

ICS 25.160.10  
CCS J 33

# 团 体 标 准

T/CWAN 0069—2022

---

## 空间三维铝合金结构回抽式搅拌摩擦焊接工艺规范

Space three-dimensional aluminum alloy structure welding process specification for  
pull-back friction stir welding

2022-05-24 发布

2022-07-01 实施

---

中国焊接协会 发布

## 目 次

前 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语、定义和符号.....	1
4 一般要求.....	5
5 焊接工艺.....	6
6 接头质量要求.....	11
7 质量检验.....	13
附录 A（资料性）典型缺陷产生的主要原因及预防措施.....	15

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：贵州航天天马机电科技有限公司、南昌航空大学、山推工程机械股份有限公司、重庆科技学院、哈尔滨焊接研究院有限公司。

本文件主要起草人：戈军委、谢吉林、陈玉华、王彩凤、张体明、尹立孟、张春波、赵源、王善林、宋骁、乌彦全、张伟、张鹤鹤、梁武。



# 空间三维铝合金结构回抽式搅拌摩擦焊接工艺规范

## 1 范围

本文件限定了回抽式空间三维铝合金结构搅拌摩擦焊接的术语和定义,并规定了一般要求、焊接工艺、设计要求、质量要求、质量检验等内容。

本文件适用于厚度为 2 mm~30 mm 的铝合金空间三维结构回抽式搅拌摩擦焊接,镁合金和钛合金也可参考本文件。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2651—2008 焊接接头拉伸试验方法

GB/T 9445—2015 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 26955—2011 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验

GB/T 34630.1—2017 搅拌摩擦焊 铝及铝合金 第 1 部分:术语及定义

GJB 2367A—2005 渗透检验

QJ 2864B—2018 铝及铝合金熔焊工艺规范

QJ 20043—2011 铝合金中厚板搅拌摩擦焊技术要求

QJ 20045—2011 铝合金搅拌摩擦焊超声相控阵检测方法

QJB 481—88 焊接质量控制要求

T/CWAN 0012—2019 焊接术语-压焊

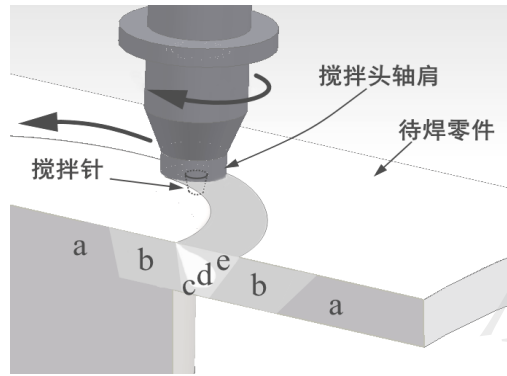
## 3 术语和定义

T/CWAN 0012 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**搅拌摩擦焊** friction stir welding, FSW

利用旋转的搅拌头在热、力耦合的锻压作用下形成焊缝的固相连接方法。搅拌摩擦焊原理示意图见图 1。



a—母材区； b—热影响区； c—热力影响区； d—焊核区； e—轴肩影响区

图 1 搅拌摩擦焊原理示意图

### 3.2

#### 回抽式搅拌头 back-pumping stirring tool

搅拌摩擦焊接过程中，与被焊件相互作用而产生摩擦热，并使母材金属发生塑性软化的焊接工具，焊接结束后，搅拌针能够回抽形成无匙空的焊缝。它主要由搅拌针、轴肩、搅拌针夹持区、搅拌套和搅拌套夹持区组成。典型的回抽式搅拌头结构示意图见图 2。

