

最佳的焊接工艺规范,并对后续的焊接接头显微组织特征及其对力学性能的影响进行了分析。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及设备

试验选用厚度为 6 mm 的 AM50 镁板作为母材,供货状态为挤压成型,所选用的焊丝与母材为同一材质,焊丝规格为 5 mm×3 mm×2 mm,合金成分如表 1 所示。

表 1 AM50 镁合金的化学成份(w)

Tab.1 Chemical composition of AM50

magnesium alloy(w)										%
Al	Zn	Mn	Cu	Si	Re	Ni	Fe	Mg		
4.5~5.3	0.20	0.28~0.50	0.008	0.05	-	-	-	其余		

试验采用纯度为 99.9% 的氩气作保护气体,非熔化极选用铈钨极,直径为 2 mm。试验设备采用交流钨极氩弧焊机,焊机型号为 NSA-500-1。焊

炬装夹在小车上,通过小车的运动带动焊枪移动,从而实现整个焊接。整个焊接过程为半自动化,人为手动送丝。为防止焊接过程中温度过高烧毁枪体,采用水冷系统,并用石棉包住焊炬下部以实现绝热。

1.2 试验方法

为得到高质量的焊缝,避免将杂质引入焊缝,焊前应对镁合金表面的氧化膜和油污进行彻底清理。对于母材,采用机械方法——砂轮清理表面。并开 V 字型坡口,使母材坡口周围露出白色金属光泽,对于焊丝,采用化学清理的方法:清水清洗→600 号砂纸打磨→30% 铬酐溶液 + 70% HNO₃ 水→丙酮清洗→冷风吹干。试件两端用夹具固定,下面放置冷却垫板。

试验采用对接方式对镁板实现 TIG 焊接,初选工艺参数见表 2。用同一镁板上的试件制成拉伸试样和金相试样,并对其抛光腐蚀。先后进行拉伸试验、硬度试验、接头处的显微组织形貌分析以及焊缝的相组成分析。

表 2 初选焊接工艺参数

Tab.2 Initially selected welding parameters

焊接电流	焊接速度	气流量	喷嘴直径	钨极直径	电弧长度
A	(mm·s ⁻¹)	(L·min ⁻¹)	mm	mm	mm
70~110	3~10	5~12	8~10	1,2	<3

2 试验结果及分析

2.1 焊接工艺参数对焊缝成形性的影响

2.1.1 焊接电流的影响

研究证明,当焊接电流很小时,由于能量不集中,电弧发散,导致试件不容易被焊透,形成液态熔池缓慢,焊缝成型性较差;同时焊炬不易被抬高,造成添丝困难,而且容易夹钨。随着电流逐渐增大,焊缝成型性越来越好,当电流很大时,能量集中,试件熔化加快,由于焊接过程中看不到熔池的颜色变化,所以如果控制不好,很容易烧穿,如果继续提高焊接电流,热影响区宽度增加,易产生热裂纹等缺陷。

图 1、图 2 是焊接速度为 6 mm/s,氩气流量为 7 L/min 条件下焊接电流对熔深、熔宽的影响,并在相同条件下与 AZ31 镁合金进行了对比。从图 1 和图 2 可以看出,随着焊接电流的增加,两种材料焊缝的熔宽、熔深均增大。而且 AM50 镁合金增大的更快一些,对电流敏感性更强一些,因此更容易产生热裂纹。

