

填充材料对镁合金 TIG 焊接头组织与性能的影响^{*}

谭兵,陈东高,明珠,王有祁

(中国兵器科学研究院 宁波分院,浙江 宁波 315103)

摘要:利用 AZ31、AZ61 两种焊丝对 10 mm 厚的 AZ31B 镁合金进行 TIG 焊。使用光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪等分析两种焊丝焊接的接头外观形貌、显微组织、元素分布和焊缝物相等。结果表明:采用两种焊丝都能获得成形美观、无明显缺陷的焊接接头,采用 AZ31 焊丝焊接的接头形貌更优于 AZ61 焊丝;采用 AZ61 焊丝焊接的焊缝晶界上有 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相产生,采用 AZ31 焊丝时没有;采用 AZ31 焊丝获得的接头硬度最高处位于母材区,而采用 AZ61 焊丝获得的接头硬度最高处位于焊缝区;采用 AZ61 焊丝获得的接头强度比 AZ31 焊丝的接头强度高 20%。

关键词:镁合金;TIG 焊;微观组织;力学性能

中图分类号: TG403

文献标识码: A

文章编号: 1004-244X(2008)06-0041-04

Effect of welding wire on the microstructure and properties of Mg alloy joint by TIG

TAN Bing, CHEN Dong-gao, MING Zhu, WANG You-qi

(Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

Abstract: The 10 mm thick AZ31B alloy is welded with AZ31 and AZ61 welding wires by TIG method. The appearance, the microstructure, the profile of the alloy elements and the patterns of welded joint with two type welding wires were analyzed by means of OM, SEM, X-ray diffraction, and etc. The result showed that the appearance was perfect with AZ31 and AZ61 welding wire, and the appearance of joint welded with AZ31 welding wire was better than with AZ61 welding wire. $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ compound existed in crystal interface of welding line welded with AZ61 welding wire, but didn't with AZ31 welding wire. The highest hardness was in welding line with AZ61 welding wire, but in base metal with AZ31 welding wire. The strength of weld joint welded with AZ61 welding wire was 20% more than that welded with AZ31 welding wire.

Key words: magnesium alloy; TIG; microstructure; mechanical property

镁合金具有密度小、比强度和比刚度高、减震性好和导热性优良等特点,并且具有较好的可切削性和可回收性^[1-2],在构件减重上具有重要意义,因此它在汽车、摩托车、航空航天等领域有巨大的应用前景。而镁合金作为一种新型的高性能结构材料,在实际应用中不可避免地采用连接技术,而焊接无疑是优先选择的连接方法之一。但镁合金的熔点低,线膨胀系数和热导率高,与氧、氮的亲合力强,焊后易形成夹杂和脆性相,易产生焊接变形和热裂纹,使焊接接头的力学性能下降,因此,焊接问题已成为制约镁合金构件广泛应用的障碍之一。

钨极气体保护焊相比其它的焊接方法,如 FSW^[3]、激光焊^[4]、激光-电弧复合焊^[5]等具有更大的灵活性和结构适应性,因此是目前镁合金焊接最常用的一种焊接方法。虽然镁合金具有较高的比强度,但由于它的强

度和刚度较低,因此从实际结构件性能考虑,应用中厚度的板材是其发展的必然趋势。作者以 10 mm 厚的 AZ31B 变形镁合金作为研究对象,采用对比性的分析方法,研究 AZ31 与 AZ61 两种填充材料焊接的接头组织和性能。通过本研究为中厚度镁合金的研究、应用提供理论基础和应用技术依据。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验用焊接母材为退火状态的 AZ31B 变形镁合金,尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm,焊接用的填充材料为 $\Phi 2.4$ mm 的 AZ31、AZ61 镁合金焊丝,焊丝采用挤压工艺制备,化学成分见表 1。焊机为焊王 Invert WSE-315P 氩弧焊机,采用气体的质量分数为 99.99%

^{*} 收稿日期:2008-04-08;修回日期:2008-06-19

作者简介:谭兵(1979—),工程师;主要从事高强钢、高强铝合金、镁合金材料的焊接研究工作。E-mail:tan-1@sina.com。

的氩气。

1.2 试验方法

试验接头为平对接接头，采用单面焊双面成型的焊接工艺，焊前固定两水平板，板间预留 3 mm 间隙，点焊两端部，焊接工艺参数采用工艺优化后的参数，如表 2 所示，焊缝背部采用氩气保护。