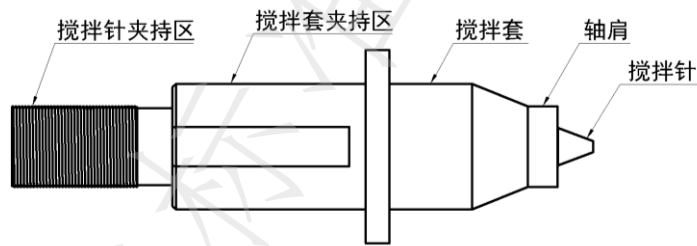


图 2 典型回抽式搅拌头结构示意图

### 3.3

#### 搅拌针 probe

位于搅拌套内部，焊接时与被焊件发生作用，焊接结束前，搅拌针沿搅拌头轴线缓慢向上移动，可实现无匙孔焊接，它是组成搅拌头的关键结构之一（见图 2）。

### 3.4

#### 轴肩 shoulder

位于搅拌套端部，焊接时与工件上表面接触并发生作用，它是搅拌头的关键组部分准之一（见图 2）。

### 3.5

#### 搅拌头倾角 tool tilt angle

搅拌摩擦焊时，搅拌头轴线方向与被焊面法线方向的夹角  $\alpha$ ，搅拌头轴线始终在焊缝切线与被焊件曲面法线所构成的平面内（见图 3）。

### 3.6

#### 压入量 heel plunge depth

焊接过程中，搅拌头的轴肩最低点压入母材表面的深度（见图 4）。

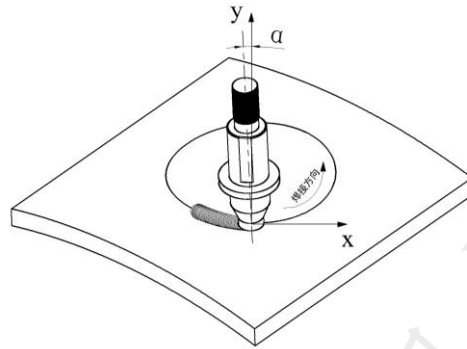


图3 搅拌头倾角

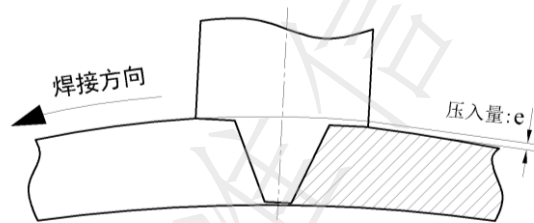


图4 压入量

## 3.7

飞边 toe flash

搅拌摩擦焊后残留在接头正面沿焊缝一侧或两侧翻卷的金属（见图5）。

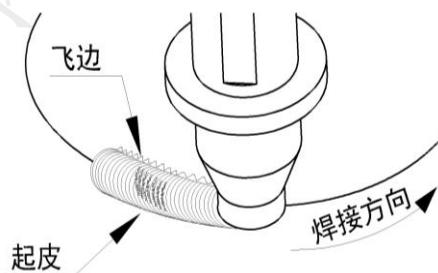


图5 飞边与起皮

## 3.8

起皮 peeling

搅拌摩擦焊缝正面产生的鼓起的麸皮状薄层金属（见图5）。

## 3.9

表面下凹 underfill

搅拌摩擦焊后，焊缝正面低于原始母材的现象（见图6）。

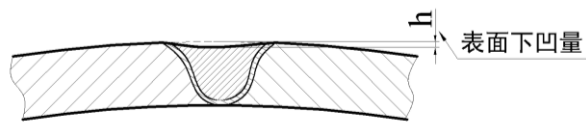


图 6 表面下凹

3.10

**隧道孔洞** tunnelcavity

搅拌摩擦焊焊缝内部形成的沿焊接方向的隧道状孔洞。

3.11

**表面犁沟** surface furrow

内部孔洞型缺陷延伸到搅拌摩擦焊缝正面形成的犁沟状焊接缺陷。

3.12

**未焊透** incomplete penetration

焊核区深度小于要求的（或规定的）深度。通常在该区域存在塑性变形，材料间紧密接触但并未形成有效结合（见图 7）。

3.13

**根部弱结合** weak root binding

在焊核底部存在的界面结合质量较差的现象。通常在该区域的材料之间形成了结合，但是根部金属的塑性流动不充分导致结合的质量较差（见图 7）。

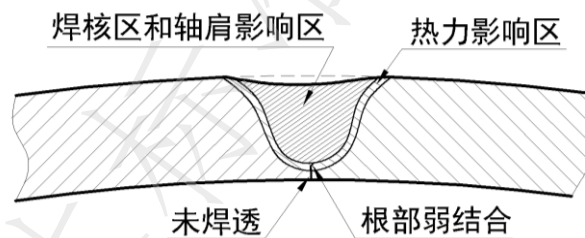


图 7 未焊透与根部弱结合

3.14

**致密性** compactness

焊接接头的焊缝区金属组织密实程度。

3.15

**错边** linear misalignment

两个焊件表面平行对齐时，未达到规定的平行对齐要求而产生的偏差。

3.16

**装配间隙** assembly clearance

两个焊件对接时，对接面之间的距离。

3.17

