工艺路线图如下图 2.7 所示：

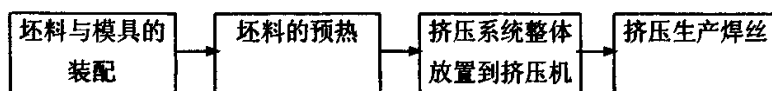


图 2.7 镁合金焊丝的工艺路线图

Fig.2.7 The flow process chart of extruding parameter of magnesium alloys

3. 挤压工艺参数的确定

(1) 坯料预热温度的确定

镁合金属于密排六方晶体结构，在室温下只有 3 个滑移系，其塑性变形需要更多的依赖于滑移和孪生的协调动作，并且最终受制于孪生。镁的 $c/a=1.6235$ ，小于 1.732，在拉伸的受力状态下，晶体所谓内部不会发生孪生变形，因此镁合金在拉伸时表现得比较脆，塑性很差，一般小于 10%。在受压的状态下晶体内部发生孪生变形，由于晶体内部滑移和孪生的协调动作，镁合金在承受压力时会表现良好的塑性变形能力。提高变形温度，镁合金变形的微观机制也发生变化，在温度高于 250℃左右时，镁晶体内的附加滑移面 $\{10\bar{1}0\}$ 开始起作用，变形变得容易的多。镁合金在 350~460℃温度范围内进行塑性加工最适宜。

(2) 挤压模具温度的确定

镁合金变性温度范围狭窄，与冷模接触很容易产生裂纹，另外模具温度与坯料温度相差太大，极易导致坯料温度的大幅度下降，从而导致镁合金焊丝的挤压过程无法进行。因此本试验要求将模具于镁合金坯料一同进行预热。

(3) 挤压压力的确定

本试验采用目前生产中经常使用的经验公式，计算镁合金焊丝热加压过程中所需的挤压力。采用的公式为：

$$P = ab\sigma_s \left(\ln \lambda + \mu \frac{4l}{D-C} \right) \quad (2.1)$$

式(2-1)中, p 为单位挤压力; a 为合金材质修正系数, 可取 $a=1.3-1.5$, 其中硬合金取下限, 软合金取上限; b 为制品断面形状修正系数, 简单断面棒材或管材, 可取 $b=1.0$; σ_s 为变形温度下静态拉伸时的屈服应力, 按表 2.2 选取; λ 为挤压比; μ 为摩擦系数, 无润滑挤压可取 $\mu=0.5$, 带润滑热挤压可取 $\mu=0.2-0.25$; D 为挤压筒直径; C 为穿孔针直径, 棒材或实心型材的 $d=0$; l 为坯料填充后的直径, 作为近似估算, 可用坯料的原始长度代替。

为镁合金焊丝的挤压比可参照镁合金棒材的挤压比公式进行计算, 计算公式为:

$$\lambda = \frac{D^2}{d^2} \quad (2.2)$$

式(2-2)中: D 为挤压筒的直径, d 为镁合金焊丝的直径。

表 2.2 镁及其合金的 σ_s , Mpa^[61]
Table 2.2 σ_s of magnesium alloys^[61]

合金牌号	变形温度/℃					
	200	250	300	350	400	450
镁	117.6	58.5	39.2	24.5	19.6	12.3
MI			39.2	33.3	29.4	24.5
AZ31	117.6	88.2	68.6	39.2	34.3	29.4
AZ61	98.0	78.4	58.8	49.0	39.2	29.4
AZ80			51.0	44.1	39.2	34.3
Zk60	107.8	68.6	49.0	34.3	24.5	19.6

根据上面总的挤压力:

$$F = pA = \frac{\pi D^2}{4} ab\sigma_s \left(\ln \lambda + \mu \frac{4l}{D-C} \right) \quad (2.3)$$

本试验中的极限挤压比 $\lambda=484$; 本试验中的镁合金焊丝材质为 AZ31, 挤压温度为 400℃, 此时 $\sigma_s=34.3$ Mpa; $a=1.5$, $b=1.0$, $D=44$ mm, $C=0$, $l=75$, $\mu=0.25$ 将以上数据带入式(2-3)中可得所需的总压力为: $F \approx 63$ KN

所以本试验中所选用的压力机组可以满足要求。

(4) 变形速度的确定

当变形速度较高时, 变形引起的热效应会使挤压坯料的温度升高, 从而流动应力明显下降, 所需的挤压力降低。但当变形速度过高时, 所需的挤压力反而增加, 这是因为热挤压时, 金属在变形时产生的硬化需要再结晶来软化, 但是这种软化作用需要一定的

时间, 如果变速过快, 这种软化来不及起作用, 就会导致变形抗力显著增加。另外在镁合金焊丝的热挤压过程中, 坯料变形速度过快, 会导致挤压焊丝中途脆断。

(5) 润滑剂

镁合金焊丝热挤压过程中, 为了减小变形抗力, 需要在挤压筒中加入适当的润滑剂。由于采用的是 400℃ 以上的高温挤压, 所以选择的是石磨润滑剂。另外, 润滑剂的存在还能起到隔热的作用, 可以提高挤压模具的使用寿命。

通过上述各项参数的合理制定, 本试验成功挤压出 $\Phi 4\text{mm}$ 和 $\Phi 2\text{mm}$ 的镁合金焊丝, 焊丝实物照片如图 2.8 所示。

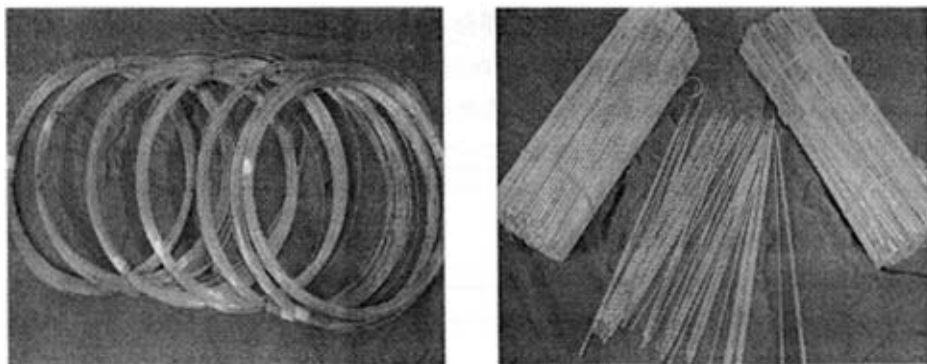


图 2.8 镁合金焊丝

Fig.2.8 Magnesium alloy welding wire

2.2 活性焊丝的制备

目前生产中镁合金一般采用 TIG 填丝焊接, 但是镁合金的导热系数大, 在进行普通的电弧焊时由于电弧热被镁合金迅速传导损失, 致使单到焊接生产效率很低。为此研究人员将活性焊引入镁合金焊接工艺, 该方法的应用可以提高焊接熔深增加生产效率, 但该方法只适合于不填丝的情况, 在需要填丝的情况下该方法的应用受到了限制。

本文将活性焊接中应用的活性剂与焊丝结合起来, 研制了镁合金活性焊丝。在实际的生产应用领域, 可将活性剂包覆在焊丝中心制成药芯活性焊丝, 也可以使用粘结剂将活性剂粘在焊丝表面制成药皮焊条。本试验主要从活性剂的作用效果和作用机理角度入手进行研究, 为研究方便和分析简单起见本试验中采用的活性焊丝, 只是采用丙酮把选定的活性剂调成糊状后, 用刷子将其涂敷在焊丝表面。具体的操作如图 2.9 所示。

(1) 活性剂选择与配比。镁合金活性焊丝是一项全新的技术，没有先例可循。活性剂是该项技术的核心，活性剂的选取要符合下列要求：①组元活性剂应具有一定的增加焊接熔深的作用，并且对焊丝的填丝性能影响较小。②组元活性剂应对人体无害。③组元活性剂对镁合金本身的性能无负面影响。在实际应用中单一成分的活性剂是不能满足要求的，这就涉及到多种活性剂的混合使用，本文采用了均匀设计法对活性剂的配方进行了设计。

(2) 研磨。为了便于活性剂的涂敷和均匀涂层的获得，有些块状或粒状的活性剂需在混合前研磨成细粉末状。

(3) 混合。用丙酮将研磨好的活性剂各组分混合成油漆状，这样有助于各组分的充分混合，同时也有助于均匀的涂刷在焊丝表面。

(4) 涂敷。涂敷活性剂之前要将焊丝用细砂纸打磨干净除去表面的氧化膜和油质。用软毛刷将混合均匀的活性剂均匀的涂敷在焊丝表面，涂敷量为 45-50mg/mm。

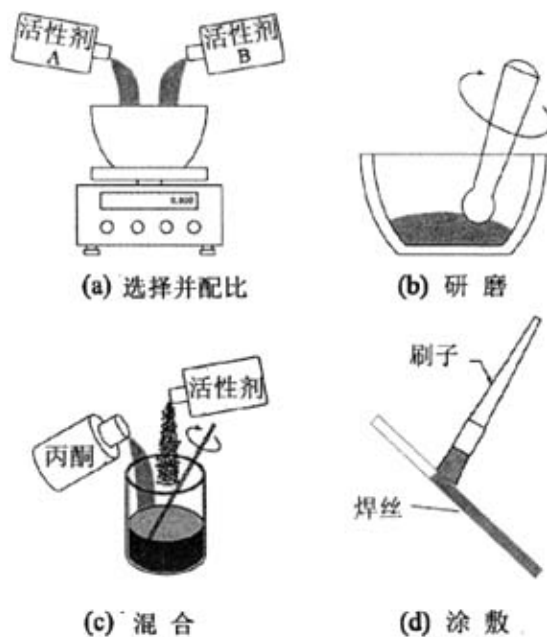


图 2.9 活性焊丝的制做示意图

Fig.2.9 Schematic diagram of flux coated wire producing process

(5) 烘干。涂好的焊丝要放在烘干炉中充分烘干，除掉其中的丙酮和水分。这样完成了镁合金活性焊丝的制作，制好的活性焊丝要求放在干燥处保存备用。图 2.10 为本试验制备的镁合金活性焊丝。

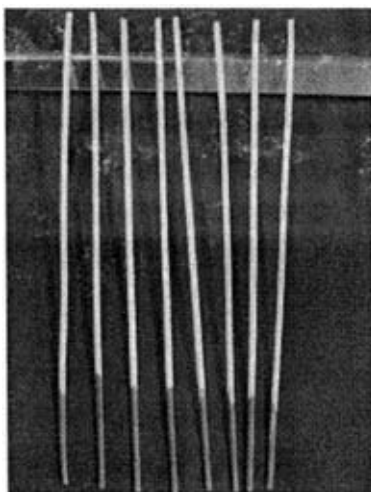


图 2.10 镁合金活性焊丝样品

Fig. 2.10 The sample of flux coated wire of magnesium

2.3 本章小结

(1) 采用本文设计的工艺，成功地熔炼并浇铸出镁合金铸锭。经检测后发现铸锭组织细密无气孔、夹杂的缺陷，可以作为镁合金焊丝挤压的坯料。

(2) 采用热挤压的方法可以连续顺利的生产镁合金焊丝，所生产焊丝表面光滑，强度和延伸率良好，足可以满足填丝焊接的要求。

(3) 在镁合金焊丝表面涂敷一层活性剂，涂敷量为 45-50mg/mm 左右，可制成镁合金活性焊丝。

3 镁合金活性焊丝焊接

3.1 试验方法

3.1.1 试验材料

本试验采用尺寸为 $200\text{mm} \times 150\text{mm} \times 5\text{mm}$ 和 $200\text{mm} \times 150\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的两种 AZ31B 镁合金板材作为焊接试板,填充的焊丝为与母材同质的自制热挤压成型镁合金焊丝,焊丝直径为 2.5mm ,焊接试板及焊丝的化学成分如表 3.1 所示。所选用的活性剂有氯化物 (CaCl_2 、 NiCl_2 、 ZnCl_2 、 MnCl_2 、 CdCl_2 、 FeCl_3 、 NH_4Cl) , 碳酸盐 (CaCO_3) , 氟化物 (AlF_3 、 MgF_2) , 氧化物 (SiO_2 、 Cr_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 ZnO 、 MnO_2 、 CaO) 。

表 3.1 AZ31 板材及焊丝的化学成分
Table3.1 Composition of AZ31 plate and wire

Al	Zn	Mn	Ca	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
2.5-3.5	0.5-1.5	0.2-0.5	0.04	0.10	0.05	0.005	0.005	Bal.

3.1.2 试验方法

焊接方法为交流自动氩弧表面堆焊,进行手工填丝,试验时焊枪保持静止,工作台恒定运动,焊接过程示意图如 3.2 所示。在 A-TIG 焊接时焊接速度、焊接电流、弧长、保护气流量和钨极直径等因素对焊缝熔深都有一定影响,试验前将这些参数设为定值,并且保证填丝速度恒定,焊接工艺参数如表 3.2 所示。将用丙酮调好的活性剂均匀涂敷在焊丝表面,厚度为 0.5mm 。涂活性剂前将焊丝打磨干净,除去氧化膜,将涂好活性剂的焊丝放入烘干炉中烘干,以去除活性剂中存留的丙酮和结晶水。

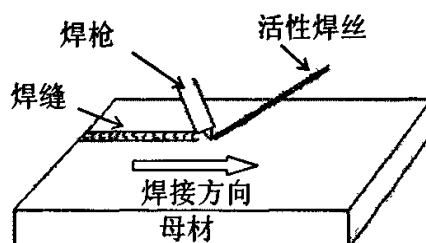


图 3.2 焊接示意图

Fig.3.2 Schematic diagram of flux coated wire weld

表 3.2 焊接工艺参数
 Table.3.2 Welding parameters of A-TIG

焊接速度 mm/min	焊接电流 A	弧长 mm	保护气流量 L/min	钨极直径 mm	电极倾角
300-450	100	2-3	10	2.5	75°

3.1.3 拉伸试验方法

焊接接头的拉伸试验是在 CSS- 2205 型电子万能试验机上进行的。拉伸试样的形状和尺寸参照了国标 GB639-86 《焊接接头机械性能试验取样方法》，试样截取示意图如图 3.3 所示。将制成后的试样夹持在夹具上，进行常温拉伸，拉伸速度为 0.5mm/min。随着拉力的增加，试样会发生变形直至断裂。记录下试样拉断时所需要的拉力，再根据试件的截面积换算出抗拉强度。每个加工态有 3 个试样，取其平均值作为该状态下的测试值。

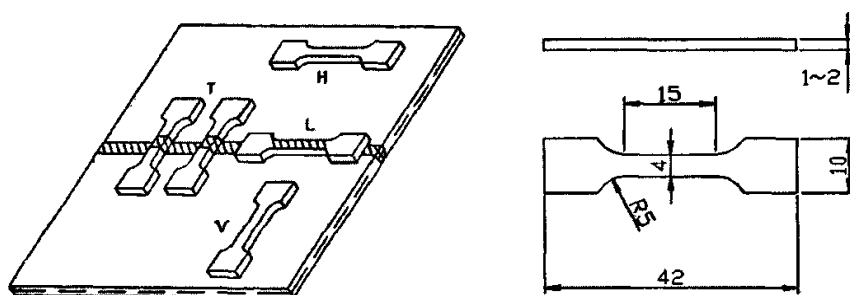


图 3.3 拉伸试样制备示意图
 Fig. 3.3 Schematic drawing of the test specimens

3.2 单一成分活性剂对焊接熔深及表面成形作用

3.2.1 单一成分活性剂对熔深的影响

不同种活性焊丝，因为所选用的活性剂不同，对焊接熔深的影响效果也必然存在较大差别。为研究不同种活性剂对焊接熔深的作用，常见的化合物氧化物、氯化物、氟化物被单独选作活性剂进行焊接试验。图 3.4 是同一焊接条件下不同种活性焊丝焊接试验得到的焊接熔深增加比 H/H_0 。H 为活性焊丝焊接熔深， H_0 为普通焊丝焊接熔深。

