

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.01.018

# 铝镁锆合金焊丝制备工艺研究

蹇海根<sup>1,3</sup>, 谢幸儿<sup>2</sup>, 单彪<sup>1</sup>, 赵毅<sup>3</sup>, 尹志民<sup>3</sup>

(1. 湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 银宇控股集团, 浙江 杭州 311255;  
3. 中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 采用均匀化处理-热挤压-拉拔退火-微刮削焊丝制备方法, 结合硬度、电导率、拉伸等性能测试和微观组织观察手段, 试验优化铝镁锆合金焊丝的生产工艺参数, 并成功制备出铝镁锆合金焊丝。研究表明, 在470℃保温24h均匀化退火, 挤压温度控制在420~430℃, 挤压比为50~60, 拉拔后中间退火制度为410℃/90min, 这样制备出来的铝镁锆合金焊丝表面光亮, 质量良好, 且焊接性能优异, 能满足实际使用要求。

**关键词:** 铝镁锆合金; 焊丝; 拉拔; 中间退火

中图分类号: TG356.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)01-0081-05

## Study on Preparation Process of Al-Mg-Zr Alloy Wire

Jian Haigen<sup>1,3</sup>, Xie Xing'er<sup>2</sup>, Shan Biao<sup>1</sup>, Zhao Yi<sup>3</sup>, Yin Zhimin<sup>3</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Yinyu Holding Group, Hangzhou 311255, China;  
3. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Combining with the means of solidity, conductivity and tensile properties measurement as well as micro-structure observation, the welding wire preparation method of homogenization treatment-hot extrusion-drawing anneals-micro scraping was adopted to test the parameters for optimizing Al-Mg-Zr alloy welding wire production process, and Al-Mg-Zr alloy welding wire was successfully prepared. It shows that the welding wire of bright surface, good quality and excellent welding performance, which meet the requirement for actual use, can be obtained under the conditions of homogenization treatment at 470℃ for 24 hours, extrusion temperature at 420~430℃, extrusion ratio for 50~60 and intermediate anneals condition after drawing being 410℃/90 min.

**Keywords:** Al-Mg-Zr alloy; welding wire; drawing; intermediate annealing

## 0 引言

铝镁锆合金属于5×××系不可热处理强化铝合金, 具有中强、耐蚀和焊接性能良好等特点, 广

泛应用于航天、轨道交通、船舶等行业<sup>[1-2]</sup>。前苏联和现在的俄罗斯对这类铝合金研究较早、较深入, 并获得了成功应用<sup>[3]</sup>。美国、德国、日本、加拿大等国在这方面也开展了较多的研究<sup>[4]</sup>。中国铝业集团

收稿日期: 2012-10-16

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(12C0049), 湖南工业大学自然科学研究基金资助项目(2012HZX29), 湖南工业大学大学生创新性实验基金资助项目(2012-37)

作者简介: 蹇海根(1980-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为新型铝合金研发,

E-mail: jianhaigen2001@163.com

东北轻合金有限公司和西南铝业集团公司先后研制开发了航天、舰船和轨道交通用铝镁锆合金板材和型材,并已批量供应市场,其性能接近国际先进水平,但相关焊丝的研究相对滞后<sup>[5]</sup>。

铝镁锆合金焊丝是一种竞争力强、应用前景好的新型焊材。目前,高速列车、地铁列车和轻轨列车车厢均是以铝合金型材作为骨架的焊接构件,焊接可减少40%的车辆制造工作量,焊接材料性能的好坏将直接影响车辆的运行性能和运行速度、运载能力和效率<sup>[6]</sup>。但是,国内车辆制造需要的铝合金焊丝主要依赖进口,其中,美国铝业公司(Aloca)生产的焊丝5356,5082和4043占90%以上<sup>[7]</sup>。我国城际轻轨和高铁行业的高速发展,使铝镁锆合金焊丝需求量剧增,国内铝镁锆合金焊丝的市场潜力巨大。如果能研制成功一种新型焊丝替代进口焊丝,其市场价值和利润均非常可观。本文通过新型铝镁锆合金焊丝制备工艺的研究,为其在相关领域的焊接应用提供实验依据。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

