

# 搅拌摩擦焊接大厚度铝合金 法兰框的应用研究

## Application of FSW on Big Thickness Aluminum Flange

北京特种机械研究所 简波 倪淑凤  
中国人民解放军驻 125 厂军代室 康占祥 张晓艳  
北京赛福斯特技术有限公司 李继忠



简波

工程师,长期从事搅拌摩擦焊接和铝合金大型薄壁结构件制造及相关焊接工艺研究。

法兰框架结构在有恒温、恒湿、气密等特殊要求的薄壁箱体中较为常见,法兰框架一般处在箱体开合部位,在整体结构中起着盖体开合、安装受力部件的主承力框的作用。法兰框一般采用  $\delta$  50mm 左右的大厚度 5A06 铝合金制成,为了保证承力框体强度,工程中往往采用整料加工以保证结构具有更好的一致性。通

采用搅拌摩擦焊接方法进行法兰端框的拼焊技术途径可行,接头的焊缝质量和框架焊接尺寸精度都可得到很好的保障,试验件焊后机加、焊接工艺适应性良好,所研制产品顺利通过了交付和例行试验考核,为后续批产型号应用奠定了技术基础。

常幅面尺寸约  $1.5\text{m} \times 2.5\text{m}$  的法兰框架,所用边框宽度只有不到 0.1m,框体材料利用率一般处在 20% 以内,耗费极大。

生产中虽可以采用套裁的方式将内部挖出来的材料另作他用,但可套裁的数量有限,还是会有大量法兰芯剩余,产品的材料利用还是很低,且费工费时。

本着降本增效的目的,工艺人员一直在探索有效的手段,将其改为拼焊结构,以提高材料利用率,降耗节能。如图 1 所示,整个法兰框如果采用绿色和粉色两种铝带板拼焊后加工成图示外廓线形状,材料利用率将大大提高。由于法兰框架属主承力结构,且焊后进行数控机加,对焊接质量要求很高,工艺急需解决的问题

是找到一个合适的拼焊工艺,使焊接强度达标,焊接方法可靠,同时操作相对简便。

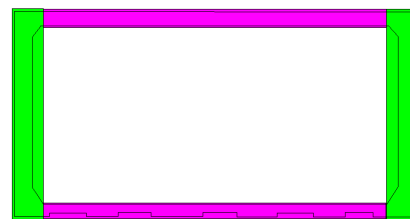


图1 法兰框拼焊及后续加工示意图

传统大厚板的拼焊一般采用熔焊,需要开双面坡口,多次堆焊,因铝合金焊接缺陷率高,为保证焊缝质量,每焊一层都需要进行 X 光探伤合格后才能继续焊接,操作比较繁琐。

搅拌摩擦焊接作为新兴的非熔化焊接方法,在铝合金的焊接上

具有较大的优势,焊接厚度范围大(1~70mm),效率较高,不需特殊处理焊口、不需开坡口,焊接过程机械化程度高,质量一致性好。搅拌摩擦焊(FSW)的工作状态如图2所示,搅拌头是其焊接工作的核心部件。工作时,焊接设备带动搅拌头高速旋转插入被焊工件的待焊位置,施加一定压力后匀速前进,搅拌头与工件之间的高速摩擦和剧烈的塑性变形释放热量,使焊接区温度上升,焊接区金属原子活化、被焊材料软化,达到可焊状态;同时,搅拌头的旋转、挤压,使焊缝两侧金属流动、融合,形成金属键连接,冷却后得到可靠的焊接接头。

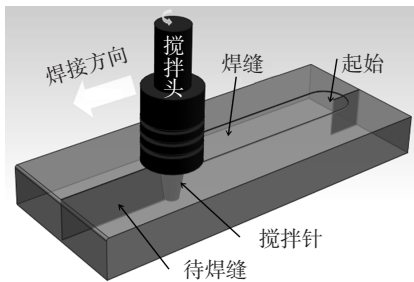


图2 搅拌摩擦焊接过程示意图

搅拌摩擦焊 FSW (Friction Stir Welding) 是英国焊接研究所(TWI)于1991年发明的一项固相摩擦焊接技术,开发初期主要用于铝合金的连接。FSW是目前铝、镁、铜及有色金属等轻合金连接的最先进连接技术之一,可以成功地实现各种铝合金、镁合金等轻合金的连接。尤其是能够可靠连接熔焊方法很难焊接的A1-Cu(2000系列)和A1-Zn(7000系列)等高强铝合金。开发初期主要用于铝合金的焊接,目前已拓宽到镁、铜、铅、钛及不锈钢等材料<sup>[1-2]</sup>。