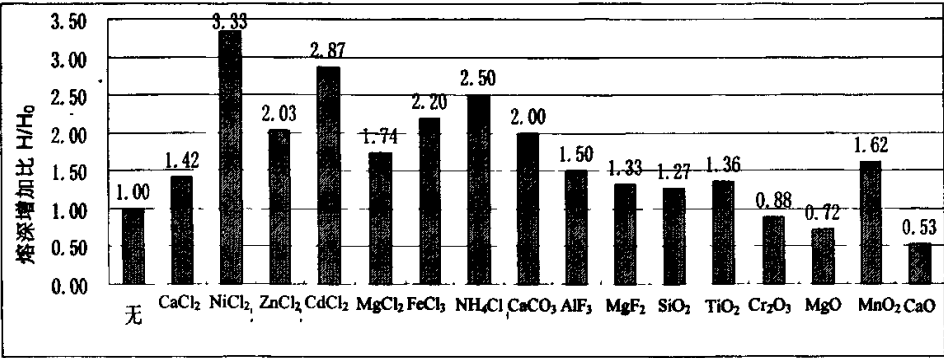


图 3.4 各种活性剂焊后熔深比

Fig.3.4 The effects of different fluxes on weld penetration increase ratio

由图 3.4 可见，从整体上而言氯化物活性剂活性焊丝对焊接熔深的增加作用最大，其次为碳酸盐活性焊丝，再次为氟化物活性剂活性焊丝，氧化物活性剂活性焊丝甚至使焊接熔深变浅。氯化物活性焊丝中氯化镍活性焊丝增加熔深的效果最明显，可达普通焊丝的 3 倍以上；其次为氯化镉活性焊丝，焊接熔深增加 2.8 倍。碳酸钙活性剂增加焊接熔深的效果也比较明显，焊接熔深为普通焊丝焊接的 2 倍。氟化物活性焊丝对熔深的影响效果比较相近都在 1.3 倍左右。氧化物活性焊丝对熔深的影响作用差距较大，MnO₂ 活性焊丝焊接熔深较普通焊丝焊接增加 1.6 倍，而其他几种氧化物活性焊丝焊接熔深较普通焊丝焊接有所变小。

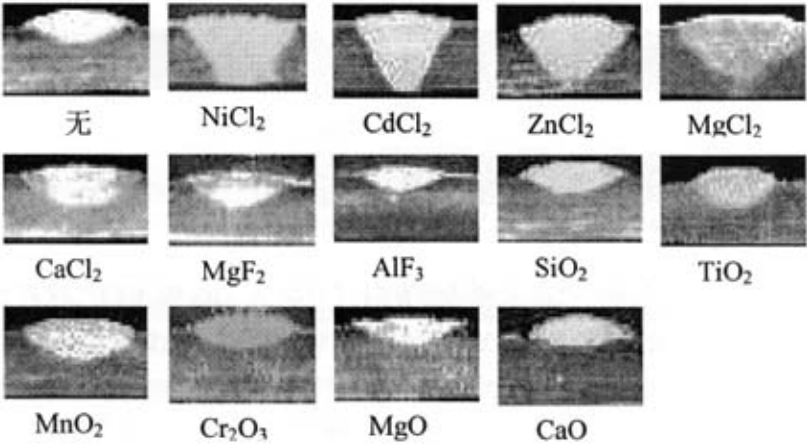


图 3.5 焊缝横截面宏观形貌照片

Fig. 3.5 Cross-sections of welding bead

图 3.5 中给出了采用普通焊丝和活性焊丝焊接，焊后得到的焊缝横截面宏观形貌。图中可见 NiCl_2 活性焊丝已将 5mm 的焊接试板完全焊透， CdCl_2 、 ZnCl_2 活性焊丝也均使焊接熔深较普通焊丝有明显增加。图 3.5 中直观地反映了活性剂在增加焊接熔深方面的明显作用。

3.2.2 活性剂分解温度与焊接熔深增加效果的关系

图 3.4 给出了活性焊丝焊接时焊接熔深较普通焊丝焊接的熔深增加比，图中发现不同种活性剂对熔深的增加作用不同。综合所选活性剂的物理性质，发现分解温度较低的活性剂对镁合金焊接的熔深增加效果较为明显。为解释这一现象，图 3.6 给出了各种活性剂的分解温度与其对映的熔深增加比之间的对应关系，采用 matlab 软件将这些点拟合为一条曲线。

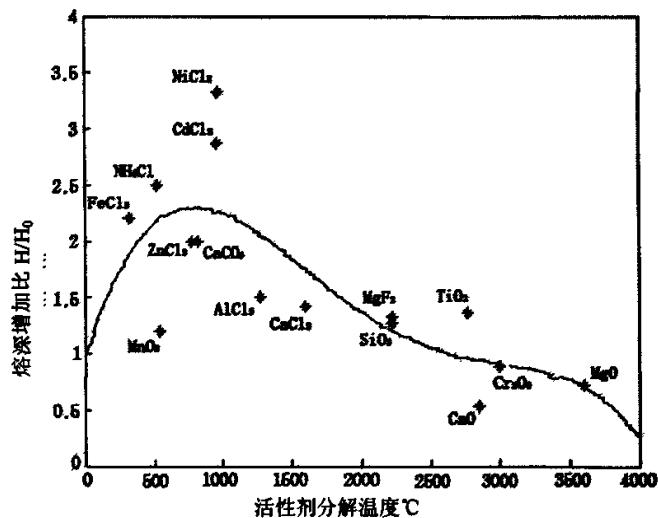


图 3.6 活性剂沸点与熔深的关系曲线

Fig.3.6 Relation between weld penetration increase ratio and oxide boiling point

由曲线可见沸点在 900°C 附近的活性剂对镁合金 A-TIG 焊接的熔深增加效果最佳。原因在于：由活性焊的电弧理论可知，活性剂能够改变焊接电弧形态的前提是其分解为原子态，而活性剂又是附着在填充金属表面被添加到电弧中加热的，在焊接过程中，熔滴的温度最高是达到填充金属的沸点附近，由此可见活性剂的分解是否充分与其分解温度是否高过熔滴温度有着直接关系。如果所选活性剂的分解温度高于熔滴温度较多，那

么其分解便不会充分,对熔深增加的作用也就不会明显;如果所选活性剂的分解温度不高于或稍高于熔滴温度,就可以充分分解,从而起到增加熔深的作用。资料^[49]表明在不锈钢 A-TIG 焊接中,对熔深增加效果明显的氧化物的分解温度可达 2000℃左右,因为不锈钢的沸点温度在 2000℃以上,这时即使分解温度较高的氧化物也是可以充分分解的;对镁合金而言,其沸点温度为 1107℃左右,则在镁合金活性焊接过程中要使得活性剂充分分解,那么所选活性剂的熔沸点必然要低于或与镁合金的沸点相近。试验证明镁合金 A-TIG 焊接过程中,增加熔深效果最明显的活性剂的分解温度集中在 900℃附近。

3.2.3 单一成分活性剂对焊丝填丝性的影响

对于活性焊丝,其对焊接熔深的增加作用是一项非常受关注的性能指标,除此之外焊丝的填丝性能也是焊丝的一项较为重要的性能参数。图 3.7 给出了上述 15 种活性焊丝及普通焊丝在同参数下焊接得到的焊缝表面形貌照片。

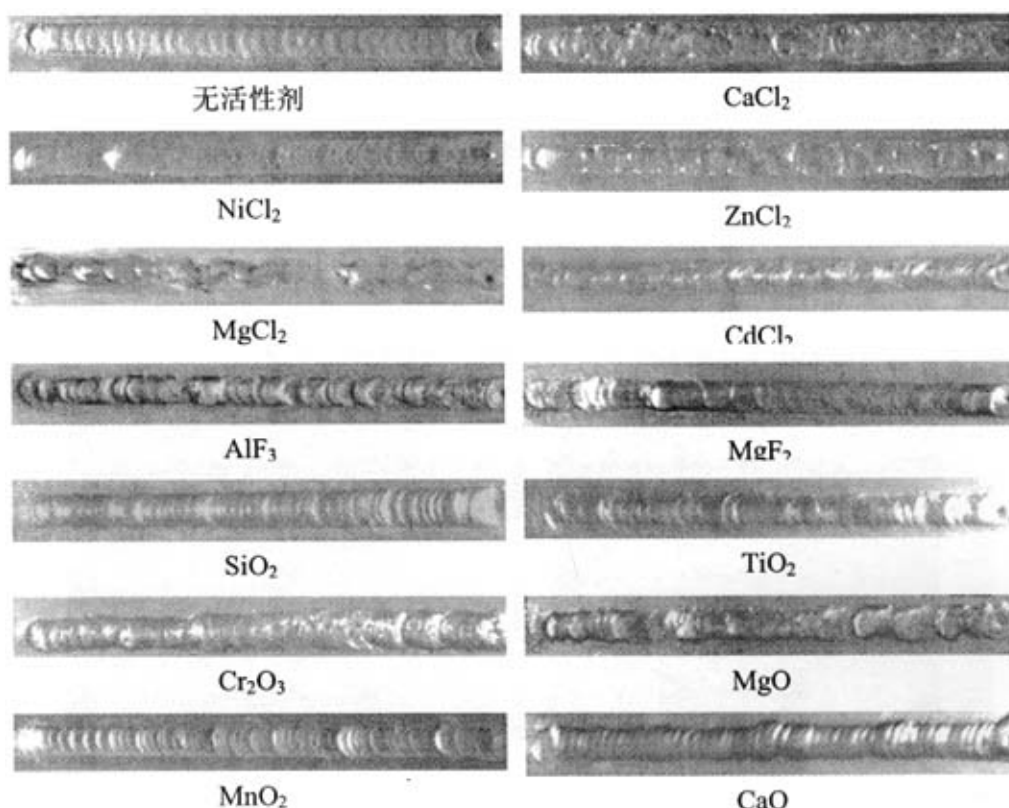


图 3.7 不同成分活性剂对焊缝成型的影响

Fig.3.7 The effects of different fluxes on bead morphologies

从图 3.7 可见无论是哪种活性焊丝焊接,焊缝质量较普通焊丝均有变差的趋势。氧化物活性焊丝的焊缝质量最差,焊缝成形不均匀不连续,焊丝熔滴在熔池表面团聚成球状。氟化物、碳酸盐活性焊丝焊接得到的焊缝质量优于氧化物活性剂,但仍存在成形不均匀的缺陷。氟化物活性焊丝的焊缝质量较其它几种的质量好,成形较为连续,但是焊缝宽度不均匀。普通焊丝焊接时焊缝宽度均匀,焊缝波纹细密均匀表面光滑。焊缝表面质量是焊丝填丝性能的直接外在表现,从而可见单一成分活性焊丝的填丝性能较普通焊丝有所恶化。

活性焊丝表面的活性剂中含有表面活性元素 O、F、Cl 等,这些元素的存在会改变液态金属的表面能,这样会造成焊丝熔滴与焊接熔池金属的表面状态之间存在一定差异,这种差异可能会对这两部分金属融合在一起的能力造成影响。焊丝熔滴与熔池金属不能充分的融合就会造成焊缝难以成形,熔滴会在熔池表面团聚成球。没有涂敷活性剂的焊丝熔化后的熔滴很容易连续且平稳地过渡到熔池中,形成的焊缝均匀、规则,外形美观。涂敷活性剂后,填丝过程中活性剂发生分解,分解后的活性元素偏聚到熔滴表面,这样就造成了熔滴的表面张力与熔池金属表面张力存在一定的差异,这种表面张力差使得熔滴与熔池金属的融合能力变差,从而造成熔滴过渡不平稳,焊缝成形质量变差。

3.2.4 单一成分活性焊丝对焊缝组织及力学性能的影响

镁合金活性焊丝的应用可以增加焊接的熔深提高焊接生产效率,对于一种焊接材料而言除了要考虑其生产效率、焊接成形质量之外还要充分研究其焊后焊缝的组织形态和力学性能。图 3.8 为同一参数下普通焊丝焊接和 NiCl_2 活性焊丝焊接的接头组织,图中可见 NiCl_2 活性焊丝的接头热影响区宽度较普通焊丝焊接的情况宽。

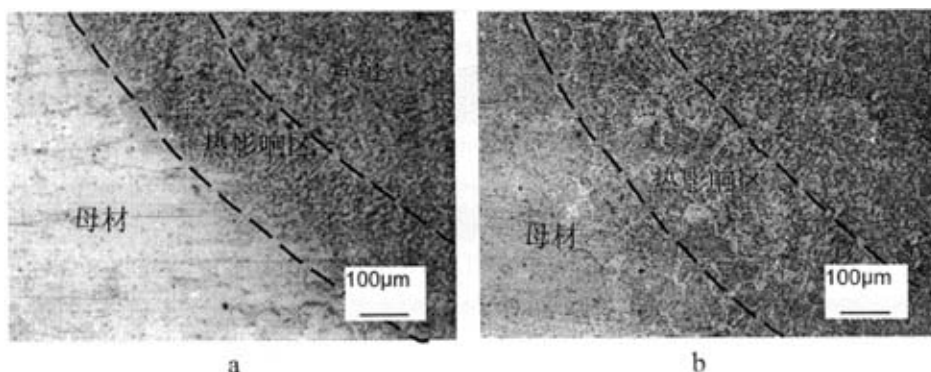


图 3.8 焊接接头组织

Fig.3.8 Microstructure of weld seam

图 3.8a 为采用未涂敷活性剂的焊丝焊接得到的焊接接头组织照片, 照片中焊缝区与热影响区的分界较为明显。热影响区是典型的过热组织, 晶粒粗大; 焊缝区为细小的等轴晶; 母材是典型的轧制带状组织。在焊接过程中, 焊缝区的母材吸收大量的热而熔化, 凝固时由于镁合金的导热系数大, 散热快, 使焊缝区金属快速凝固结晶, 从而导致了焊缝区的晶粒细化, 因此在焊缝区得到细小的等轴晶。由镁合金的自身导热特性决定, 在对其进行焊接时要求大的热输入, 这就使得热影响区极易过热, 再加之母材的组织为不稳定的带状轧制组织, 所以热影响区的晶粒较为粗大。

图 3.8b 为添加涂敷有 NiCl_2 的焊丝得到的接头组织照片, 从中可见其热影响区宽度明显宽于未加活性剂的情况。这是由于活性剂的加入改变了焊接电弧的形态, 使得焊接热输入量明显增加, 这种增大了的热输入量在增加了焊接熔深的同时也使得热影响区的范围明显变宽, 热影响区的组织更加粗大。

同样工艺参数下, 活性剂的加入使得焊缝热影响区变宽, 组织粗大。宽的热影响区和粗大的热影响区组织, 必然会给焊接接头性能带来不良影响。为了验证这种活性焊丝的可行性, 我们设计了如下试验: 在其他焊接参数与上试验相同的条件下改变焊接电流, 分别采用无活性剂 (焊接电流 $I=60\text{A}$) 和涂有 NiCl_2 (焊接电流 $I=50\text{A}$) 的焊丝将 2.5mm 厚的 AZ31B 镁合金板焊透, 获得相同熔深的焊缝, 焊接接头的组织如图 3.9a 和图 3.9b 所示。图 3.9a 是使用无活性剂的焊丝在焊接电流为 60A 的情况下得到的焊缝熔合区组织照片, 图 3.9b 为使用涂有 NiCl_2 的焊丝在焊接电流为 50A 的情况下得到的焊缝熔合区照片。由这两张照片可见: 在要求获得相同熔深的情况之下, 采用无活性剂和涂有 NiCl_2 的焊丝进行焊接, 最终得到的焊缝热影响区宽度基本没有差别, 热影响区晶粒大小也差别不大, 活性焊丝焊接与普通焊丝焊接具有相似的接头组织形貌。