合金熔炼在中国铝业集团东北轻合金有限公司进行,铝镁锆合金焊丝的化学成分见表1,其中Al和Mg为主合金元素。Zr, Cr, Mn等复合微合金化添加元素以中间合金形式加入,目的是为了保证焊缝组织得到细晶强化和 $Al_3Zr$ 等初晶相的弥散相强化作用,提高焊接接头强度系数。熔炼过程中搅拌均匀,熔剂覆盖,除气除渣。取样进行炉前分析,成份分析合格后开始浇注。合金熔炼温度控制在720~760℃,采用氩气精炼除气,静置后热顶铸造成直径为 $\Phi 160$  mm的铸锭。

表1 焊丝的化学成分

Table 1 The chemical composition of welding wire

成分	Mg	Mn	Cr	Zr	Ti	Fe+Si	其他		Al
							单个	合计	
质量分	5.20~	0.30~	0.10~	0.10~	0.15	≤0.40	≤0.05	≤0.15	余量
数/%	6.20	0.70	0.20	0.20					

### 1.2 试验方法与测试

铸锭均匀化在电阻炉中进行,然后锯切、车皮,除去表面氧化层和气孔。热挤压在1250 T铝材正反向挤压机上,挤压得到焊丝毛料尺寸为 $\Phi 8.5$  mm,然后经过拉拔和多道次中间退火,得到最后的成品焊丝尺寸为 $\Phi 2.6$  mm。

采用上海光学精密机械研究所生产的HW187.5型布洛维硬度计对均匀化处理试样进行硬度值测定,

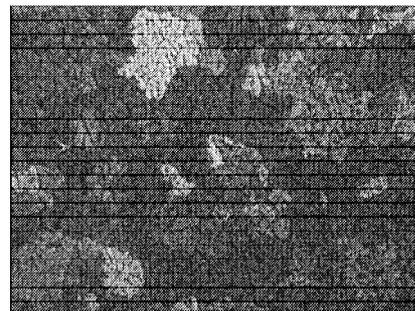
每一个状态的试样测3个点后取其平均值,具体试验方法按国标GB231—84《金属布氏硬度实验方法》执行。电导率测试在爱德森电子有限公司生产的7501型涡流电导仪上进行,测量前用标准块进行校准,试验结果取5次测量值的平均值。焊丝力学性能测试在长春试验机研究所生产的CSS-44100型万能测量试验机上进行。

试样经机械预磨,在铬酸(9 g  $CrO_3$ +14 mL  $H_2SO_4$ +57 mL  $H_3PO_4$ +20 mL  $H_2O$ )中进行电解抛光,抛光电压为24 V左右,时间为15 s左右,然后采用上海明兹光学仪器有限公司生产的POLYVER-MET金相显微镜进行金相显微组织观察。高倍扫描试验在FEI公司生产的Sirion场发射扫描电镜上进行。

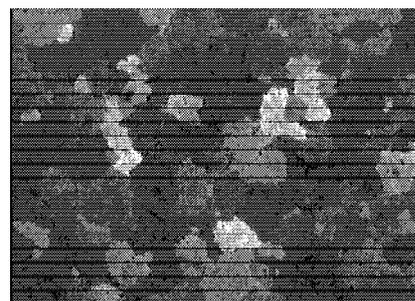
## 2 试验结果与分析

### 2.1 均匀化退火

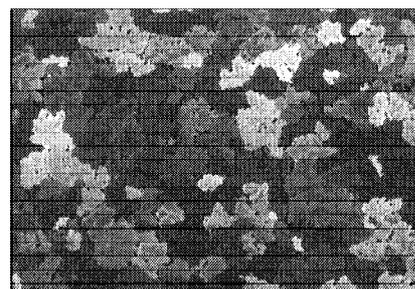
图1为铸态和不同均匀化处理后合金的金相显微组织照片,表2为不同状态下合金的硬度和电导率结果。



