

退火对 AZ31B 镁合金 TIG 焊接接头组织与性能的影响

段锦文, 许泽清, 王小娇, 张红霞, 李咏梅
(太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:采用钨极氩弧焊对 2.7 mm 厚的 AZ31B 镁合金板进行焊接,研究了退火处理工艺(200℃1 h, 250℃1 h, 300℃1 h, 350℃1 h, 400℃1 h, 450℃1 h)对 AZ31B 镁合金焊接接头组织、力学性能和析出相的影响,利用光学显微镜和扫描电镜对焊后及退火处理后的接头显微组织进行观察,在退火处理前对焊缝区组成和相进行 EDS、XRD 分析,对不同退火条件下的接头进行了拉伸试验。结果表明,经过 400℃1 h 退火处理后,焊缝区粗大的颗粒物基本溶于基体,晶粒变得细小均匀,抗拉强度和伸长率均达到最大值,焊缝区在焊接过程并没有低熔点共晶化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ 生成。当退火温度进一步升高时,焊缝处晶粒呈现异常长大,抗拉强度和伸长率急剧降低。

关键词:AZ31B 变形镁合金;焊接接头;退火处理;组织;力学性能

中图分类号:TG146.22;TG166.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7235(2016)09-0056-07

Effect of annealing treatment on microstructure and mechanical properties of TIG-welded AZ31B magnesium alloy

DUAN Jin-wen, XU Ze-qing, WANG Xiao-jiao, ZHANG Hong-xia, LI Yong-mei
(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Tungsten Inert Gas (TIG) welding was performed on AZ31B magnesium-alloy plates with 2.7 mm thickness. The study was concentrated on the effect of post-weld annealing treatment(200℃1 h, 250℃1 h, 300℃1 h, 350℃1 h, 400℃1 h, 450℃1 h) on the microstructure, mechanical properties and precipitated phase of the weld joints. The microstructures of as-welded joints and heat-treated joints were investigated by optical and scanning electron microscopy. The precipitated phases and composition of the welded seam before annealing treatment were analyzed with the help of EDS and XRD. Tensile tests were carried out on the joints under different annealing conditions. The results show that after annealing treatment at 400℃ for 1h, most of the coarse particles in the weld seam have been dissolved into the matrix; the grains in the weld seam become fine and homogeneous; the tensile strength and elongation of the weld joints have been increased to the maximum, there is no eutectic phase $Mg_{17}Al_{12}$ of low melting point observed in the welded joints during welding. The grains in the weld seam will abnormally grow up, tensile strength and elongation of the weld joints will dramatically decline with increasing of annealing temperature.

收稿日期:2016-02-21

基金项目:基于红外温度场特征的镁合金焊接接头疲劳断裂行为与评定理论研究(编号 51175364)

第一作者简介:段锦文(1989-),男,山西太原人,硕士研究生。

Key words: AZ31B wrought magnesium alloy; welded joint; annealing treatment; micro-structure; mechanical properties

镁合金是目前最轻的金属结构材料,具有较低的密度,较高的比强度和比刚度,良好热导率,理想的电磁屏蔽功能,易于机加工,零件尺寸稳定,易回收等优点。这些优良的特性使得镁合金在航空航天、汽车制造、通信和计算机制造领域具有广泛的应用前景^[1-2]。作为一种新型的金属结构材料,镁合金虽然能铸造出很多结构部件,但是它的广泛应用离不开焊接技术的支持。由于镁合金化学性质活泼,热传导系数较高,在焊接过程中易热裂,晶粒粗化严重,焊后残余应力较大等问题,使镁合金的应用受到限制^[3]。

