

# 薄壁电池壳体焊缝部位配合间隙对电子束焊接的影响

## Influence of Weld Seam Gap of Thin Cell Case on Electron Beam Welding

中国电子科技集团公司第十八研究所 陈 军 周春亮 魏乃达 张洪凯

**[摘要]** 空间锂离子电池现基本采用薄壁电池壳体,材质为LF21 铝合金,用电子束焊接进行壳体封装。电子束焊接焊出的铝合金焊缝强度高,I级焊缝合格率高,故空间产品大多采用电子束焊接。但由于电子束焊接属于精密高能束焊接方法,对被焊工件焊缝的配合间隙有着严格的要求,所以通过一些列试验来研究薄壁电池壳体焊缝部位配合间隙对电子束焊接的影响,得到了相应的结论,以此来指导实际生产中零部件加工尺寸的设计和检验,提高产品可靠性。

**关键词:** 薄壁电池壳体 LF21 铝合金 电子束焊接 配合间隙

**[ABSTRACT]** Space lithium-ion cell now basically uses thin cell case which is made of LF21 aluminum alloy, packed by electron beam welding. The EBW joint of aluminum is strong, with high I grade rate, so space products usually use electron beam welding. However, because EBW belongs to the precise high energy beam welding method, it has strict requirements on welding seam gap, therefore, a series experiments are made to study the influence of seam gap of space lithium-ion thin cell case on electron beam welding. Corresponding conclusions are gotten, in order to guide the design and testing of parts machining dimensions in actual production, and product reliability is improved.

**Keywords:** Thin cell case LF21 aluminum alloy Electron beam welding Seam gap

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.004

电子束焊接起源于20世纪20年代,是由德国物理学家斯塔格瓦耳德博士根据原子能工业需要提出的一种高能束焊接方法,20世纪60年代初期作为一种先进的特种焊接技术开始应用于工业生产中,具有能量密度高、焊接深宽比大、焊接变形小、可控精度高、在真空环境下焊缝纯净等突出优点。我国从20世纪60年代开始电子束焊机的研制,到20世纪80年代中后期,国内电子束焊接装置开始从实验室研究过渡到生产应用<sup>[1-3]</sup>。

影响电子束焊接质量的因素很多,配合间隙是影响电子束焊接质量的一个重要因素。对于空间锂离子电

池的薄壁壳体,配合间隙的控制更显得尤为重要。

### 1 验证试验准备

#### 1.1 焊件

本试验采用模拟真实电池壳体焊接结构的焊件进行试验,该焊件具有如下特质(图1)。

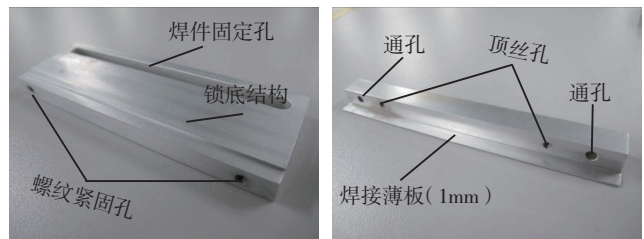
(1)材质:LF21 铝合金;

(2)数量:13套;

(3)焊接结构:模拟电池焊接结构,焊接部位薄板厚度简化为1mm,带有锁底;

(4)对接间隙通过螺纹及顶丝结构可调。

焊件在焊接前均按照单体电池工艺进行碱洗。



(a) 锁底端

(b) 1mm 厚度端

图1 焊件照片

Fig.1 Weldment photos

#### 1.2 工装

为保证焊接面平整及焊件良好定位,采用压板固定工装。

#### 1.3 配合间隙调整方式

使用塞尺来调整焊缝的配合间隙,然后通过螺纹顶丝结构来固定配合间隙。

### 2 验证试验要求

#### 2.1 观察焊缝成形

观察焊缝成形是否良好,焊缝应连续、均匀,无明显咬边和飞溅,无气孔、夹杂物和断点等缺陷,与母材面相比不应明显下陷。

#### 2.2 焊缝截面形貌观察

对焊缝进行横向剖切、打磨和腐蚀,对比不同配合间隙焊件与紧密配合间隙焊件焊后焊缝底部形貌。焊缝应圆滑过渡,无顶尖状,否则间隙值为不合理。

#### 2.3 平均熔深偏差率

在本试验中,紧密配合试样的熔深值称为标准熔深,其他配合间隙值的试样熔深取平均熔深。对比不同配合间隙焊件与紧密配合间隙的平均熔深偏差率:

平均熔深偏差率 = (平均熔深 - 标准熔深) / 标准熔深,偏差率值 ≤ 5% 为合理,否则间隙值不合理。

### 3 验证试验

#### 3.1 试验流程

##### 3.1.1 流程图

对每一个焊件,试验流程如图 2 所示。

##### 3.1.2 间隙值及焊接数量

分别对 5 种间隙类型进行验证,具体间隙值及焊件数量见表 1。

##### 3.1.3 焊接参数

表 1 中 13 个焊件均按照表 2 中的焊接参数进行焊接。

#### 3.2 取样方法

焊后对试件进行剖切取样,得到最终试样,然后检验分析。

得到的最终试样是位于整条焊缝中段的部分,该处焊缝质量的好坏能够反映焊缝整体质量水平(不包括起弧收弧段)。

#### 3.3 试验结果分析

##### 3.3.1 外观比对

5 种配合间隙共 13 条焊缝的最终试样焊缝外观如图 3 所示。

(1)图 3 (a)为紧密配合间隙,为标准对比试样,焊

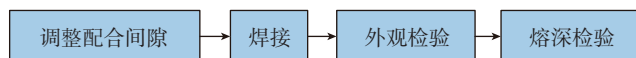


图2 试验流程图  
Fig.2 Test flowchart

表1 配合间隙值

序号	间隙值 /mm	焊件数 / 个
1	0.10	3
2	0.15	3
3	0.20	3
4	0.25	3
5	紧密配合(塞尺不可测)	1

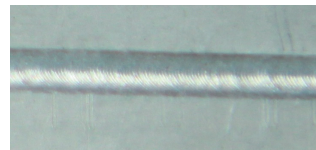
表2 焊接参数

工作距离 /mm	加速电压 /kV	聚焦电流 /A	焊接束流 /mA	焊速 / (m·min <sup>-1</sup> )
280	40	1.93	20	1.5

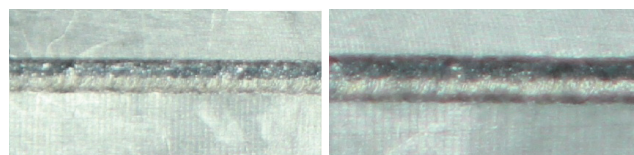
缝外观整洁、饱满,满足第 2 节中的要求;

(2)图 3 (b)~(d)为 0.10mm 配合间隙,3 个试样焊缝外观均整洁,较为饱满,与紧密配合间隙几乎无差别,满足第 2 节中的要求;

(3)图 3 (e)~(g)为 0.15mm 配合间隙,3 个试样焊缝外观均整洁,3# 试样焊缝表面较平缓,与母材平面相比并未下陷,其余两条焊缝较为饱满,整体来讲此 3

