

单一及复合氧化物活性剂对镁合金 A-TIG 焊的影响

马 翔^{1,2}, 张兆栋¹, 刘黎明¹, 刘景和²

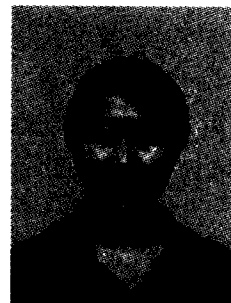
(1. 大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室及材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 长春理工大学 材料科学与工程学院光电信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

摘 要: 以 AZ31B 变形镁合金为材料, 采用五种单一氧化物 MgO , Cr_2O_3 , CaO , TiO_2 , MnO_2 进行混合配制得到复合配方。比较了无活性剂、涂敷单一 TiO_2 活性剂和复合活性剂的焊缝熔深、接头金相组织、相组成及力学性能。结果表明, 熔深达到最大的复合活性剂比常规 TIG 焊增加 2.5 倍左右, 也比单一活性剂的熔深增加效果明显, 同时其焊缝中晶粒比单一 TiO_2 活性剂的晶粒细小, 焊缝的抗拉强度比单一 TiO_2 活性剂的高。经 XRD 分析复合配方中活性元素的加入改善了焊缝的相组成, 避免了接头低熔点镁铝化合物脆性相的形成。

关键词: 镁合金; 活性剂; 均匀设计**中图分类号:** TG403 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2007)09-039-04

马 翔



0 序 言

镁合金由于具有密度小、比强度高、导热性好和可回收等特点, 在航空、航天、汽车和电子通讯等行业中得到广泛的应用^[1]。由于变形镁合金具有更高的强度、更好的塑韧性和优良的综合力学性能, 更适合于制作结构件, 在实际应用中必然会采用连接结构, 因此镁合金的连接技术也备受关注^[2]。活性化焊接技术(A-TIG)在提高焊接效率方面具有较高的研究价值, 因此镁合金的活性化焊接技术也引起了广泛的关注。

目前国内外对活性剂的研究主要集中在单一活性剂上, Marya 研究了单一氯化物活性剂对 AZ31 镁合金的焊接^[3]。文献[4]对涂敷单一氯化物和涂敷单一氧化物对 AZ31 镁合金的熔深增加机理进行了研究, 而对复合配方的活性焊试验研究较少。鉴于氯化物不仅有腐蚀性而且毒性较大, 在焊接过程中易吸水受潮, 因此要考虑用氧化物作为活性剂进行焊接。

通过采用均匀设计法进行五种氧化物的混合配方设计, 然后对混合配方进行优化设计, 最终得到综合效果较好的镁合金活性剂复合配方。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验采用尺寸为 50 mm × 50 mm × 5 mm 的 AZ31B 变形镁合金板材。其化学成分如表 1 所示。选用五种氧化物 MgO , Cr_2O_3 , CaO , TiO_2 , MnO_2 作为活性剂。

表 1 AZ31B 变形镁合金板材的化学成分(质量分数, %)**Table 1** Chemical composition of base metal

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	余量

1.2 试验方法

1.2.1 单组分活性剂的配制

将 MgO , Cr_2O_3 , CaO , TiO_2 , MnO_2 活性剂粉末烘干, 充分研磨后用精度为 0.01mg 的电子天平各称取 5 g, 与一定量的丙酮混合后作为活性剂备用。

1.2.2 均匀设计法配制多组分活性剂

运用均匀设计法中的配方设计, 以五种单一氧化物活性剂为组元, 选取 $U_{21}^*(21^5)$ 设计表, 采用自行编制的 C 语言程序计算得到 21 组多组元活性剂配方, 用电子天平按各组分分配比称取重量为 5g 的复合配方, 并与一定量的丙酮混合后作为活性剂备用。

1.2.3 焊接过程

焊接前将镁合金板材表面用细砂纸和钢丝刷仔
细清理干净,然后分别将单一的五种氧化物和 21 种
复合活性剂涂敷到板材的表面,涂敷宽度为 40 mm
左右,采用交流自动氩弧表面堆焊。试验中采用的
焊接工艺参数为:焊接电流 100 A,弧长 2 mm,保护
气流量 10 L/min,焊接速度 350 mm/min,电极直径
2.5 mm。