AZ31B 是一种目前广泛应用的商用镁合金,TIG 是镁合金焊接发展最早、最常用的一种焊接方式。Tokisue H 和 Ashina T 等^[4-5]研究了 AZ31 镁合金 TIG 焊后显微组织和力学性能,研究表明脉冲频率对 AZ31 镁合金焊接接头热裂敏感性有重要影响,合适的脉冲频率可获得较高力学性能的焊接接头。周海、张福全等^[6-7]研究了焊接电流在 160 A ~ 220 A 与 30 A ~ 60 A 区间对 AZ31 镁合金焊接接头组织和力学性能的影响,试验表明焊接电流对接头组织和力学性能影响较大。Shen 等人^[8]研究了 TIG 焊前对镁合金工件进行预热对焊接接头组织和力学性能的影响,结果表明,在 300℃ 预热后焊接,接头的抗拉强度和显微硬度均达到最大值。然而由于 TIG 焊接工艺不当造成的镁合金焊接接头综合性能降低是否可以通过焊后退火处理来改善,国内外尚鲜有报道。本试验主要针对镁合金薄板在 TIG 焊后组织和力学性能显著下降等问题,研究了退火工艺参数对 AZ31B 镁合金薄板焊接接头组织和力学性能的影响。

1 试样制备与试验方法

本试验采用厚度为 2.7 mm 经热挤压成形的 AZ31B 镁合金板,其化学成分见表 1。本试验中的 AZ31B 镁合金焊接接头采用 TIG 焊接方法进行焊接,填充焊丝为直径 3.0 mm 的 AZ61 镁合金,成分如表 2 所示。焊接示意图如图 1 所示。焊接工艺参数见表 2。焊接设备为联合汇力的 300GP 型 AC/DC TIG 电焊机。焊前对试件表面的氧化物进行机械方法清理,为防止焊件变形,焊件两端采用夹具固定,

铜作垫板。钨极为直径 2 mm 的铈钨极,保护气体为 99.99% 的高纯度氩气,保护气体流量为 15 L/min。

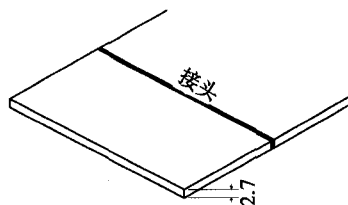


图 1 焊接接头示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the brazed joint specimens

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy (wt/%)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Be	Mg
3.1	0.88	0.48	0.01	0.0027	0.0015	0.00051	0.00006	余量

表 2 AZ61 镁合金焊丝的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical compositions of AZ61 magnesium welding wire (wt/%)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
6.4	0.77	0.35	0.03	≤0.01	≤0.01	≤0.01	余量

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Technological parameters of welding

焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度 mm/min	保护气体流量 L/min
100 ~ 120	12 ~ 15	64 ~ 82	15

焊后把母材和焊接接头分组并分别放在 200℃, 250℃, 300℃, 350℃, 400℃, 450℃ 保温炉中退火 1h。金相试样采用苦味酸溶液(苦味酸 0.85 g, 乙酸 2 mL, 乙醇 14 mL, 蒸馏水 2 mL) 腐蚀后用 LeicaDM2700M 型光学显微镜观察显微组织。在 WEW-300D 型电子拉伸机上进行室温拉伸试验,拉伸加载方向垂直于焊缝方向,拉伸试样如图 2 所示。拉伸速率为 3mm/min。使用扫描电镜对接头退火处理后焊缝区析出物进行观察。

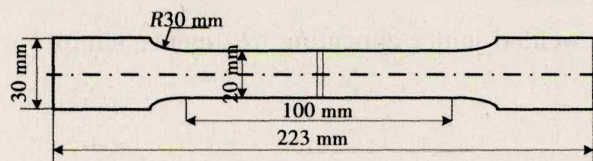


图2 拉伸试样形状及尺寸

Fig. 2 Shape and sizes of the tensile specimen

2 试验及结果

2.1 热处理对接头组织的影响

图3所示为焊缝到母材区域的光学显微组织,焊缝区表面布满了析出的颗粒使晶界变得模糊。退火处理后,如图4所示,焊缝处析出的颗粒随着退火温度的提高逐渐溶于基体,用截线法测得焊缝处晶粒的平均晶粒度在350℃退火1 h后达到最大值37 μm ,在400℃退火1 h后,焊缝处晶粒的平均晶粒度达到最小值20 μm 。接头在400℃退火1 h后,焊缝处的晶粒更均匀细小。当退火温度升高到450℃时,