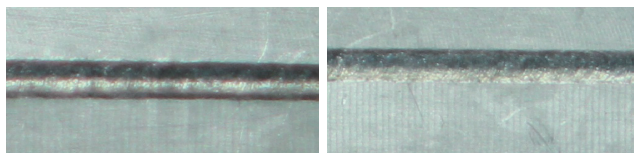


(a)紧密配合试样



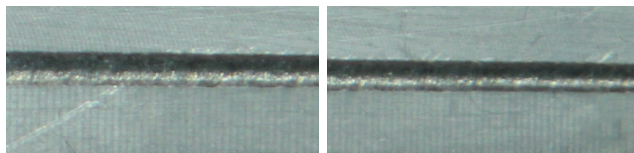
(b)0.10mm 试样 1#

(c)0.10mm 试样 2#



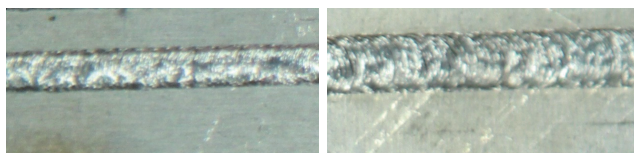
(d)0.10mm 试样 3#

(e)0.15mm 试样 1#



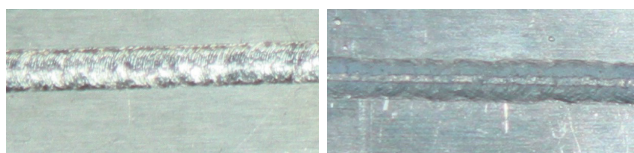
(f)0.15mm 试样 2#

(g)0.15mm 试样 3#



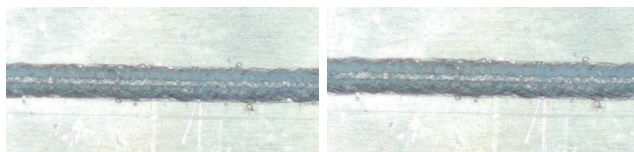
(h)0.20mm 试样 1#

(i)0.20mm 试样 2#



(j)0.20mm 试样 3#

(k)0.25mm 试样 1#



(l)0.25mm 试样 2#

(m)0.25mm 试样 3#

图3 试样焊缝外观图

Fig.3 Appearance of specimen welding seam

个试样与紧密配合间隙差别不大,满足第2节中的要求;

(4)图3(h)~(j)为0.20mm配合间隙,3个试样焊缝外观均整洁,2#试样焊缝表面略微下陷,3#试样焊缝表面较平缓,与母材平面相比并未下陷,1#试样焊缝较为饱满,整体来讲此3个试样与紧密配合间隙差别不太大,基本满足第2节中的要求;

(5)图3(k)~(m)为0.25mm配合间隙,3个试样焊缝外整洁,但焊缝表面较母材面相比均明显下陷,整体来讲此3个试样与紧密配合间隙差别较大,不满足第2节中的要求。

### 3.3.2 熔深比

将13个试样的焊缝截面打磨腐蚀,得到焊缝截面照片如图4所示,每个照片中画圈部位为焊缝。

(1)图4(a)为紧密配合试样,为标准对比试样,焊缝底部圆滑过渡,无顶尖状,满足第2节中的要求。经测量标准熔深  $d \approx 1.89\text{mm}$ 。

(2)图4(b)~(d)为0.10mm配合间隙的3个试样,焊缝底部均圆滑过渡,无顶尖状,满足第2节中的要求。熔深经测量  $d_1 \approx 1.90\text{mm}$ ,  $d_2 \approx 1.91\text{mm}$ ,  $d_3 \approx 1.90\text{mm}$ , 平均熔深  $d \approx 1.90\text{mm}$ 。

(3)图4(e)~(g)为0.15mm配合间隙的3个试样,焊缝底部均圆滑过渡,无顶尖状,满足第2节中的要求。熔深经测量  $d_1 \approx 1.91\text{mm}$ ,  $d_2 \approx 1.90\text{mm}$ ,  $d_3 \approx 1.95\text{mm}$ , 平均熔深  $d \approx 1.92\text{mm}$ 。

(4)图4(h)~(j)为0.20mm配合间隙的3个试样,焊缝底部均圆滑过渡,无顶尖状,满足第2节中的要求。熔深经测量  $d_1 \approx 1.97\text{mm}$ ,  $d_2 \approx 1.92\text{mm}$ ,  $d_3 \approx 2.0\text{mm}$ , 平均熔深  $d \approx 1.96\text{mm}$ 。

(5)图4(k)~(m)为0.25mm配合间隙的3个试样,1#和2#试样焊缝底部有顶尖状出现,同时可以看出1#和3#试样焊缝与母材面相比明显下陷,不满足第2节中的要求。熔深经测量  $d_1 \approx 2.20\text{mm}$ ,  $d_2 \approx 2.11\text{mm}$ ,  $d_3 \approx 1.99\text{mm}$ , 平均熔深  $d \approx 2.1\text{mm}$ 。