将整料套裁和两种焊接接方法的用料指标和优缺点进行比较可以看出,搅拌摩擦焊接属于优选方案,如表1所示。鉴于以上需求和FSW工艺特点,本文中对搅拌摩擦焊接箱体法兰框架展开了应用研究,开发

出了适用的法兰端框的FSW拼焊工艺。

### 试验方法

根据应用背景,本文采用50mm厚度5A06铝合金板材进行试验,在二维定梁龙门式搅拌摩擦焊设备(编号CFSWT-027)进行焊接,拉伸试验采用Z100电子万能材料试验机,MG161型X射线机、金相等试验采用常见手段,进行焊接试验和接头性能测试。

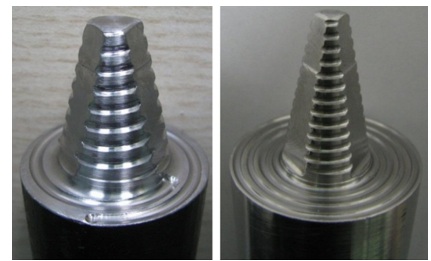
#### 1 搅拌头和参数试验

因现有设备焊接能力为单面30mm厚度,受设备条件限制采用了双面焊接工艺,单面焊接厚度大于25mm,双面有一定长度的叠加,以保证焊透。借鉴以往厚板焊接经验,初步确定搅拌头外形结构如图3(a)所示,针长大于25mm,搅拌头轴肩有圆环线防止材料外溢形成过多飞边。为保证足够的高温工作强度,搅拌针较粗,轴肩较小,焊接参数选用

范围为500~1000r/min、50~100mm/min,焊缝不能成形。经研究分析,隧道主要是由于轴肩产热不够,且搅拌针尺寸规格不合理导致。

在此分析基础上,对搅拌针直径进行优化,同时改变搅拌针上的螺纹深度和螺纹间距,调整焊接过程热输入量,促进焊缝成形。

经过优化后的搅拌头结构如图3(b)所示,在较高焊速的强参数匹配条件下,焊缝中间存在明显的隧道缺陷。当转速和焊接速度采用弱参数匹配时,焊接表面质量良好,匙孔未出现缺陷,X光检测内部无缺陷。



(a)优化前 (b)优化后

图3 搅拌头

表1 法兰框4种备料方式比较

序号	方案	用料重量/kg	利用率/%	优缺点
0	最终成件	53.3		
1	机械套裁	320.83	16.6	优点:方法传统,没有技术风险; 缺点:定制大板较贵,切割量大,利用率低,占用大型铣床
2	等离子套裁	320.83	16.6	优点:方法传统,没有技术风险; 缺点:定制大板较贵,切割量大,利用率低,污染,需留过烧量或热处理,施工受环境温度制约
3	氩弧焊拼焊	81.42	65.5	优点:带材好买,利用率高; 缺点:变形大,缺陷多,焊接污染大,返修率高,中途多次检测费用高,工作量大
4	FSW拼焊	77.62	68.7	优点:带材好买,质量可靠,利用率高; 缺点:需技术开发

表2 焊后接头的拉伸性能

编号	$R_m$ /MPa	$R_p0.2$ /MPa	母材 $R_m$ /MPa	接头强度系数/%
1	305.38	196.60	340	89.81
2	291.95	189.34		85.87
3	292.16	188.40		85.93
4	307.05	181.53		90.31
5	330.26	175.27		97.14
平均值	305.36	186.23		89.81