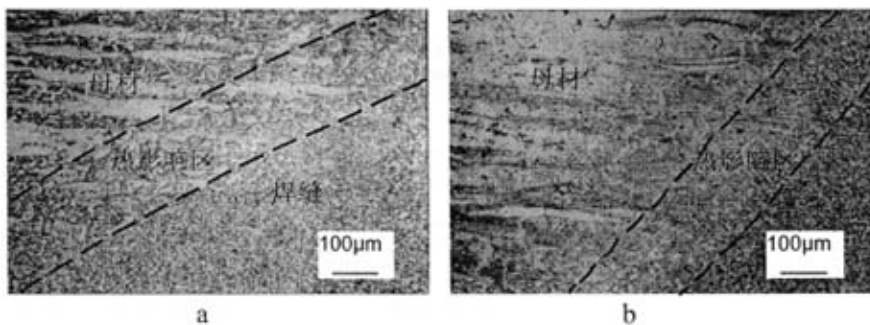


图 3.9 焊接接头组织

Fig.3.9 Microstructure of weld seam

对不同条件下得到的焊接接头进行拉伸性能试验, 试验结果如表 3.3 所示。由表 3.3 可知, 在选择相同参数进行试验时涂有 NiCl_2 的焊丝得到接头的抗拉强度可达到无活性剂情况的 95%; 在要求获得相同熔深时涂有 NiCl_2 的焊丝得到的接头的抗拉强度可达到无活性剂情况的 98%。由此可见, 活性剂的加入虽然会对焊接接头的抗拉强度有所弱化, 但这种影响与其带来的焊缝熔深增加, 生产效率提高等优点相比是微不足道的, 甚至是可以忽略的。

表 3.3 不同条件下焊接接头抗拉强度

Table.3.3 Tensile-strength of the welding joint in different technological condition

母材 /MPa	同焊接参数 ($I=100\text{A}$)		同焊接熔深 ($H=2.5\text{mm}$)	
	无活性剂 /MPa	NiCl_2 /MPa	无活性剂 /MPa ($I=60\text{A}$)	NiCl_2 /MPa ($I=50\text{A}$)
259	249	237	255	252

3.3 双组分活性剂对焊接熔深及表面成型的作用

填丝活性焊可以通过两种方法进行操作: 第一将活性剂涂在焊丝表面制成活性焊丝进行填丝焊接; 第二将活性剂涂在试板表面填充普通焊丝进行焊接, 焊接示意图如图 3.10 所示。为了验证这两种方法的可行性, 本文分别对这两种方法焊接后的熔深、表面成型质量及电弧光谱进行了对比分析。

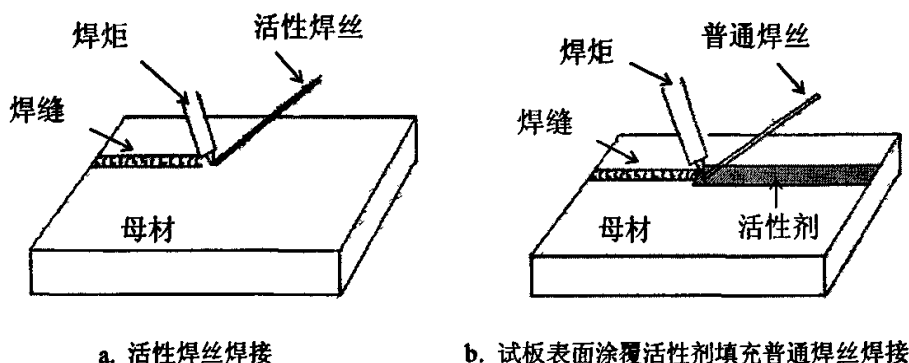


图 3.10 活性焊丝焊接与试板表面涂覆活性剂填充普通焊丝焊接示意图

Fig.3.10 Schematic diagram of FC wire weld and normal wire flux pasted weld

分别选取一种氧化物活性剂和一种氯化物活性剂进行混合得到不同配比的氧化物、氯化物混合活性剂。本节采用不同配比的 ZnO 和 MnCl_2 混合活性剂研究了焊接深宽比随成分的变化规律；对比了活性焊丝焊接与将活性剂涂敷在试板表面填充普通焊丝焊接方法的区别；分析了影响活性焊丝填丝性能的因素及双组分活性剂焊接条件下的焊缝组织和力学性能。

3.3.1 双组分活性剂对熔深的影响

本节对比分析了活性焊丝焊接和试板表面涂覆活性剂填充普通焊丝焊接两种情况，图 3.11 为这两种焊接情况下的焊缝深宽比图片。图中可见无论采用哪种成分的活性剂进行焊接试验，活性焊丝焊接得到的深宽比均超过表面涂覆活性剂填充普通焊丝焊接情况。在 MnCl_2 与 ZnO 的比例为 2:3 时活性焊丝焊接得到的深宽 (D/W) 比可达到相同成分活性剂涂覆在待焊试板表面填充普通焊丝焊接的 172%，可达普通焊丝焊接不加活性剂的情况的 382%。从图中还可见在这两种焊接方法中，焊缝深宽比均随活性剂中 MnCl_2 含量的增加而变大，但是在活性焊丝焊接过程中当 MnCl_2 含量在 0-20% 之间时焊缝深宽比增加十分迅速，当 MnCl_2 含量达到 40%-60% 之间时焊缝深宽比增加缓慢，当 MnCl_2 含量超过 60% 时焊缝深宽比基本不再放生变化。在表面涂覆活性剂填充普通焊丝焊接情况下，焊缝的深宽比是一直随着 MnCl_2 含量的增加而慢慢增加的。

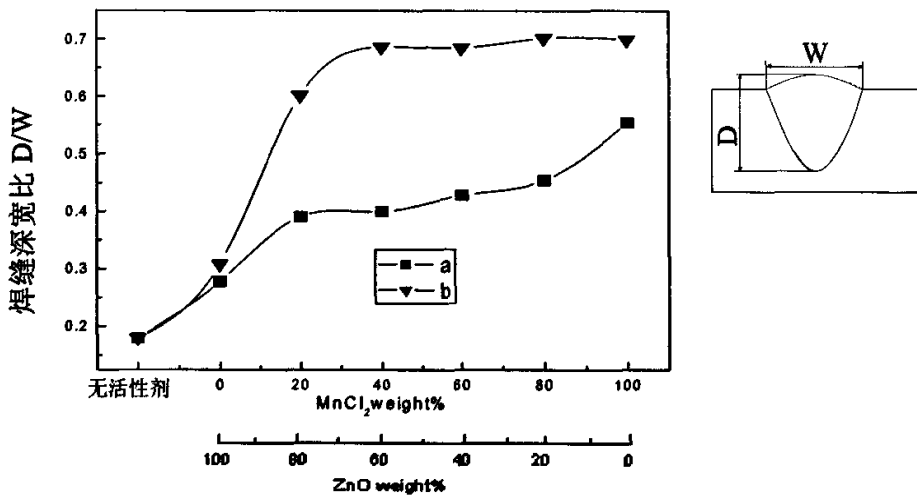


图 3.11 不同活性剂焊接的焊缝深宽比

Fig.3.11 Variation of depth/width ratio of weld beads

a. normal wire flux pasted weld b. FC wire weld

图 3.12 为焊缝接头的照片，图中给出了各个接头的深宽比数值，更加精确的给出两种焊接条件下焊缝深宽比的变化情况，直观的反应了不同成分的活性剂增加焊接熔深的能力。普通焊丝不加活性剂焊接时深宽比为 0.18，活性焊丝焊接时深宽比最大可达 0.703，活性剂涂覆在试板表面填充普通焊丝焊接时的最大深宽比可达 0.585。

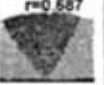
Flux Coating position	ZnO	80%ZnO+ 20%MnCl ₂	60%ZnO+ 40%MnCl ₂	40%ZnO+ 60%MnCl ₂	20%ZnO+ 80%MnCl ₂	MnCl ₂
On the filler wire	 r=0.308	 r=0.651	 r=0.687	 r=0.675	 r=0.703	 r=0.700
On the test piece	 r=0.278	 r=0.391	 r=0.400	 r=0.429	 r=0.455	 r=0.585
Without flux	 r=0.18					

图 3.12 焊缝横截面照片 r 为深宽比

Fig.3.12. Cross-section of welds with and without flux
r is the depth/width ratio of weld beads.

比较活性焊丝焊接与试板表面涂覆活性剂填充普通焊丝的情况，区别仅仅在于活性剂的添加方式，活性焊丝焊接时活性剂是随焊丝熔滴一同进入焊接电弧区，并有可能随之进入焊接熔池。在试板涂活性剂填充普通焊丝试验中活性剂是被直接涂在焊接试板上，活性剂直接被填入到焊接熔池当中，然而活性剂需要经过电弧加热分解后扩散进入焊接电弧区。这样我们可以断定在活性焊丝焊接过程中，活性剂容易大量进入焊接电弧，少量进入焊接熔池；然而在试板表面涂覆活性剂填充普通焊丝的焊接条件下活性剂是直接进入焊接熔池，而有相对较少活性剂扩散进入焊接电弧。基于这两焊接方式的差别及焊后深宽比的对比，我们发现在镁合金活性焊接过程中活性剂对焊接电弧的作用是影响焊接熔深增加的主要因素。

图 3.13 为两种焊接方式下拍摄的焊接电弧光谱，从该图可以更加深刻的分析上述两种焊接方法下焊接电弧的区别。为了突出试验的代表性，本试验选取了 40% MnCl₂+60%ZnO 的活性剂焊接时的电弧光谱进行了分析。图 3.13a 为活性焊丝焊接过程中的电弧光谱，图 3.13b 为试板表面涂覆活性剂填充普通焊丝情况的电弧光谱。从图中可见，两种方式下进行焊接试验，电弧中的主要介质均为 Ar 和 Mg，同时存在活性剂分

解后所得产物 Zn 和 Mn。对比两者的区别发现, 图 3.13a 中存在几条图 3.13b 中不存在的 Mn II 线, 并且图 3.13a 中的 Mg 谱线强度明显强于图 3.13b, 而 Ar 谱线强度明显弱于图 3.13b。由上面的谱线变化可以认定, 活性焊丝焊接过程比试板表面涂覆活性剂填充普通焊丝情况有更多的活性剂进入焊接电弧; 并且在活性焊丝焊接时有更多的镁因为蒸发进入焊接电弧。

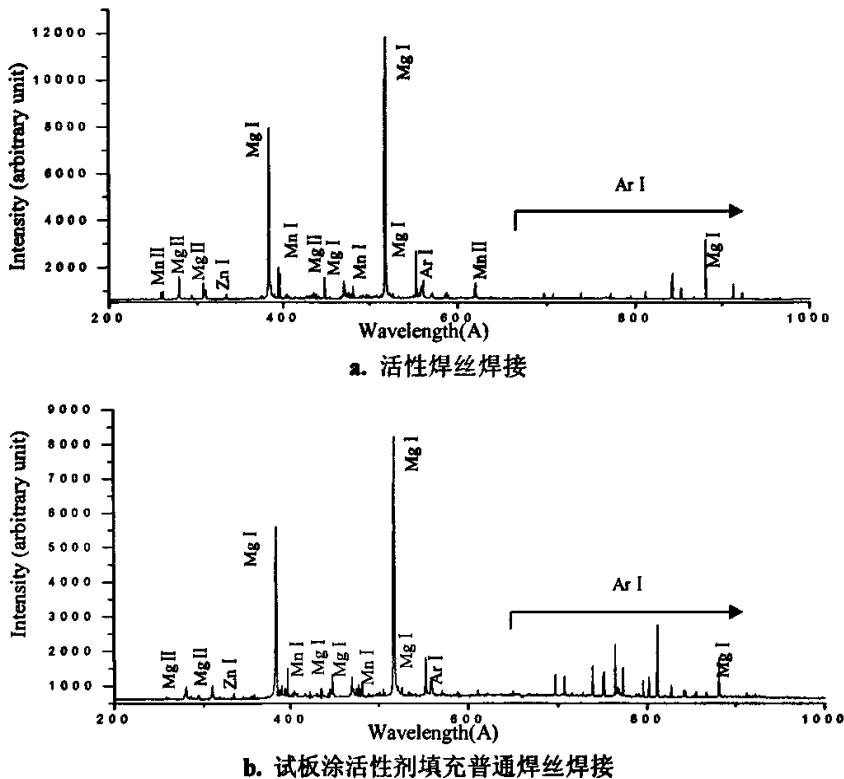


图 3.13 活性剂成分为 (40% MnCl₂ +60%ZnO) 时的电弧光谱

Fig.3.13 Arc spectra when weld with (40% MnCl₂ +60%ZnO)

电弧压缩理论指出: 分解了的活性剂原子进入电弧后, 在温度较低的电弧边缘区域吸附了大量的电子形成负离子, 造成电弧的压缩, 提高了电弧等离子体的能量密度, 从而造成电弧对熔池的热输入增加, 进而增加了焊接熔深。由此活性剂进入电弧较容易的活性焊丝焊接时电弧温度应该高于活性剂涂覆在焊接试板上填充普通焊丝的情况, 在同样条件下进行焊接最终熔深也必然是活性焊丝焊接的情况深。

从图 3.11 中给出的焊缝深宽比随活性剂中 MnCl_2 的含量的变化规律可以推断, 活性剂对电弧的影响随电弧中 MnCl_2 含量存在一定的“饱和度”。在活性焊丝焊接过程中 MnCl_2 含量达到 40% 时, 活性剂对焊接电弧的影响程度最大, 当 MnCl_2 的含量进一步增加时活性剂对焊接电弧的影响也不会随之增大, 所以在活性焊丝焊接时当 MnCl_2 的含量达到 40% 时便达到了这个“饱和度”。对于试板表面涂活性剂填充普通焊丝的情况, 焊缝深宽比一直随着活性剂中 MnCl_2 的含量增加而增大。这是因为在这种方式下焊接较活性焊丝焊接活性剂更难以进入焊接电弧, 从而电弧中 MnCl_2 活性剂的浓度一直没有达到上面提到的“饱和度”, 所以在此情况下焊缝深宽比是一直随活性剂中 MnCl_2 的含量增加而逐渐增大的。

3.3.2 双组分活性剂对焊丝填丝性能的影响

单一成分活性焊丝焊接时, 发现活性焊丝的填丝性能较普通焊丝有所恶化, 本节通过对不同配比的活性焊丝进行试验, 研究焊丝填丝性恶化的原因并提出改善方法。本节还对活性焊丝焊接和试板表面涂覆活性剂填充普通焊丝焊接时的填丝性能、焊缝成形及熔滴过渡进行了详细的分析。

图 3.14 为本次试验提出的两种焊接方法焊接得到的焊缝表面成形照片, 对这些照片分三组对比观察很容易发现: 不添加任何活性剂进行直接焊接时得到的焊缝成形质量最好; 活性焊丝焊接次之; 将活性剂涂敷在试板上填充光焊丝的情况成形质量最差, 甚至难以成形。

