

DOI:10.13979/j.1007-7235.2021.12.011

不同焊丝对 6061 铝合金 MIG 焊缝组织和性能的影响

冉启洪, 李 佳, 许 红, 张 雷, 冉令坤, 邢晓燕

(重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400020)

摘要: 电动车轻量化是汽车行业研究热点。将电动车的电池包材料由钢材替换为铝合金后, 可使电池包的重量大幅度减轻, 电池包内各铝合金组件间优良的焊接质量至关重要。针对 6061 铝合金电池包分别选用 4043、5356、6061 和 6101 铝合金焊丝进行熔化极惰性气体保护焊(MIG), 并通过拉伸测试、硬度测试、金相组织观察、腐蚀测试以及疲劳测试研究不同焊丝焊接的焊缝组织和性能。结果表明: 相比其他三种焊丝, 5356 铝合金焊丝与 6061 铝合金母材匹配性较好, 母材与热影响区的强度、塑性与焊缝的比较接近, 焊缝的应力较小, 抗裂纹能力强, 其性能达到电池包铝合金连接要求。

关键词: 轻量化; 电池包; 6061 铝合金; MIG 焊; 焊缝

中图分类号: TG444.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7235(2021)12-0053-06

Microstructure and properties of 6061 aluminum alloy MIG weld with different welding wires

RAN Qi-hong, LI Jia, XU Hong, ZHANG Lei, RAN Ling-kun, XING Xiao-yan

(Chongqing Chang'an Automobile Co., Ltd., Chongqing 400020, China)

Abstract: The weight reduction of electric vehicles has become a research hotspot in the automotive industry. The weight of the battery pack can be greatly reduced by replacing steel with aluminum alloy. Welding quality is important for aluminum alloy components in the battery pack. 4043, 5356, 6061 and 6101 aluminum alloy welding wires were selected for MIG weld. Weld microstructure and properties with different welding wires were studied by tensile test, hardness test, metallographic observation, corrosion test and fatigue test. The results show that 5356 aluminum alloy wire matches best with 6061 aluminum alloy base metal compared with other test wires. The wire and base metal have similar HAZ strength and plasticity. The stress on the weld is low and the resistance to crack is strong. The performance meets the welding requirements of aluminum alloy for battery package.

Key words: lightweight; battery pack; 6061 aluminum alloy; MIG welding weld

作为电池组的载体, 电池包起着保护电池组安全的关键作用。传统电池包的材料多为钢材, 电池包的轻量化作为电动车轻量化中的重要一环,

CHEN、汪佳龙等^[1-5]对电池包下箱体从材料层面进行了轻量化方面的研究。

以某电池包为研究对象, 其总体模型如图 1 所

收稿日期: 2020-01-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0101700)

第一作者简介: 冉启洪(1975-), 男, 重庆人, 高级工程师。

示。由图 1 可见,电池包由上箱体、下箱体、底板加强板和支架四部分组成。将电池包 Q235 钢材料替换为 6061 铝合金后(图 1 中下箱体与支架为 6061 铝型材,其余为铝合金板材),电池包的重量减少了 34.2 kg,减重比例达到 36%。研制铝合金轻量化电池包的关键是保证电池包内各铝合金组件间的焊接质量。本试验采用熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)对 6061 铝合金电池包进行焊接,探讨不同焊丝对焊缝组织和性能的影响。

1 试验方法

轻量化铝合金电池包材料为 6061 铝合金。采

用熔化极惰性气体保护焊进行焊接,焊丝选用 4043、5356、6061 和 6101 四种铝合金焊丝,其化学成分如表 1 所示。

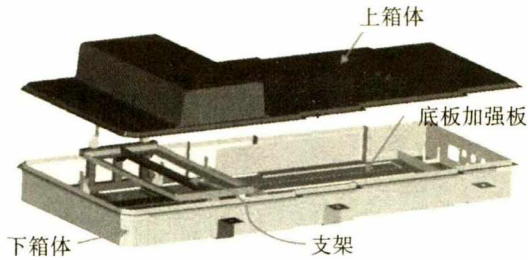


图 1 某电池包总体模型

Fig.1 The 3D model of a battery pack

表 1 母材及四种铝合金焊丝化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of the base metal and four kinds of aluminum alloy welding wires(wt/%)

材料	Si	Mg	Fe	Cu	Cr	Mn	Zn	Ti	Al
6061 母材及 6061 焊丝	0.40~0.80	0.80~1.20	0~0.70	0.15~0.40	0.04~0.35	0.15	0.25	0.15	余量
4043	4.5~6.0	0.05	0.80	0.30		0.05	0.10	0.20	余量
5356 焊丝	0.25	4.5~5.5	0.40	0.10	0.05~0.20	0.05~0.20	0.10	0.06~0.20	余量
6101 焊丝	0.30~0.70	0.35~0.80	0.40	0.10	0.03	0.03	0.10		余量

