

# 锂电池 PACK 包 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金 CMT 焊接组织与性能研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.01.002

高平平<sup>1,3</sup> 潘云<sup>2</sup>  
陈爽<sup>1</sup> 刘春轩<sup>3</sup>  
曾维权<sup>2</sup> 欧阳志军<sup>2</sup>  
吴安如<sup>1</sup>

1. 湖南工程学院  
湖南省汽车动力与传动系统  
重点实验室  
湖南 湘潭 411104
2. 广州汽车集团股份有限公司  
汽车工程研究院  
广东 广州 511434
3. 湖南金天铝业高科技股份  
有限公司  
技术中心  
湖南 长沙 410007

**摘要:**以锂电池包箱体常用的 7003 铝合金为研究对象,采用冷金属过渡焊接工艺(CMT)对 7003 铝合金进行焊接后,经过固溶(485 °C, 3 h)、人工时效(160 °C, 2 h)和自然时效(72 h)热处理后,进行组织和性能研究。通过慢应变速率拉伸试验、常温拉伸试验、显微维氏硬度测试、扫描电子显微镜分析等方法,对该铝合金接头的母材和焊缝的抗腐蚀性能、力学性能以及微观组织形貌进行研究。结果表明:当慢应变速率为  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  时,基材和焊接试样的应力腐蚀敏感性指数( $I_{\text{SSRT}}$ )分别为 2.73% 和 9.74%;对焊接试样的接头进行晶间腐蚀和剥落腐蚀测试并评级,晶间腐蚀为 4 级,剥落腐蚀为 PA 级;焊接接头的电导率、抗拉强度、延伸率分别为 22.0% (IACS)、330.7 MPa、10.0%。

**关键词:** CMT 焊接; 7003 铝合金; 应力腐蚀; 力学性能

**中图分类号:** TG178 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2020)01-0009-08

**引文格式:** 高平平, 潘云, 陈爽, 等. 锂电池 PACK 包 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金 CMT 焊接组织与性能研究 [J]. 包装学报, 2020, 12(1): 9-16.

## 1 研究背景

近年来,电动汽车的销量获得急速增长。对于新能源纯电动汽车而言,汽车整备质量每减少 10%,其电耗下降 5.5%,续航里程增加 5.5%<sup>[1]</sup>。同时汽车质量的降低可减小汽车制动距离,提高安全性能<sup>[2]</sup>。传统电池包箱体一般采用低碳钢钣金和焊接工艺加工而成,其生产成本低但箱体质量大,这严重影响电池包系统能量密度的提高和新能源汽车的轻量化,不符合发展趋势,需要进行轻量化改进<sup>[3]</sup>。电池包箱轻量化材料主要有铝合金材料、高强钢材料和复合材

料等。目前,铝合金替代传统低碳钢已被广泛应用在电池箱上。

铝及其合金具有密度小、耐蚀性好、比强度高等优点<sup>[4]</sup>。目前电池包上游厂家,如中铝苹果铝业有限公司、辽宁忠旺集团有限公司、湖南海大铝材有限公司等,大量采用 6061 铝合金制造箱体,但 6061 铝合金强度低,因此铝合金厂家将发展方向转向强度更高的 7 系铝合金。7003 铝合金的主要合金元素为 Zn、Mg、Cu 等<sup>[5]</sup>,可通过调控 Zn、Mg、Cu 元素的含量来调整合金的抗腐蚀、强度、韧性等性能<sup>[6]</sup>。7003 铝合金由于存在 Zn、Mg、Cu 等合金元素,如果冷

收稿日期: 2019-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51671085, 11572124), 湖南省教育厅科研基金资助项目(16B058)

作者简介: 高平平(1985-), 男, 江西吉安人, 湖南工程学院工程师, 博士, 主要研究方向为材料表面改性,  
E-mail: fengyun\_gao@126.com

通信作者: 陈爽(1982-), 女, 辽宁锦州人, 湖南工程学院讲师, 博士, 主要研究方向为材料表面改性,  
E-mail: 65422713@qq.com

却速度和热处理过程控制不理想而发生合金元素的偏析, 会增大发生晶间腐蚀的风险, 而焊接接头的熔池区与热影响区更容易发生合金元素偏析<sup>[7-8]</sup>。铝合金焊接后的力学性能较基材会下降 20%~30%, 因此需要选择合理焊接工艺来保证接头的力学性能<sup>[9]</sup>。

冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 焊接, 是通过对熔滴短路过渡的精确控制, 使热输入量几乎为零的焊接技术, 它被广泛应用于超薄板的焊接<sup>[10]</sup>。本文对新能源锂电池包箱体用 7003 铝合金的 CMT 焊接试样进行金相、硬度、电导率、组织形貌、慢应变应力、晶间腐蚀、剥落腐蚀及断口形貌等分析, 并评估 7003 铝合金 CMT 焊接试样的力学、导电、抗腐蚀等性能, 以期满足新能源汽车使用要求。