2.1.2 焊接速度的影响

研究证明,当焊接速度很小时,随着焊接电流

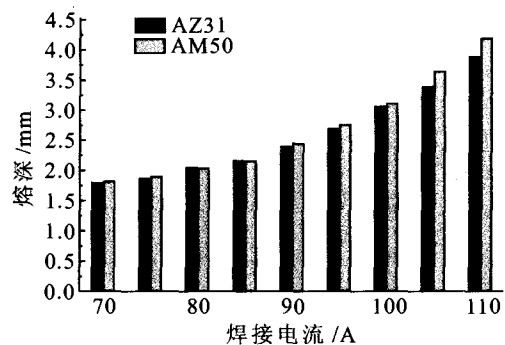


图 1 焊接电流与熔深的关系

Fig.1 Dependence of penetration on welding current

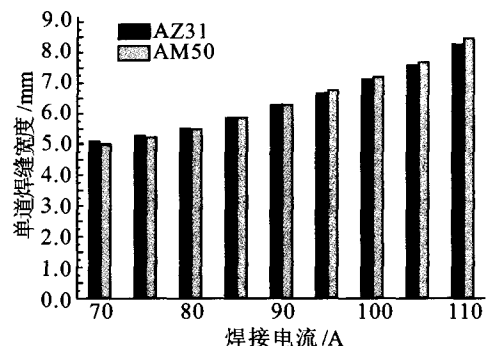


图 2 焊接电流与单道焊缝宽度的关系

Fig.2 Dependence of weld width on welding current

的逐渐增大,由于没有显著的颜色变化,熔池在液态停留时间增长,导致焊接接头软化而产生下塌现象,所以应适当减小电流;当焊接速度很大时,焊接热源在试件同一位置停留时间变短,此时如果焊接电流不够大,试件无法充分吸收热量,熔池还没完全形成,热源已经被移走.试件出现未熔合现象.因此焊接速度与所选择的焊接电流有交互作用.考虑到镁合金散热快的特点,必然有一部分能量要发生损耗,所以在焊接时要采用较大的焊接电流,并有较大的焊接速度与之相匹配.

图3和图4是焊接电流为90 A、氩气流量为6 L/min条件下,焊速对熔宽及熔深的影响.并在相同条件下与AZ31镁合金进行了对比.

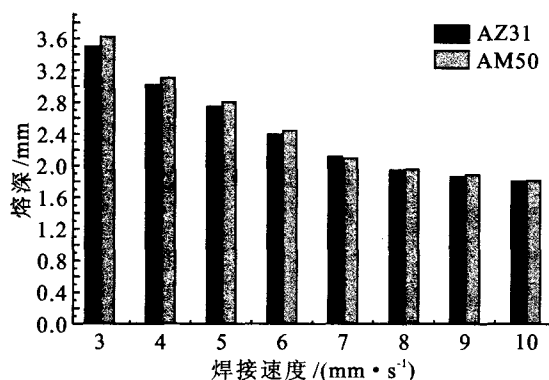


图3 焊接速度与熔深的关系

Fig.3 Dependence of penetration on welding speed

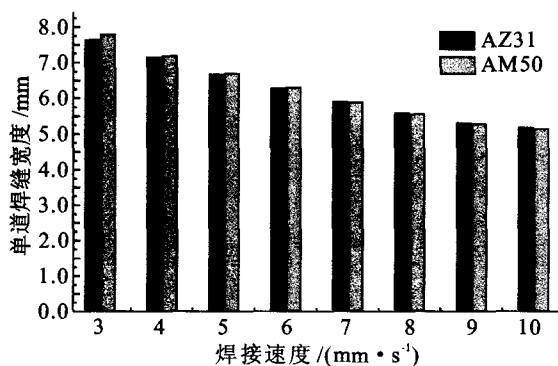


图4 焊接速度与单道焊缝宽度的关系

Fig.4 Dependence of weld width on welding speed

从图3和图4可以看出,随着焊接速度的增大,焊缝的熔宽和熔深均有明显降低,这是因为在同一焊接电流下随着速度的增加,焊接热源在试件同一位置停留时间变短,试件无法充分吸收热量.同时通过对比发现,当焊接速度大于8 mm/s时,两种合金的成形性与焊接速度的变化趋势基本处于重合,而小于8 mm/s时,AM50的变化趋势要更大一些,说明AM50的成形性更易受到焊接速度的影响,对热源敏感性大.

2.1.3 氩气流量的影响

当氩气流量很小时,对熔池的保护作用很小,不能有效地保护熔池,在焊接高温下易形成氧化镁和氧化氮等高熔点杂质,使接头性能变坏.当氩气流量很大时,产生紊流,部分空气被卷入氩气中,降低了氩气的纯度,保护效果减弱,焊缝表面被氧化.这在需要高纯氩气的镁合金焊接中不允许出现.因此氩气流量的选择应适中.

2.2 焊接工艺参数对接头力学性能的影响

2.2.1 对抗拉强度的影响

AM50镁合金拉伸试验采用标准试样,在电子万能实验机上对试样进行拉伸试验,试验结果取4个试样的平均值.本试验对不同焊接电流和焊接速度条件下得到焊接接头的试件加工成拉伸试件进行拉伸试验.并在相同条件下与AZ31镁合金进行了对比.