1.1 拉伸试验

拉伸试验包括铝合金板材拉伸试验与焊接试样拉伸试验。板材拉伸试验所用铝合金板材厚度为 3.0 mm,按照 GB/T 228-2010 标准在 CMT5305 拉伸试验机上进行试验。在焊接试样拉伸试验中,分别对采用 4043、5356、6061、6101 铝合金焊丝的焊接试样进行拉伸测试。

1.2 焊缝、热影响区以及母材的硬度测试

焊接接头微区力学性能无法通过拉伸试验测量,因此本研究采用测量接头处维氏硬度(HV0.5)的分布来反映接头的力学性能。为避免接头位置的组织突变导致硬度波动,在同一区域测量 3 次取其平均值。

1.3 焊接接头的金相组织观察

本次研究中,利用低倍显微镜首先对采用 4043、5356、6061、6101 铝合金焊丝焊接接头关键部位金相组织进行观察,其次对焊接区、焊缝区以及热影响区的金相组织进行观测,最后将放大倍数从 100 倍变为 200 倍,对采用 5356 铝合金焊丝的铝合金焊接接头的金相组织进行更细致的观测。

1.4 焊接试样腐蚀测试

为研究腐蚀对铝合金焊接试样的影响,对采用

4043、5356、6061、6101 铝合金焊丝焊接的试样进行腐蚀,腐蚀介质为酸性盐雾介质,其配方为在 5% (质量分数)氯化钠溶液中加入一些冰醋酸,调整介质浓度直至溶液的 pH 值为 3 左右,腐蚀时间分别为 12 h、24 h、96 h、168 h,并记录合金焊接试样在不同时间腐蚀后的宏观形貌。

1.5 焊接试样疲劳试验

为满足电池包壳体开发对铝合金材料耐久性能的要求,在上述焊缝准静态拉伸测试结果基础上,择优选择最佳焊丝焊接样品,进一步进行焊缝疲劳性能试验。疲劳试验按照 GB/T 26957-2011 标准进行,使用的设备为 PLG200 高频疲劳试验机。焊缝疲劳试样如图 2 所示。

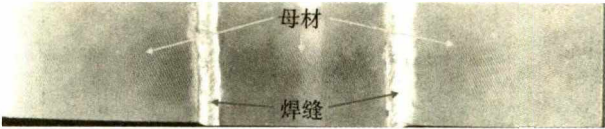


图 2 铝合金搭接焊件试样

Fig.2 The lap joint sample of aluminum alloy

随后利用 PLG200 高频疲劳试验机对铝合金搭接焊件进行轴向力控制的疲劳试验,获得不同最大

应力水平下的疲劳寿命,并拟合出 $S-N$ 曲线。试验全程采用计算机实时监控,疲劳周次由计算机自动记录,疲劳加载模式为拉-拉加载,试验加载谱为正弦波,载荷比 $R=0.1$,疲劳失效判据为试样开始出现疲劳裂纹。

2 结果与分析

2.1 拉伸试验结果与分析

所选 6061 铝合金在 0° 、 45° 、 90° 的拉伸真应力-真应变曲线如图 3。由图 3 可见,屈服强度约为 254.27 N/mm^2 ,抗拉强度约为 305.12 N/mm^2 ,断后伸长率约为 15.76% ,具有较高的强度和较好的塑性,因此适用于轻量化铝合金电池包的开发。

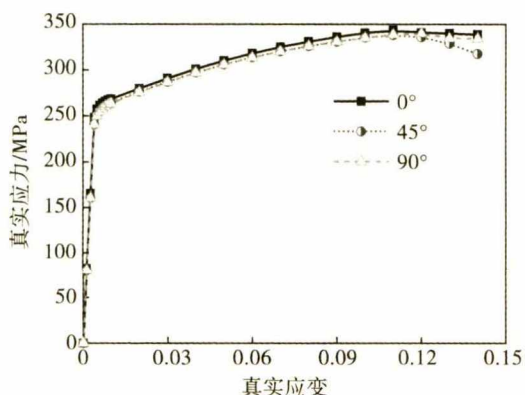


图3 6061 铝合金材料的拉伸真应力-真应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves of 6061aluminum alloy