a) 铸态



b) 350℃/24 h



c) 430℃/24 h

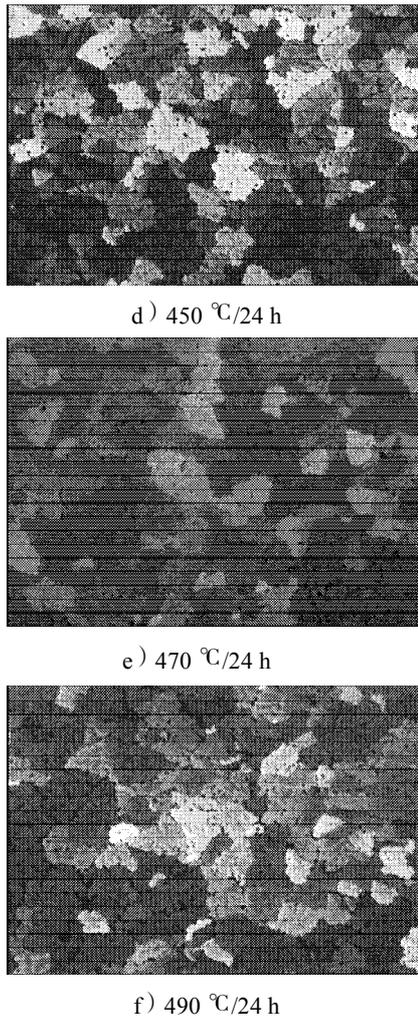


图1 不同状态下合金的金相组织

Fig. 1 The metallograph of Al-Mg-Zr alloy under different status

从图1可以看出, 铸态合金存在明显的枝晶组织, 且枝晶间存在较粗大的非平衡相, 成分偏析严重。随着均匀化温度的升高, 枝晶逐渐消失, 非平衡相也逐渐回溶到合金基体中; 470 °C/24 h 均匀化处理后, 枝晶基本消失, 非平衡相完全回溶; 490 °C/24 h 均匀化处理后, 合金晶粒出现部分长大。

表2 不同状态下合金的硬度和电导率

Table 2 The hardness and conductivity of Al-Mg-Zr alloy under different status

状态	硬度 / HRC	电导率 / (MS · m <sup>-1</sup> )	状态	硬度 / HRC	电导率 / (MS · m <sup>-1</sup> )
铸态	74.8	21.73	450 °C/24 h	78.5	23.10
350 °C/24 h	80.1	22.17	470 °C/24 h	78.1	23.46
430 °C/24 h	79.4	22.93	490 °C/24 h	74.4	23.23

从表2可以看出, 随着均匀化温度的升高, 合金的硬度呈下降趋势, 而电导率逐渐升高。铸态和490 °C/24 h 处理后合金的硬度和电导率相对较低, 470 °C/24 h 均匀化处理后合金电导率最高。综合考虑, 选择470 °C/24 h 均匀化处理比较合适。

## 2.2 热挤压

一般而言, 高镁铝合金挤压时的变形抗力较大, 挤压温度应选择其合金的上限温度。参考传统同类型铝合金<sup>[8]</sup>的热挤压温度为380~450 °C, 该铝镁锆合金的挤压温度设定为420~430 °C, 在1250 T 卧式铝材正反向挤压机上挤压成Φ8.5的焊丝毛料, 挤压比约为50~60, 焊丝毛料具体的挤压工艺参数见表3。