焊缝区晶粒显著长大。由此可知焊缝处的晶粒在400℃退火1 h后刚好完成静态再结晶。发生再结晶的原因一方面是因为退火温度较高,已达到再结晶温度;另一方面是由于焊接过程存在拘束,熔池凝固后焊缝区域具有较大的残余应力,为再结晶提供了驱动力^[9]。温度升高时,晶粒吸收了更多的能量使得晶粒急剧长大。

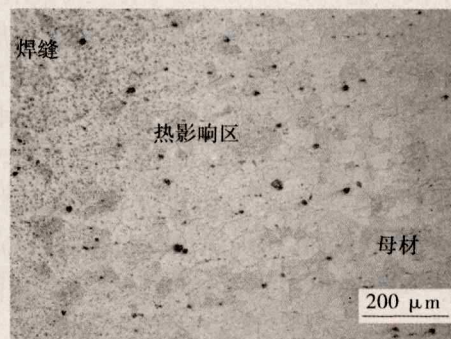


图3 焊缝到母材区域的光学显微组织

Fig. 3 OM showing the microstructure of the TIG joints

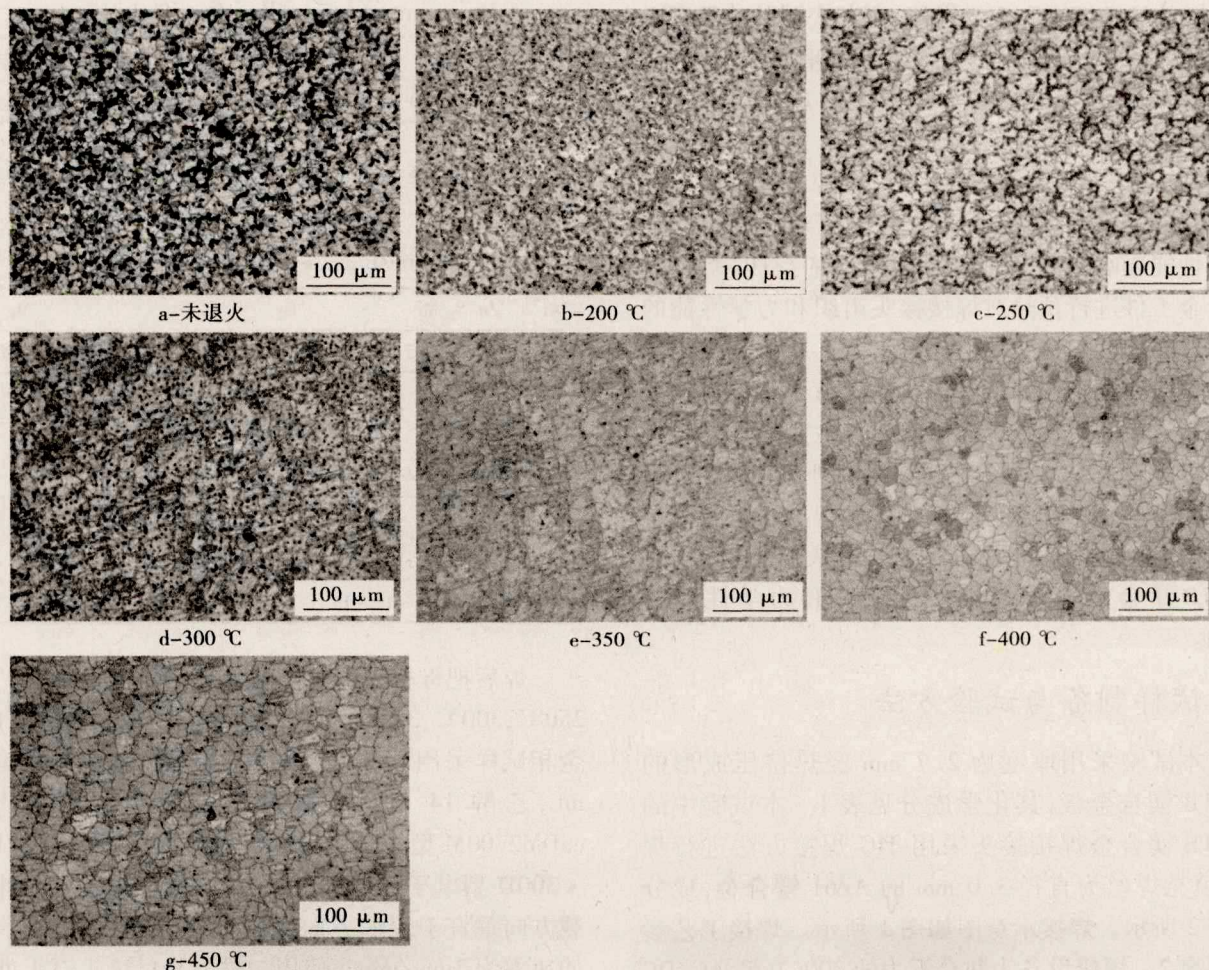