2 试验结果与分析

2.1 丙酮的容量对涂敷单一活性剂增加熔深的影响

试验发现在涂敷活性剂的过程中涂敷量的可控
性差。在试验中为了保证试验的准确性和可操作
性,先任取一种单一氧化物活性剂的溶质质量 5 g,
在溶质质量不变情况下改变丙酮的容量,则得到不
同浓度的混合液,每次都用胶头滴管分别取 3 滴不
同的混合液涂在镁板上,如上操作其余四种单一氧
化物活性剂,这样保证了当五种单一氧化物活性剂
与相同的丙酮容量混合后,涂敷后丙酮挥发则留在
镁板上的溶质是相同的,从而达到了涂敷量的可控
性。涂敷后在相同的焊接工艺参数条件下进行焊
接。试验结果如图 1 所示。从图中可以看出当丙酮
容量在 25 ~ 35 mL 时涂敷五种单一氧化物增加熔深
效果均较为明显,因此在后续试验中采用丙酮 30
mL 配制活性剂,并从混合液中用胶头滴管取 3 滴涂
敷在镁合金表面。

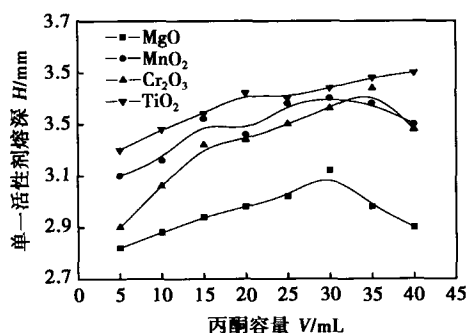


图 1 配制混合液与涂敷活性剂后增加熔深的关系

Fig.1 Relationship between mixture and welding penetration with fluxes

2.2 熔深达到最大的复合活性剂的选择

试验采用自行编制的 C 语言程序进行试验设
计,试验指标为 1 项(熔深增加比),试验因素为
MgO, Cr₂O₃, CaO, TiO₂, MnO₂ 的质量分数;试验的运
行次数为 21 种不同的混合配方质量分数^[5]。采用

的设计表为 $U_{21}^*(21^5)$, 偏差 $D = 0.1442^{[6]}$ 。试验结
果采用逐步分析法进行回归分析,以验证各组元的
可信性,经验证各组元的可信度为 98%, 然后进行
试验优化设计。最后得出增加熔深效果较好的配方
为第 16 组,第 5 组,第 21 组,再比较采用这三组复
合配方得到的焊缝成形,最终确定第 16 组复合配方
为较满意的复合配方,其中 MgO 7.3%, Cr₂O₃ 9.7%,
CaO 11.7%, TiO₂ 58.6%, MnO₂ 12.7%。图 2 为涂敷
第 16 组复合活性剂焊缝的外观形貌。从图中可以
看出焊缝的表面成形良好,波纹较细腻。



图 2 涂敷第 16 组复合活性剂的外观形貌

Fig.2 Appearance of weld of 16th group compound flux

2.3 涂敷单一活性剂及第 16 组复合活性剂对镁合金 TIG 焊接的影响

2.3.1 熔深增加的分析对比

图 3 为涂敷单一活性剂与第 16 组复合活性剂
后的焊接熔深比较,从图中可以看出与未涂活性剂
的熔深相比较,涂敷单一活性剂后焊接熔深也都有
所增加,但涂敷第 16 组复合活性剂后焊接熔深增加
最大,是未涂活性剂熔深的 2.5 倍。其次是涂敷单
一活性剂 TiO₂ 增加熔深较大,是未涂活性剂熔深
的 1.82 倍,而涂敷单一活性剂 MgO 增加焊接熔深最
小,仅为 1.14 倍。

2.3.2 焊缝组织特征分析对比

图 4 为涂敷第 16 组复合活性剂与涂敷熔深达
到较大的单一 TiO₂ 活性剂的焊缝组织。从图 4a, b
中可以看出两者在焊缝的熔合线、焊缝中心处的组
织形貌有所差异,图 4a 中的热影响区的晶粒比图 4b
中的热影响区的晶粒粗大,图 4a 中近热影响区组织
明显呈柱状晶,而图 4b 中的近热影响区组织呈柱状
晶不明显。

从图 4c, d 为涂敷 TiO₂ 和第 16 组复合活性剂的
焊缝中心的金相组织,从中可以看出图 4d 中的晶粒
比图 4b 的晶粒细小;并且还可以看出在图 4c 中的
组织中含有大量的树枝状晶,而图 4d 组织中树枝状
晶数量减少,粒状共晶组织的数量增加。经电 子探
针面扫描发现涂敷第 16 组复合活性剂的焊缝中有
Cr 元素的存在,如图 5 所示。因此涂敷复合活性剂
之所以晶粒得以细化,原因可能是由于涂敷复合活