**前进侧** advancing side

搅拌头旋转线速度方向和焊接方向一致的焊缝侧。

3.18

**后退侧** retreating side

搅拌头旋转线速度方向与焊接方向相反的焊缝侧。

3.19

**轴肩后沿** heel

相对于焊接方向，在搅拌头后方的轴肩部分。

## 3.20

**横向偏移量** lateral offset

搅拌头轴线与接合面之间的距离。

## 4 符号

本文件中所采用的符号及其含义如下所示：

- $t$  —— 母材厚度，单位 mm
- $\alpha$  —— 搅拌头倾角，单位  $^{\circ}$
- $h$  —— 表面下凹量，单位 mm
- $L$  —— 错边量，单位 mm
- $c$  —— 装配间隙，单位 mm
- $a$  —— 搅拌头偏移量，单位 mm
- $D$  —— 轴肩直径，单位 mm
- $n$  —— 搅拌头转速，单位 r/min
- $v_1$  —— 搅拌头行进速度，单位 mm/min
- $v_2$  —— 回抽速度，单位 mm/min
- $d$  —— 搅拌针长度，单位 mm

## 5 一般要求

## 5.1 人员

- 5.1.1 搅拌摩擦焊接操作人员应经过培训、考核并取得相应资格证书。
- 5.1.2 无损检测人员资格鉴定与认证应符合 GB/T 9445—2015 规定。

## 5.2 设备

- 5.2.1 搅拌摩擦焊接设备控制系统应具有稳定性，焊接设备应配置相应的检测装置、仪表显示装置、辅助冷却装置、焊接参数输入、显示和记录装置等，且应定期对焊接设备进行检定。
- 5.2.2 搅拌摩擦焊接设备在安装、搬迁、大修或停止使用一年以上时，应进行检定并进行工艺参数确认，合格后方可投入使用。

## 5.3 回抽式搅拌头

- 5.3.1 回抽式搅拌头应设计为搅拌针与轴套分离结构，承力台阶贴合牢靠，无轴向窜动，目视旋转过程中应无跳动及干涉。
- 5.3.2 回抽式搅拌头应具有较高的耐热性，能够承载焊件在搅拌摩擦焊接时的温度，能够承受一定的冲击载荷。搅拌头材质应选用工作温度在  $700^{\circ}\text{C}$  以上仍然保持良好的韧性、硬度和耐磨性的材料，如热作模具钢、高速工具钢、高温性能良好的耐热合金钢等。
- 5.3.3 搅拌头所选用的结构材料在合适的焊接参数下焊接时不应与被焊铝合金发生粘连反应。
- 5.3.4 搅拌头型面结构的设计应具有一定的聚拢材料作用，如螺旋型凹槽、渐开线型凹凸花纹等，以满足搅拌摩擦焊工艺要求。
- 5.3.5 搅拌头经加工后，可进行热处理提高耐磨性能，推荐采取表面强化措施，如表面渗氮等。

## 5.4 焊接工装

- 5.4.1 焊接工装应为待焊工件提供刚性支撑及夹紧功能，一般包括垫板、外抱夹具等结构。
- 5.4.2 垫板应具有良好的硬度和刚度，应选用与被焊铝合金不容易发生粘连的材料，如不锈钢等。
- 5.4.3 焊接工装与被焊件之间应紧密贴合，与被焊件接触面的表面粗糙度应不大于 Ra3.2。
- 5.4.4 根据被焊件结构特点，可在焊接工装垫板上设计孔或槽等结构，防止被焊件在前进抗力作用下发生移动。