图4 焊缝区退火前及不同温度退火后的显微组织

Fig. 4 Microstructures of the TIG joints before and after annealing at different temperatures

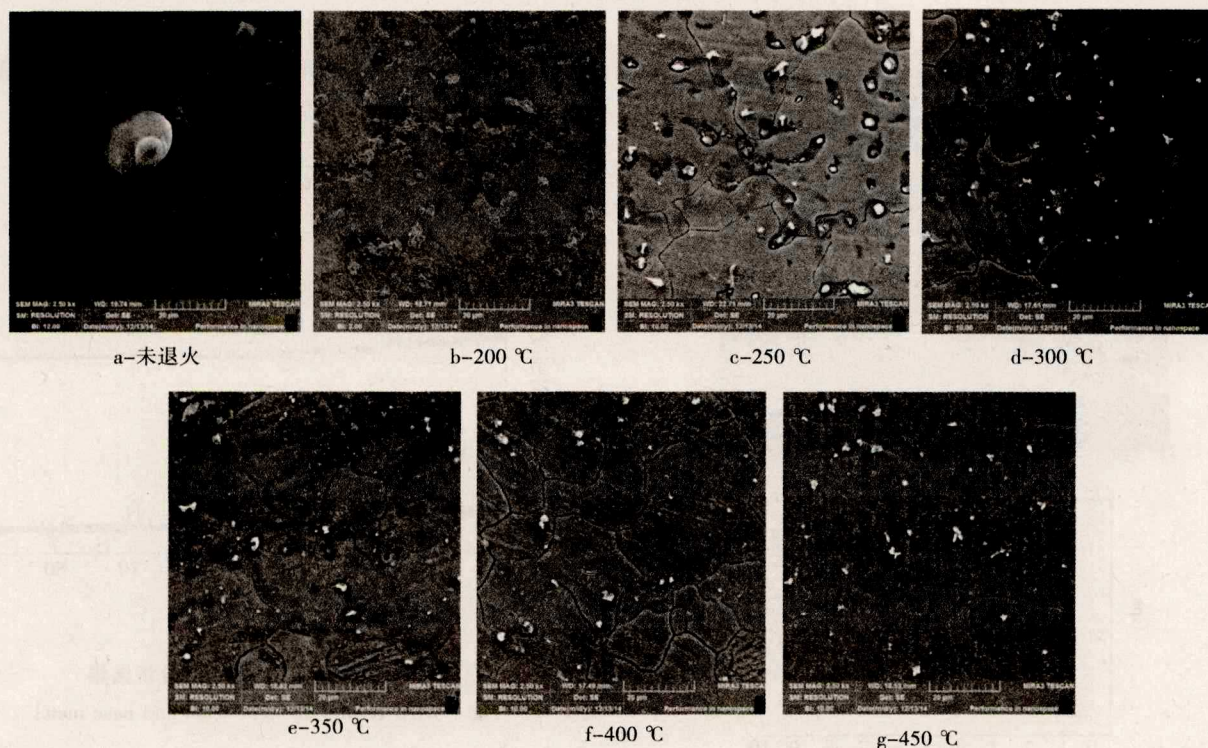


图5 焊接接头在退火前和不同温度退火保温 1 h 后焊缝的扫描照片

Fig. 5 SEM images of the weld joints before and after annealing at different temperatures and holding for 1 hour