采用优化参数进行试板焊接,在焊接接头处分别截取 5 个样品进行拉伸试验,测得的力学性能数据如表 2 所示。焊接后材料抗拉强度的平均值达到了 305.36MPa,在 GB/T3880.2—2006《一般工业用铝合金板、带材:力学性能》上规定 50mm 厚度 5A06-H112 的抗拉强度不低于 295MPa,焊缝平均接头强度与母材在同一水平。

## 2 模拟件及工装设计

设计模拟件是以某产品法兰端框为原型,设计时充分考虑了焊接操作的便捷性、接头质量的可靠性、原材料采购和下料复杂程度。原材料采用铝带板是最经济的方案,可有效降低订货和搬运难度,与普通板材四方等离子切割下料方式相比,可实现从两端锯下料,将切割下料损耗降到了最低水平。

综合考虑焊接结构变形后可达的结构精度,常规运输保护水平和后续机加余量需求,初步确定模拟件上下边各留 5mm 余量,两端留 3mm 余量。

焊接的起始和结束部位是缺陷高发区,搅拌摩擦焊也不例外,而且搅拌摩擦焊的尾孔也是工艺必须解决的问题,因此也有必要在焊缝起始和结束部位设置引入引出板,如图 4 (a) 所示。为进一步减小引入引出时将缺陷带入本体的风险,利用框型结构常见的法兰拐角处的加强斜边,在接头部位设计榫接插槽,既可辅助保证焊接装配定位,又可将焊接的引入引出放到实体金属上,而不增加额外的冗余结构,如图 4 (b) 所示。

通过制作模拟件的接头试验件,先进行了试验件焊接,考察接头设计具有合理性后,优化接头设计局部细节余量,进一步提高了模拟件焊接操作方便性,然后在此基础上进行焊接夹具设计。

为了焊接时在巨大的摩擦抗力作用下保证焊接后端框的位置精度,

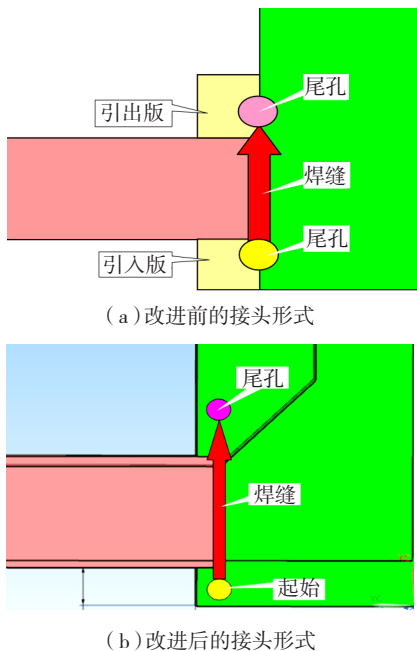


图4 焊接方向和尾孔布置

设计制作的工装必须强度可靠,并能精确定位模拟件。工装方案采用整体压紧方式,将待焊接部位 6 个方向充分固定,防止焊接过程中试件发生移动。图 5 所示为装夹工装布置方案,在整体底板上设置四组可调固定块组合,保证焊接受热部位的刚性支撑和模拟件的装配精度。

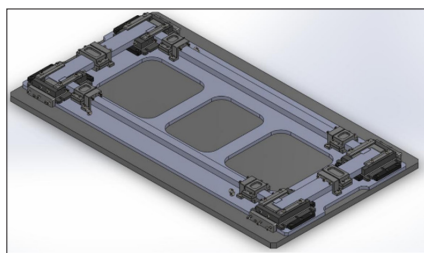


图5 工装夹具和端框模拟件整体结构

焊接模拟件前,将上述接头试验件在工装的一个角上装夹定位,用优化参数进行焊接,然后进行 X 光内部探伤,测量平面度及外形尺寸,证明该结构的工艺适应性和布局的合理性符合要求后,再完成整体模拟件安装和焊接。