## 5.5 环境

环境温度应在 10 °C 以上，相对湿度一般不大于 80%。

## 5.6 焊件

- 5.6.1 母材应符合零件的相关工艺技术文件的要求。在图样或技术文件中应注明材料名称、牌号、规格、状态或材料标准编号。
- 5.6.2 试件及产品接头部位表面应保持平整、清洁。
- 5.6.3 焊件对接边部位的厚度应保持一致，且压紧后无明显间隙和不贴合，其波动范围符合表 1 规定。
- 5.6.4 试件的材料、状态、厚度、接头形式和焊接质量的要求应与产品相同。

表 1 焊件对接边厚度波动范围

单位为毫米

母材厚度 $t$	$2.0 < t \leq 5.0$	$5.0 < t \leq 10.0$	$10.0 < t \leq 20.0$	$20.0 < t \leq 30.0$
焊接接头厚度波动范围不大于	$5\%t$ 或 0.2, 取小值	$5\%t$ 或 0.4, 取小值	$5\%t$ 或 0.8, 取小值	$5\%t$ 或 1.2, 取小值

## 5.7 工艺文件

- 5.7.1 工艺文件中应明确主要焊接参数：主轴转速、焊接速度、主轴倾角、主轴旋向、搅拌头规格、下压量、回抽速度、轴向压力，如需定位焊，应明确定位焊要求。
- 5.7.2 对于焊件返修焊，也应编制返修焊接工艺文件。
- 5.7.3 工艺文件应包括工艺参数确定过程及结果记录。

## 6 焊接工艺

### 6.1 焊前准备

#### 6.1.1 工艺参数确定

- 6.1.1.1 新产品焊接前，应通过焊接试件确定焊接工艺参数，试件的材料牌号、接头形式、材料厚度、状态、批次和焊接质量要求应与产品一致，所用焊接设备、搅拌工具、焊接参数与产品一致。
- 6.1.1.2 正式产品焊接前，应按已确定的工艺参数焊接试件，验证工艺参数的稳定性后，方可焊接正式产品。
- 6.1.1.3 出现下列任一情况时，应重新确认焊接工艺参数：
- 焊道表面出现犁沟型缺陷或焊后经检测发现接头存在隧道、未焊透、空洞缺陷；
  - 搅拌头轴肩前端低于母材上表面；
  - 焊接设备状态及精度发生变化；
  - 焊接母材的种类、热处理状态发生变化以及焊件厚度变化值超过  $\pm 2$  mm。

## 6.1.2 编程

根据焊缝所在空间曲线进行程序编写，应充分考虑搅拌头倾角与焊缝的联系。

## 6.1.3 表面清理

焊前应对工件、引入板和引出板的焊接区域表面氧化膜、油污及异物等进行清理，清理范围应大于搅拌头轴肩直径 10 mm 以上。清理方法可采用化学方法或机械方法，焊件清理后一般应在 24 h 内施焊。

## 6.2 装配

6.2.1 焊件的焊接装配应按照技术文件或工艺规程的要求进行，焊接装配过程要避免二次污染。安装过程中，夹具应均匀、对称用力，避免焊件发生翘曲、弯折变形；

6.2.2 对接接头装配示意图见图 8，焊件装配应在焊接工装上进行，确保焊件与垫板紧密贴合，装配间隙、错边量和偏移量符合以下规定：

- a) 装配间隙：对接接头允许的局部最大间隙不超过表 2 的规定；
- b) 错边：焊前错边（含厚度波动）应不超过表 3 的规定；
- c) 偏移：焊前装配搅拌头旋转中心与焊件对接面的偏移量不超过表 4 的规定。