2.2 退火对焊缝成分的影响

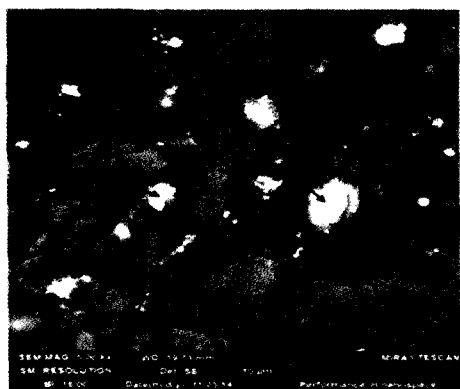
图5所示为接头焊缝区退火前的扫描照片,接头在退火处理前焊缝区布满了粗大的球状颗粒,在退火处理过程中,球状颗粒逐渐变小溶于基体。当退火温度高于350℃时,粗大的颗粒显著变小溶于基体。图6所示为一些粗大的颗粒分散在焊缝区,对亮白色的颗粒进行能谱分析,结果显示,A点各元素的摩尔分数为Mg 68%,Al 20.1%,Mn 11.8%,Zn 0.1%,A点中的Al和Mn元素的含量远远高于其在正常焊丝和基体B点中的含量。B点处各元素的摩尔分数为Mg 80.5%,Al 16.6%,Zn 2.8%,Mn 0.1%,B点中的Al元素和Zn元素的含量远远高于其在镁合金基体和焊丝中的含量。由XRD对退火前焊缝进行分析显示并没有共晶化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ 在焊接过程生成。图5焊后及不同温度退火后的扫描组织图也显示,晶界均没有明亮的树枝状第二相 $Mg_{17}Al_{12}$ 生成。结合EDS,XRD分析及扫描电镜下不同退火温度处理后的微观组织可知,图6中粗大的球状颗粒为过饱和的金属原子在焊缝冷却过程中偏析所致。因为镁合金板薄,焊缝狭窄,焊接电流大,焊接速度快,垫板为大铜板,夹具为表面温度较低的钢铁,所以焊接过程散热较快,熔池铸态的AZ61镁合金焊丝及部分AZ31母材快速凝固,熔池凝固具有

定向凝固与快速凝固特征^[10]。徐锦锋等^[11]研究了AZ91D镁合金的急冷快速凝固特征,XRD分析表明,在快速凝固条件下 $L \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 的共晶反应受到抑制,条带凝固组织由过饱和的单相 $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体组成。黄正华等^[12]也研究了快速凝固AZ91D镁合金的组织,他们用光学显微镜和透射电镜观察了普通凝固和快速凝固AZ91D镁合金的组织,用XRD分析了合金相的组成。结果表明,普通凝固AZ91D镁合金组织由 $\alpha\text{-Mg}$ 基体和 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相组成,晶粒较粗大,而快速凝固AZ91镁合金薄带截面组织均为过饱和的 $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体,并没有共晶组织 $Mg_{17}Al_{12}$ 生成。

2.3 退火对接头拉伸性能的影响

接头在不同退火温度下的拉伸性能如表4所示,每个值为同种试件四次试验的平均值。母材的抗拉强度为220 N/mm²~250 N/mm²,伸长率为7%~8%。接头在热处理前的抗拉强度为138 N/mm²,伸长率为3%。焊接过程使焊接接头相比母材抗拉强度下降37%~45%,伸长率下降57%~62%。在退火处理后,接头的抗拉强度和伸长率显著提高,接头的抗拉强度在400℃退火处理1h后达到最大值210 N/mm²,同时伸长率也达到最大值11%,当退火温度升高到450℃退火处理1h后,抗拉强度和伸长