使用 4043、5356、6061、6101 铝合金焊丝的铝合金焊接接头宏观状态如图 4 所示。由图 4 可见,采用 5356 铝合金焊丝的焊接接头焊缝细长、焊接宽度窄、表面型面良好、局部有少量焊瘤;采用其他三种焊丝的焊接接头表面型面凹凸不齐、焊缝较宽、外观形貌不良,尤其是使用 6061 铝合金焊丝和 6101 铝合金焊丝的焊接接头焊缝宽度不齐、边缘存在缩沟、焊缝中间存在裂纹。综合整体焊接接头外观质量,使用 5356 铝合金焊丝焊接的焊缝质量最好,达到焊接要求。

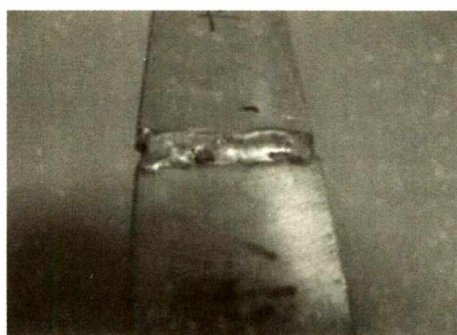
铝合金焊接试样的拉伸测试结果如表 2 所示。只有用 5356 焊丝的接头断裂位置在母材上,用 4043、6061 和 6101 焊丝的均断在焊缝处;从拉伸性能来看,5356 焊缝接头抗拉强度最高(达到 141 N/mm^2),4043、6101 和 6061 的依次降低,这说明 5356 焊丝接头性能不低于母材,这可能与合金元素 Mg 有关系。



a-4043 铝合金焊丝焊接



b-5356 铝合金焊丝焊接



c-6061 铝合金焊丝焊接



d-6101 铝合金焊丝焊接

图4 不同焊丝焊接 6061 铝合金焊接接头的宏观形貌

Fig.4 Macroscopic feature of 6061 aluminum alloy welded joint using different welding wires

2.2 硬度测试结果与分析

焊接试样的硬度测试情况如图 5 所示。可以看出,5356 焊丝接头整体硬度分布低于其他三种焊丝接头,但母材区、热影响区和焊缝区的硬度相对一

表 2 不同焊丝焊接 6061 铝合金焊接
接头的拉伸强度

Table 2 Tensile strength of 6061 aluminum alloy welded joints with different welding wires

焊丝	$R_m/(N \cdot mm^{-2})$	$R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$	断裂位置
4043	107.11	94.30	焊缝
5356	141.14	86.55	母材
6061	62.20	54.19	焊缝
6101	105.12	71.97	焊缝

致;相比而言,4043、6061 和 6101 焊丝的焊缝区的硬度均超过母材硬度约 15 HV ~ 20 HV,这代表着焊缝区的强度要大于母材,这与前述的拉伸性能数据矛盾,并且这三种焊丝制作的焊接件断裂均发生在焊缝处,说明焊缝可能存在缺陷。

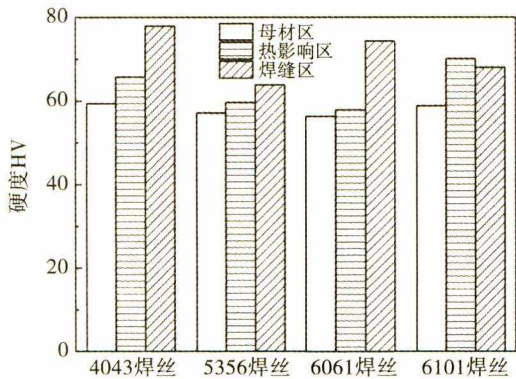


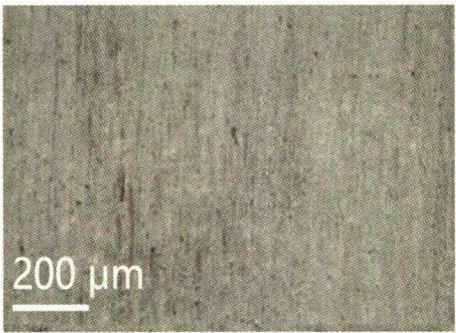
图 5 不同焊丝焊接 6061 铝合金焊接接头的硬度分布
Fig. 5 Hardness distribution of 6061 aluminum alloy welded joints with different welding wires