## 2 试验

### 2.1 试验材料

7003 铝合金挤压板材: 厚度为 1.5 mm, 其具体化学成分如表 1 所示; 焊丝: 直径为 1.2 mm, 其化学成分与 7003 铝合金基材相同。

表 1 7003 铝合金的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of the 7003 alloy

成分	Zn	Mg	Cu	Zr	Cr
质量分数 /%	5.00~6.50	0.50~1.0	≤ 0.20	0.05~0.25	≤ 0.20
成分	Mn	Ti	Fe	Si	
质量分数 /%	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.35	≤ 0.30	

### 2.2 实验过程

将 2 块间距为 5 mm 的铝合金板用 CMT 焊接, 焊接技术参数如表 2 所示。焊接完成后在 485 °C 下固溶 3 h, 160 °C 下人工时效 2 h, 自然时效 72 h 热处理。

表 2 7003 铝合金 CMT 焊接主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of 7003 aluminum alloy CMT welding

焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (cm·min <sup>-1</sup> )	送丝速度 / (m·min <sup>-1</sup> )
90	15	50	5.5

采用锯割的方法获取晶间腐蚀、慢应变应力等试验试样。锯割的金相试样经打磨、抛光和超声清洗后, 用柯尔腐蚀试剂 (其中 HF、HCl、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O 的体积分数分别为 0.5%、1.5%、2.5%、95.5%) 腐蚀后<sup>[11]</sup>, 在光学显微镜下观察组织晶粒情况。

将获得的慢应变应力试样继续使用线切割加工成图 1 的形状和尺寸 (单位: mm, 焊接接头处于拉伸试样的中心部位), 再将加工好的试样经过 320#、

800#、1000#、1500#、2000# 砂纸打磨, 以保证试样表面光滑且无明显划痕, 用酒精清洗试样表面待用。

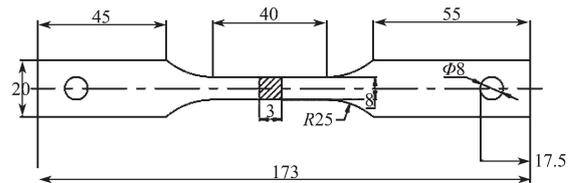


图 1 拉伸试样尺寸图

Fig. 1 The drawing of tensile specimen

在 YYF-50 慢应变应力腐蚀拉伸机上进行应力腐蚀试验, 应变速率为  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , 介质是质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液和硅油, 每种试样测试 3 个平行样。按照 HB 5254-83<sup>[8]</sup> 计算出 CMT 焊接接头的应力腐蚀敏感性指数 ( $I_{SSRT}$ )。将慢应变速率拉伸断裂后的试样在扫描电镜 (JSM 6360-LV) 中观察断口形貌。

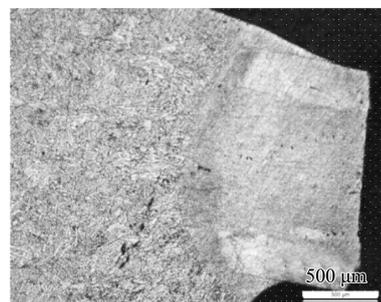
锯割的剥落腐蚀试样经过稍微打磨后, 分别放入 234 g/L 的 NaCl、50 g/L 的 KNO<sub>3</sub>、6.3 g/L 的 HNO<sub>3</sub> 腐蚀溶液中, 然后观察试样表面的变化, 按照 GB/T 7998-2005 《铝合金晶间腐蚀测定方法》<sup>[12]</sup> 测试、分析、评级。晶间腐蚀的试样取长度方向为板材挤压方向, 取宽度垂直于板材挤压方向; 在垂直主变形方向的一端切去 5 mm, 经过打磨抛光后, 进行相关的晶间腐蚀测定并评级。腐蚀介质水溶液中 NaCl 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的质量浓度分别为 57, 10 g/L, 腐蚀时间为 6 h。