率均出现下降。



a-焊缝区显微组织

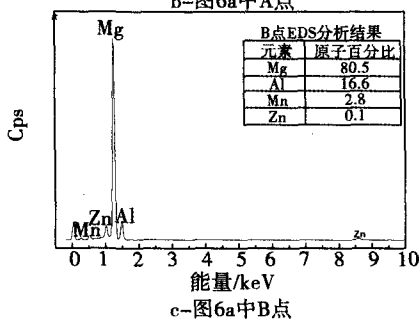
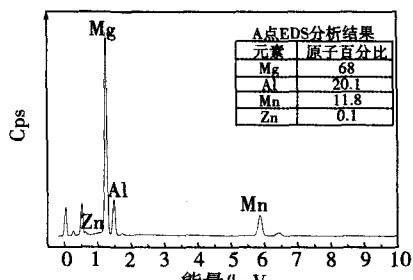


图6 退火前焊缝区亮白色颗粒的能谱分析结果

Fig.6 Electron dispersive spectra for the bright-colored particles found in the weld seam before annealing treatment

结合退火处理条件下接头焊缝区组织的变化,这种现象可以解释为在400℃退火处理1h后焊缝区组织刚好完成了静态再结晶,此时晶粒的平均尺寸达到最小值。根据Hall-Petch公式 $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$ ^[13-14], σ_0 和 k_y 在一定温度和应变率下均为材料常数,屈服强度 σ_y 取决于晶粒尺寸 d 。Ryukichi和Kensuke发现对于抗拉强度也有类似的规律^[15],抗拉强度与晶粒尺寸同样适用于公式 $\sigma_u = \sigma_{0u} + k_u d^{-1/2}$, σ_{0u} 和 k_u 在一定温度和应变率下均为材料常数,抗拉强度 σ_u 取决于晶粒尺寸 d 。Pavel Lukáč和Zuzanka Trojanová研究发现镁合金在400℃的断裂应变是晶粒尺寸的函数 $\varepsilon_f = \varepsilon_0 + k d^{-1/2}$ ^[16], ε_0 和 k 为经验参数。接头在400℃退火处理1h后晶粒尺

寸达到最小值,抗拉强度和伸长率同时达到最大值。Atwell D L等人^[17]也研究发现AZ31镁合金的塑性随着晶粒的细化而提高。

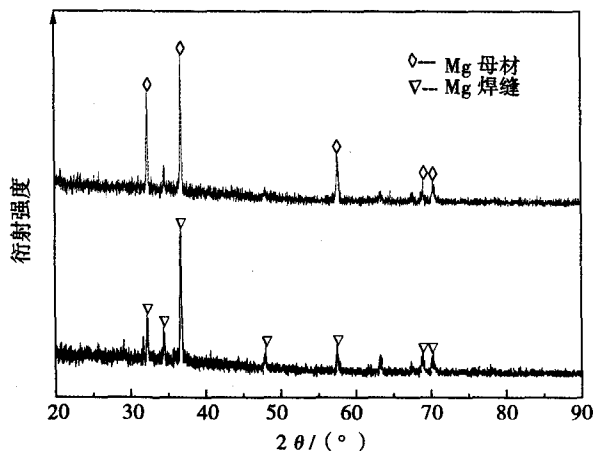


图7 焊缝和母材的XRD分析结果

Fig.7 XRD results for weld seam and base metal

表4 不同温度退火1h后接头的抗拉强度和伸长率

Table 4 The tensile strength and elongation of the joints after annealing treatment at different temperatures

温度/℃	$R_m / (N \cdot mm^{-2})$	$A / \%$
200	173	6.0
250	180	6.0
300	194	6.5
350	200	8.5
400	210	11.0
450	194	4.9