2.3 金相组织观测结果与分析

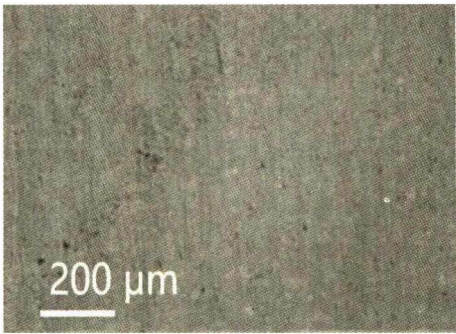
利用低倍显微镜对采用 4043、5356、6061、6101 铝合金焊丝的焊接接头关键部位金相组织进行观察,结果如图 6 所示。采用 6061 和 6101 铝合金焊丝的焊接接头的宏观裂纹比较明显,相比之下,采用 4043 和 5356 铝合金焊丝的焊接接头基本无裂纹,接头组织更好。

利用低倍显微镜对焊接区、焊缝区以及热影响区的金相组织进行观测,观测结果如图 7 所示。可见,采用 4043 和 5356 焊丝的焊接接头铸造组织比较明显。

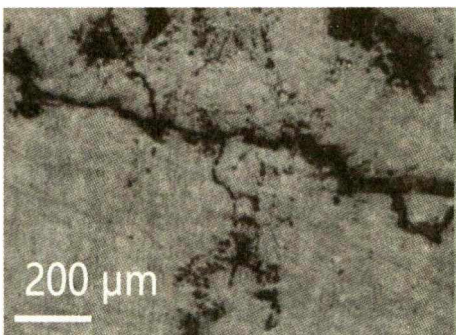
由上述分析可得,采用 5356 铝合金焊丝进行焊接可得到最优的焊接质量,焊缝微观组织为(α + Si)共晶组织,同时存在少许初晶硅颗粒。



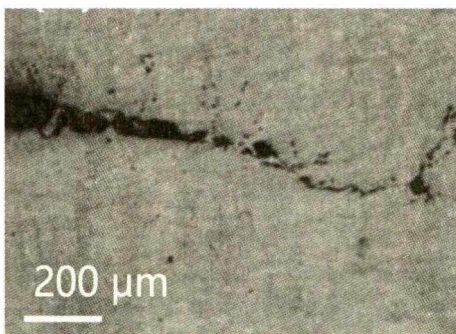
a-4043 铝合金焊丝焊接



b-5356 铝合金焊丝焊接



c-6061 铝合金焊丝焊接



d-6101 铝合金焊丝焊接

图 6 不同焊丝焊接 6061 铝合金焊接接头的金相组织
Fig. 6 Microstructures of 6061 aluminum alloy welded joints with different welding wires

2.4 焊接试样腐蚀测试结果与分析

铝合金焊接试样在不同腐蚀时间下的腐蚀结果如图 8 所示。由图 8 可见,铝合金试件焊缝表面在腐蚀一段时间后出现了白色颗粒状的腐蚀产物,当



图 7 不同焊丝焊接 6061 铝合金焊接接头不同区域的金相组织

Fig. 7 Microstructures of aluminum alloy welded joints with different welding wires in different areas

腐蚀时间为 12 h 时,焊缝表面无腐蚀膜,焊缝和母材的颜色与腐蚀前差别不大;当腐蚀时间为 24 h 时,焊接热影响区表面有浅灰色腐蚀膜出现;当腐蚀时间为 96 h 时,焊缝表面有灰色腐蚀膜,焊缝、母材均出现白色颗粒状的腐蚀产物;当腐蚀时间为 168 h 时,焊缝表面颜色加深,逐渐变为灰黑色,并且白色颗粒状腐蚀产物增多,但并没有出现起泡现象。可见经腐蚀测试后的焊缝区、热影响区和母材区均出现变色现象,但并没有发生明显的腐蚀,因此本研究中的铝合金焊件耐腐蚀性能满足要求。

2.5 焊接试样疲劳试验结果与分析

一般对于具体材料,其不同力学性能之间具有一定的对应关系,具有最佳静态拉伸力学性能的材质往往也拥有最佳的动态疲劳、冲击性能。因此本研究中基于静态测试结果,只选取强-塑性最优的用 5356 焊丝制作的焊接件进行疲劳测试。利用 PLG200