锯切的硬度和电导率试样需要打磨抛光后进行测量, 每个试样测试 3 次获取平均值。焊接试样的显微维氏硬度采用从基材到焊缝再到基材线性测试并绘制成曲线。

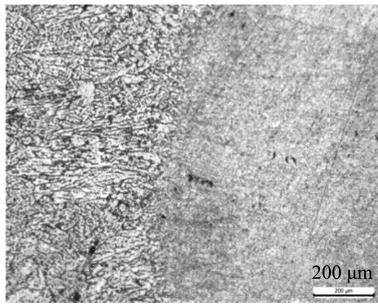
## 3 结果与分析

### 3.1 试样晶界形貌

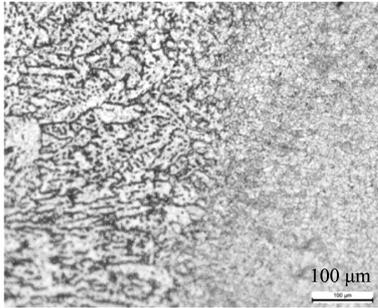
7003 铝合金 CMT 焊接接头, 经过 T5 工艺处理后的金相组织如图 2 所示。



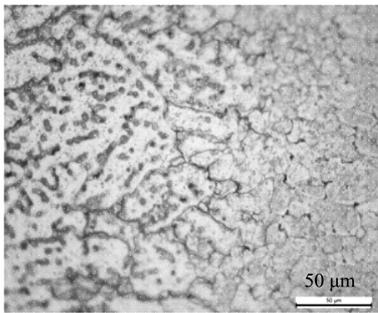
a) 放大 50 倍



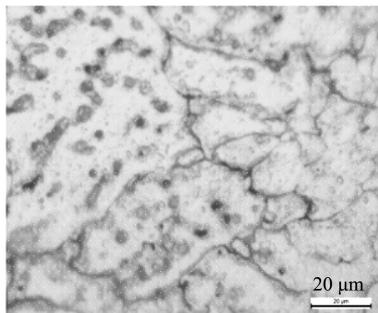
b) 放大 100 倍



c) 放大 200 倍



d) 放大 500 倍



e) 放大 1000 倍

图 2 焊接接头的金相组织

Fig. 2 The metallographic structure of welded joints

由图 2a 可以看出, 接头部位晶粒区别明显, 存在明显的熔合区、热影响区和母材区, 其中热影响区的区域宽度窄, 这与 CMT 焊接工艺热量输出低的特点相吻合。

由图 2b 和图 2c 可以看出, 热影响区与熔合区具

有明显的界面, 熔合区的晶粒尺寸大于热影响区。对界面进一步放大观察 (图 c), 熔合区组织呈现一定量的柱状晶和树枝晶<sup>[13]</sup>, 这是因为熔池中心温度高, 存在温度梯度, 而且焊缝中心的温度最高, 焊缝凝固需要一定时间才能完成, 因此晶粒有充足的时间形核长大。

由图 2d 和图 2e 可以看出, 因合金采用了固溶热处理工艺, 熔合区晶界处原先存在的部分合金元素固溶进入晶粒内部, 但仍有不连续的合金偏析物存在。而热影响区因使用的板材为挤压变形态, 在焊接热传导的热量下发生回复再结晶, 且晶粒主要以等轴晶粒形式存在<sup>[14]</sup>。

因此, 7003 铝合金 CMT 焊接接头微观组织表明, 晶粒的粗化和不均匀性导致接头整体性能低于基材。

### 3.2 试样的力学和电学性能

图 3 为 7003 铝合金 CMT 焊接试样的截面显微硬度曲线图。

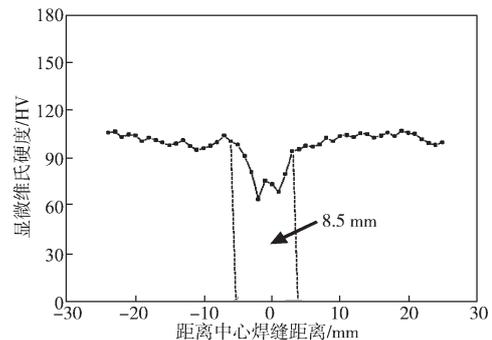


图 3 CMT 焊接试样的断面显微硬度分布曲线  
Fig. 3 The microhardness distribution curve of CMT welding samples

由图 3 可知: 熔合区附近和热影响区的硬度比焊缝中心区域的低, 其原因是在整个焊接过程中熔池温度高, 对热影响区的铝合金存在退火软化的作用, 原先组织中挤压态的加工硬化作用减弱甚至消失, 因此出现硬度下降。热处理工艺后的母材区, 主要为回复再结晶后的细晶粒组织, 母材区显微硬度平均值约为 108 HV。焊接完成后, 铝合金焊接的热影响区域基材的显微硬度下降, 这是因为焊接相当于对热影响区进行了消除应力退火处理, 而热处理工序可以破坏铝合金的原有加工硬化层, 从而导致焊接后试样的显微硬度降低<sup>[15]</sup>。整个焊接接头硬度降低区域长度为 8.5 mm。