焊后对焊接接头的外观形貌、微观组织、焊缝物相、元素分布及力学性能进行检测，接头的力学性能取样分别在焊缝前端、中央、尾部各取 1 个试样，接头硬度检测分别在焊缝区、热影响区及母材区测量三点。

表 1 焊丝与板材的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and welding wire (mass fraction/%)

牌号	Al	Zn	Mn
AZ61 焊丝	5.923	1.341	0.444
AZ31 焊丝	3.201	1.284	0.356
AZ31B 板材	2.5~3.5	0.5~1.5	0.2~0.5

牌号	Fe	Cu	Si	Mg
AZ61 焊丝	0.002	0.002	0.015	balance
AZ31 焊丝	0.001	0.001	0.010	balance
AZ31B 板材	0.04	0.10	0.05	balance

表 2 焊接工艺参数

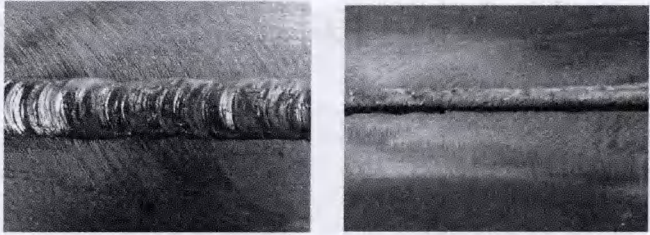
Table 2 Parameters of welding technology

焊丝 型号	焊道	焊接电流/ A	基值电流/ A	电弧长 度/mm	气流量/ (L·min ⁻¹)	焊接速度/ (mm·min ⁻¹)
AZ31	打底	120~140	100~110	2~4	6~12	65
	封面	130~150	100~110	2~4	6~12	35
AZ61	打底	120~140	100~110	2~4	6~12	67
	封面	130~150	100~110	2~4	6~12	40

2 试验结果及分析

2.1 焊缝外观形貌检测与分析

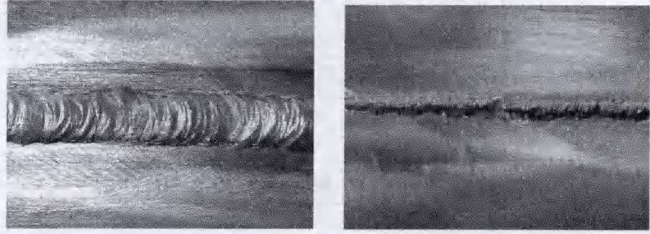
图 1、2 为采用两种填充材料焊接的焊缝正面、背部形貌。由图显示，两种焊缝正面成形美观，无气孔、裂



a—正面形貌 b—背部形貌

图 1 采用 AZ31 焊丝焊接的焊缝外观形貌

Fig.1 Appearances of welded joint with AZ31 welding wire



a—正面形貌 b—背部形貌

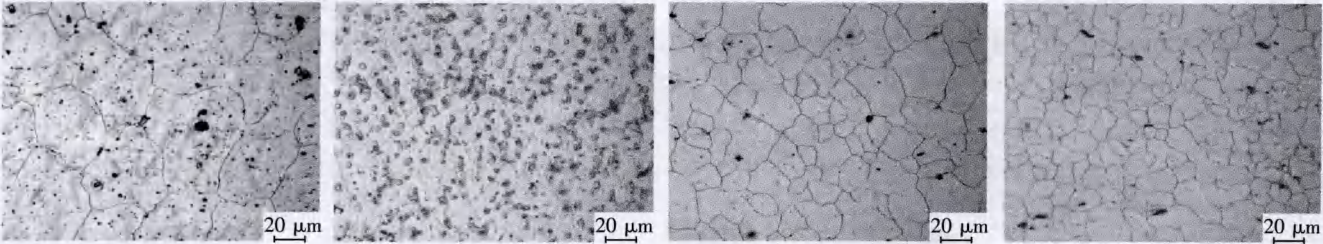
图 2 采用 AZ61 焊丝焊接的焊缝外观形貌

Fig.2 Appearances of welded joint with AZ61 welding wire

纹、焊瘤、未熔合等表面缺陷存在，背部无明显的氧化现象，说明采用背部气体保护能获得成形较好的背部焊道。对比两种焊缝的正面、背部的外观形貌，采用 AZ31 焊丝焊接的焊缝形貌更加美观，背面熔透效果更好。