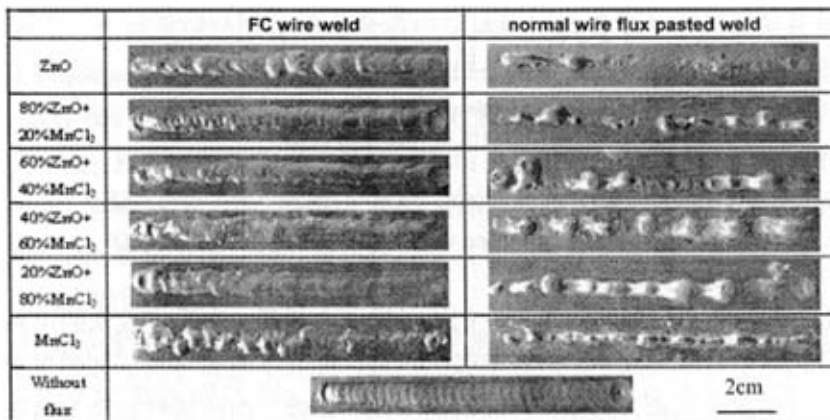


图 3.14 焊缝表面成形质量
Fig.3.14. weld bead made with and without flux

填丝焊接过程中,焊丝熔滴与母材金属的融合能力是影响焊缝表面形貌的重要因素之一。在其他参数都调整适当的情况下,熔滴过渡进入熔池后,如果很容易的与熔池金属融合成为一体,那么将会得到均匀、规则,外形美观的焊缝;反之焊缝的表面成形会较差。由于焊丝与母材同质,当不添加活性剂焊接时,焊丝的熔滴进入熔池后会与熔池金属很容易的混融到一起,这也是不加活性剂直接焊接时焊缝成形最好的原因。在添加活性剂(无论是将活性剂涂在丝上还是涂在试板上)之后,由于活性元素的存在,都会使熔滴与熔池金属之间产生表面张力的差异,造成熔滴与熔池金属的融合能力与不加活性剂的情况相比变弱。

在活性焊丝焊接和活性剂涂于试板上填充光丝焊接两组试验之间,焊丝熔滴与熔池金属融合过程中也存在这很大的差异。具体的说:在活性焊丝焊接时,活性元素附着在焊丝熔滴表面使得熔滴的表面张力远小于熔池中金属的表面张力;在活性剂涂于试板上填充普通丝焊接试验中,活性元素附着于熔池金属表面使得熔池金属的表面张力远小于熔滴的表面张力。下面假设这两种情况下熔滴金属均能平铺在熔池金属表面,示意图如图 3.15 所示。

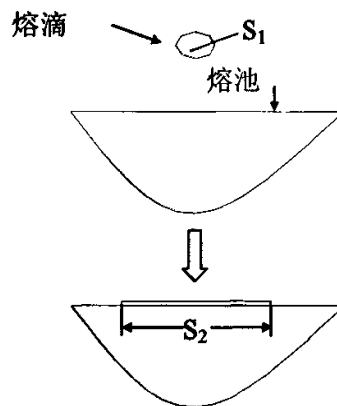


图 3.15 理想熔滴过渡示意图

Fig3.15. The hypothetical fusion mode of droplet tiling on the surface of the molten pool

假设当时熔滴与熔池金属的温度都是 T , 附着有活性元素的液态镁合金的表面张力为 r_1 , 无活性元素的液态镁合金的表面张力为 r_2 , 铺开后熔滴金属与熔池金属之间的界面张力 r , 熔滴的表面积 s_1 , 熔滴在熔池表面铺开的面积 s_2 , 熔滴未落入熔池前熔滴和熔池金属组成系统的表面吉布斯自有能 G_1 , 熔滴在熔池表面铺开后系统吉布斯自由能 G_2 。

1.活性剂涂敷于试板表面填充光焊丝焊接过程中熔滴在熔池表面铺开前后系统的表面吉布斯自有能差 ΔG_1

$$\Delta G_1 = G_2 - G_1 = (r_2 \times s_2 + r \times s_2) - (r_1 \times s_1 + r_1 \times s_2) \dots\dots\dots (3.1)$$

2.活性焊丝焊接熔滴过渡过程中熔滴在熔池表面铺开前后系统的表面吉布斯自有能差 ΔG_2

$$\Delta G_2 = G_2 - G_1 = (r_1 \times s_2 + r \times s_2) - (r_1 \times s_1 + r_2 \times s_2) \dots\dots\dots (3.2)$$

由热力学可知,判定某过程能否发生的判据是计算该过程中系统吉布斯自由能改变量 ΔG 的正负,如果 $\Delta G > 0$ 该过程则不能发生;如果 $\Delta G < 0$ 该过程则能发生。但是对本试验 s_1 、 s_2 的值是难以准确测量的; r_1 、 r 的值是随着温度、金属液表面活性元素的含量的变化在不断变化的, r_2 的值也在随着温度不断改变,所以现在还不能获得 s_1 、 s_2 、 r_1 、 r 、 r_2 具体值。

但是通过对其他情况下进行的总结分析,可以肯定存在如下关系: $r_2 > r > r_1$; $s_2 > s_1$ 。那么通过式 (3.1) 很容易得出 $\Delta G_1 > 0$,即活性剂涂敷于试板表面填充光焊丝焊接过程中,焊丝的熔滴进入熔池后是不能在熔池表面铺展开的而是团聚成球状液滴,实际的熔滴过渡过程如图 3.16a 所示,这样就造成熔滴与熔池金属不能混融在一起,就直接造成了这种方法下进行焊接焊缝不能成形如图 3.14 所示。

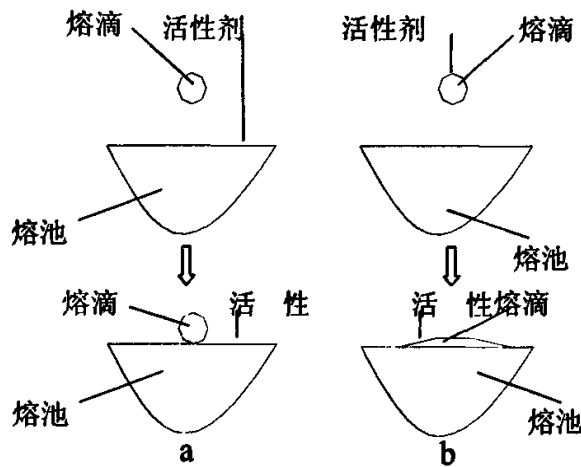


图 3.16 实际熔滴过渡示意图, a 试板涂活性剂填充普通焊丝焊接试验, b 活性焊丝焊接试验
Fig3.16. The mode of the transition of droplet a. Gas tungsten arc welded with flux pastes and normal wires b. Gas tungsten arc welded using flux coated wires

对式 (3.2) 进行整理发现只要 $(r_1 + r - r_2 - r_1 \times \frac{s_1}{s_2}) < 0$ 就肯定有 $\Delta G_2 < 0$, 可以通过调整活性剂组成的方法来满足该条件, 结合图 3.14 发现, 不同活性剂成分确实带来不同的表面成形形貌。在活性焊丝焊接过程中, 当满足上面条件时, 焊丝熔滴进入熔池后便在熔池表面铺展开, 如图 3.16b。熔滴在熔池金属表面铺展开后, 在电弧及后续熔滴的搅动作用下便能与熔池金属混合在一起, 而后形成的焊缝成形质量将会较高。对图 3.14 中活性焊丝焊接得到的焊缝进行仔细对比发现: 焊缝成形质量随活性剂中 MnCl_2 含量的增加呈现出先变好后又恶化的变化趋势, 当 MnCl_2 为 40% 时焊缝成形质量最好。

活性剂中 ZnO 分解后的产物是镁合金的表面活性元素, 其对焊丝熔滴表面的活化作用使的活性焊丝的填丝性能有所恶化, 使得焊缝成形质量变差, 但单独以 ZnO 为活性剂焊接时焊接电弧较稳定; 活性剂中 MnCl_2 分解产物并不是镁合金的表面活性元素, 它主要是通过分解后进入电弧改变电弧形态增加电弧对工件的热输入的方式来增加焊接熔深且效果很明显, 可是它会造成焊接电弧稳定性变差, 造成焊缝成形质量变差, 但单独以 MnCl_2 为活性剂焊接时焊丝熔滴与熔池金属很容易混融。将 ZnO 和 MnCl_2 按比例混合, 以 ZnO 补充 MnCl_2 造成焊接电弧不稳定的缺点, 以 MnCl_2 增强电弧的优点来打破 ZnO 分解产物造成的熔滴与熔池金属之间的界面达到两部分金属相互混融的目的。试验证实活性焊丝焊接时 MnCl_2 与 ZnO 的质量比为 2:3 时得到的焊缝具有熔深大、表面成形质量好的综合优点。

3.3.3 双组份活性剂对焊缝组织及力学性能的影响

由上分析发现: 将活性剂直接涂覆在待焊试板表面填充普通焊丝的活性焊接方法是不可行的, 采用该方法时活性剂增加焊接熔深的能力得不到明显的发挥, 同时焊缝难以成形。为此本节仅对活性焊丝焊接后得到的接头, 进行了微观组织、力学性能的分析。

图 3.17 为普通焊丝焊接和采用 40% MnCl_2 + 60% ZnO 活性焊丝焊接得到接头热影响区照片, 图中可见采用活性焊丝进行焊接得到接头 HAZ 区明显比普通焊丝焊接宽。这说明在同种工艺参数下进行焊接, 活性焊丝焊接时电弧向焊缝中输入了更多热量。

图 3.18 为焊缝及母材的微观组织照片, 图 a, b 为焊缝区的微观组织。图 a 为普通焊丝焊接焊缝区微观组织, 晶粒尺寸为 $20\mu\text{m}$ 左右; 图 b 为 40% MnCl_2 + 60% ZnO 活性焊丝接头焊缝区微观组织, 晶粒较普通焊丝焊接稍大一点为 $30\mu\text{m}$ 左右。图 c 为母材的组织照片, 母材为典型的轧制组织, 晶粒尺寸大小不均匀。图 d, e 为热影响区的微观组织, 图 d 为普通焊丝焊接接头热影响区的组织照片, 该区域晶粒较焊缝区的晶粒相比有明显的长大, 并且晶粒尺寸大小不均匀, 晶粒尺寸在 $10-70\mu\text{m}$ 之间。图 e 为活性焊丝焊接接头热影响区的组织形貌, 该区的晶粒尺寸比普通焊丝焊接的热影响区稍大。

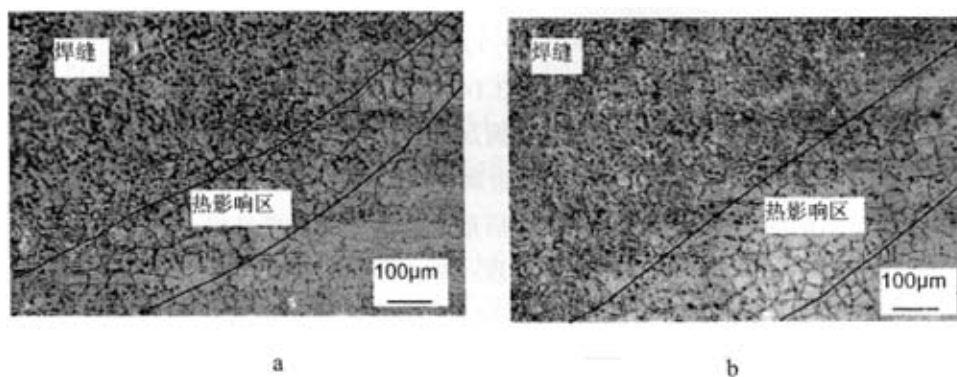


图 3.17 焊缝热影响区照片, a 为普通焊丝焊接, b 为 40%MnCl₂+60%ZnO 活性焊丝焊接
Fig.3.17. Optical macrostructure of GTA welded Mg-AZ31B alloy prepared with normal wires (a) and with (60%ZnO+40%MnCl₂) flux coated wires(b).

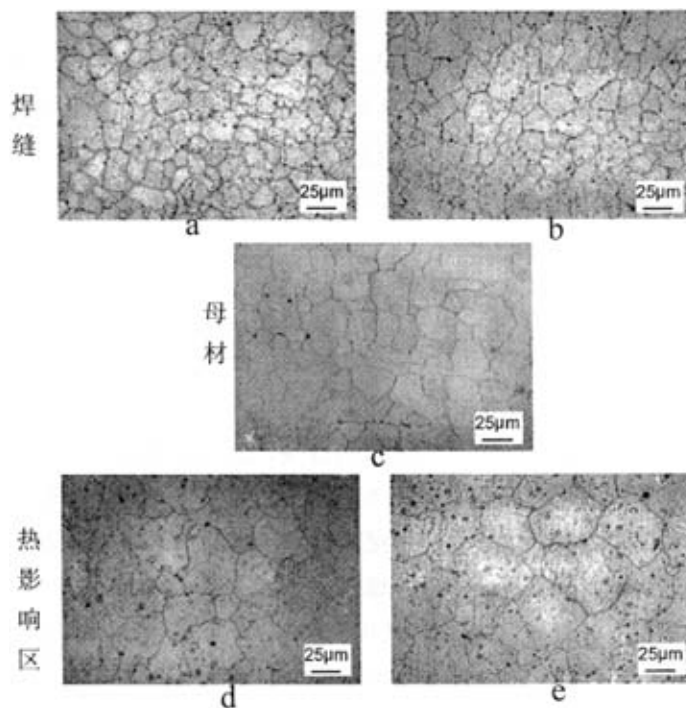


图 3.18 (60%ZnO+40%MnCl₂)活性焊丝焊接焊缝微观组织照片
Fig.3.18 Optical macrostructure of GTA welded Mg-AZ31B alloy with normal wires and (60%ZnO+40%MnCl₂) flux coated wires

图 3.19 为母材与焊接接头的抗拉强度对比,图中分别给出了普通焊丝焊接接头抗拉强度和采用(40% MnCl_2 +60% ZnO)活性焊丝焊接接头强度。由图中可见母材的强度明显高于焊缝的强度,普通焊丝焊接的强度稍高于活性焊丝焊接的强度。试验发现无论是普通焊丝焊接还是活性焊丝焊接,焊接接头拉伸断裂位置均处在接头的热影响区。从接头微观组织区别可以为接头强度的差异找出原因:第一,从图 3.18c 中发现母材的组织为典型的轧制组织,母材金属在轧制过程中形成了这种明显的具有方向性的组织形态,这种轧制组织顺着晶粒的生长方向具有很强的加工强化作用,抗拉强度较铸态组织有明显增加。第二,比较图 3.18a, b 和图 3.18d, e 发现无论是普通焊丝焊接还是活性焊丝焊接接头热影响区的组织均比焊缝区组织有明显长大趋势,接头热影响区将成为接头性能薄弱区,拉伸时将会首先在接头热影响区发生断裂。第三,比较图 3.18d 和图 e 发现,活性焊丝焊接时接头热影响区组织比普通焊丝焊接热影响区组织更为粗大一些,在拉伸是粗大的组织更容易发生断裂。