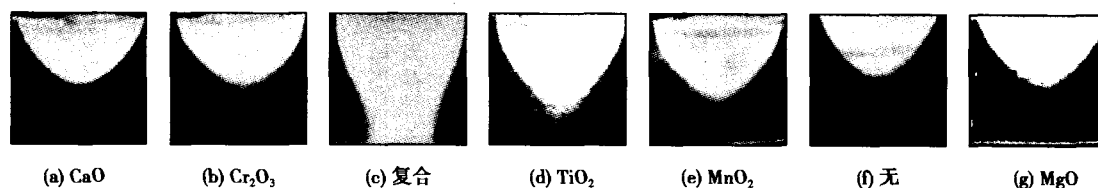


图 3 涂敷单一活性剂与第 16 组复合配方的熔深对比

Fig.3 Comparison of welding penetration of single flux and 16th group compound fluxes

性剂中各种氧化物的金属元素的原子大小不一,在电弧作用下进入熔池中阻碍晶核的生长,增加了形核率,从而使晶粒细化。

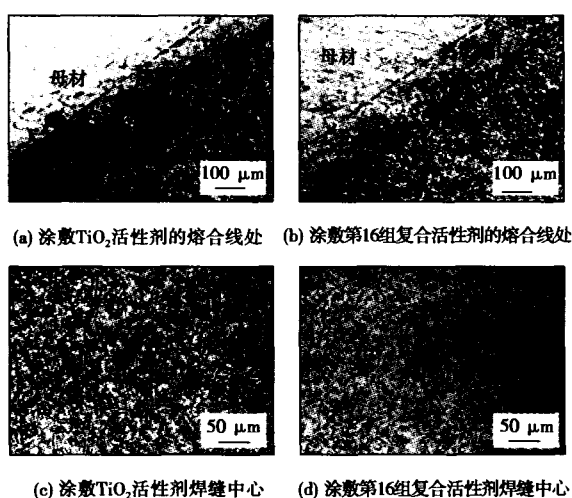


图 4 涂敷第 16 组的复合活性剂与 TiO_2 活性剂的组织比较
Fig.4 Comparison of microstructures of TiO_2 flux and 16th group compound fluxes

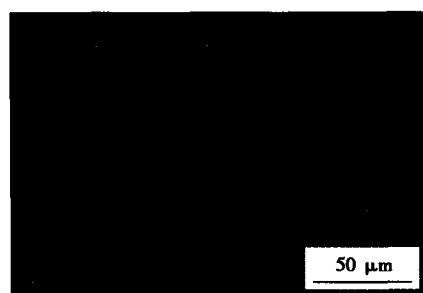


图 5 涂敷第 16 组的复合活性剂焊缝 Cr 元素分布
Fig.5 Distribution of Cr in weld of 16th group compound fluxes

从图 4d 的金相照片中可以看出,组织中有大量的黑色点状物质,由于成像原理的不同,这些点状物质在扫描电镜(SEM)下呈白色,并且呈规则的圆柱状或圆形,如图 6 所示。用扫描电镜能谱分析

(EDS)这些白色物质的成分(EDS 能谱分析取点位置如图 6 中 A, B 所示),发现这些物质的主要元素为 Mg, Al, Zn, Mn。与基体相比 Mg 元素的含量由 93.97% 下降 83.36%, Mn 元素的含量增多,如图 7 所示。Mn 元素的存在尤其以合金形式的存在都会提高镁合金的韧性,改善镁合金的性能,因此这些点状物质中 Mn 含量的增加对镁合金性能的改善起一定的效果。

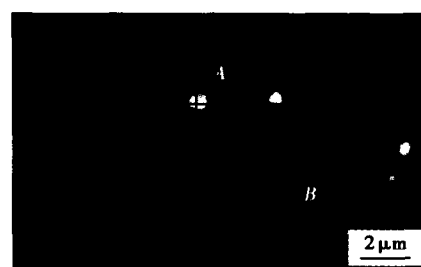


图 6 复合配方中的点状物质
Fig.6 Core dots in compound oxide

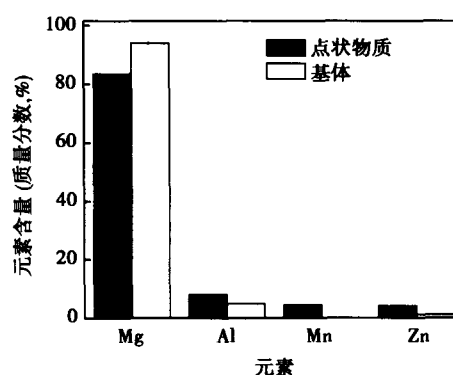


图 7 基体与白点中元素的含量
Fig.7 Content of element in base material and white dot

2.3.3 焊接接头元素分析对比

为了进一步认识焊缝中化合物相的组成,对涂敷单一活性剂 TiO_2 的试样和 16 组复合活性剂的试样进行了 XRD 分析,如图 8 所示。图 8a 中发现涂敷单一 TiO_2 活性剂的试样存在 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 化合物相,