表 3 为试样的有关力学与电学性能测试数据。

**表 3 基材与焊接试样的力学与电学性能**  
**Table 3 Mechanical and electrical properties of substrate and welding samples**

位置	电导率/( IACS )	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%
焊缝	22.0	330.7	275.9	10.0
基材	36.2	433.1	408.0	12.3

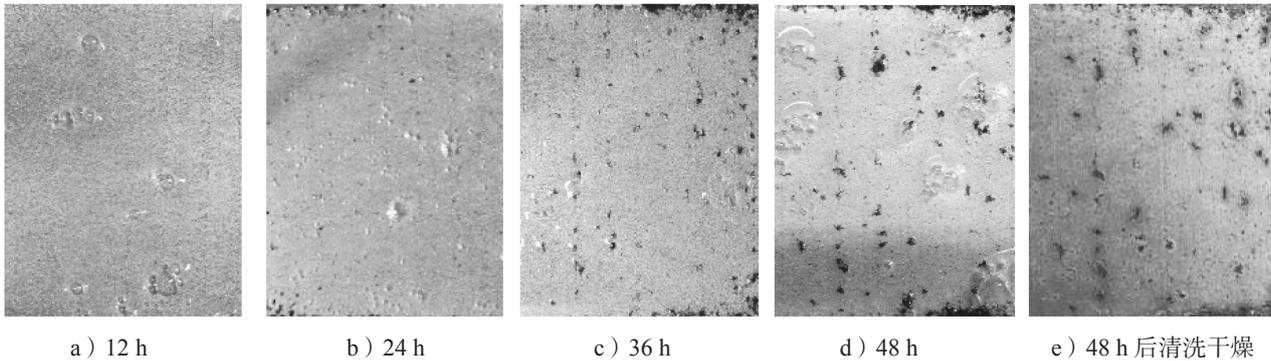
由表 3 可知,与基材相比,焊缝部位的力学性能出现下降。这是因为在焊接前基材为挤压型材,回复再结晶后型材晶粒细小,且沿挤压方向呈纤维状,此时力学性能受到加工硬化和晶粒细化影响获得较高的强度和延伸率<sup>[16]</sup>。焊接后,熔合区和热影响区的相当于进行了退火处理,部分区域合金元素偏聚,从而造成焊接部位的抗拉强度、屈服强度和延伸率均出现下降。结合金相组织分析表明,焊接接头的熔池区域晶粒呈现树枝晶和柱状晶状,而基材区的组织主要为细小的等轴晶粒为主,根据 Hall-Petch 公式可以解释基材和焊接接头的力学性能差异与晶粒度有关联<sup>[17]</sup>,晶粒越细小材料的强度和延伸率越高。

与基材相比,焊缝的电导率出现较大的下降。在焊接过程中,焊接部位受到熔池区的热辐射和热传递,导致溶质原子回溶,熔合区合金元素在晶界富集,形成偏析等造成成分差异,从而导致电导率下降。

### 3.3 试样的耐晶间腐蚀性能

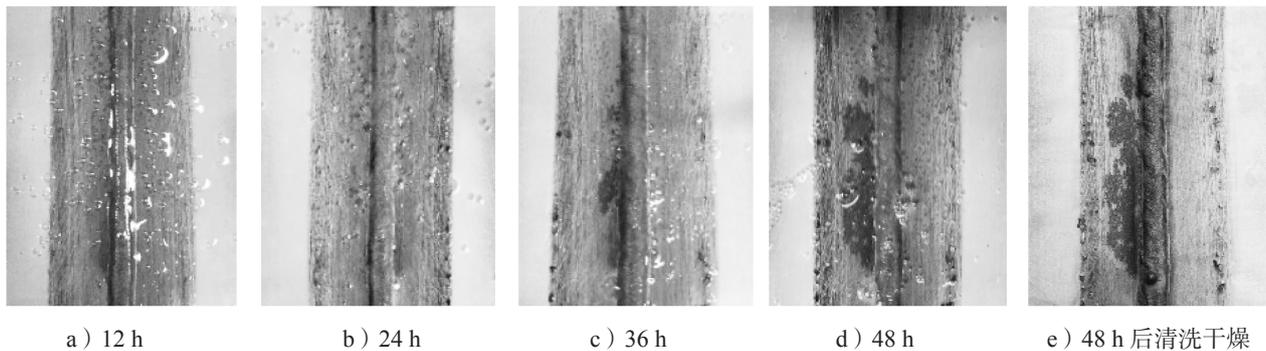
7003 铝合金发生晶间腐蚀的主要原因是:在凝固过程中,铝合金晶界连续析出部分合金相,合金相在晶界形成富集,从而导致晶界附近第二相或者合金元素偏聚,晶粒内合金元素固溶度降低,产生内外元素的电位差而发生电化学反应,这也是 7003 铝合金发生晶间腐蚀的主要原因<sup>[18]</sup>。晶粒越粗大,在宏观晶界周边分布的第二相粒子越多,晶界处发生腐蚀的倾向就更大。同时,大尺寸晶粒有助于腐蚀介质通过连续晶界向金属深层发展,从而导致抗腐蚀性能下降。