表3 焊丝挤压工艺参数

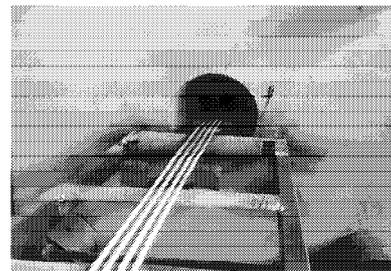
Table 3 The process parameters for wire extrusion

材料	产品规格 / mm	锭长 / mm	模温 / °C	锭温 / °C	
				前	后
Al-Mg-Zr	Φ8.5	500	450	410	450

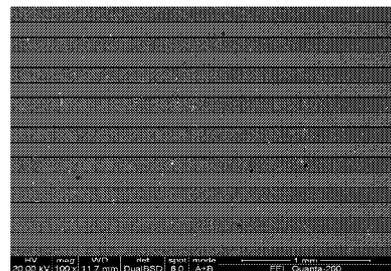
  

材料	筒温 / °C	线材速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	挤压筒速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	出口温度 / °C
	Al-Mg-Zr	426	1.8	0.4

焊丝毛料的挤压加工照片及表面形貌如图2所示。由图可知, 选用一模四孔按表3中的工艺参数挤压时进展顺利, 表面光亮无毛刺, 挤压件质量良好。



a) 毛料挤压



b) 表面形貌

图2 焊丝毛料挤压照片及焊丝表面形貌

Fig. 2 The photograph of wire extrusion and its surface morphology

## 2.3 拉拔

Φ8.5 mm 挤压毛料加工到Φ2.6 mm 的丝线, 需要经过多道次的拉伸。由于在拉伸过程中会产生很强的加工硬化, 两道次拉伸之间必须进行中间退火。考虑到节约能源和加工效率的因素, 既要充分消除加工硬化效应, 又不使晶粒过于长大而不利于拉伸。经过多次试验后, 确定丝材在410 °C 保温90 min 中间退火较为合适。

中间退火的次数与软化程度有关, 软化的程度

越高,进行中间退火的次数越少。退火次数由以下公式确定:

$$n = \frac{\ln \lambda_{\Sigma}}{\ln \lambda}, \quad (1)$$

式中,  $n$  为中间退火次数;

$\lambda_{\Sigma}$  为总延伸系数;

$\lambda$  为两次退火间允许的延伸系数。

设定第一次拉拔延伸系数(从8.5到7.0)为平均系数,即 $\lambda_1 = \lambda = 1.48$ ; 又 $\lambda_{\Sigma} = 10.69$ ; 代入式(1)得 $n = 6$ , 即中间退火6次。

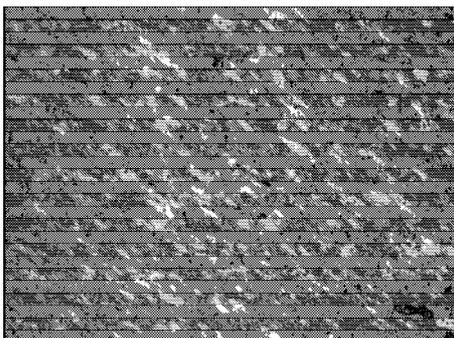
焊丝制备过程中各拉拔道次焊丝的基本力学性能见表4。从表中可以看出,丝材直径越小,强度越高,但延伸率下降。由于加工硬化效应,退火前后焊丝的性能相差较大。

表4 焊丝拉拔工艺中各道次丝材基本力学性能

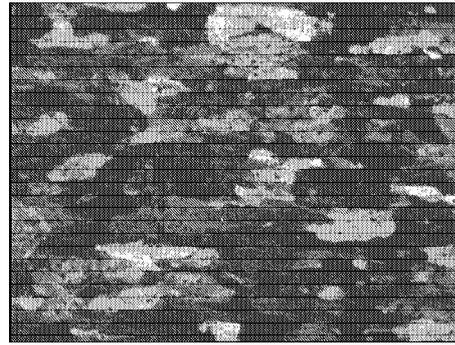
Table 4 The mechanical properties of different diameter wires by drawing