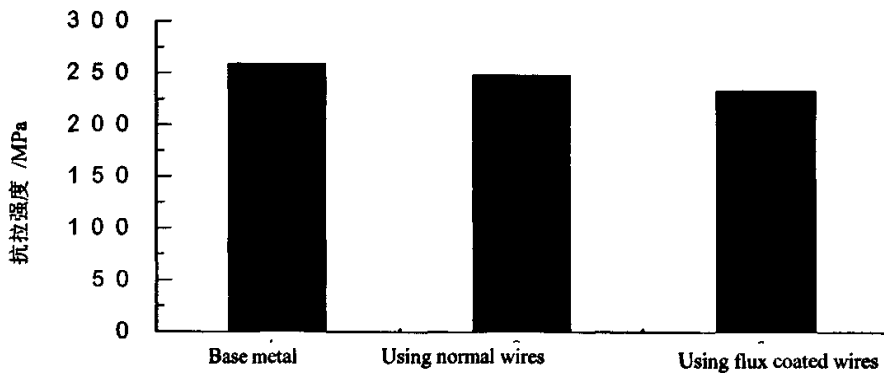


图 3.19 母材及焊接接头的抗拉强度

Fig.3.19. Room temperature tensile test results

3.4 本章小结

(1) 采用镁合金活性焊丝进行焊接,可以增加焊接熔深最大可达普通焊丝焊接熔深的 300%。采用单一成分活性焊丝焊接时,氯化物对焊接熔深的增加效果最为显著,其次为碳酸盐和氟化物,再次为氧化物,有的氧化物活性焊丝甚至降低焊接熔深。考察活性剂的分解温度和其对焊接熔深的增加作用,发现分解温度在 900℃附近的活性剂对镁合金焊接的熔深增加作用最大。

(2) 镁合金活性焊丝焊接时，由于活性剂的存在造成熔滴金属与熔池金属之间的表面状态产生差异，熔滴金属与熔池金属融合能力变差，焊缝成形质量较普通焊丝焊接有所恶化。通过调整活性剂成分，发现采用(40% MnCl_2 +60% ZnO)活性焊丝进行镁合金焊接，可以得到表面波纹细腻、均匀光滑的焊缝。

(3) 在相同工艺参数下，与普通焊丝焊接相比，活性焊丝焊接接头热影响区较宽，热影响和熔合区组织较粗，活性焊丝焊接较低，焊接熔深较大。因此，在要求获得相同熔深的条件下，采用活性焊丝进行焊接可以有效的降低焊接电流。最终，采用活性焊丝进行焊接与采用普通焊丝进行焊接得到的接头组织及力学性能相当。

4 镁合金活性焊丝焊接熔深增加机理的分析

通过第三章的研究发现,采用镁合金活性焊丝焊接镁合金可以大幅度增加焊接熔深,大大提高镁合金焊接的生产效率。以往对于活性焊接的研究,研究人员总结出两个比较得到认可的理论,解释活性剂增加焊接熔深现象,其一为“表面张力理论”,其二是“电弧收缩理论”。本章从这两个角度分析了镁合金活性焊丝焊接熔深增加的机理。

4.1 试验方法

本试验材料选择为 AZ31 镁合金试板,焊丝选用了同材质的挤压成型镁合金焊丝,活性剂为 MnCl_2 和 ZnO 两种,分别单独使用进行焊接试验。试验中将一根焊丝后半部分涂上活性剂,前半部分为光焊丝,焊接时将这样的焊丝填充进焊缝中。采用 SP-2556 型光谱仪拍摄整个一根焊丝焊接过程中的电弧光谱变化形态,采用 TDS1002 型数字示波器,记录整个焊接过程中电弧电压的变化情况,采用 CPL250KCMOS 型高速摄像机拍摄整个焊接过程中的焊接电弧形态,整个焊接试验系统的示意图如图 4.1 所示。焊接试验完成后,分别将焊缝取横断面和纵断面,对断面进行标准的抛光和腐蚀,并采用电子探针对焊缝横断面进行元素分布分析。

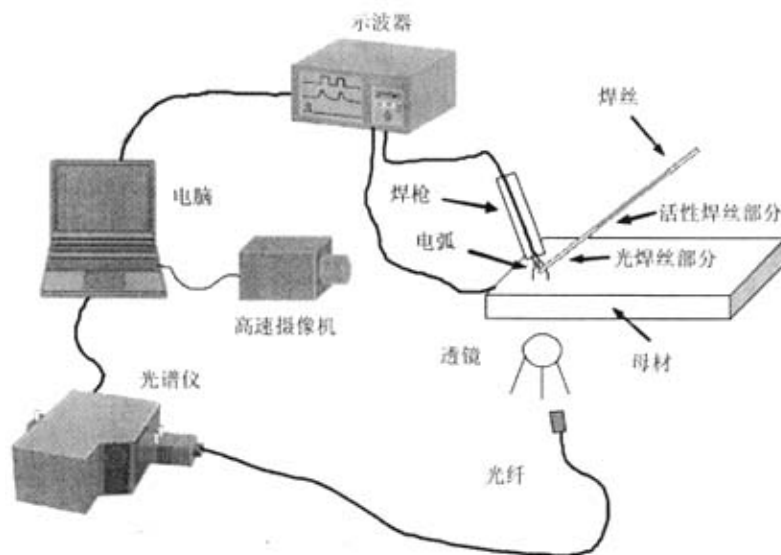


图 4.1 焊接示意图

Fig.4.1 Schematic diagram of weld process

4.2 电弧收缩理论

焊接电弧理论认为,在活性焊接过程中,活性剂在电弧作用下发生分解,分解产物中电负性较大的 Cl 或 O 能够吸附电弧外围温度较低区域中的自由电子,造成电弧导电通道收缩,电弧温度增加,电弧热输入集中,从而使得焊接熔深增加。

图 4.2 中给出的分别是采用 MnCl_2 和 ZnO 两种活性焊丝焊接得到的焊缝纵断面照片,从照片中发现两种活性焊丝的应用均对焊接熔深起到了一定的增加作用, MnCl_2 活性焊丝的熔深增加能力明显强于 ZnO 活性焊丝。应用 MnCl_2 活性焊丝焊接得到的焊接熔深可达普通焊丝焊接的 300%;应用 ZnO 活性焊丝焊接,熔深较普通焊丝增加 120%。本试验中活性剂随焊丝直接进入焊接电弧,大量的活性剂必然对焊接电弧产生影响。由此而引发焊接电弧压缩,电弧电压和电弧温度升高,最终造成的焊接热输入增加应为活性焊丝焊接熔深增加的主要原因。在下面的内容中电弧电压和电弧温度变化将被详细的分析。

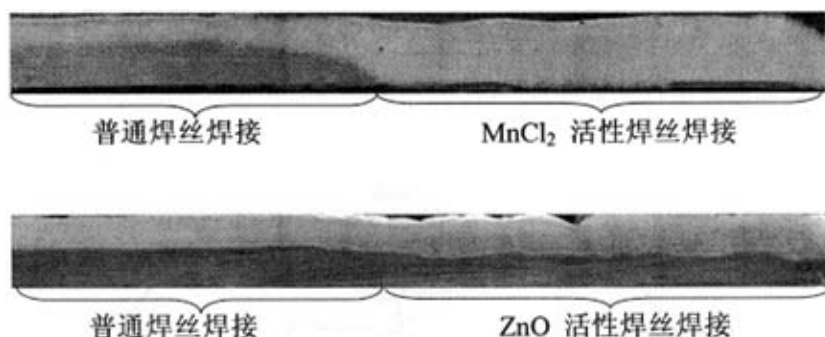


图 4.2 焊缝纵断面

Fig.4.2 The longitudinal sections of the weld beads

4.2.1 电弧电压变化

图 4.3 展示了本试验过程中有效电弧电压的变化情况。焊接过程中当电弧遇上 MnCl_2 活性剂时,电弧电压明显增加(从 12 伏增到 17 伏)。采用 ZnO 活性焊丝焊接时发现,当电弧遇到 ZnO 时电弧电压变化较小,只是稍有增加(从 12 伏增到 13 伏)

由于焊接过程中焊接电流是恒定的,电弧电压的增加必然会造成焊接热输入的相应增加,从而造成焊接熔深的增加。活性焊丝焊接较普通焊丝焊接,电弧电压增加必然与

活性焊丝焊接时电弧导电通道的压缩有关系。导电通道的压缩会造成电弧电导率的下降，这必然会迫使电弧电压增加，以满足电流不变的要求。下面 4.2.2 将会对焊接电弧进行细致的分析。

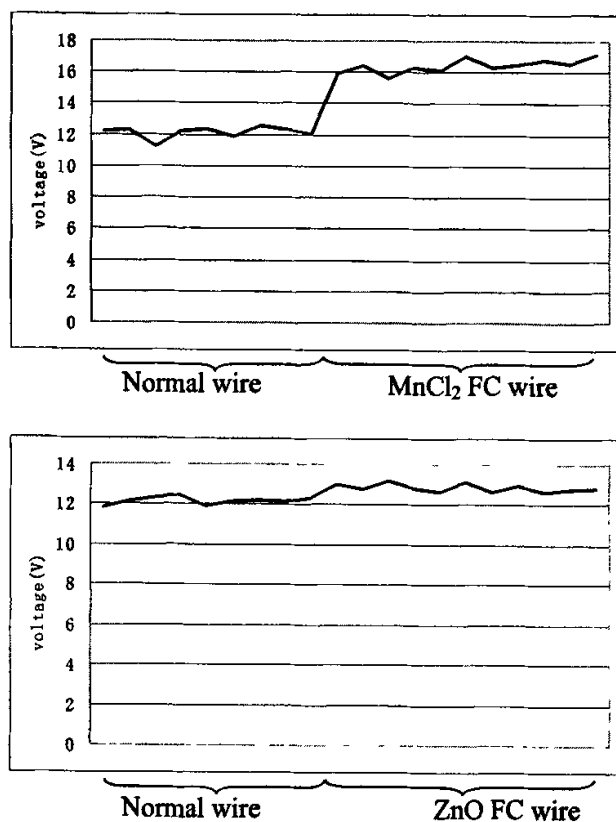


图 4.3 焊接过程电弧电压的变化曲线

Fig4.3 The variations of effective voltage during the welding

4.2.2 焊接电弧形态变化

采用高速摄像机对焊接过程中的焊接电弧进行了拍摄，电弧照片如图 4.4 所示。由图可见在 MnCl_2 活性焊丝焊接时无论是正半波区 (EN period) 还是负半波 (EP period) 电弧的明亮区域较普通焊丝焊接时有所压缩。图中的明亮区就是电弧的高温区，因为作为电弧主要电流载体的电子就主要在这个区域存在，所以这个明亮区也是整个电弧的主要导电区。由此可见 MnCl_2 活性焊丝焊接时电弧导电通道产生了压缩效应，从而更加确切的解释了 MnCl_2 活性焊丝焊接较普通焊丝焊接电弧电压升高的现象。然而对比普通焊

丝焊接与 ZnO 活性焊丝焊接的电弧形态发现,这两种情况下焊接电弧形态相似,ZnO 活性焊丝焊接时没有发生类似于 $MnCl_2$ 活性焊丝焊接时的电弧导电通道压缩的现象。

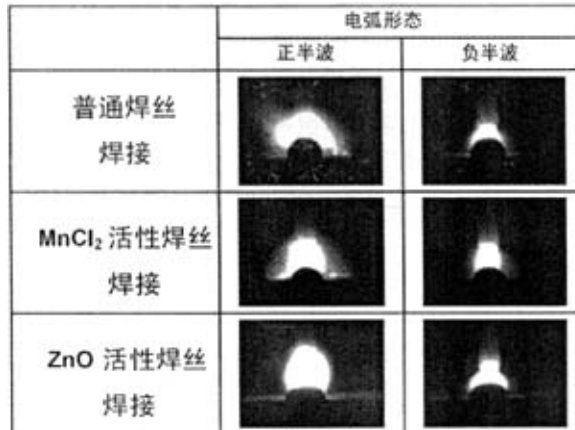


图 4.4 焊接电弧形态

Fig.4.4 Characteristic appearances of arc

活性焊丝焊接过程中电弧压缩可以从两个方面来解释:其一,导电通道的压缩。活性焊丝焊接时随焊丝一同进入焊接电弧的活性剂在电弧的作用下发生了分解,其分解产物在电弧的外围低温区捕获了该区域的电子,形成阴离子。由于阴离子的导电能力很差,这时整个电弧的电流都通过电弧中心高温区传导,从而高温区电流密度将会增大。其二,是指电弧的热收缩作用。从文献^[62]可知,当焊接气氛中存在表面活性元素时,会促使待焊金属的蒸发剧烈增加。在本试验中作为待焊金属的镁,在活性焊丝焊接过程中也必然大量进入电弧,这一点可以从图 4.5 中得到明确的证据。我们知道在其它条件相同的条件下,原子质量越小的介质热导率将会越高,由于镁的原子质量远小于氩的原子质量,那么可以断定在活性焊丝焊接过程中电弧气氛的导热能力将会远大于普通焊丝焊接的情况。进而可以确定如果焊接电弧形态不变,活性焊丝焊接时电弧热损耗将会远大于普通焊丝焊接。由最小电压原理可知,电弧有自动缩小其半径以实现热损耗最小的性质。第二个机理尚需进一步的验证。

由图 4.4 可以断定,活性焊丝焊接时电弧的压缩并非电弧整体的压缩,所谓的压缩是指电弧中心高温区(电弧导电通道)的压缩。这种压缩必然会造成电弧电流密度的增加,电流密度的增加就意为着电弧能量的集中,从而必然造成焊接电弧温度的增加。下面就是利用焊接电弧光谱,分析焊接过程中的电弧等离子体电子温度。

4.2.3 焊接电弧光谱变化

为了比较活性焊丝焊接与普通焊丝焊接过程中电弧等离子体的差异,我们选定了波长范围在 382nm 到 554nm 的镁原子 (Mg I) 谱线和波长在 690nm 到 860nm 氩原子 (Ar I) 谱线进行了分析。图 4.5 是采用一半涂有 MnCl_2 的焊丝进行焊接在整个试验过程中两种谱线的变化情况。由图 4.5 可见, MnCl_2 活性焊丝焊接时 Mg I 线的强度较普通焊丝焊接时有了剧烈的增加; 然而 Ar I 线的强度却相应的明显的下降。同时从图 4.7a 可见活性焊丝焊接时 Mn I 元素的强也明显增加。而当采用 ZnO 活性焊丝焊接时, 电弧光谱较普通焊丝焊接时基本没有变化, 如图 4.6, 图 4.7b 所示。

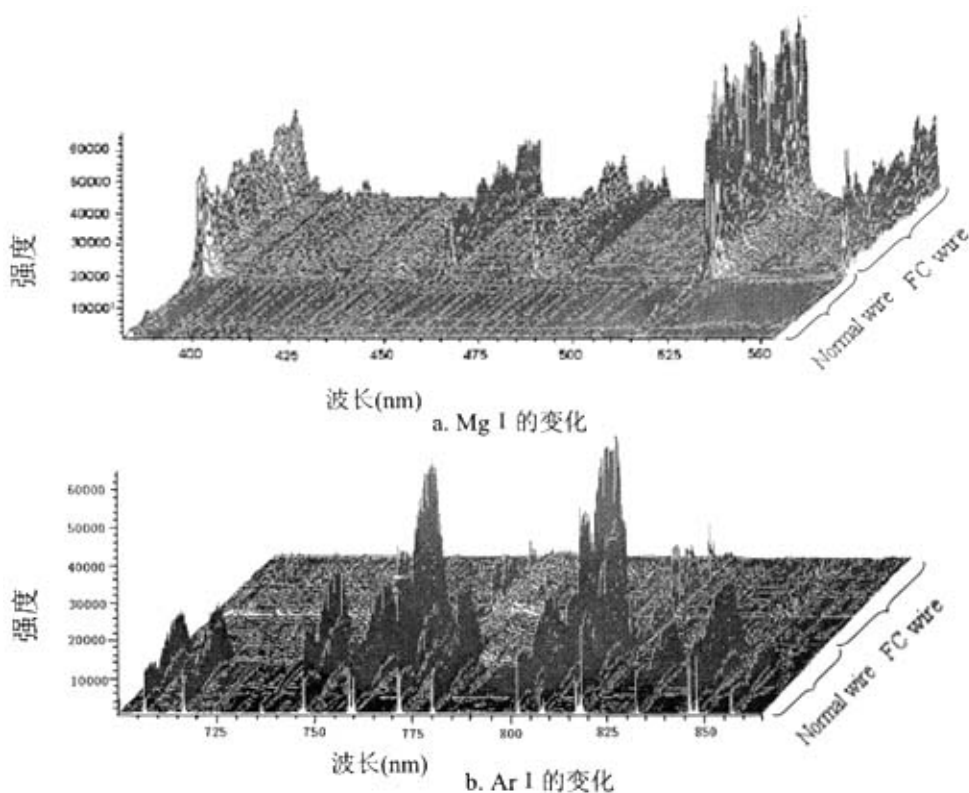


图 4.5 采用一半涂有 MnCl_2 的焊丝进行焊接的电弧光谱变化

Fig.4.5 - The variations of the spectral lines before and after the MnCl_2 flux coated wire was used