图 4 和图 5 为基材和 CMT 焊接接头试样进行剥落腐蚀实验的结果。试样在腐蚀液中分别放置 12, 24, 36, 48 h 后,最后用去离子水冲洗,用电吹风烘干。



**图 4 基材不同腐蚀时间后的剥落腐蚀结果**

**Fig. 4 Peeling corrosion results of substrate after different corrosion time**



**图 5 焊接接头不同腐蚀时间后的剥落腐蚀结果**

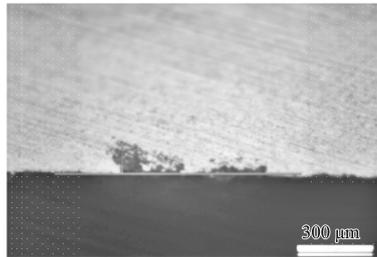
**Fig. 5 Peeling corrosion results of welded joints after different corrosion time**

从图 4 可知,基材试样经 12~48 h 腐蚀后,表面出现少量点蚀的情况,无腐蚀物剥落。从图 5 可知,

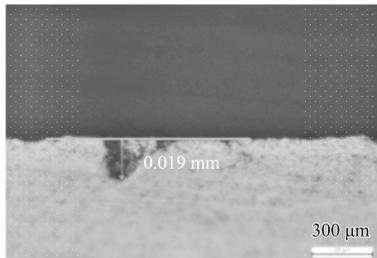
焊接试样在腐蚀试验进行了 12 h 后,焊接部位的表面出现了一层发黑的腐蚀物,继续延长至 24,

36, 48 h 均未发现明显变化; 经过 48 h 腐蚀后清洗烘干, 其表面的腐蚀深度并没有加深, 焊缝部位表面有发黑腐蚀物。这说明表面发生腐蚀, 但没有观察到明显剥落的腐蚀物, 即腐蚀存在但腐蚀深度浅。因此, 与基材比较而言, 7003 铝合金 CMT 焊接接头抗剥落腐蚀能力略有下降, 但仍保持较好的抗剥落腐蚀性能。对照国家标准, 可以评定焊接接头的剥落腐蚀等级为 PA 级, 接近于基材性能。

进一步研究焊接后基材区域和焊接接头的晶间腐蚀性能, 对试样进行晶间腐蚀试验, 观察其断面的腐蚀深度。图 6 为基材和焊接接头的 3 组平行试样晶间腐蚀结果。



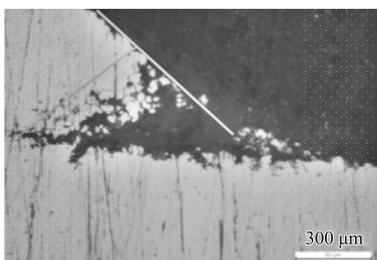
a) 基材试样 1



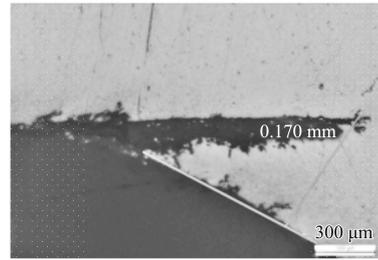
b) 基材试样 2



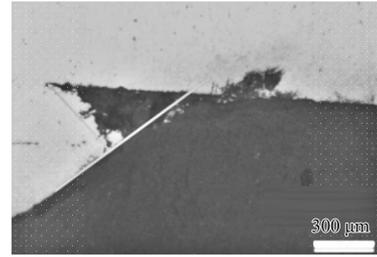
c) 基材试样 3



d) 接头试样 1



e) 接头试样 2



f) 接头试样 3

图 6 基材和 CMT 焊接接头试样晶间腐蚀试验结果

Fig. 6 Intergranular corrosion test results of substrate and CMT welded joint samples

由图 6 可知, CMT 试样存在晶间腐蚀, 基材处腐蚀深度为 0.019 mm, 对照国家标准评定腐蚀等级为 2 级; 焊接接头处腐蚀深度为 0.170 mm, 腐蚀等级为 4 级。出现上述结果的主要原因为焊缝周边存在偏析, 偏析部位在腐蚀液作用下容易构成腐蚀原电池结构; 同时焊缝接头存在气孔、表面不平、成分不均匀的情况, 故晶体界面易发生腐蚀。而基材晶粒细小、成分偏差小, 故其抗晶间腐蚀的能力强于焊缝接头。