试样状态	直径 / mm	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	伸长率 / %
挤压	8.5	322	200	16.5
冷拉	7.0	375	348	6.2
退火	7.0	325	165	17.0
冷拉	6.0	395	355	6.0
退火	6.0	315	172	22.0
冷拉	5.2	390	375	5.0
退火	5.2	292	145	19.0
冷拉	4.4	398	378	4.6
退火	4.4	298	176	20.0
冷拉	3.5	402	386	3.9
退火	3.5	252	107	19.8
冷拉	2.6	408	390	3.6
退火	2.6	248	102	21.0

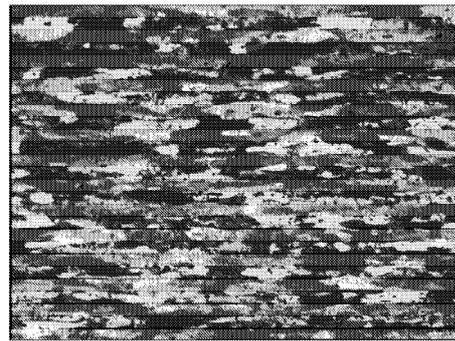
焊丝拉拔及其中间退火过程中,焊丝的金相组织照片如图3所示。由图可知,直径8.5 mm焊丝毛料为典型的挤压态组织,沿挤压方向拉长呈纤维状(图3a)。拉拔退火后焊丝为纤维状和部分再结晶的混合组织(图3b),直径为2.6 mm的成品焊丝纤维状组织更加细密,组织也更加均匀(图3c~d)。



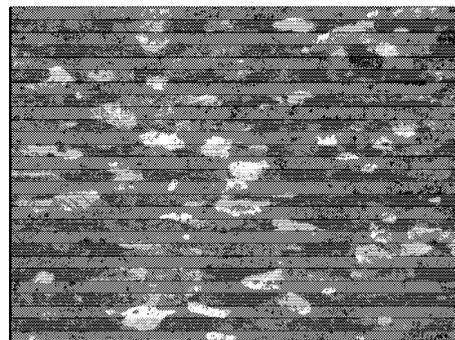
a)  $\Phi 8.5$  mm 挤压态



b)  $\Phi 7.0$  mm 退火态



c)  $\Phi 2.6$  mm 拉拔态



d)  $\Phi 2.6$  mm 退火态

图3 焊丝拉拔退火过程中的金相组织观察

Fig. 3 Metallographic observation of wire by drawing and annealing

在410 °C退火90 min后,焊丝发生部分再结晶现象并开始软化,但晶粒均匀没有发生异常长大的现象,不会发生拉断等问题,有利于后续的拉拔加工。金相观察结果也表明,退火后焊丝仍然保持着纤维状组织,但软化的程度又足够进行下一道拉丝,保持丝材的良好塑性与强度。

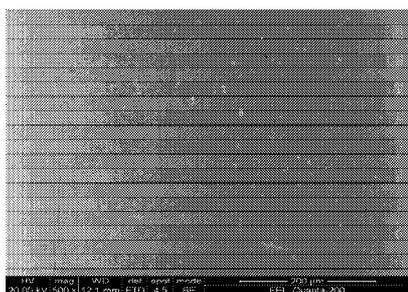
#### 2.4 焊丝成品

为了提高焊接质量,焊接前还需对焊丝进行表面处理。采用微刮削技术去除焊丝加工过程中的油污和吸潮层,消除焊丝表层氧化膜,控制焊缝中的气孔和氧化夹渣,以改善焊缝内部冶金质量。