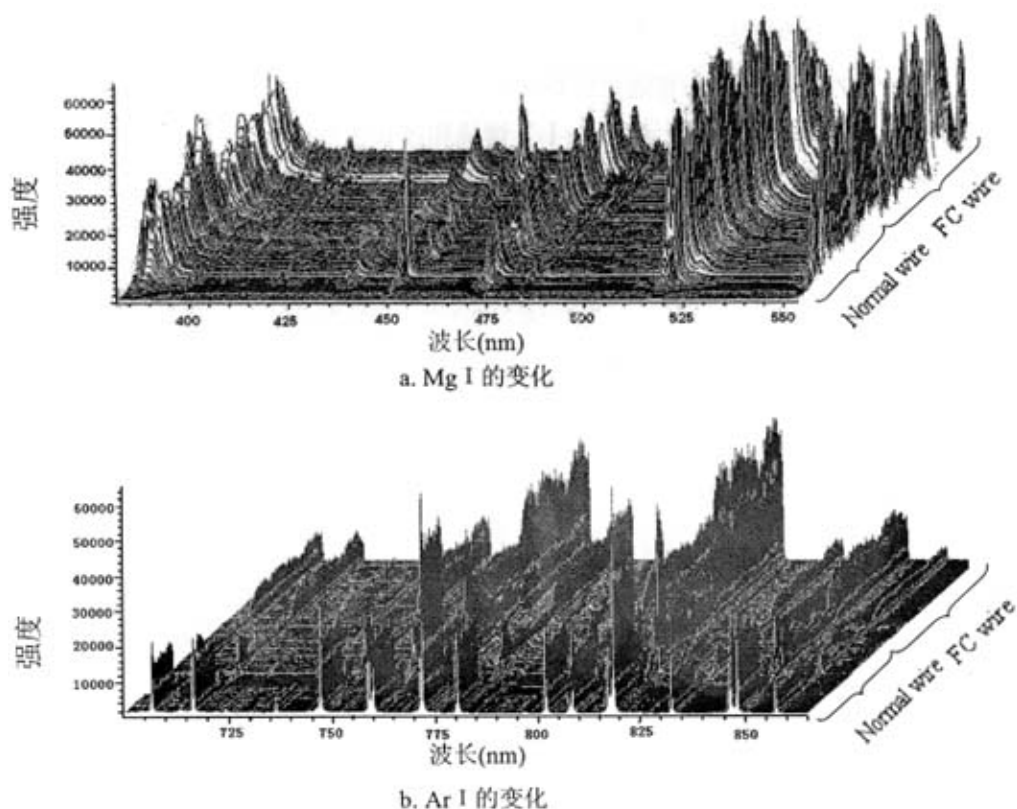


图 4.6 采用一半涂有 ZnO 的焊丝进行焊接的电弧光谱变化

Fig.4.6 The variations of the spectral lines before and after the ZnO FC wire was used

从图 4.5a 就可以明确地断定, 活性焊丝焊接时有大量的镁由于蒸发而大量进入电弧, 镁的原子及离子成为活性焊丝焊接时焊接电弧的主导粒子。由图 4.5b 可见在活性焊丝焊接时氩的受激发原子数量明显减少。这一现象可能是由两方面作用造成的, 第一、 MnCl_2 活性焊丝焊接时焊接电弧温度较普通焊丝焊接时大幅度降低, 致使氩不能被激发。回顾前面得到的电弧电压及电弧形态结果, 我们认为 MnCl_2 活性焊丝焊接时焊接电弧温度较普通焊丝焊接时大幅度降低, 这种情况是不可能发生的。由此我们提出第二种可能的原因, 在 MnCl_2 活性焊丝焊接时母材金属发生大量的蒸发, 大量蒸发的镁蒸气阻碍了氩进入电弧高温区, 从而致使其没有被激发。

图 4.7a 的光谱告诉我们在氯化锰活性焊丝焊接时, 活性剂氯化锰在电弧作用下发生了解。分解的反应式为 $\text{MnCl}_2 = \text{Mn} + 2\text{Cl}$ 。从而可知在氯化锰活性焊丝焊接时焊接电弧

中存在着大量的氯原子。氯原子是一种极易吸收电子形成阴离子的原子，从而可以断定大量氯原子的存在，捕获了焊接电弧外围电子，造成的电弧导电通道的压缩。从 4.7b 中可见当采用 ZnO 活性焊丝焊接时，活性剂元素并没有大量的进入电弧区，从而活性剂元素也就不会对焊接电弧产生影响。

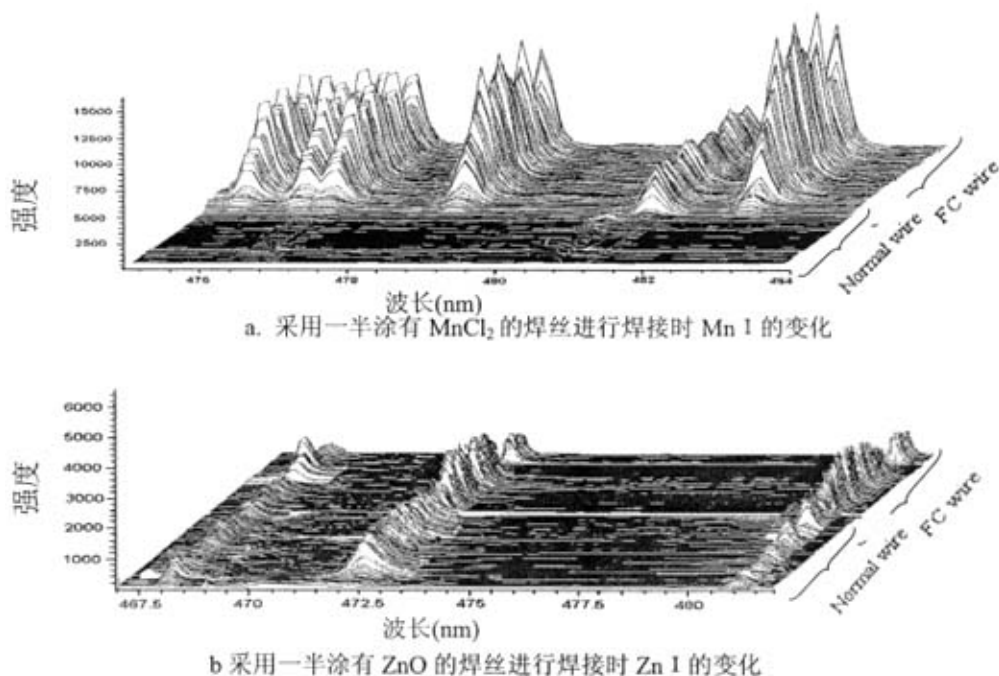


图 4.7 电弧中活性元素的谱线强度变化

Fig.4.7 The spectral lines intensity of flux elements

4.2.4 焊接电弧电子温度变化

电子温度是一个可以表征电弧温度变化的重要的物理量。本文中通过氩离子 (Ar II) 线和镁原子 (Mg I) 分别计算了试验过程中电子温度的变化情况。采用的方法为波尔兹曼斜率法, E , g 为跃迁谱线上能级能量和统计权重, A 为跃迁几率, k 为波尔兹曼常数, T 为电子温度, C_1 、 C_2 为常数。

$$\ln\left(\frac{Ic\lambda}{Ag}\right) = C_1 + C_2\left(-\frac{E_m}{kT_e}\right) \quad (4.1)$$

图 4.8a 可见当采用 Ar II 进行计算电子温度时，普通焊丝焊接的电子温度大概在 8500K 左右； MnCl_2 活性焊丝焊接时电子温到可达 10000K 左右。从图 4.8b 可见利用

Mg I 进行电子温度计算时发现, 普通焊丝焊接的电子温度大概在 6000K 左右, 氯化锰活性焊丝焊接时电子温到可达 8000K 左右。这说明当采用 MnCl_2 活性焊丝焊接时电弧温度要明显高于普通焊丝焊接, 较高的电弧温度必然要带来大的焊接熔深。而从图 4.9 中可见, 当采用 ZnO 活性焊丝焊接时, 无论用 Ar II 还是用 Mg I 进行计算, 电弧电子温度均和普通焊丝焊接时变化不大, 仅有在 500K 范围内波动。

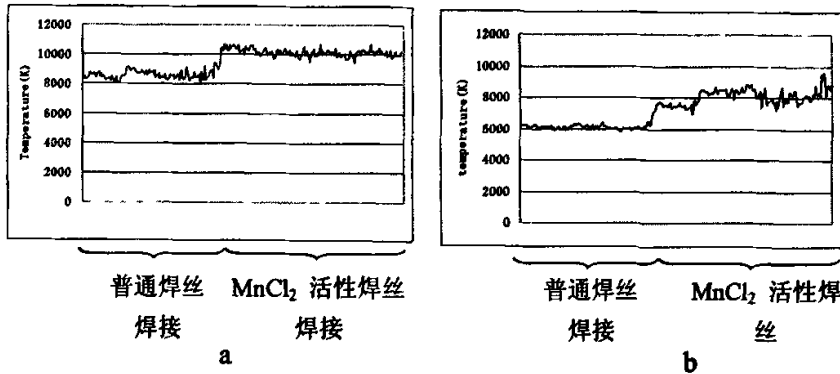


图 4.8 采用一半涂有 MnCl_2 的焊丝进行焊接电弧电子温度变化

Fig.4.8 The variations of the Electronic temperature before and after MnCl_2 FC wire was used

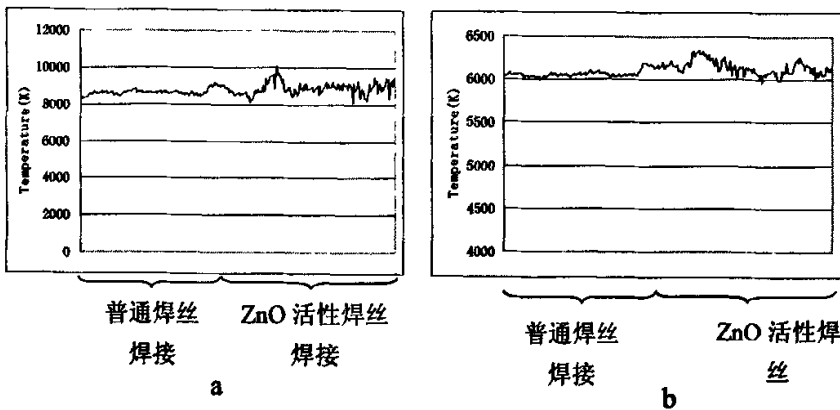


图 4.9 采用一半涂有 ZnO 的焊丝进行焊接电弧电子温度变化

Fig.4.9 The variations of the Electronic temperature before and after ZnO flux coated wire was used

本试验中计算得到的电子温度变化情况与上面得到的焊接熔深变化、电弧电压变化、电弧形态变化、以及等离子体谱线变化是很好对应统一的。 MnCl_2 活性焊丝焊接时

电子温度的升高可以解释为：具有较低分解温度的 MnCl_2 活性剂在电弧作用下完全分解。分解产物氯原子在电弧外围低温区捕获大量的电子，致使电弧电流只能通过电弧中心高温区传导，明显增加了电弧的电流密度，从而使得电弧温度显著增加，焊接熔深增加。 ZnO 活性焊丝焊接时，由于 ZnO 的分解产物并没有对焊接电弧产生类似于 MnCl_2 活性剂对焊接电弧的压缩作用，所以 ZnO 活性焊丝焊接时并没有产生焊接熔深的明显增加现象。

4.3 表面张力理论

表面张力理论认为，活性焊接过程中活性剂在焊接电弧作用发生分解，分解后的产物可以作为镁合金的表面活性元素附着在熔融金属表面。由于表面活性元素的存在，改变了熔池金属的表面张力梯度，使得熔池金属由普通焊接时的自熔池中心向熔池四周的流动方式，变为活性焊接时的由熔池四周向熔池中心流动。这种由四周向中心的流动方式，有利于电弧热向熔池底部的传输，从而使得活性焊接的焊接熔深明显大于普通焊接。

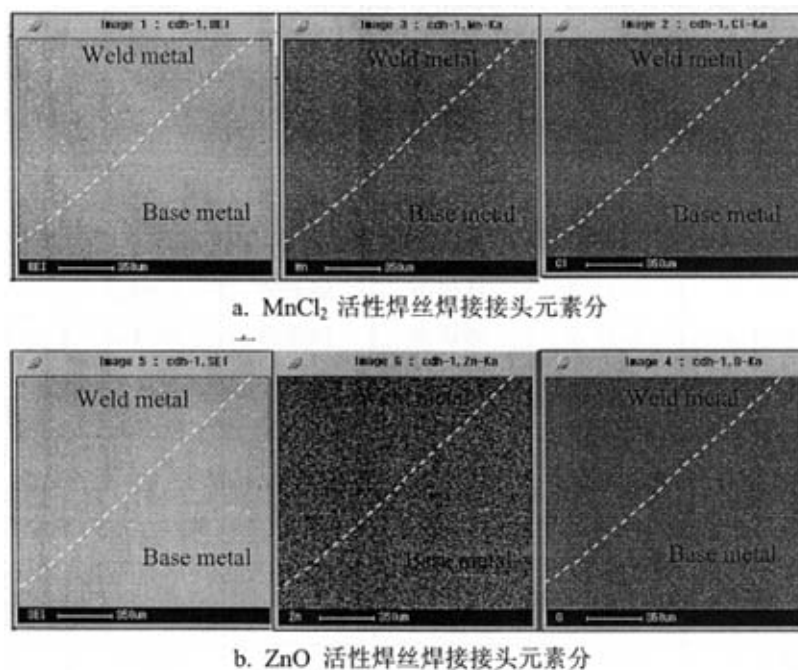


图 4.10 活性焊丝焊接接头元素分布

Fig.4.10 Back-scattered electron images and compositional maps in the weld seam of the GTA weld prepared with flux coated wires

图 4.10 为分别采用 MnCl_2 活性焊丝焊接和 ZnO 活性焊丝焊接后的焊缝横断面元素分布照片，由图中可见不管哪种活性焊丝焊接，接头都没有发现活性剂元素的富集，焊缝中锌元素、氯元素、锰元素、氧元素的含量都和母材中这些元素的含量相同。由此可以断定，在活性焊丝焊接过程中并没有活性剂元素过渡进入焊接熔池，活性元素也就不可能通过改变熔池金属流动方式而提高电弧热向熔池的传递效率。

4.4 本章小结

(1) MnCl_2 活性焊丝焊接与普通焊丝焊接相比熔深可达普通焊丝焊接时的 300%；电弧电压由普通焊丝焊接的 12V 增至 17V；焊接电弧的高温区发生明显的收缩现象；电弧电子温度较普通焊丝增加 1500~2000K。ZnO 活性焊丝焊接时，焊接熔深可达普通焊丝焊接的 120%，电弧电压由 12V 增至 13V，电弧形态和电弧电子温度与普通焊丝焊接时相比变化不明显。