图5为抗拉强度与焊接电流的关系,其中焊接速度为6 mm/s,气流量为7 L/min.从图5可以看出,AM50镁合金随着焊接电流的增大,试件的抗拉强度明显增加,但是当电流达到一定值后,抗拉强度开始减小.这是因为增大电流可以提高熔池的冷却速度,增加过冷度,使接头组织得到细化,晶界增多,有效地抑制了位错,所以抗拉强度提高.但是当电流超过100 A时,由于过热,使焊缝组织变得粗大,同时焊接熔池中的镁元素严重烧损,抗拉性能开始下降.

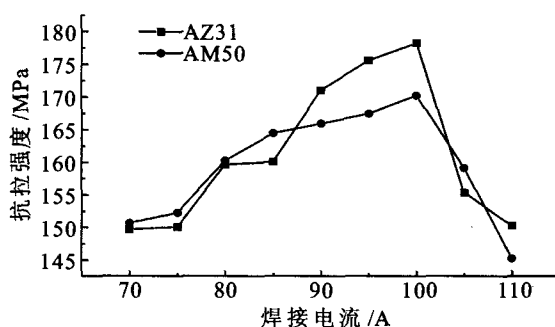


图5 抗拉强度与焊接电流的关系

Fig.5 Dependence of tensile strength on welding current

图6为抗拉强度与焊接速度的关系.其中焊接电流为90 A,氩气流量为6 L/min,从图中可以看出,当焊接速度小于7 mm/s时,AM50镁合金的抗拉强度随着焊接速度的增加而逐渐增加,但是超过7 mm/s后,抗拉强度有了明显的下降,力学性能有所降低.当焊接速度超过8 mm/s时,性能急剧下降.所以,适当的焊接速度对焊缝组织的细化起促进作用.但是当焊接速度过大时,接头处熔合性不良,造成力学性能严重下降.

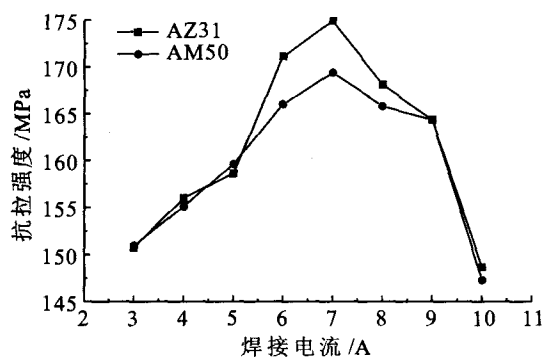


图 6 抗拉强度与焊接速度的关系

Fig.6 Dependence of tensile strength on welding speed

AM50 镁合金母材的抗拉强度为 236 MPa,而焊接接头的抗拉强度稍低于母材,为母材的 72.1%.研究发现试样断裂多发生在热影响区附近,这与热影响区的晶粒粗大和接头的应力集中等因素有关.分析认为焊接热输入对焊接接头力学性能的影响较大,主要原因有以下几方面:

1) 焊接热输入的变化,必然影响焊接接头组织的晶粒度和热影响区的宽度,当热输入较大,熔池中液态金属高温停留时间延长,接头晶粒严重长大,不利于焊缝力学性能的提高;热输入过小时,熔池中液态金属停留时间太短,焊缝来不及形成,易造成未焊透,咬边等焊接缺陷,也降低接头的机械力学性能.

2) 由于镁的沸点较低(1 100 ℃),随着热输入增加,液态金属在电弧高温停留时间长,镁元素的氧化、蒸发问题严重,也影响接头性能的提高.

3) 由于焊接热输入增大,镁合金强化相脱溶析出,失去共格联系从而失去了强化作用.

因此,在焊接镁合金时,注意选择合适的焊接规范,保证在焊透的前提下,尽可能选择小的焊接

热输入,提高焊接速度,改善焊接接头质量.

2.2.2 对硬度的影响

硬度试验:硬度试验的设备为国产 HX-1000 型维氏显微硬度机,负载 0.098 N,加载时间 60 s,分别在试件上选取母材、热影响区、焊缝各处进行测试,测出各个部位的硬度平均值.本试验主要针对焊接工艺规范对焊接接头硬度的影响,采用布氏硬度计对不同的热输入条件下的 AM50 焊接接头进行了硬度测试,对各个部位测量出来的硬度值取平均值,测量结果如表 3 所示.