### 3.4 试样的应力腐蚀敏感性

应力腐蚀敏感性指数  $I_{SSRT}$  是判定合金应力腐蚀敏感性的重要指标, 与其它单项力学性能测试指数相比, 它能更好地反映应力腐蚀断裂敏感性。其计算公式为

$$I_{SSRT} = 1 - \frac{\sigma_{f0}(1 + \delta_{f0})}{\sigma_{fA}(1 + \delta_{fA})}$$

式中:  $\sigma_{f0}$  是试样在质量分数为 3.5% 的 NaCl 介质中的抗拉强度, MPa;

$\sigma_{fA}$  是试样在硅油介质中的抗拉强度, MPa;

$\delta_{f0}$  是试样在质量分数为 3.5% 的 NaCl 介质中的断裂延伸率, %;

$\delta_{fA}$  是试样在硅油介质中的断裂伸长率, %。

$I_{SSRT}$  的取值范围为 0~1, 试样的慢应变应力腐蚀试验结果如表 4 所示。

表4 试样的慢应变应力腐蚀试验结果

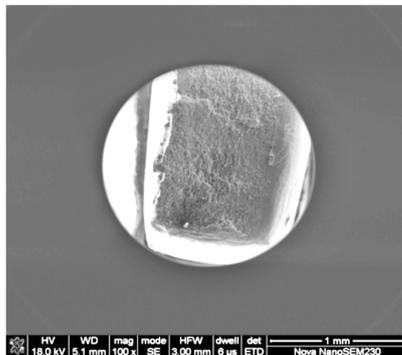
Table 4 Results of slow strain stress corrosion test of the sample

试样部位	试验环境	延伸率/%	抗拉强度/MPa	$I_{SSRT}/\%$
接头	硅油 (25 °C)	5.14	294.36	9.74
	盐水 (3.5%、25 °C)	4.44	267.49	
基材	硅油 (25 °C)	12.60	387.00	2.73
	盐水 (3.5%、25 °C)	11.60	380.00	

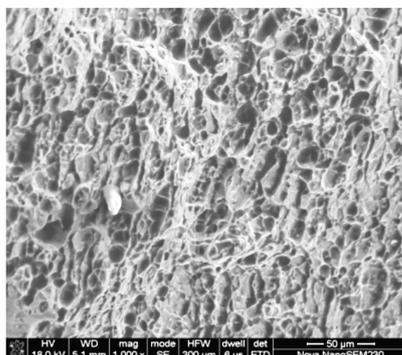
由表4可知, 基材的  $I_{SSRT}$  为 2.73%, 而焊接接头的  $I_{SSRT}$  为 9.74%。 $I_{SSRT}$  数值越大表示应力腐蚀敏感性越大<sup>[14]</sup>。因此, 焊接接头慢应变应力腐蚀性能较基材有较大的下降。

对焊接试样在硅油惰性介质和盐水腐蚀介质慢应变应力腐蚀试验后的断口进行分析, 断口形貌采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察, 其形貌分别如图7和图8所示。

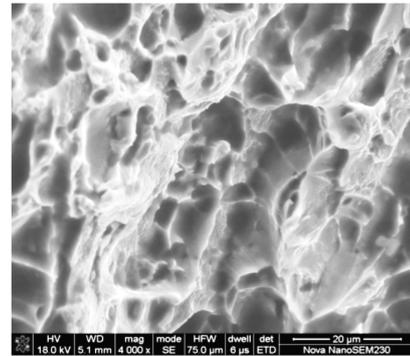
由图7可知, 在硅油介质中, 试样腐蚀断口呈韧窝为主的韧性断裂特征, 这表明在惰性介质中, 焊接接头断裂主要为塑性断裂机理。由图8可知, 试样在质量分数为 3.5% 的 NaCl 介质中, 腐蚀断口形貌也呈现出大量的韧窝断面, 但断口周边还存在一定量絮状解理断面, 这说明试样在介质中有一定量的腐蚀。