焊后的法兰框体模拟件结构如图 6 所示,经 X 光检测,4 条焊

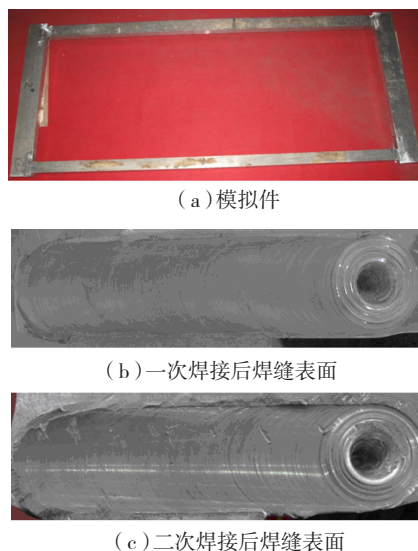


图6 焊后法兰框体结构模拟件外形及焊缝

缝内部无焊接缺陷,达到了一级焊缝内部质量标准。焊接结构件的尺寸检测结果表明对角线相差 1mm,平面度 1.5mm,符合设计要求的 2mm 误差范围,焊接变形能控制在 1/1000 以内,一次/二次焊后焊缝减薄量均小于 0.5mm,满足设计要求。

焊后对试验件直接进行机加后发现,虽然搅拌摩擦焊属于不熔化的低应力焊接方法,其残余应力对细长框型结构还是有一定影响,未进行热处理的框体腰部因残余应力存在,在撤掉机加装夹后自动内收 5mm 左右。

通过对后续两件试验件框体进行整体退火消除焊接残余应力后,机加达到了设计精度要求,且结果显示框体焊缝内部一致性很好。机加成件酸洗后与箱体焊接,接缝处对手工氩弧焊的适应性良好,如图 7 所示。最终某重点研制型号的 0102#、0106# 产品使用了搅拌摩擦焊试验

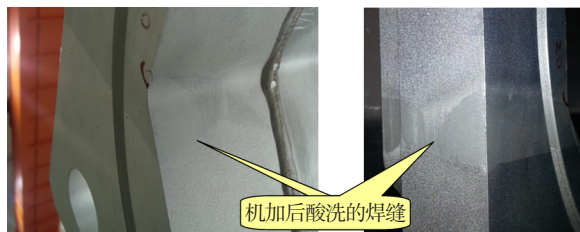


图7 机加后酸洗并与箱体焊接后的法兰零件

件制成的法兰,与同批次产品一起喷漆后顺利通过了对接、气密、水密、性能、公路运输等交付和例行试验考核。后续再经过鉴定试验考核后,可考虑应用到其它类似型号产品上。

## 结果分析

### 1 宏观金相

图8是焊接后试样横截面的宏观金相外观形貌,双面焊接很好地保证了焊缝焊透。从图中可以看出双面焊接后,50mm厚的铝合金板能充分焊透,能够清晰区分出前进侧和后退侧,母材轧制纹理在焊接部位被搅匀,焊缝组织较母材更加细致,厚度方向组织均匀性较好,焊接区域内没有明显缺陷。在搅拌区域内出现了焊接重叠部分,重叠深度约5mm,这有效避免了中部缺陷的产生,消除双面未焊透现象,保证了焊缝强度一致性。通过对图中不同部位进一步放大观察可以看出,重叠区及其附近没有明显的晶粒长大现象,双面两次焊接的热影响不会对材料晶粒组织造成不利影响。

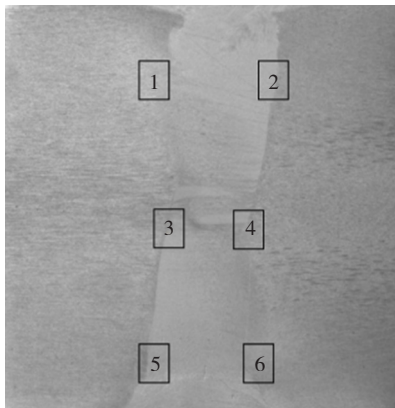


图8 双面焊接横截面宏观形貌

### 2 微观金相

对焊缝各区域(1,2,3,4,5,6)进行微观金相取样观察,母材微观组织基本如图9(a)所示,均由两相组织组成,组织一致性好、晶粒大小一致、分布均匀;母材区域未出现晶粒长大,组织粗大化等现象。焊缝热-力影响区域组织如图9(b)所示,从