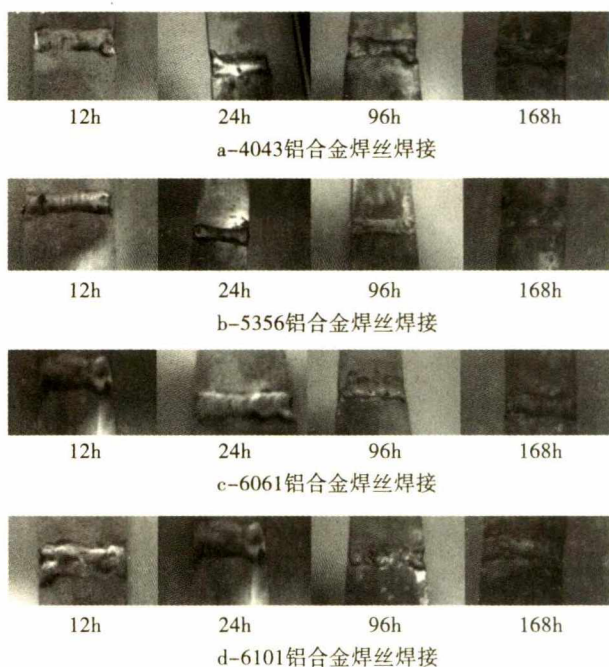


图 8 不同焊丝焊接铝合金焊接接头经不同腐蚀时间处理后的宏观形貌

Fig. 8 Macroscopic features of 6061 aluminum alloy welded joints with different welding wires after different corrosion time treatment

高频疲劳试验机对铝合金搭接焊件进行轴向力控制的疲劳试验,获得不同最大应力水平下的疲劳寿命,并拟合出 $S-N$ 曲线,如图 9 所示。在不同最大应力水平下,铝合金焊件表现出较长的疲劳寿命,因此该电池包铝合金焊件具有较好的疲劳性能,可在实际工况中保持良好的工作状态。

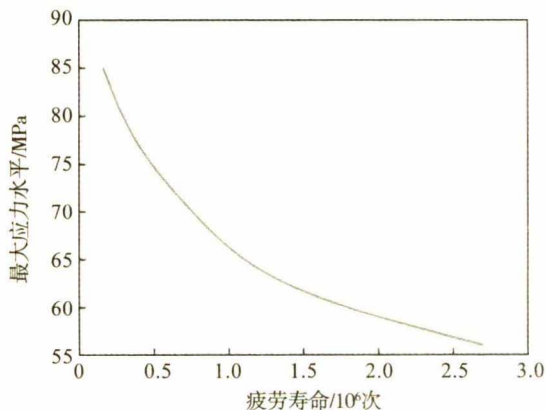


图 9 采用 5356 铝合金焊丝焊接 6061 铝合金接头的疲劳试验 $S-N$ 曲线

Fig. 9 Fatigue test $S-N$ curve of 6061 aluminum alloy welded joints with 5356 aluminum alloy welding wire

3 结 论

1) 分别使用 4043、5356、6061、6101 铝合金焊丝焊接 6061 铝合金, 其中采用 5356 铝合金焊丝焊接的焊缝细长、焊接宽度窄、外观质量最好, 同时也具有最好的抗裂纹能力。

2) 5356 铝合金焊丝与 6061 铝合金母材的匹配性较好, 母材与焊接接头热影响区及焊缝的强度、塑性比较接近, 焊缝的应力也较小, 因此适用于轻量化

铝合金电池包的焊接。

3) 采用 5356 铝合金焊丝焊接的接头的金相组织中基本无裂纹, 接头组织更优良。

4) 焊接试样经腐蚀后, 焊缝区、热影响区和母材区均出现变色现象, 但并没有发生明显的腐蚀, 满足耐腐蚀性能要求。

5) 焊件表现出优良的疲劳性能, 可使电池包在实际工况中保持良好的工作状态。

参考文献:

- [1] CHEN Q S, ZHAO H, KONG L X. Research on battery box lightweight based on material replacement[C]//2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICM-MCCE 2017). 2017.
- [2] 汪佳农, 赵晓昱. 碳纤维环氧树脂复合材料电池箱的轻量化研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(12):99-102.
- [3] ZHAOX Y, ZHANG B M. Lightweight design of battery box for electric vehicle[C]//Proceedings of 21st International Conference on Composite Materials, 2017.
- [4] BAUMEISTER J, WEISE J, HIRTZ E. Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2015, 45(12):1099-1107.
- [5] CHOI C H, CHO J M, KIL Y. Development of polymer composite battery pack case for an electric vehicle[J]. Sae Technical Papers, 2013(2):188-196.

俄铝公司与格朗吉斯铝业公司合作生产铝板带

俄铝公司与格朗吉斯铝业公司已于 2021 年 5 月中旬签署协议, 后者将用俄铝以水电生产的绿色铝合金轧制汽车板、带材。这些铝合金是用低碳的 ALLOW 锭配制的, 其 CO_2 排放量低于 4 t eq/t 铝, 而当前全球提取的原铝的排放量为 $12 \text{ t eq CO}_2/\text{t}$ 铝。俄铝生产多种铝合金, 包括称为 Sc Alution 的含钪的铝合金, 可制造更轻的汽车零部件, 从而降低燃料消耗和温室气体排放。

(王祝堂)