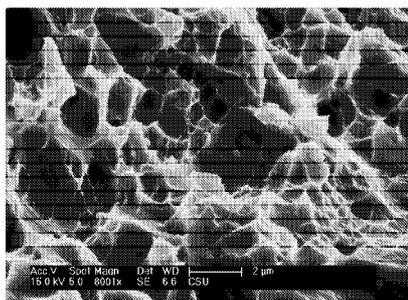
图4为 $\Phi 2.6$  mm成品焊丝照片及焊丝表面和断口形貌观察结果。由图可知,成品焊丝表面光亮,无油污无夹杂,断口观察表明焊丝组织均匀。



a) 成品焊丝



b) 表面形貌



c) 断口形貌

图4 成品焊丝及其表面和断口形貌

Fig. 4 The photograph of finished wire and its surface and fracture morphology

### 2.5 焊接试验

采用单丝MIG焊接工艺对所生产的焊丝性能进行测试,在氩气保护下,采用双层多道次焊接,其具体的焊接工艺参数如表5所示。选用5083铝合金板材作为焊接母材,然后对焊接接头进行力学和弯曲性能测试。试验结果表明,焊接接头弯曲性能好,焊接强度系数达76%,满足实际使用要求。

表5 焊接工艺参数

Fig. 5 The welding process parameters

母材厚度/mm	焊丝直径/mm	喷嘴直径/mm	焊机型号
8	2.6	16	松下YD-400GE
焊接电流/A	氩气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	焊接道次	
200	19	2层3道	

## 3 结论

铝镁合金焊丝制备工艺参数: 均匀化退火温

度及时间为470℃/24h,挤压温度420~430℃,挤压比50~60,中间退火制度为410℃/90min。依据本试验制定的焊丝生产工艺路线,成功制备出了铝镁合金焊丝,成品焊丝表面光亮,质量良好,且焊接性能优异,能满足实际使用要求。

### 参考文献:

- [1] 肖亚庆,谢水生,刘静安,等.铝加工技术实用手册[M].北京:冶金工业出版社,2005:639-642.  
Xiao Yaqing, Xie Shuisheng, Liu Jing'an, et al. Aluminum Processing Technology Manual[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 639-642.
- [2] 刘静安.铁道车辆用大型铝合金挤压型材的开发应用[J].铝加工,1995,18(1):16-23.  
Liu Jing'an. Development and Application of Large-Scale Aluminum Alloy Extruded Section for Railway Car[J]. Aluminum Fabrication, 1995, 18(1): 16-23.
- [3] И.Н.弗里良捷尔.高强度变形铝合金[M].吴学,译.上海:上海科学技术出版社,1963:6-9.  
И.Н.МандраксаХороший. High Strength Deflection Aluminum Alloy[M]. Wu Xue, Translator. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1963: 6-9.
- [4] Staley J T, Liu J, Hunt Jr W H. Aluminum Alloys for Aerostructures[J]. Advance Materials and Processes, 1997, 152(4): 17-20.
- [5] 戴静敏.高速列车用大型挤压铝型材[J].轻合金加工技术,1995,23(5):2-7.  
Dai Jingmin. Large-Scale Aluminum Extrusion Profile for High Speed Train[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1995, 23(5): 2-7.
- [6] Heinz A, Haszler A. Recent Development in Aluminum Alloys for Aerospace Applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2000(280): 102-107.
- [7] 卫晏华,尹志民.铁路列车车辆用大型铝合金型材焊丝的选用与生产[J].有色金属加工,2005,34(4):21-24.  
Wei Yanhua, Yin Zhimin. Selection and Production of Welding Wire for Welding Large Aluminum Alloy Profiles for Railroad Cars[J]. Nonferrous Metals Processing, 2005, 34(4): 21-24.
- [8] 蹇海根,谢幸儿,尹志民,等.5B01铝合金方管型材的热挤压温度试验[J].湖南工业大学学报,2011,25(4):9-12.  
Jian Haigen, Xie Xing'er, Yin Zhimin, et al. Extrusion Temperature Test for 5B01 Aluminum Alloy Square Tube [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(4): 9-12.

(责任编辑:邓光辉)