6.2.3 工件装配过程中应避免发生碰撞或划伤，应保证整个焊接过程中焊接设备、搅拌头与工装无干涉。

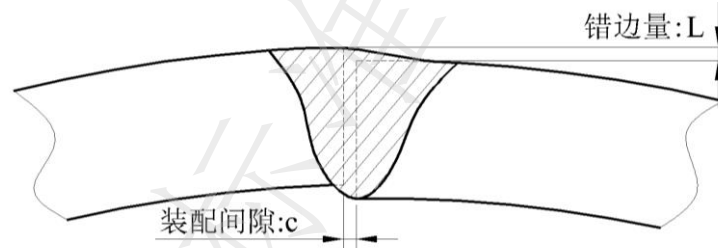


图 8 对接接头装配

表 2 对接接头允许的局部最大间隙

单位为毫米

母材厚度 $t$	最大间隙 $c$
2.0~5.0	$\leq 10\%t$ 或 0.4, 取较小值
>5.0~10.0	$\leq 10\%t$ 或 0.8, 取较小值
>10.0~20.0	$\leq 10\%t$ 或 1.5, 取较小值
>20.0~30.0	$\leq 10\%t$ 或 2.5, 取较小值

表 3 焊前允许最大错边量

单位为毫米

母材厚度 $t$	最大错边量 $L$
2.0~5.0	$\leq 5\%t$ 或 0.2, 取较小值
>5.0~10.0	$\leq 5\%t$ 或 0.4, 取较小值
>10.0~20.0	$\leq 5\%t$ 或 0.8, 取较小值
>20.0~30.0	$\leq 5\%t$ 或 1.2, 取较小值

表 4 焊前装配偏移量要求

单位为毫米

母材厚度 $t$	最大搅拌头偏移量 $a$
2.0~5.0	$\leq 10\%t$ 或 0.4, 取较小值
>5.0~10.0	$\leq 10\%t$ 或 0.6, 取较小值
>10.0~20.0	$\leq 10\%t$ 或 1.2, 取较小值
>20.0~30.0	$\leq 5\%t$ 或 1.4, 取较小值

### 6.3 搅拌头选用及装夹要求

6.3.1 搅拌头轴肩尺寸和搅拌针尺寸选择应与被焊母材厚度相匹配，搅拌头尺寸可根据表 5 选择。

表 5 搅拌摩擦焊 I 形对接接头

母材厚度 $t$ mm	轴肩直径 $D$ mm	搅拌针长度 $d$ mm
2.0~5.0	6~15	$t-(0.1\sim 0.2)$
>5.0~10.0	15~25	$t-0.2$
>10.0~20.0	25~36	$t-0.2$
>20.0~30.0	36~48	$t-0.2$

6.3.2 搅拌头装配前，应检查搅拌针长度与工件厚度是否匹配，检查搅拌针与轴肩是否存在磨损、断裂和异物，应保证搅拌头与主轴同轴度。

### 6.4 定位焊

6.4.1 如焊件受结构限制或允许采用定位焊情况下，在工件装配夹紧后，可通过定位焊控制装配间隙与相对滑动。

6.4.2 定位焊可采用熔焊与搅拌摩擦焊，其要求如下：

a) 按 QJ 2864B—2018 进行熔焊定位，可不添加焊丝，允许未焊透，熔焊定位焊缝一般位于焊缝端部，焊缝宽度、深度及热影响区应能够被后续正式搅拌焊缝所覆盖，且焊缝尺寸尽量短，宜采用多焊点方式。

b) 采用搅拌摩擦焊进行定位焊，一般采用小尺寸的搅拌头焊接，焊缝宽度和深度不应超过正式搅拌摩擦焊焊缝的尺寸。

6.4.3 熔焊定位焊后，应在正式搅拌摩擦焊前采用机械方法清除定位焊缝的余高及其表面氧化物等，同时要避免多余物进入焊件对接面。

## 6.5 焊接

6.5.1 焊接前应两次检查焊接程序，焊接设备移动范围是否存在障碍物，确保焊接过程安全可靠。

6.5.2 焊接过程常见缺陷、产生原因及防止措施见附录 A。

6.5.3 在焊接过程中，可根据焊件表面高度变化及飞边情况实时微调下压量，以保证焊接质量。

6.5.4 发生下列情况之一，应停止焊接：

- a) 装配间隙不断增大，超过对接接头允许的局部最大间隙（见表 2）；
- b) 搅拌头轴线与焊缝偏移量超过搅拌针端部半径大小；
- c) 焊缝出现严重质量问题。