2.4 退火对焊缝区硬度的影响

AZ31镁合金TIG焊接接头退火前焊缝区的平均硬度为70.84HV,退火处理后焊缝区的平均硬度值如图8所示,接头在200℃退火1h后焊缝区的平均硬度值提高到71.86HV,接头在250℃退火1h后焊缝区的平均硬度达到最大值75.98HV。当退火温度进一步提高时,焊缝区的平均硬度呈急剧下降趋势。当退火温度高于350℃时,焊缝区的平均硬度值下降较小。接头在400℃退火1h后抗拉强度和伸长率达到最大值,此时焊缝区的平均硬度值为65.46HV。Sato YS^[18]的研究表明,材料的硬度主要取决于晶粒尺寸和析出相。退火处理前焊缝的平均硬度值较高,主要是由于退火前,焊缝区析出的大量

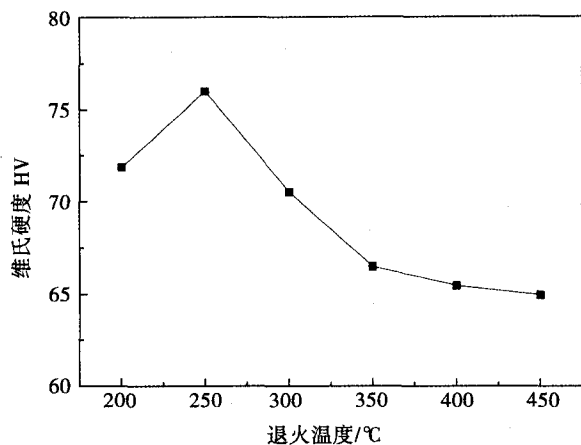


图8 不同温度保温1 h退火后焊缝区的平均硬度值

Fig. 8 Average hardness of the weld joints after annealing at different temperatures and holding for 1 h

金属单质团聚成粗大的颗粒密集分布在焊缝表面,提高了焊缝区的硬度值。当退火温度为250℃时,焊缝区粗大的颗粒物还没有溶于基体,而母材晶粒部分开始发生再结晶,组织更加均匀,此时焊缝区硬度达到最大值。当退火温度进一步提高时,焊缝区粗大的金属颗粒快速溶于基体,如图5所示,当退火温度在250℃~350℃范围内,焊缝区颗粒物快速变小溶于基体,此时焊缝区硬度值下降较快。当退火温度

为350℃~450℃时,粗大的颗粒物已变小,进一步溶于基体的速度减慢,此时相对应的焊缝区硬度值下降速度也变小。

3 结 论

1) 焊接接头焊缝区的组织在退火处理后变得更均匀,晶粒更细小。当接头在400℃退火1 h后焊缝区晶粒呈现等轴晶,平均晶粒尺寸达到最小值。当退火温度继续提高到450℃时,晶粒急剧长大。

2) AZ31 镁合金在 TIG 焊过程中,焊缝处没有共晶化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ 生成。焊缝中粗大明亮的大颗粒为焊后冷却过程中过饱和的金属原子偏析富集而成。在退火过程中,焊缝处粗大的颗粒物随着退火温度的提高逐渐溶于基体。

3) 接头的抗拉强度和伸长率在退火处理后显著提高,接头在400℃退火1 h后抗拉强度达到最大值210 N/mm²,比退火处理前提高了50%;伸长率也同时达到最大值11%,是退火前的3.7倍。退火温度提高时,接头的抗拉强度和伸长率均降低。

4) 退火前接头焊缝区的平均硬度值为70.84 HV,接头在250℃退火处理1 h后,接头焊缝区的平均硬度值达到最大值75.98 HV。当退火温度进一步提高时,焊缝区的平均硬度值随着退火温度的提高而降低。

参考文献:

- [1] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-applications-potential[J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 302(1): 37-45.
- [2] KULEKCI M K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(9): 851-865.
- [3] COMMINS L, DUMONT M, MASSE J E, et al. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters[J]. Acta Materialia, 2009, 57(2): 326-334.
- [4] ASAHINA T, TOKISUE H, KATHO K. Solidification crack sensitivity of TIG welded AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1999, 49(12): 595-599.
- [5] ASAHINA T, TOKISUE H. Some characteristics of TIG welded joints of AZ31 magnesium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 1995, 45(2): 70-75.
- [6] 周海, 丁成钢, 胡飞, 等. 不同电流下 AZ31 镁合金交流钨极氩弧焊焊接接头的显微组织与力学性能[J]. 机械工程材料, 2011(5): 47-50.
- [7] 张福全, 王响群, 陈振华, 等. AZ31 镁合金薄板的交流钨极氩弧焊[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(6): 9-12.
- [8] SHEN J, XU N. Effect of preheat on TIG welding of AZ61 magnesium alloy[J]. International Journal of Minerals Metallurgy & Materials, 2012, 19(4): 360-363.
- [9] 张铁磊, 吉泽升, 赵振华. 热处理对 ZM6 镁合金 TIG 焊后组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013

(3):593-598.

- [10] 张 璋. 超薄快速铸轧的凝固前沿计算及应用研究[D]. 长沙:中南大学,2004.
- [11] 徐锦锋,翟秋亚,袁 森. AZ91D 镁合金的快速凝固特征[J]. 中国有色金属学报,2004,14(6):939-944.
- [12] 黄正华,郭学锋,张忠明. 快速凝固 AZ91D 镁合金组织的研究[J]. 材料热处理学报,2005,26(1):32-35.
- [13] HALL E O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of Results[J]. Proceedings of the Physical Society,1951,643(9):747-752.
- [14] PETCH N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. J Iron Steel Inst,1953,173(1):25-28.
- [15] RYUKICHI NAGASAKI,KENSUKE SHIRAIISHI. The effect of grain size on the tensile properties of magnox Al80[J]. Journal of Nuclear Science & Technology,1965,2(9):369-374.
- [16] PAVEL Luká,TROJANOVÁ Z. Influence of grain size on ductility of magnesium alloys[J]. Materials Engineering,2011,18(3):110-114.
- [17] ATWELL D L,BARNETT M R,HUTCHINSON W B. The effect of initial grain size and temperature on the tensile properties of magnesium alloy AZ31 sheet[J]. Materials Science & Engineering A,2012,549(7):1-6.
- [18] SATO YS,PARK SHC,KOKAWA H. Microstructural factors governing hardness in friction-stir welds of solid-solution-hardened Al alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A. 2001,32(12):3033-3042.

(上接第 49 页)

- [2] 刘 锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺[M]. 北京:国防工业出版社,1977:186-193.
- [3] 李淑明,刘贤锋,胡永会. 7075 铝合金表面喷丸残余应力松弛的实验研究[J]. 热加工工艺,2013,42(14):25-29.
- [4] RAO D,WANG D,CHEN L,et al. The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress[J]. International Journal of Fatigue,2007(29):192-196.
- [5] HU Yonghui,WU Yunxin,WANG Guangyu,GUO Junkang. Surface yield strength gradient versus residual stress relaxation of 7075 aluminum alloy[J]. Advanced Materials Research,2010(160-162):241-246.
- [6] FENG B X.,MAO X N,YANG G J,et al. Residual stress field and thermal relaxation behavior of shot-peened TC4-DT titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A,2009(512):105-108.
- [7] 傅子霞,胡永会,袁海洋. 温度载荷下铝合金的残余应力松弛行为[J]. 热加工工艺,2014,43(2):35-36,39.

英车布里奇诺斯铝业公司扩建 CTP/PS 版基材生产线

英国布里奇诺斯铝业公司(Bridgenorth Aluminum)位于什罗普希雷镇(Shropshire),是希腊埃瓦尔(EIVal S.A.)公司的独资子公司,专业生产 CTP/PS 版铝基板,自 2014 年以来对生产线及精整设备进行了大规模的改扩建,总投资达 1 亿英镑,使 CTP/PS 铝基板生产能力翻一番,达到了 75 kt/a,改扩建工作已于 2015 年 12 月全部完成,新增员工 75 名,并新建了一个研发试验室。

(王祝堂)