a) 放大 100 倍

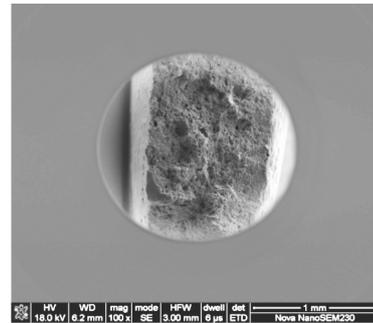


b) 放大 1000 倍

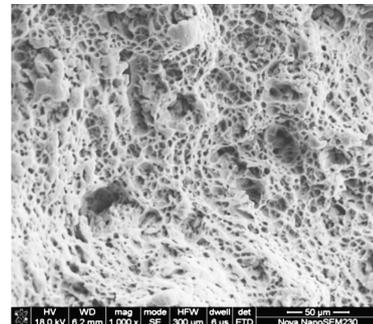


c) 放大 5000 倍

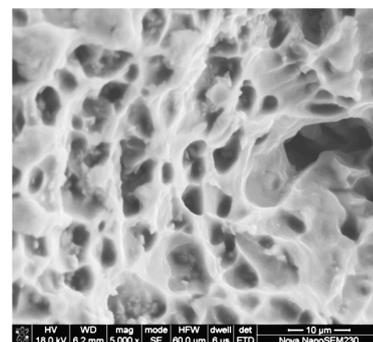
图7 硅油惰性介质环境应力腐蚀测试后的断口形貌  
Fig. 7 The fracture morphology after stress corrosion test in inert medium of silicone oil



a) 放大 100 倍



b) 放大 1000 倍



c) 放大 5000 倍

图8 盐水腐蚀介质环境应力腐蚀测试后的断口形貌  
Fig. 8 The fracture morphology after stress corrosion test of saline corrosive medium

综上所述, CMT 焊接接头对应力腐蚀性敏感, 其  $I_{SSRT}$  为 9.74%, 已超过了轨道车辆性能指标 5% 的要求。因此, 需要进一步优化焊接工艺和调控焊接材料组织和成分, 以提高 CMT 焊接接头的性能。

## 4 结论

综合前面的研究可得如下结论:

1) 7003 铝合金 CMT 焊接接头组织热影响区窄, 熔合区存在柱状晶和树枝晶, 经过热处理后仍存在一定的合金元素偏析。

2) 与基材相比, 焊接接头的显微维氏硬度下降, 硬度降低区域宽度为 8.5 mm。焊接接头的抗拉强度、屈服强度、延伸率、导电性能等明显下降。

3) 焊接接头剥落腐蚀等级为 PA 级。基材和焊接接头晶间腐蚀等级分别为 2 级和 4 级。

4) 基材和焊接试样的应力腐蚀敏感性指数 ( $I_{SSRT}$ ) 分别为 2.73% 和 9.74%。

### 参考文献:

- [1] 司福建, 时红海, 吴中旺, 等. 电池包箱体的轻量化与连接技术 [J]. 汽车工艺师, 2019(1/2): 34-38, 72. SI Fujian, SHI Honghai, WU Zhongwang, et al. Lightweight and Connection Technology for Battery Pack Case[J]. Modern Components, 2019(1/2): 34-38, 72.
- [2] 王艺, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于模型预测控制的智能网联汽车路径跟踪控制器设计 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 136-144, 153. WANG Yi, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. Design of Intelligent and Connected Vehicle Path Tracking Controller Based on Model Predictive Control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 136-144, 153.
- [3] 杨明飞. 电动汽车动力锂电池包结构设计及其液冷散热性能研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019. YANG Mingfei. Structural Design of Electric Vehicle Power Lithium Battery Pack and Its Liquid Cooling Performance[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2019.
- [4] 张鹏, 朱强, 秦鹤勇, 等. 航空发动机用耐高温材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2014, 28(11): 27-31, 37. ZHANG Peng, ZHU Qiang, QIN Heyong, et al. Research Progress of High Temperature Materials for Aero-Engines[J]. Materials Review, 2014, 28(11): 27-31, 37.
- [5] 滕海涛, 熊柏青, 张永安, 等. 高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的凝固态显微组织 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 852-865. TENG Haitao, XIONG Baiqing, ZHANG Yong'an, et al. Solidification Microstructure of High Zinc-Containing Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(4): 852-865.
- [6] 王杰, 张永安, 范云强, 等. Zn 和 Mg 元素对高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 合金铸锭及其均热态组织的影响 [J]. 稀有金属, 2016, 40(11): 1081-1087. WANG Jie, ZHANG Yong'an, FAN Yunqiang, et al. Microstructure of Semicontinuous Casting Ingot and Homogenization of High Zinc-Containing Al-Zn-Mg-Cu Alloys with Zn and Mg Additives[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40(11): 1081-1087.
- [7] 曾龙飞. 铝合金 FSW 构件时效成形的微观组织及力学性能 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013. ZENG Longfei. Research on Age Forming Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy FSW Components[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013.
- [8] 胡桂云, 陈康华, 陈送义, 等. 轨道交通用 7003 铝合金型材失效行为分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 802-808. HU Guiyun, CHEN Kanghua, CHEN Songyi, et al. Failure Behavior Analysis of Railway 7003 Aluminum Alloy Extrusions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(4): 802-808.
- [9] 李红, 刘旭升, 张宜生, 等. 新能源电动汽车异种材料连接技术的挑战、趋势和进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(12): 3853-3861, 3881. LI Hong, LIU Xusheng, ZHANG Yisheng, et al. Current Research and Challenges in Innovative Technology of Joining Dissimilar Materials for Electric Vehicles[J]. Materials Reports, 2019, 33(12): 3853-3861, 3881.
- [10] 张永顺, 沈州. CMT 焊接技术实例 [J]. 汽车与配件, 2015(6): 70-72. ZHANG Yongshun, SHEN Zhou. Example of Cold Metal Transition Welding Technology[J]. Automobile & Parts 2015(6): 70-72.
- [11] 王健, 卢雅琳, 徐文婷, 等. 热挤压工艺对 6061 铝合金组织及性能的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41(10): 172-175. WANG Jian, LU Yalin, XU Wenting, et al. Effect of Hot Extrusion Process on Microstructure and Properties of 6061 Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals,