2.2 焊接接头微观组织检测与分析

图 3a、b 为采用 AZ31 焊丝焊接的接头微观组织，由图显示，在打底焊的晶界和晶粒上无明显的析出相，在封面焊的晶粒上存在灰色片状颗粒。片状颗粒产生主要因为在高温时 Al 在 Mg 中的溶解度较高，而随温度的降低溶解能力下降，会出现过饱和，在时效温度以上时，这种过饱和固溶体会直接析出稳定性较高的 β - $Al_{12}Mg_{17}$ 相^[6]。在打底焊时，试板未预热，焊缝冷却速度过快，造成过饱和固溶体析出量极少，而在封面焊时，由于焊缝及试板已受热，焊缝冷却速度较小，增加了该相的析出时间。对比焊缝区、热影响区与母材区的晶粒尺寸，其中焊缝区最大，为 7~8 级，母材区最小，为 3~4



a—打底焊焊缝组织 b—封面焊焊缝组织 c—热影响区组织 d—母材组织

图 3 采用 AZ31 焊丝焊接的接头组织

Fig.3 Microstructures of weld joint welded with AZ31 welding wire

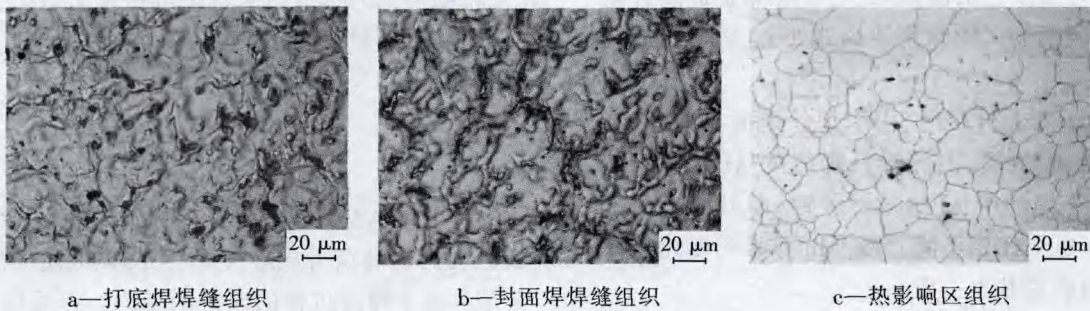


图4 采用 AZ61 焊丝的接头组织

Fig.4 Microstructures of weld joint welded with AZ61 welding wire

级,热影响区晶粒比母材区大,为典型的过热组织。因为厚板镁合金焊接时,由于导热快,焊接所需的热输入量大,从而导致焊缝和热影响区晶粒粗大。

图 4a,b 为采用 AZ61 焊丝焊接的接头组织图,由图显示,在封面焊的晶粒上也存在有析出物,产生该析出物的原因与上面分析的原因类似,都是由于封面焊时试板已预热减小了焊缝冷却速度,从而利于过饱和固溶体析出。检测焊缝区与热影响区的晶粒尺寸,晶粒度级别与 AZ31 焊丝获得的焊缝、热影响区的基本相同,这说明改变焊丝成分,未影响到焊缝晶粒尺寸,如图 3c,4c 所示。在打底焊和封面焊的晶界上都有析出相,这是因为采用 AZ61 焊丝作为填充物时,熔池中的 Al 合金含量较大,从而更利于 Al 富集于晶界上,并与 Mg 形成化合物析出在晶界上。