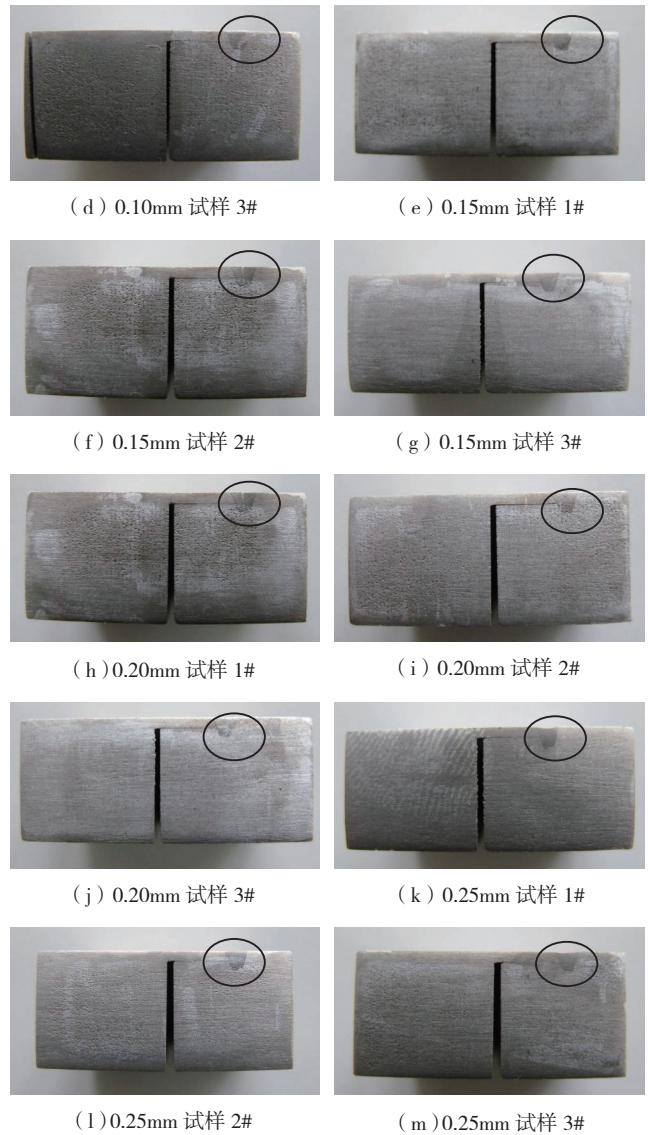


图4 试样焊缝截面照片

Fig.4 Appearance of specimen welding seam

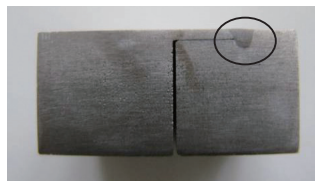
### 3.3.3 小结

不同配合间隙(紧密配合间隙除外)试验结果分析比对汇总如表3所示。4个间隙值中,最大合理间隙值为0.20mm。同时可以看出,在同样焊接参数下,平均熔深随着间隙值的增大而增大。

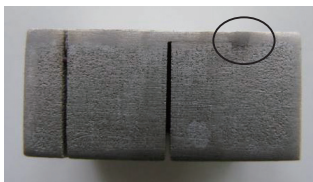
表3 试验结果比对汇总表

序号	间隙值/mm	焊缝成形	焊缝截面	平均熔深/mm	平均熔深偏差率/( $\leq 5\%$ 为合理)	结论
1	0.10	良好	合格	1.90	0.5	合理
2	0.15	较好	合格	1.92	1.6	合理
3	0.20	较好	合格	1.96	3.7	合理
4	0.25	不太好	不合格	2.10	11.1	不合理

(下转第10页)