而图 8b 涂敷复合活性剂中只有镁的单相组织。由于 $Mg_{17}Al_{12}$ 是低熔点化合物易偏析于晶界^[7], 因此在应力的作用下易形成热裂纹使镁合金的性能降低, 说明复合活性剂的加入在一定程度上改善了焊缝的相组成, 避免了接头脆性相的存在。在扫描电镜下观察到的复合活性剂中的元素 Mn, Al, Zn 并没有以化合物的形式存在, 只是以质点的形式固溶于镁合金中, 这样可以提高镁合金的性能。

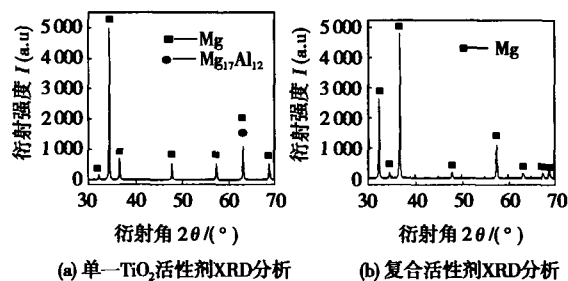


图 8 涂敷单一氧化物和第 16 组复合活性剂的 XRD 分析
Fig.8 XRD analysis of single oxide flux and 16th group compound fluxes

2.3.4 力学性能分析对比

用 CSS-2205 型电子万能试验机对涂敷单一 TiO_2 活性剂的试样和涂敷 16 组复合活性剂的试样进行了焊接接头横向拉伸试验, 拉伸速度为 3 mm/min。(抗拉强度取 3 个试样的平均值)。试验结果如表 2 所示。

表 2 焊接接头抗拉强度
Table 2 Tensile strength of welded joint

拉伸试件	抗拉强度 R_m/MPa	断裂位置
母材	256	中央
X	216	焊缝
Y	233	热影响区

注: X 为涂敷单一活性剂 TiO_2 的拉伸试样; Y 为涂敷熔深达到最大的复合配方的拉伸试样

从表中可以看出涂敷单一活性剂 TiO_2 试样的抗拉强度约为母材的 84.4%; 涂敷第 16 组复合活性剂试样的抗拉强度约为母材强度 90.5%。试样拉伸后发现涂敷单一 TiO_2 活性剂试样在焊缝处断裂,

而涂敷 16 组复合活性剂的试样在热影响区断裂, 这主要因为涂敷第 16 组复合活性剂的焊缝中心组织的晶粒细化明显, 细小的组织提高了材料的塑性、韧性等力学性能, 所以试样不容易在焊缝处断裂; 而涂敷单一活性剂 TiO_2 的试样焊缝处晶粒较粗大, 再者由于焊缝晶界处有脆性相 $Mg_{17}Al_{12}$ 化合物的偏析, 因此焊缝处易形成裂纹而引起试样断裂。

3 结 论

(1) 采用均匀设计法进行镁合金活性剂复合配方设计, 在文中试验条件下得到了熔深达到最大的活性剂配方, 其焊缝熔深比常规的 TIG 焊增加 2.5 倍左右; 也比单一活性剂的熔深增加效果明显。

(2) 熔深达到最大的复合活性剂的焊缝中晶粒比单一 TiO_2 活性剂的晶粒细小, 其焊缝的抗拉强度比涂敷单一 TiO_2 活性剂的好。

(3) 经 XRD 分析复合活性剂的加入在一定程度上改善了焊缝的相组成, 避免了接头脆性相的形成。

参考文献:

- [1] 陈振华. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 张 津, 章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] Marya M. Theoretical and experimental assessment of chloride effects in the A-TIG welding of magnesium[J]. Welding in the World, 2002, 46(8): 7-21.
- [4] 刘黎明, 张兆栋, 沈 勇, 等. 活性剂对镁合金 TIG 焊接熔深的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(4): 399-404.
- [5] 樊 丁, 黄 勇, 张瑞华, 等. 均匀设计法在铝合金 A-TIG 活性剂配方研制中的应用[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(2): 48-53.
- [6] 方开泰. 均匀设计及均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [7] Wohlfahrt H, Rethleimeier M, Bouaifi B, et al. Metal-inert gas welding of magnesium alloys[J]. Schweissen und Schneiden/Welding and Cutting, 2003, 55(2): 80-84.

作者简介: 马 翔, 女, 1981 年出生, 硕士研究生。主要研究镁合金的 A-TIG 焊。已发表论文 2 篇。

Email: liulm@dlut.edu.cn