## 6.6 缺陷的修整和返修

### 6.6.1 缺陷修整和返修的要求

凡超出 QJ 20043—2011、GJB 2367A—2005、QJ 20045—2011 规定的内外部缺陷应进行修整及返修焊。

### 6.6.2 缺陷的返修焊

6.6.2.1 下列缺陷允许进行返修焊

- a) 表面经修整后仍不合格的；
- b) 焊缝表面犁沟、根部弱结合与未焊透、内部裂纹、存在孔洞的。

6.6.2.2 接头存在焊缝表面犁沟、根部弱结合与未焊透、内部裂纹、孔洞型缺陷以及经修整后仍不合格的各种表面缺陷，且焊后接头厚度不小于技术文件要求的可采用搅拌焊进行局部或者全部返修焊；

6.6.2.3 焊后表面存在犁沟、内部存在孔洞和气泡等母材严重减少的缺陷可采用熔焊方法进行返修焊；

6.6.2.4 允许采用熔焊返修焊的根部缺陷尺寸应符合表 6 规定；

6.6.2.5 返修焊次数应符合以下要求：

- a) 采用搅拌摩擦焊进行返修焊，同一位置的返修次数不超过 3 次；
- b) 采用熔焊进行返修焊，同一位置的返修焊次数不超过 2 次；
- c) 在原焊接部位调换一个零件，算作被焊 1 次，但如在调换零件时，零件上的热影响区全部除去则不算作 1 次被焊。

表 6 允许采用熔焊进行返修焊的根部缺陷

缺陷种类	允许值
缺陷累积长度占焊缝全长的百分比 不大于	10%
缺陷在板厚方向的深度不大于 mm	0.2t 或 2 mm, 取较小值

6.6.2.6 搅拌摩擦焊返修焊焊缝宽度一般不大于原焊缝宽度的 1.5 倍, 但不应超过表 7 的规定。

表 7 焊缝宽度

单位为毫米

母材厚度 $t$	$2.0 < t \leq 5.0$	$5.0 < t \leq 10.0$	$10.0 < t \leq 20.0$	$20.0 < t \leq 30.0$
焊缝宽度 $W$ 不大于	15	25	36	48

6.6.2.7 返修焊应编制工艺文件, 返修焊工艺文件应包括返修焊接方法、焊接工艺参数、质量要求等内容。

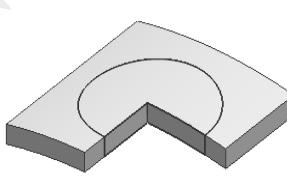
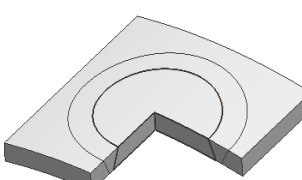
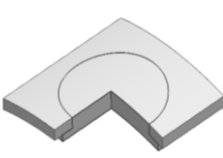
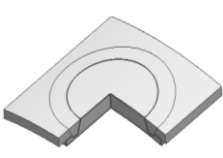
6.6.2.8 典型返修程序如下:

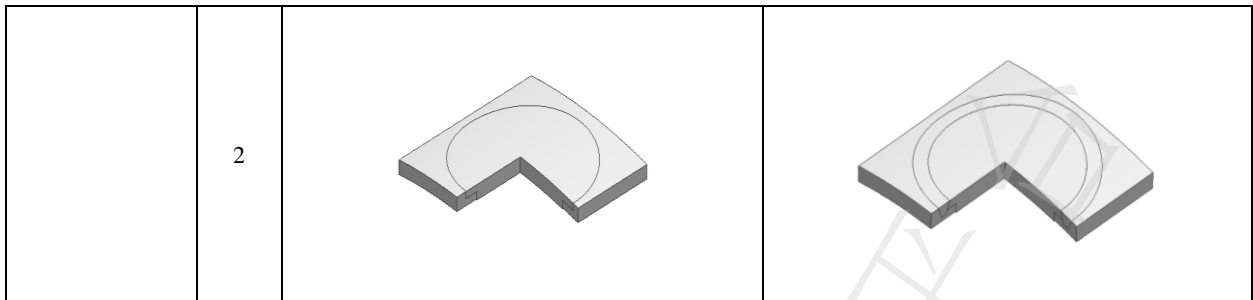
- a) 确定缺陷类型和具体位置;
- b) 根据缺陷类型确定返修焊接方法;
- c) 返修焊;
- d) 检验返修焊质量。