表 3 AM50 接头各部位的硬度平均值

Tab.3 Average hardness of welding joint of AM50 alloy					HB
热输入	母材	热影响区	焊缝	热影响区	母材
151.11	70	68	62	66	72
167.90	70	65	60	62	71

从表 3 可以看出,AM50 镁合金的硬度最大处为母材.焊缝和热影响区的硬度略低于母材.这种“不等强性”的表现,说明焊接接头发生了某种程度的软化.试验还发现,当热输入减小时,接头处各部位硬度均有所增加.文献[10]对镁合金焊接接头硬度与平均晶粒直径的关系进行了研究,发现接头硬度与其平均晶粒直径的平方根成反比.因此,随着热输入的降低,接头各部位的晶粒变细,硬度增加.

所以综合焊接工艺参数对焊缝成形性和力学性能两方面的因素,最终得到的最佳焊接规范如表 4 所示.其中喷嘴直径、钨极直径由母材厚度决定.为了充分发挥交流 TIG 焊的阴极雾化作用,电弧长度应控制在 3 mm 以下.

表 4 最佳焊接工艺参数
Tab.4 Optimal welding parameters

焊接电流	焊接速度	气流量	喷嘴直径	钨极直径	电弧长度
A	(mm·s ⁻¹)	(L·min ⁻¹)	mm	mm	mm
80~100	6~8	6~9	8.5	2	1.5~3

2.3 显微组织形貌分析

图 7 是 AM50 焊接接头金相组织照片,与拉伸试件取自同一块试板.a、b、c、d 分别为试件的母材、热影响区、熔合区、焊缝.图中白色组织为基体 α-Mg,在晶界分布的黑色物质为第二相或 Mn 的游离状单质.从图中可以看出,金属组织在图 a、b、c、d 中依次呈规律性变化,晶粒逐渐变大,晶界析出物明显增多.其原因是随着热输入的增加,液态金属高温停留时间越长,越有利于晶粒的进一步长大,特

别是焊缝处形成比较粗大的柱状晶组织.因为焊接凝固过程属于非平衡凝固,在随后的快速冷却中,二次结晶相 β-Al₁₂Mg₁₇从基体 α-Mg 中脱溶析出,大部分在晶界处析出,还有少量在晶内缺陷处析出.由于固态下原子扩散能力小,因此第二相都比较细小.因为在焊接过程中焊缝最后凝固,所以在焊缝区晶界上第二相 β-Al₁₂Mg₁₇的浓度也相对较高.由于第二相是脆性相,导致焊缝的力学性能发生变化,强度、硬度均有所降低.

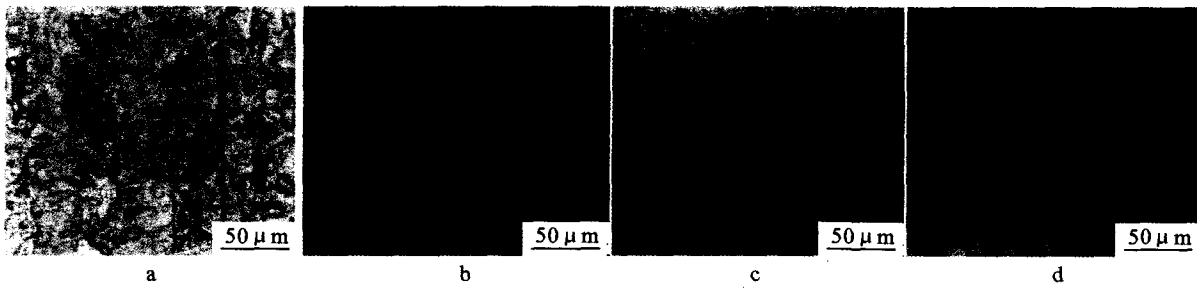


图7 AM50 镁合金焊接接头的微观组织

Fig.7 Microstructures of welding joints of AM50 magnesium alloy

a. 母材 b. 热影响区 c. 熔合区 d. 焊缝

2.4 x 射线衍射分析

图8是对较为平整的焊缝表面直接进行x射线衍射分析,不经过任何处理,在x射线分析图中可以看出焊缝中大部分都是 α -Mg,同时也有少量 β - $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$.这与实际情况基本相符:AM50 镁合金中,Al的含量比较少(5%左右),大部分Al都以固溶体的形式溶入Mg中形成 α -Mg,只有随温度降低才有少量 β - $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 析出.