热-力影响区微观金相组织与母材金相组织对比分析可以看出靠近热机影响区母材并未发生明显的改变。在热-力影响区,较小的等轴晶与母材柱状晶并存;搅拌区域存在晶粒变形破碎等现象。焊核区微观组织如图9(c)所示,焊核区比母材晶粒明显细化,在前进侧母材晶粒表现为向上运动的拉长变形,后推侧母材晶粒没有向上或向下的运动,在水平方向上与焊核晶粒过渡并连接。相对于母材轧制的柱状晶粒相比,焊核区尺寸明显减小的致密的等轴晶,测量显示焊核区的晶粒尺寸为

2~10 μm。

焊缝内部等轴细晶组织也是搅拌摩擦焊接头冲击韧性一般优于母材的原因,这主要与焊核区细小的等轴晶组织有关。根据断裂理论,晶粒细小则裂纹不容易形成,并且裂纹形成后也不易扩展,因为较小的晶粒迫使裂纹扩展时要多次改变方向,将消耗更多的能量,表现为FSW接头冲击吸收功高。

## 结论

(1)通过搅拌头和焊接工艺的优化,解决了焊缝布置、起焊和尾孔处理、大厚板装夹定位、控制焊接变形等问题;

(2)焊接接头平均抗拉强度达到305.36MPa,接头强度与国标规定的原材料强度处于同一水平;

(3)接头金相母材区域受热未出现晶粒长大现象,焊核区为致密的等轴晶,热力影响区为等轴晶与母材柱状晶并存。焊核区的晶粒尺寸为2~10 μm,组织结构形态优于母材;

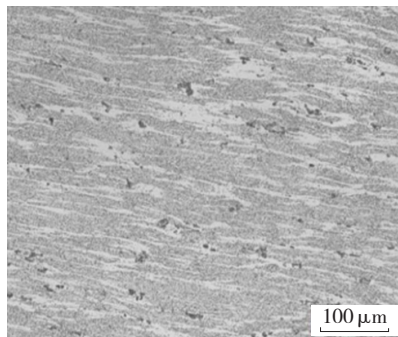
(4)厚度50mm,幅面1.5m×2.5m、边框宽度小于0.1m铝合金框架模拟件焊接变形可以控制在1/1000以内;

综上所述,采用搅拌摩擦焊接方法进行法兰端框的拼焊技术途径可行,接头的焊缝质量和框架焊接尺寸精度都可得到很好的保障,试验件焊后机加、焊接工艺适应性良好,所研制产品顺利通过了交付和例行试验考核,为后续批产型号应用奠定了技术基础。

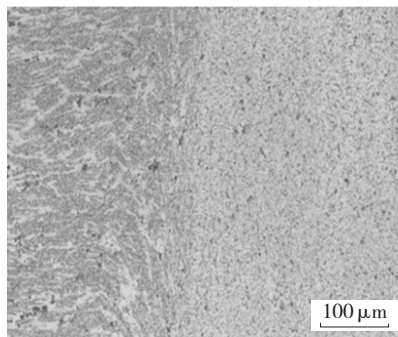
## 参考文献

[1] 关桥. 搅拌摩擦焊—未来的连接技术 // 柳百成. 工程前沿—香山会议文集 I: 未来的制造科学与技术. 北京: 高等教育出版社, 2004.

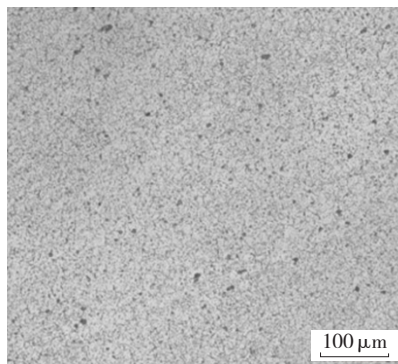
[2] 张友寿, 何建军, 谢志强, 等. 搅拌摩擦焊接技术基础及其工程应用. 材料导报, 2008, 22: 78-89.



(a)母材微观组织



(b)焊缝热-力影响区域组织



(c)焊核区微观组织

图9 焊缝微观金相组织

(责编 良辰)