- 2016, 41(10): 172-175.
- [12] 顾沛沛, 蒋秋妹, 刘俊生, 等. 关于铝合金晶间腐蚀试验标准的讨论 [J]. 轻工科技, 2018, 34(5): 118-119.
- GU Peipei, JIANG Qiumei, LIU Junsheng, et al. Discussion on Intercrystalline Corrosion Test Standard of Aluminum Alloy[J]. Light Industry Science and Technology, 2018, 34(5): 118-119.
- [13] 栗慧. 2219 铝合金直流正接 A-TIG 焊机机理研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- LI Hui. Research on DCEN A-TIG Welding Mechanism of 2219 Aluminum Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- [14] 王文明, 潘复生, LU Yun, 等. 喷射成形技术的发展概况及展望 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2004, 27(1): 101-106, 111.
- WANG Wenming, PAN Fusheng, LU Yun, et al. Advance in Spray Forming Technology and Its Prospect[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2004, 27(1): 101-106, 111.
- [15] 汪洪峰, 左敦稳, 王宏宇, 等. 5554 铝合金 TIG 焊缝组织与性能 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 753-757.
- WANG Hongfeng, ZUO Dunwen, WANG Hongyu, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 5554 Aluminum Alloy TIG-Welded Seam[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(6): 753-757.
- [16] 李晓泉, 初雅杰, 杨宗辉, 等. 热塑挤压改善镁合金熔焊接头疲劳性能及其微观机制 [J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 1-4, 113.
- LI Xiaoquan, CHU Yajie, YANG Zonghui, et al. Improving Fatigue Properties with Thermo Plastic Extrusion and Micro-Mechanism for Fusion Welded Joint of Magnesium Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(10): 1-4, 113.
- [17] 周学浩, 孙有平, 王文熙, 等. 固溶时效对 Al-Mg-Si-Cu 合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2017, 38(2): 30-37.
- ZHOU Xuehao, SUN Youping, WANG Wenxi, et al. Effect of Solid Solution and Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Si-Cu Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(2): 30-37.
- [18] DURSUN T, SOUTIS C. Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.

(责任编辑: 邓光辉)

## Study on Microstructure and Properties of Lithium Battery Pack of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy Welded by CMT

GAO Pingping<sup>1,3</sup>, PAN Yun<sup>2</sup>, CHEN Shuang<sup>1</sup>, LIU Chunxuan<sup>3</sup>, ZENG Weiquan<sup>2</sup>,  
OUYANG Zhijun<sup>2</sup>, WU Anru<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Vehicle and Transmission System of Hunan Province, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan 411104, China; 2. Automobile Engineering Research Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China; 3. Technology Center, Hunan Gold Sky Aluminum Industry High-Tech Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** The 7003 aluminum alloy commonly used in battery packs was taken as the research object. After joint welding by CMT (cold metal transition welding) process, the structure and performance were studied after heat treatment with solid solution at 485 °C for 3 h, artificial aging at 160 °C for 2 h and natural aging for 72 h. The corrosion resistance, mechanical properties and microstructure of the base material and weld of the aluminum alloy joint were studied and analyzed by means of slow strain rate tensile test, normal temperature tensile test, micro-vickers hardness, scanning electron microscope and other analytical methods. The results showed that when the slow strain rate was  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , the stress corrosion sensitivity index of the substrate was 2.73%, the welding sample was 9.74%, while the intergranular corrosion of the welded joint samples was level 4 and peeling corrosion rating was PA. The conductivity, tensile strength and elongation of the joint were 22.0% (IACS), 330.7 MPa and 10.0% respectively.

**Keywords:** cold metal transfer welding; 7003 aluminum alloy; stress corrosion; mechanical property