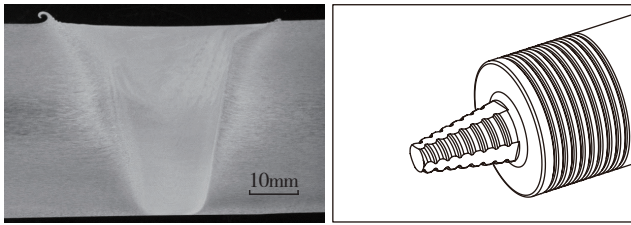
(a) 紧密配合试样



(b) 0.10mm 试样 1#



(c) 0.10mm 试样 2#

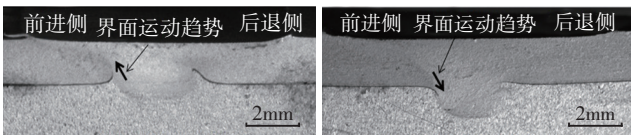


(a) 40mm 铝合金 FSW 焊核 (b) 搅拌头示意图

图6 40mm厚铝合金FSW

Fig.6 FSW of 40mm-thick aluminum alloy

(2) 为了明确焊接界面处的刚性质点在竖直方向的运动规律,通过对普遍存在于 FSW 搭接接头内的界面畸变现象分析进行说明<sup>[5]</sup>。图 7 为 FSW 搭接焊接过程中界面畸变情况的试验结果。图 7 (a) 为搅拌摩擦搭接焊过程中常见的现象,即前进侧的界面会向焊缝上表面上翘,原因为搅拌针上的右旋螺纹在主轴逆时针旋转焊接的过程中会驱动前进侧附近的刚性质点向上运动,也就是界面畸变上翘的原因为搅拌针上的螺纹驱动作用。图 7 (b) 的试验结果验证了界面畸变与搅拌针螺纹的驱动作用有关,即采用相同结构的搅拌针,把主轴旋转方向调整为顺时针,则前进侧界面畸变向下翘。工程实践表明,在选用搅拌针没有螺纹结构时,前进侧的界面仍然表现为向焊缝的上表面运动,原因为焊缝的上表面存在轴肩影响区,产热量和塑性金属流动范围更大,导致焊缝上部的温度高。更高的温度以及塑性金属流动范围更大,导致焊缝上部塑性金属的内压力小,故前进侧搭接界面处刚性质点发生向上运动的趋势。通过分析搭接界面前进侧界面畸变的原因,得出减弱或消除 FSW 前进侧搭接界面畸变的措施为,优化搅拌针对塑性金属向上的驱动力,同时降低轴肩影响区的产热量,降低焊缝上下部的温度梯度。前进侧搭接界面向上的运动趋势证明,文中 S 线特征消失模型中的质点还发生复杂的 Z 向范围内的运动。文中模型为了简化分析,没有考虑质点的上下运动。



(a) 右旋螺纹逆时针旋转 (b) 右旋螺纹顺时针旋转

图7 FSW搭接焊试验结果

Fig.7 Results of FSW lap

## 4 结论

(1) 提出 S 线特征模型,抽象地描述了 S 线特征的产生原因及分布形态,通过对 XY 面、XZ 面内 S 线特征的试验研究,证明该模型具有合理性。该模型为 S 线特征的形成及避免提供了理论依据。(2) 通过对 S 线特征

的分析,总结了 FSW 过程中塑性金属流动的驱动力及阻力等受力条件,在分析 S 线特征分布的同时,以 S 线特征为示踪方法侧面描述了塑性金属流动的规律,即塑性金属呈现周期转移、层内流动的规律。(3) S 线特征消失模型可以为薄板铝合金 FSW 接头 S 线特征、搭接界面畸变的避免等问题提供理论依据。(4) XY 面及 XY 面焊核内 S 线特征的试验研究,证明 6005 铝合金 FSW 焊缝 S 线特征分布于焊核的中部区域,待焊界面处的刚性质点虽然经过搅拌头的驱动作用但仍保持在原先位置附近,即 6005 铝合金待焊界面处的刚性质点具有在 FSW 过程中保持在原有位置取向的特性,优化搅拌头结构及焊接参数的最终目的正是驱动质点离开原先的位置并发生大范围的位移,文中的研究成果明确了评判搅拌头及 FSW 参数的依据。

## 参考文献

- [1] Chen H B, Yan K. The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering*, 2006,433(1-2): 64-69.
- [2] 谢腾飞,邢丽. 搅拌针形状对 FSW 焊缝 S 曲线形成的影响. *热加工工艺*, 2008,37(7):64-66.
- [3] 王卫兵,佟建华. FSW 待焊界面消失模型. *焊接学报*, 2013,34(6):37-40.
- [4] Klagesd H K. The "lazy S" feature in friction stir welding of AA2099 aluminum-lithium alloy[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007.
- [5] 郭晓娟,李光. 搅拌摩擦搭接焊界面成形机制及影响因素. *航空制造技术*, 2009(12):62-65.

(责编 一帆 古京)

(上接第 6 页)

## 4 结论

(1) 针对薄壁焊接,配合间隙越大,焊缝表面越趋于下陷,熔深越深。

(2) 经验证 0.20mm 间隙值合理,故锂离子单体电池生产工艺中规定的允许最大间隙值 0.15mm 合理而且严格,工艺过程控制有效。

(3) 针对薄壁焊接,在同样焊接参数下,平均熔深随着间隙值的增大而增大,故在实际生产中,对于稍大一些的对接配合间隙,可适当减小线能量,如减小焊接束流,以获得相对稳定的熔深。

## 参考文献

- [1] 刘湘. 高能束流加工技术的现状及发展. *航空制造技术*, 1995(S1):13-15.
- [2] 张秉刚,吴林,冯吉才. 国内外电子束焊接技术研究现状. *焊接*, 2004(2):5-8.
- [3] 王辉. 钛合金张力贮箱焊接工艺改进. *火箭推进*, 2001(5):37-41.

(责编 亿霖)