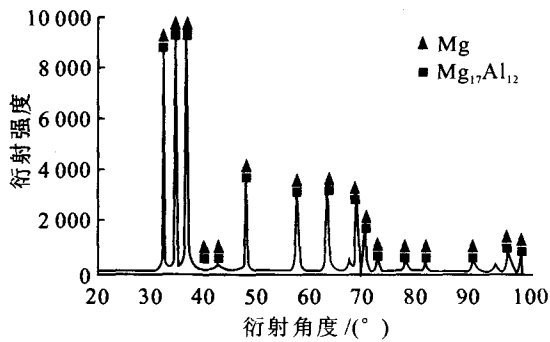


图8 AM50 镁合金焊缝处的x射线衍射谱

Fig.8 x-ray pattern of weld joint of AM50 magnesium alloy

3 结 论

1) 在对AM50 镁合金进行TIG焊接时,制定适当的工艺规范,能够得到优质的焊缝,显著提高焊接接头的力学性能;

2) AM50 镁合金焊接接头的抗拉强度和硬度均稍低于母材.断裂部位多发生在热影响区附近.焊接热输入对接头的力学性能产生较大影响;

3) 从母材到焊缝晶粒组织逐渐变大,晶界析出物明显增多;

4) 焊缝组织中除大部分是基体 α -Mg外,还有少量第二相 β - $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 富集于晶界.

参考文献:

[1] 曾小勤,王渠东,吕宜振,等.镁合金应用新进展[J].铸造,1998(11):39-42.

(ZENG Xiao-qin, WANG Qu-dong, LÜ Yi-zhen, et al. New development in application to magnesium alloy [J]. Foundry, 1998(11): 39-42.)

[2] 陈振华,严红革,陈吉华,等.镁合金[M].北京:化学工业出版社,2004.

(CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, CHEN Ji-hua, et al. The magnesium alloy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.)

[3] 吕宜振.镁合金铸造成型技术的发展[J].铸造,2000,49(7):383-388.

(LÜ Yi-zhen. Development of casting technology in magnesium alloy [J]. Foundry, 2004, 49(7): 383-388.)

[4] 王祝堂.镁与汽车[J].轻金属加工技术,1994,22(4):2-8.

(WANG Zhu-tang. Magnesium and car [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1994, 22(4): 2-8.)

[5] 翟春泉,吕宜振.压铸镁合金的应用现状和发展趋势[J].铸造,1998(12):50-52.

(ZHAI Chun-quan, LÜ Yi-zhen. Applied present state and trend in development in die-casting magnesium alloy [J]. Foundry, 1998(12): 50-52.)

[6] 刘政军,苏允海,刘铎,等.镁合金及其成型技术综述[J].沈阳工业大学学报,2006,28(1):14-20.

(LIU Zheng-jun, SU Yun-hai, LIU Duo, et al. Review of magnesium alloys and their forming technologies [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2006, 28(1): 14-20.)

[7] 燕战秋.镁合金在汽车中的应用[J].汽车工艺与材料,1994(8):26-29.

(YAN Zhan-qiu. The application of magnesium in automobile [J]. Automobile Technology & Material, 1994(8): 26-29.)

[8] 徐锦锋,翟秋亚.AZ91B 镁合金 TIG 焊接头组织与性能[J].特种铸造及有色合金,2004(4):23-25.

(XU Jin-feng, ZHAI Qiu-ya. Texture and performance of AZ91B magnesium alloy TIG welding joint [J]. Special Foundry and Nonferrous Alloy, 2004(4): 23-25.)

[9] 张兆栋,刘黎明,王来.镁合金活性 TIG 焊焊接接头组织特征分析[J].焊接学报,2004,25(4):55-58.

(ZHANG Zhao-dong, LIU Li-ming, WANG Lai. Analyse of texture and performance of magnesium alloy A-TIG welding joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 55-58.)

[10] Wu S H. Evolution of microstructure and texture in Mg-Al-Zn Alloys during electron-beam and gas tungsten arc welding [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2004, 35A(8): 2455-2469.

(责任编辑:王艳香 英文审校:陈立佳)