2.3 焊缝物相检测与分析

图 5 为 AZ31 焊丝、AZ61 焊丝焊接的焊缝 X-ray 衍射分析图,从中可见,采用 AZ31 焊丝焊接的焊缝主

要有 α -Mg、Al 两种相成分,采用 AZ61 焊丝焊接的焊缝主要为 α -Mg、Al、 $Al_{12}Mg_{17}$ 三种相。根据 Al-Mg 二元相图知^[7],在平衡凝固过程中,温度为 710 K 时 Al 在 Mg 中的最大固溶度为 12.6%,采用 AZ61 焊丝焊接时,虽然熔池中的 Al 未达到最大溶解度,但冷却速度较快,实际固相线相对平衡条件下的固相线向左下移动,造成晶界上 Al 富集,这些 Al 与 Mg 化合成 γ - $Al_{12}Mg_{17}$ 相^[8],这与图 4a 晶相分析结果一致,在晶界存在较多的析出相。而采用 AZ31 焊丝焊接时,熔池中的 Al 元素含量过低,虽然焊接过程中熔池 Al 元素存在一定的非平衡凝固现象,但这种非平衡凝固不致于使较多 Al 元素富集在晶界并以 γ - $Al_{12}Mg_{17}$ 相存在,因此在图 3a 的晶界上未见到析出相。虽然在图 3b 的晶粒上存在 β - $Al_{12}Mg_{17}$ 固溶析出相,但由于量特别低,因此 X-ray 衍射仪未能检测出。

2.4 接头元素检测

采用 X 射线能谱分析仪(EDX)对焊接接头进行化学成分分析,分析的结果如表 3 所示。由测量结果显示,在采用 AZ31 焊丝焊接的焊缝中,Al、Zn、Mn 元素的质量分数高于热影响区的质量分数,并且在界面处 Zn 的质量分数高于焊缝中央的质量分数。由于在焊接过程中,高温熔池中的镁蒸发比较严重,而 Al、Mn 沸点都较高,并且它的含量也较低,因此蒸发的量较少,从而造成焊缝中镁的蒸发损失引起 Al、Mn 的相对含量升高;Zn 元素除了由于 Mg 元素的蒸发造成相对含

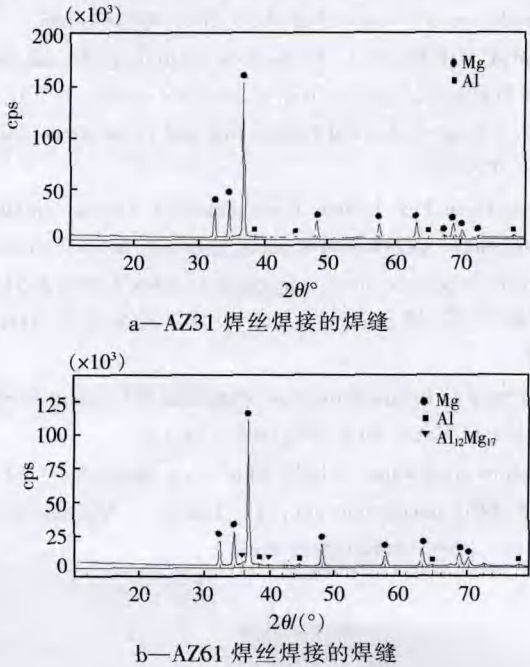


图5 焊缝 X-ray 衍射分析图
Fig.5 XRD patterns of welding joint

表 3 两种焊接接头的 EDX 分析结果(质量分数/%)
Table 3 Results of EDX(mass fraction/%)

焊丝类型	位置	Mg	Al	Zn	Mn
AZ31	热影响区	92.71	3.76	1.49	0.48
	焊缝界面区	92.54	3.99	1.61	0.55
	焊缝中央区	92.50	4.01	1.55	0.68
AZ61	热影响区	93.56	3.09	1.53	0.56
	焊缝界面区	90.90	5.83	1.47	0.70
	焊缝中央区	89.65	6.84	1.38	0.80

量增加外,另外由于它的沸点低,它自身蒸发造成含量下降,这两种因素的共同作用使焊缝处 Zn 的质量分数降低较少。

采用 AZ61 焊丝焊接时,由于焊丝中的 Al 含量较高,再加上 Mg 的蒸发,因此焊后焊缝的 Al 元素比例最大,并且高于焊丝中 Al 的质量分数,而界面上由于母材溶解稀释造成比例下降。Zn、Mn 元素的变化规律与上面分析的机理基本一致。