## 6.7 接头设计

焊接接头设计应考虑必要的材料性能数据, 部分焊接接头的示例参见表 8。

表 8 焊接接头形式

接头形式		焊 前	焊 后
对接接头			
锁底接头	1		



### 6.7.1 对接接头

对接焊接接头搅拌针插入深度以及接头装配（如装配间隙、错边量等）要求应在焊接工艺规程中规定。

### 6.7.2 锁底接头

搅拌头轴线至每个搭接件边缘的距离以及搅拌针插入深度应在焊接工艺规程中规定。

### 6.8 回抽速度

在铝合金无匙孔搅拌摩擦焊中，回抽速度是影响焊缝质量的重要参数之一，回抽速度应符合表9规定。

表9 回抽速度

母材厚度 $t$ mm	$2.0 < t \leq 10.0$	$10.0 < t \leq 20.0$	$20.0 < t \leq 30.0$
回抽速度 $v_2$ mm/min	6	5	4

### 6.9 焊缝曲率

焊缝允许最大曲率取决于搅拌头主轴最大允许倾角。

## 7 接头质量要求

### 7.1 质量等级

焊接接头质量等级按 QJB 481—88 的规定划分为I、II、III三级。产品焊接接头的质量等级由设计部门根据受力情况、焊件结构特点、工作特点、重要程度和可靠性及工艺可能性会同工艺部门综合评定后确定。I、II级接头应在设计文件中注明，未注明的为III级。

### 7.2 力学性能

焊前未经过强化处理（冷变形强化或热处理强化），焊后也不再进行强化处理的材料搅拌摩擦焊对接接头，其室温接头强度应满足：

- a) I级对接接头的抗拉强度应不低于母材金属技术条件规定的材料抗拉强度极限下限值的 90%；
- b) II级对接接头的抗拉强度应不低于母材金属技术条件规定的材料抗拉强度极限下限值的 80%；
- c) III级对接接头的抗拉强度应不低于母材金属技术条件规定的材料抗拉强度极限下限值的 70%。

### 7.3 外观质量

### 7.3.1 焊缝宽度

焊缝宽度（见图9）应符合表10的规定。

### 7.3.2 表面下凹

焊缝表面下凹量应符合表10规定，表面下凹处边缘应与母材金属圆滑过渡。

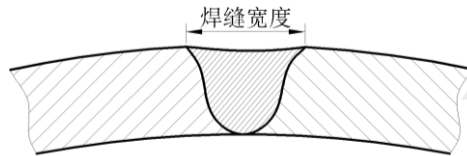


图9 焊缝宽度

表10 表面下凹量

单位为毫米

母材厚度 $t$	2.0~5.0	>5.0~10.0	>10.0~20.0	>20.0~30.0
表面下凹量 $H$ 不大于	$5\%t$ 或 0.2, 取小值	$5\%t$ 或 0.4, 取小值	$5\%t$ 或 0.8, 取小值	$5\%t$ 或 1.2, 取小值

### 7.3.3 飞边、起皮

接头正面不应存在飞边、起皮，焊接产生的飞边、起皮焊后应消除。

### 7.3.4 表面犁沟与表面裂纹

接头表面不应存在表面犁沟与表面裂纹。

### 7.3.5 未焊透

I、II级接头不应存在未焊透；III级接头不作规定。

### 7.3.6 焊接接头背面质量要求

接头背面应圆滑过渡。

## 7.4 内部质量

### 7.4.1 根部弱结合

I、II级接头不应存在根部弱结合；III级接头不作规定。

### 7.4.2 孔洞型缺陷

I、II级接头不应存在孔洞型缺陷；III级接头不作规定。

### 7.4.3 内部裂纹

焊缝及热影响区内部不应存在裂纹。

## 7.5 致密性

设计文件有致密性要求时，按设计文件规定。

## 8 质量检验

### 8.1 检验内容

8.1.1 试件的检验项目与试验要求见表 11，若特殊的使用条件、材料及生产条件所需的试验可由供需双方协商确定补充试验项目；

表 11 试件的检验与试验

试件	试验项目	检验比例或试样数量
搅拌摩擦焊接接头	外观检验	100%
	X 光射线检测	100%
	双面着色渗透检查	100%
	低倍金相	2
	常温拉伸测试	3
	低温拉伸测试	2
	常规疲劳测试*	2
	弯曲试验*	2