(2) 无论是 MnCl_2 活性焊丝焊接还 ZnO 活性焊丝焊接，焊接接头均没有发现活性剂元素的富集，活性剂元素没有过渡进入焊接熔池。

5 镁合金活性焊丝活性剂复合配方设计

5.1 复合成分活性焊丝焊接试验

基于前面单一成分活性焊丝试验结果, 根据以下三条原则进行活性剂复合配方基础组元选择。①组元活性剂应具有一定的增加焊接熔深的作用, 并且对焊丝的填丝性能负面影响较小。②组元活性剂应对人体无害。③组元活性剂对镁合金本身的性能无负面影响。根据上面三条原则优选出 CaCl_2 、 ZnCl_2 、 MgCl_2 、 TiO_2 、 MnO_2 5 种活性剂为基础组元, 进行活性剂复合配方设计。

表 5.1 活性剂复合配方
Table.5.1 The mixture ratio of the activating fluxes

	A (X_1)	B (X_2)	C (X_3)	D (X_4)	E (X_5)
M1	0.6072	0.1578	0.1043	0.0529	0.0778
M2	0.4830	0.1201	0.0787	0.2652	0.0530
M3	0.4126	0.0682	0.0062	0.1099	0.4031
M4	0.3611	0.0156	0.3043	0.2051	0.1139
M5	0.3196	0.3457	0.0765	0.0061	0.2521
M6	0.2846	0.2078	0.0185	0.2213	0.2678
M7	0.2541	0.1185	0.3370	0.2559	0.0345
M8	0.2269	0.0456	0.1891	0.1410	0.3974
M9	0.2024	0.5682	0.0141	0.1486	0.0667
M10	0.1799	0.2954	0.3105	0.0153	0.1989
M11	0.1591	0.1735	0.1954	0.2360	0.2360
M12	0.1398	0.0828	0.0677	0.6590	0.0507
M13	0.1216	0.0070	0.5707	0.0931	0.2076
M14	0.1046	0.4027	0.1613	0.2446	0.0868
M15	0.0884	0.2373	0.0766	0.0712	0.5265
M16	0.0731	0.1269	0.5862	0.1171	0.0967
M17	0.0585	0.0389	0.3284	0.5605	0.0137
M18	0.0446	0.5591	0.0558	0.1216	0.2189
M19	0.0312	0.3135	0.5542	0.0795	0.0216
M20	0.0184	0.1785	0.3232	0.0800	0.3999
M21	0.0060	0.0768	0.1551	0.4537	0.3084

以均匀设计法进行镁合金活性焊丝活性剂复合配方设计。按照均匀设计表 $U_{21}^*(21^4)$ 安排试验, 其偏差 $D=0.1381$ 。根据方开泰教授在《均匀设计与均匀设计表》一书中给出配方均匀设计递推算式^[63], 自行以 VB 语言编写程序进行配方配比计算, 得到的活性剂复合配方如表 5.1 所示。表中 A、B、C、D、E5 个字母分别用以代表所选的五种基础活性剂, 表中数值为各基础活性剂在每种配方中的质量百分数。

按表 5.1 中比例每种配方称取 5g 用丙酮调匀后涂于焊丝表面进行镁合金活性焊丝焊接。试验后得到的熔深比如图 5.1 所示, 由图可见 M3、M8、M14 三种配方的活性剂均使焊接熔深较不加活性剂的情况增加 3 倍以上, 从整体上看发现复合成分活性剂比单组份活性剂更能增加焊接熔深。(单组分活性剂焊丝试验结果如图 3.4 所示)

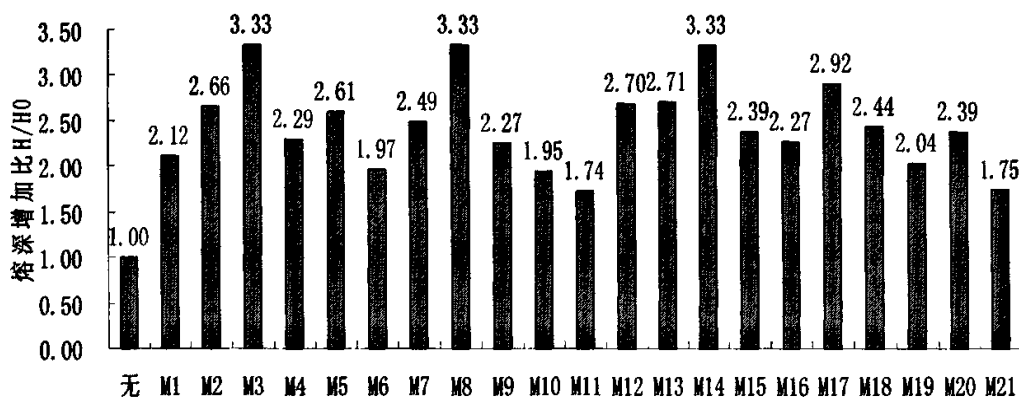


图 5.1 复合成分活性剂焊后的熔深增加比

Fig.5.1 The effects of different compound activating fluxes on weld penetration increase ratio

图 5.2 是复合成分活性剂试验后得到的焊缝表面成形形貌, 由图中可见 9 号、15 号、18 号配方活性剂得到的焊缝成形较为良好, 由此可见成分配比合理的复合配方活性剂可以解决单组份活性剂造成焊丝填丝性能变差的问题。

在以单一成分氯化物为活性剂时, 由于氯化物本身带有结晶水并且具有较强的吸水性, 即使焊前对焊丝进行烘干处理也难以将其中的水去除干净, 水分的存在使得焊接时很容易产生氢气孔。使用复合成分活性剂时由于存在氧化物, 氧化物在电弧作用下发生分解产生氧原子, 以 MnO_2 为例加以说明, MnO_2 在温度达到 808K 时分解为 MnO 和 O 原子, O 原子与电弧气氛中的 H 原子结合为 OH 原子团, 并最终逸出电弧区。由于上述过程的存在, 复合配方活性剂的使用可以抑制焊缝气孔的产生。

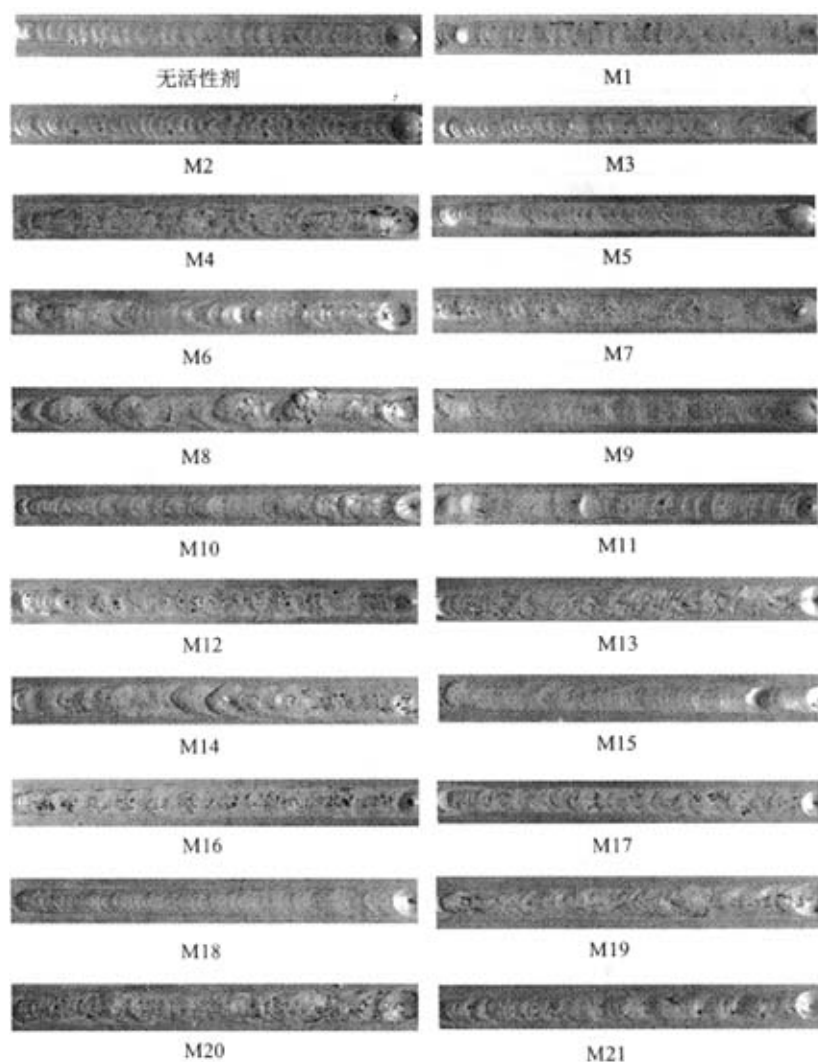


图 5.2 不同配方活性剂对焊缝成形的影响

Fig.5.2 The effects of different compound activating fluxes on bead morphologies

综合考虑熔深增加比和焊缝成形质量两要素，给每种活性剂效果打分^[64]。熔深增加比一项的分值即为熔深比数值，其最大值为 3.33，如图 5.1 所示。为与熔深增加比在总分中占相当比重，焊缝成形一项的满分设为 3.33 分，参照图 5.2 给每种配方的成形质量一项打分。将熔深增加比和焊缝成形质量两项的得分加在一起即得到每种配方的最终效果分，如表 5.2 所示。

表 5.2 各配方效果评定

Table5.2 Measure of effectiveness about every compounding

	熔深增加比	焊缝成形质量	总分 (Y)
M1	2.12	2.00	4.12
M2	2.66	2.20	4.86
M3	3.33	2.50	5.83
M4	2.29	1.80	4.09
M5	2.61	2.60	5.21
M6	1.97	1.70	3.67
M7	2.49	2.10	4.59
M8	3.33	1.00	4.33
M9	2.27	2.60	4.87
M10	1.95	1.70	3.65
M11	1.74	1.80	3.54
M12	2.70	1.50	4.20
M13	2.71	1.70	4.41
M14	3.33	1.30	4.63
M15	2.39	2.80	5.19
M16	2.27	1.20	3.47
M17	2.92	1.40	4.32
M18	2.44	2.90	5.34
M19	2.04	1.30	3.34
M20	2.39	1.20	3.59
M21	1.75	1.40	3.15

设总分为 Y, 用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 分别代表配方中 A、B、C、D、E 的百分含量。对配方进行回归分析, 因为活性剂各组元之间存在着交互作用, 所以选择存在高次项的多项式回归模型, 回归方法为逐步回归法^[65], 得到的回归方程为:

$$Y = 3.09 + 7.84X_2 + 4.60X_5 + 18.0X_1 \cdot X_4 + 28.2X_1 \cdot X_5 + 12.8X_2 \cdot X_2 + 13.1X_2 \cdot X_4 + 2.31X_3 \cdot X_3 + 2.12X_3 \cdot X_4 - 6.77X_3 \cdot X_5 - 12.8X_4 \cdot X_5 - 209X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 + 62.7X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + 168X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$$

方差分析如表 5.3 所示,

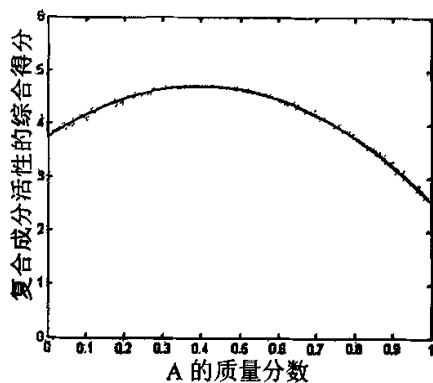
表 5.3 方差分析表

Table.5.3 Variance analysis

误差来源	平方和	自 由 度	均 方	F
回 归	10.6	13	0.818	33.79
剩 余	0.1700	7	0.0242	
总 和	10.8	20		

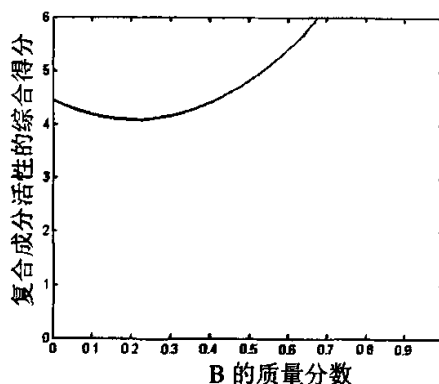
其中显著性水平 $\alpha = 0.01$, 标准差 $S = 0.0856$, 复相关系数 $R = 0.9921$, 决定系数 $R_2 = 0.9843$, F 检验值 $= 33.79$, $F(0.01, 13, 7) = 6.410$, 显然 F 检验值 $> F(0.01, 13, 7)$, 由此可见得到的回归方程是完全可信的。由方程可知, 复合配方中各基础活性剂之间存在着复杂的交互作用, 这些交互作用中有的对焊接工艺产生有益作用, 如回归方程中的正数项; 有的组元之间的交互作用则起到了负面影响, 如方程中的负数项。按最优化理论自行编写程序, 以所得回归方程为基础对活性剂配方进行优化设计, 得到最优配方中各组元活性剂的质量分数的取值范围: $0.3 \leq X_1 \leq 0.45$; $0.2 \leq X_2 \leq 0.27$; $0 \leq X_3 \leq 0.08$; $0 \leq X_4 \leq 0.03$; $0.32 \leq X_5 \leq 0.45$ 。

为了更直观、形象地分析复活配方中各基础组元对配方综合效果的影响, 以表 5.1 和图 5.2 中的数据为基础应用 matlab 软件分别拟合出了五种组元在配方中质量分数对配方综合效果影响的趋势图, 见图 5.3 (a-e) 所示。



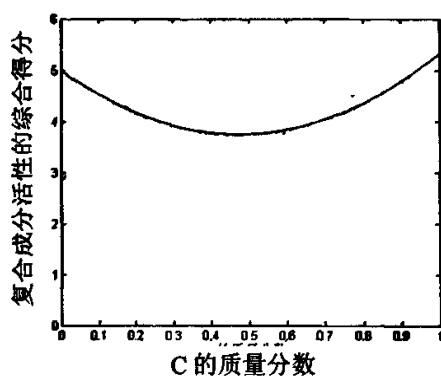
(a) A 对配方综合效果的影响

(a) Effect of A on the general results of compounding



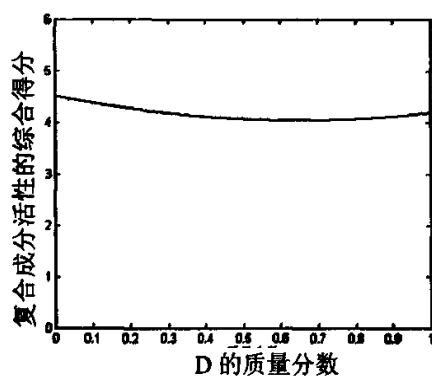
(b) B 对配方综合效果的影响

(b) Effect of B on the general results of compounding



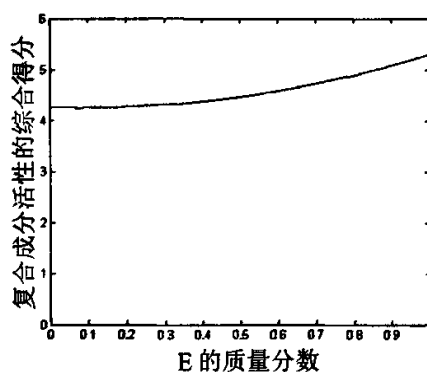
(c) C对配方综合效果的影响

(c) Effect of C on the general results of compounding



(d) D对配方综合效果的影响

(d) Effect of D on the general results of compounding



(e) E对配方综合效果的影响

(e) Effect of E on the general results of compounding

图 5.3 各组分活性剂对配方综合效果的影响

Fig.5.3 Effect of flux on the general results of compounding

由图 5.3(a)中可见,复合配方活性剂的综合效果随配方中 A 含量的增加先增强后减弱,当 A 的含量达到 40%左右时出现最大值。图 5.3(b)说明复合配方活性剂的综合效果虽 B 含量的增加先减弱后增强,在 B 含量达到 15%附近时出现最小值,当越过这个最小值点后活性剂的效果随 B 含量的增加而急剧增加。图 5.3(c)表明 C 对复合配方活性剂的效果的影响与 B 类似但较平缓,当 C 的含量为 50%左右效果最差。由图 5.3(d)、(e)