2.5 接头硬度检测与分析

表 4 为焊接接头的维氏硬度值,通过比较各区域的硬度均值,采用 AZ31 焊丝焊接的焊缝区硬度值最低,其次是热影区;而采用 AZ61 焊丝焊接的焊缝区硬度最高,热影响区硬度最低。由于采用 AZ31 焊丝焊接焊缝组织存在晶粒粗大、气孔等问题,从而使焊缝组织低于轧制得到的组织,造成了焊缝硬度最低。而采用 AZ61 填充材料时,虽然在焊缝中会产生气孔、疏松等缺陷,但由于 AZ61 材料本身硬度值要远高于基体材料的硬度值,因此焊缝硬度高于母材;而热影响区由于焊接热作用使母材晶粒粗大,从而该区域硬度低于基体的硬度。

2.6 接头强度检测与分析

表 5 为焊接接头力学性能的测试结果,第二个力学性能值来自接头中央,强度值高于焊缝两端的接头强度值,所有试样断裂于焊缝处。通过对比,采用 AZ61 焊丝焊接的接头强度比采用 AZ31 焊丝焊接的高 20%,但小于母材强度值。在焊接过程中由于 AZ61 填充材料的加入,增加了焊缝中的强化相成分,从而提高了焊接接头的性能,但由于焊缝晶界上产生了脆性相,

并且轧制得到的母材组织优于焊接接头组织,使得焊缝强度低于母材强度。

3 结 论

1) 采用 AZ31 焊丝焊接的接头形貌优于 AZ61 焊丝,但它们都能获得成形美观、无明显缺陷的焊缝。

2) 由于焊接过程的非平衡凝固,在采用 AZ61 焊丝焊接的焊缝晶界上存在 $Al_{12}Mg_{17}$ 相,并且在封面焊的晶界上有更多的该析出相,而采用 AZ31 焊丝焊接的焊缝晶界上未存在 $Al_{12}Mg_{17}$ 相。

3) 采用两种焊丝焊接的焊缝元素都有一定的烧损,并且由于镁元素的烧失引起焊缝中的 Al、Mn 元素相对含量增加。

4) 采用 AZ31 焊丝焊接的焊缝硬度最低,基体最高,而采用 AZ61 焊丝焊接的焊缝硬度最高,而热影响区最低;采用 AZ61 焊丝所焊接的焊缝强度比采用 AZ31 焊丝的焊接的接头强度高 20%。

参考文献:

[1] Mordike B L, Ebert T. Magnesium properties applications potential[J]. Material Science and Engineering, 2001, A302:37-45.

[2] Jacques R P, Dasgupta R. Hot chamber diecasting of magnesium alloy AM50A for automotive interior structural components[M]. Society of Automotive Engineers, 1996:15-22.

[3] Park S H C, Sato Y S, Kokawa H. Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test[J]. Scripta Materialia, 2003, 49: 161-166.

[4] Marya M, Edwards G R. Factors controlling the magnesium welding morphology in deep penetration welding by CO₂ laser [J]. Journal of Material Engineering and Performance, 2001, 10 (4):435-444.

[5] Song Gang, Liu Liming, Wang Peichong. Overlap welding of magnesium AZ31B sheets using laser-arc hybrid process [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 429:312-319.

[6] 陈振华,等. 镁合金[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:39-44.

[7] Murray J L. Binary alloy phase diagrams[M]. American Society of Metals, Metals Park, OH, 1986: 129-130.

[8] Asahina, Toshikatsu. Solidification crack sensitivity of TIG welded AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Institute of Light Metals, 1999, 49(12):595-599.

表 4 焊接接头布氏硬度值

Table 4 Hardness distributions of welded joint

检测区域	AZ31 HV				AZ61 HV			
	1	2	3	均值	1	2	3	均值
焊缝区	51.7	52.2	53.1	52.3	56.6	56.1	56.5	56.4
热影响区	52.7	53.9	53.4	53.3	51.5	53.4	52.9	52.6
基体	53.4	55.0	55.7	54.7	53.0	55.0	55.4	54.5

表 5 焊接接头抗拉强度

Table 5 Tensile strength of welded joint

填充材料				MPa
	1	2	3	
AZ31	160	180	175	172
AZ61	210	215	195	206