\*根据用户要求

8.1.2 若某项检验结果不符合理论时，需对相关试件再次取样进行检验确认。

### 8.2 外观检验

8.2.1 回抽式三维搅拌摩擦焊接接头外观检验必要时可借助不大于 10 倍的放大镜进行检验；

8.2.2 回抽式三维搅拌摩擦焊接接头表面鱼鳞纹应均匀，不应出现起皮或裂纹，焊缝与母材表面应圆滑过渡；

8.2.3 接头背面应无明显未焊透缺陷。

### 8.3 X 光射线检测

搅拌摩擦焊接接头应进行 X 射线检测，排除接头内部质量缺陷。X 射线检测按 QJ 20043—2011 的规定进行。

### 8.4 渗透检查

搅拌摩擦焊接对接头应进行 100% 双面着色渗透检查，排除根部未焊透缺陷；搭接接头和锁底接头应进行单面着色渗透检查，排除表面裂纹缺陷。渗透检验按 GJB 2367A—2005 的规定进行。

### 8.5 拉伸测试

焊接产品前需对焊接试件取样进行拉伸测试，以摸索最佳焊接工艺参数，根据产品特殊使用条件，必要时需进行常温和低温拉伸测试。在焊接工艺评定和工艺验证或设计文件有要求时，力学性能试验项目按设计文件或工艺要求进行，拉伸试验方法按 GB/T 2651—2008 的规定进行。

#### 8.6 超声相控阵检测

搅拌摩擦焊接接头要求较高时可进行超声相控阵检测，排除接头内部质量缺陷。焊缝超声相控阵检测按 QJ 20045—2011 的规定进行。

#### 8.7 宏观和微观检验

焊缝宏观和微观检验应符合 GB/T 26955—2011 规定。

---

## 附录 A

(资料性)

## 典型缺陷产生的主要原因及预防措施

表 A.1 搅拌摩擦焊典型缺陷产生的主要原因及预防措施

缺陷名称	产生主要原因	解决措施
飞边过大	1.搅拌头压入量过大 2.焊缝错边 3.焊接接头部位的板厚差过大	1.控制焊接压入量 2.焊前选配板材，确保两对接板材厚度基本保持一致 3.焊前选配板材，确保板材厚度波动范围不要过大，满足表 1 要求
起皮	焊接参数不合适	合理匹配焊接参数
孔洞型缺陷	1.搅拌头压入量不足 2.接头对接间隙过大 3.搅拌头结构设计不合理 4.焊接参数不合适	1.控制焊接压入量 2.控制原始母材对接间隙值，满足表 2 要求 3.选择合适的搅拌头 4.合理匹配焊接参数
表面犁沟	1.搅拌头压入量不足 2.接头对接间隙过大 3.搅拌头结构设计不合理 4.焊接参数不合适	1.控制焊接压入量 2.控制原始母材对接间隙值，满足表 2 要求 3.选择合适的搅拌头 4.合理匹配焊接参数
夹杂物	1.搅拌头压入量过大，垫板材料搅入焊缝中 2.原始母材中存在硬度较大的金属或非金属夹杂	1.控制焊接压入量 2.控制原始母材的质量
未焊透	1.搅拌头探针尺寸与原始母材厚度不匹配 2.搅拌头压入量不足	1.合理选择搅拌头 2.合理匹配焊接参数
根部弱结合	1.搅拌头探针尺寸与原始母材厚度不匹配 2.搅拌头压入量不足 3.搅拌头与原始母材接合面不对中	1.合理选择搅拌头 2.合理匹配焊接参数 3.控制焊前装配偏移量，满足表 4 要求