复合配方活性剂的效果随 D、E 的含量的变化趋势恰好相反，随 D 含量的增加活性剂的效果也随之减弱，相反随 E 含量的增加活性剂的效果也是增加的。这些变化趋势的形成，除了与基础活性剂自身的物理化学性质有关之外，与复合配方活性剂在焊接过程中产生的各组元之间的交互作用存在着密不可分的联系。因此在活性剂复合配方设计中，各组元活性剂之间的交互作用方式及机理的研究是必要和有意义的。不过只从基础组元对复合成分活性效果影响的变化趋势看，我们前面得到的优化配方是完全合理的。

按上面给出的优化配方，取 A：40%、B：20%、C：8%、D：2%、E：30%组成复合活性剂 M，进行试验。试验后仍对焊缝进行综合评分，总分为 6.4 分，其中熔深增加分为 3.8 分，焊缝成形分为 2.6 分。由此试验进一步证实了本文所提出的镁合金活性焊丝复合配方活性剂合理性。对该配方活性焊丝焊接接头取 3 个标准拉伸试样进行抗拉强度试验，发现 3 条焊缝的抗拉强度分别为：254MPa、246MPa、230MPa，平均强度为 243 MPa，达到母材抗拉强度(259 MPa)的 94%。

5.2 本章小结

采用均匀设计法进行镁合金活性焊丝活性剂复合配方设计，在进行相对少试验的情况下能够找到效果很好的活性剂配方，并可以采用一定的手段对配方进行优化设计，从而得到科学合理的活性剂配方。

复合配方中各组元活性剂之间存在着交互作用，并且这些交互作用中有的有利于活性剂的整体效果，有的则有害于活性剂的整体效果。

结论

1. 采用热挤压方法可以连续生产镁合金焊丝, 所生产焊丝表面光滑, 强度高和延伸率好, 满足填丝焊接的要求。在镁合金焊丝表面涂敷一层活性剂, 涂敷量为 45-50mg/mm 左右, 可制成镁合金活性焊丝。

2. 采用单一成分活性焊丝焊接镁合金, 可使焊接熔深较普通焊丝焊接有明显增加, 其中氯化物活性剂的效果最为明显, NiCl_2 活性焊丝焊接可达普通焊丝的 300% 以上。综合考虑活性剂的分解温度和其对焊接熔深的增加作用, 发现分解温度为 900℃ 左右的活性剂对焊接熔深的增加作用最大。

3. 采用镁合金活性焊丝进行焊接时, 由于活性剂的存在造成熔滴金属与熔池金属之间的表面状态有所不同, 熔滴金属与熔池金属互熔能力变差, 焊缝成形质量较普通焊丝焊接有所恶化。试验发现采用复合成分的活性剂, 利用活性剂之间的交互作用, 可以有效改善活性焊丝的填丝性能。当采用双组元活性焊丝时, 发现采用 (60% ZnO +40% MnCl_2) 活性焊丝进行镁合金焊接, 可以得到表面波纹细腻, 均匀光滑的焊缝。

4. 在相同工艺参数下, 与普通焊丝焊接相比, 活性焊丝焊接接头热影响区较宽, 热影响和熔合区组织较粗, 活性焊丝焊接较低, 焊接熔深较大。因此, 在要求获得相同熔深的条件下, 采用活性焊丝进行焊接可以有效的降低焊接电流。最终, 采用活性焊丝进行焊接与采用普通焊丝进行焊接得到的接头组织及力学性能相当。

5. MnCl_2 活性焊丝焊接与普通焊丝焊接相比熔深可达普通焊丝焊接的 300%; 电弧电压由普通焊丝焊接的 12V 增至 17V; 电弧的高温区发生明显的收缩现象; 电弧电子温度较普通焊丝增加 1500~2000K。采用 ZnO 活性焊丝焊接时, 焊接熔深可达普通焊丝焊接的 120%, 电弧电压由 12V 增至 13V, 电弧形态和电弧电子温度与普通焊丝焊接时相比变化不明显。

6. 采用均匀设计法进行镁合金活性焊丝活性剂复合配方设计, 得到效果良好的活性剂配方, 在一系列试验的基础上对配方进行优化, 得到了科学合理的活性剂配方。采用活性剂复合配方进行焊接, 不仅可以增加焊接熔深还可以改善焊缝成型质量。

参考文献

- [1] 余琨,黎文献,王日初. 变形镁合金的研究、开发及应用. 中国有色金属学报, 2003, (2): 277-288.
- [2] 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): 6-10
- [3] 张珣. 镁合金产业的现状与发展. 世界有色金属, 2002, 9: 10-13.
- [4] B. Q. Han, D. C. Dumand, Materials Science and Engineering A 277(2000): 297-304.
- [5] 祁庆琚, 刘勇兵, 杨晓红. 镁合金的研究及其在汽车工业中的应用与展望. 汽车工程, 2002, 24(2): 94-101.
- [6] 贺岩松, 杨诚. 镁合金在轻量化汽车中的应用. 汽车工艺与材料, 2002, 6: 25-27.
- [7] 曾荣昌, 柯伟, 徐永波. Mg 合金的最新发展及应用前景. 金属学报, 2001, 37(7): 673-685.
- [8] 尹守义. 国外镁合金的新发展. 世界有色金属, 1994, 7: 9-11.
- [9] 潘际鑫. 镁合金结构和焊接. 电焊机, 2005, 35(9): 1-7.
- [10] Gurevich S M, Z. V. N., Kushmienko N A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process. Avtom Svarka, 1965, 18(9): 1-5.
- [11] Gurevich S M, Z. V. N. Automat weld, 1966, 19: 14-18.
- [12] 王红英, 莫守形, 李志军. AZ31 镁合金 CO₂ 激光填丝焊工艺. 焊接学报, 2007, 28(6): 93-96.
- [13] 董长富, 刘黎明, 赵绪. 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): 33-36.
- [14] 美国焊接学会编. 焊接手册第七版第四卷金属及其焊接性. 黄静文等译. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [15] 美国金属学会. 金属手册. 第九版, 第六卷. 焊接与钎焊. 北京: 机械工业出版社. 1994.
- [16] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第二卷)材料的焊接. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [17] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第一卷)焊接方法及设备. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [18] 苗玉刚, 刘黎明, 赵杰等. 变形镁合金熔焊接头组织特征分析. 焊接学报, 2003, 24(2): 63-66.
- [19] LIU Liming, M. Y. G, SONG Gang, LIANG Guoli. Effect of heat input on microstructure and properties of welded joint in magnesium alloy AZ31B. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2004, 14(1): 88-92.
- [20] 苗玉刚. 镁合金薄板焊接工艺及弧长控制: (硕士学位论文). 大连: 大连理工大学, 2004.
- [21] Munitz A., C. C., A. Stern,. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates. Materials Science and Engineer A, 2001, 302: 68-73.
- [22] Lockwood F. Automatic gas tungsten-arc welding of magnesium. Welding Journal, 1965, 44(5): 213-220.
- [23] Asahina T, Tokisue H. Some characteristics of TIG welded joints of AZ31 magnesium alloy. Journal of the Japan Institute of Light Metal, 1995, 19(1): 95-95
- [24] Asahina T, Tokisue H, Katoh K. Solidification crack sensitivity of TIG welded AZ31 magnesium alloy. Journal of the Japan Institute of Light Metal, 1999, 49(12): 595-599

- [25] Munitz A, Cotler C, Stern A, et al. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates. *Material Science and Engineering A*, 2001, 302(1): 68-73
- [26] Stern A, Munitz A. Partially melted zone microstructure characterization from gas tungsten-arc bead on plate welds of magnesium AZ91 alloy. *Journal of Materials Science Letters*, 1999, 18(11): 853-855
- [27] Marya M, Edwards G R, Liu S. An investigation on the effects of gases in GTA welding of a wrought AZ80 magnesium alloy. *Welding Journal*, 2004, 83(7):203-212
- [28] 苗玉刚, 刘黎明, 王继锋等. 镁合金薄板 TIG 焊自适应弧长控制. *焊接学报*, 2003, 24(6):33-36
- [29] Marya M. Theoretical experimental assessment of chloride effects in the A-TIG welding of magnesium. *Welding in the World*, 2002, 46(7-8):7-21
- [30] Marya M, Edwards G R. The effects of chloride fluxes on the gas tungsten arc welding of AZ31magnesium alloy. In: Dacocha J E, DuPont J N, Lienert T J, et al. *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research[C]*. Columbus Ohio: ASM, 2002: 398-403
- [31] 沈勇, 刘黎明, 张兆栋. 镁合金中厚板变极性等离子弧焊工艺. *焊接学报*, 2005, 26(6):1-4.
- [32] 刘黎明, 沈勇, 张兆栋. 镁合金变极性等离子弧焊接头的微观组织分析. *机械工程学报*, 2006, 46(2):198-202.
- [33] 沈勇. 镁合金变极性等离子弧焊及活性化焊接研究:(硕士学位论文). 大连理工大学, 2006.
- [34] 蒋健博, 刘黎明, 祝美丽, 沈勇. 镁合金小孔变极性等离子弧缝焊工艺. *焊接学报*, 2007, 28(5): 65-68.
- [35] Sun Z, P.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.
- [36] Zhu J H, L.L., Zhu L. CO₂ and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy. *Applied Surface Science*, 2005, 247:300-306.
- [37] 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, 12(6):327-330.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 于彦东, 张凯锋, 蒋大鸣等. MB15 超塑性镁合金扩散连接试验. *焊接学报*, 2003, 24, (1):64-68.
- [41] 吴安如, 夏长清, 王少武等. 搅拌摩擦焊接技术及其展望. *材料导报*, 2005, 19(4):85-88.
- [42] 张华, 吴林, 林三宝等. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊研究, 2004, 40(8):123-126.

- [43] 董长富, 刘黎明, 苗玉刚. 镁合金焊丝挤压成形过程挤压力的研究. 塑性工程学报, 2004, 11(3):35-38.
- [44] 金文中, 刘顺华, 刘黎明等. AZ61 镁合金焊丝的成形工艺及性能的研究和进展. 上海有色金属, 2004, 25(1):1-4.
- [45] 顾曾迪, 陈根宝, 金心溥. 有色金属焊接. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [46] Takahashi H, oishi Y, Wakamatsu K and Kawabe N. Tensile properties and bending formability of drawn magnesium alloy pipes. Materials Science Forum, 2003:419-422.
- [47] 陈振华. 变形镁合金. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [48] W. Lucas, D.S Howes. Activating flux increasing the performance and productivity of TIG and plasma processes. Welding and metal Fabrication, 1996, 6(1):11-17.
- [49] D.S.Howes, W. Lucas. Investigation into arc constriction by active fluxes for tangent inert gas welding. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(3):189-193.
- [50] Marya M, Edwardz G R. Chloride Contributions in Flux-Assisted GTA Welding of Magnesium Alloys. Welding Journal, 2002, 81(12): 291-298.
- [51] 张兆栋. 镁合金活性焊接研究:(博士学位论文). 大连:大连理工大学, 2007.
- [52] 杨春利, 牛尾诚夫, 田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(2)-活性化 TIG 焊接中的电弧现象. 焊接, 2000, (5):15-18.
- [53] 杨春利, 牛尾诚夫, 田中学. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(3)-活性化 TIG 焊接中的熔池表面张力测定. 焊接, 2000, (6):11-15.
- [53] 张瑞华, 樊丁, 尹燕. 低碳钢高效 TIG 焊的活性剂研制. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(4):8-10.
- [54] 樊丁, 黄勇. 铝合金交流 A-TIG 焊中活性剂和焊接参数对焊缝熔深的影响. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(3):6-9.
- [55] 张连锋, 李晓红, 杜欲晓. 钛合金活性焊剂氩弧焊接头组织分析. 焊接. 2006, (7):16-19.
- [56] Wilma Middel. Additives in GTA Welding. Netherlands Delft University of Technology. 2000, 23-32:84-89.
- [57] Mills K C, Keene B J. Factors affecting variable weld penetration. Int. Mat. Rev., 1990, 35(4):185-216.
- [58] Perry N, Marya S, Soutif E. Study and Development of Flux Enhanced GTA Penetrations in a Commercial Grade Titanium. In: Proceedings of 5th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, Georgia. 1988:520-525.
- [59] 刘凤尧, 杨春利, 林三宝等. 活性化 TIG 焊熔深机理的研究. 金属学报, 2003, 6(39):661-665
- [60] T. Shimizu, H. Terasaki et al. Effects of activating flux on arc gas tungsten arc welding. Science and Technology of Welding and Joining 2000, 5(6):397-402.
- [61] 《轻金属材料加工手册》编写组. 轻金属材料加工手册. 北京:冶金工业出版社, 1980.
- [62] P. Sahoo, M. M. Coollur and T. Debroy. Metall. Trans. B, 1988, 19B, 967-972.
- [63] 方开泰. 均匀设计及均匀设计表. 北京:科学出版社, 1994.

- [64] 王海松, 吴树雄. 均匀设计在不锈钢焊条配方设计中的应用. 肃工业大学学报, 1999, 25(3): 23-26.
- [65] 项可风, 吴启光. 试验设计与数据分析. 上海科学技术出版社, 1989.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

[1] 刘黎明, 蔡东红, 张兆栋, 祝美丽: 镁合金活性焊丝 TIG 焊接. 焊接学报, 2007, 28(4):29-32. (EI 检索) (第三章)

[2] L.-M. Liu, D.-H. Cai, Z.-D. Zhang. Gas tungsten arc welding of magnesium alloy using activated flux coated wire. scripta materialia 57 (2007) 695 - 698. (EI、SCI 检索) (第三章)

[3] L.-M. Liu, D.-H. Cai, Z.-D. Zhang. Magnesium alloy weld using manganese chloride coated wire. Science and Technology of Welding and Joining. 已录用. (SCI 刊源) (第五章)

致 谢

本课题的研究工作自始至终得到了刘黎明教授的悉心指导。在科研中，导师渊博的知识，严谨的治学态度，高效率的工作作风和敏锐的洞察力使我受益非浅；在生活上，导师更是给予了很大的关怀。正是由于导师的全力支持才使我顺利完成硕士阶段的学习和科研工作。在此论文完成之际，谨向关心和培养我的导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

在论文研究工作期间，本组的张兆栋老师，宋刚老师不但给予了理论上的指导和试验上的帮助，而且从生活、学习等诸多方面给予了照顾，在此表示诚挚的感谢！

感谢同学郝新锋、蒋健博、孙昊、谢龙在硕士课题中给予本人的大力协助，在学习、生活中给予本人的无私帮助。

感谢本组赵丽敏、黄瑞生、王红阳、张帆、徐荣正、任大鑫、单闯、杨崢山、王镇等学友在硕士课题间给予的帮助。

衷心感谢所有曾在学习、生活和工作中给予我关心、支持和帮助的老师、同学和朋友。