

ICS 25.160.10

CCS J 33



团 体 标 准

T/CWAN 0160—2026

铝/钢无针搅拌摩擦铆焊推荐工艺规范

Recommended process for aluminum/steel pinless friction stir rivet welding

2026-07-07 发布

2026-08-01 实施

中国焊接协会 发布

目 次

1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 技术要求	4
5 接头检验方法	9
6 合格判定标准	10
7 安全与环保要求	11
附录 A（资料性）典型材料组合的推荐工艺参数范围	12

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：南昌航空大学、上海航天设备制造总厂有限公司、湖南方恒新材料技术股份有限公司、中南大学、江西洪都航空工业集团有限责任公司、黑龙江工程学院、中国航空制造技术研究院、贵州航天天马机电科技有限公司、威海职业学院、中焊科技发展（哈尔滨）有限公司。

本文件主要起草人：郑敏、陈玉华、曾智恒、吴红艳、王善林、王苏煜、王佳杰、徐宇欣、蒋青、王楠、陈永生、封小松、张晓晨、肖熙、董继红、戈军委、隋英杰、牛董山钰、武鹏博、邓辉、常朝祥、胡鹏、梁霄鹏。

铝/钢无针搅拌摩擦铆焊推荐工艺规范

1 范围

本文件规定了铝/钢无针搅拌摩擦铆焊的术语和定义、焊接工艺规程、接头检验方法、合格判定规则、安全和环境保护等内容。

本文件适用于汽车制造、轨道交通、新能源装备、航空航天等领域用母材厚度不超过10 mm的工业纯铝、铝合金与碳素结构钢、低合金高强度钢板材的搅拌摩擦铆焊连接，焊接接头型式主要为搭接接头，其他铝/钢异种金属组合的搅拌摩擦铆焊可参照执行。

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 116 铆钉技术条件

GB/T 699 优质碳素结构钢

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 3098.24 紧固件机械性能 高温用不锈钢和镍合金螺栓、螺钉、螺柱和螺母

GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分

GB/T 3375 焊接术语

GB 9448 焊接与切割安全

GB/T 15111 点焊接头剪切拉伸疲劳试验方法

GB/T 15248 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法

GB/T 20878 不锈钢 牌号及化学成分

GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验

GB/T 26957 金属材料焊缝破坏性试验 十字接头和搭接接头拉伸试验方法

GB/T 34630.1 搅拌摩擦焊 铝及铝合金 第1部分：术语及定义

GB/T 41979.3 搅拌摩擦焊 铝及铝合金 第3部分：焊接操作工的技能评定

3 术语和定义

GB/T 3375和GB/T 34630.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

搅拌摩擦铆焊 friction stir rivet welding

在待焊板材搭接区域预制通孔并压入铆钉，采用无针搅拌头对铆钉及周围材料进行高速旋转摩擦施压，利用摩擦热与机械压力使铆钉墩粗、材料塑性流动填充间隙，实现固相扩散连接与机械连接的复合工艺。

3.2

无针搅拌头 pinless tool

一种端面为平面或带有同心圆环槽/内凹涡状槽的搅拌摩擦工具，无搅拌针，通过轴肩端面与工件摩擦产热并施加轴向压力，实现铆钉的墩粗和待焊板材的塑性流动。

3.3

预制孔 pre-drilled hole

在板材上预先加工的用于安装铆钉的圆形通孔、阶梯孔、沉头孔等。

4 技术要求

4.1 材料要求

4.1.1 母材

a) 铝板：待焊铝合金板材的化学成分、抗拉强度、断后伸长率等力学性能应符合GB/T 3190、GB/T 1591和GB/T 20878的要求，且需满足产品设计要求，常用牌号包括6061和5083等；

b) 钢板：待焊钢板材的化学成分、抗拉强度、伸长率等力学性能应符合GB/T 699的要求，且表面无锈蚀、氧化皮、裂纹等缺陷，常用牌号包括Q235、Q355和Q390等；

c) 铝/钢母材焊前表面处理：待焊区采用机械打磨及化学清洗去除氧化皮、油污，预制孔内壁采用专用刀具精加工，去除毛刺。

4.1.2 铆钉材料

a) 铆钉材料应根据母材组合及剪切强度要求进行选择。对于铝/钢连接，铆钉宜选用剪切强度高于铝合金母材且与铆钉避免产生厚层脆性金属间化合物的材料，如Q235和SS304等；

b) 表面质量：要求无裂纹、划伤、夹渣、氧化皮等缺陷；

c) 铆钉的化学成分与力学性能应符合GB/T 116和GB/T 3098.24的规定；

d) 铆钉材料的线膨胀系数应尽量介于铝和钢之间，以减小焊接残余应力。

4.2 接头结构设计要求

4.2.1 接头形式

搅拌摩擦铆焊适用于搭接接头，推荐钢板置于上方，铝板置于下方。试件是由两块等宽和等长的钢板及铝板搭配一定尺寸的铆钉组合而成，见图1。搭接宽度需同时满足两个条件：①不小于10 mm；②不小于3倍预制孔公称直径 D_0 。

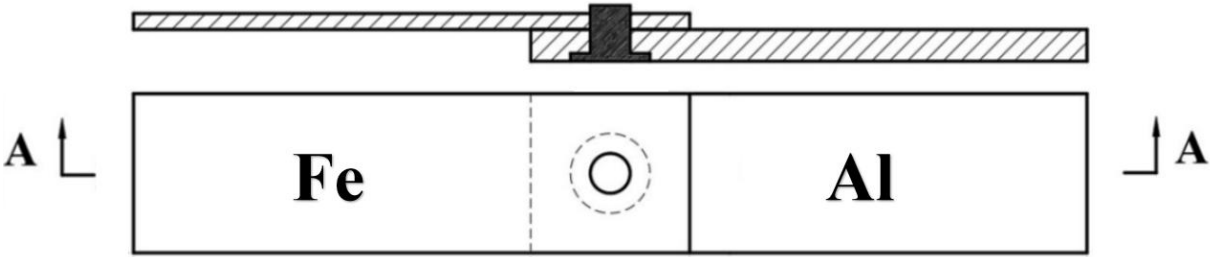


图1 搅拌摩擦铆焊搭接示意图

4.2.2 预制孔设计

- a) 加工方式：厚度不超过4 mm的母材优先采用精密钻孔，厚度大于4 mm的母材可采用激光打孔等加工方法；
- b) 预制孔公称直径 D (mm)：需根据母材厚度综合确定，需满足铆钉与母材的承载匹配性和塑性变形空间需求，以铝板厚度 t_1 mm、钢板厚度 t_2 mm，铝板、钢板宽度 d mm为主要参考，推荐预制孔公称直径范围 D_0 (mm)具体参考见表1。

表1 预制孔尺寸设计

总厚度 t_1+t_2 /mm	母材宽度 d	推荐铆钉公称直径 D	推荐预制孔公称直径范围 D_0
$t_1+t_2 \leq 6$	$d < 15$	4	4.1-4.5
	$15 \leq d < 25$	5	5.1-5.5
	$25 \leq d < 40$	6	6.1-6.5
	$d \geq 40$	6	6.1-5.5
$6 < t_1+t_2 \leq 8$	$d < 15$	5	5.1-5.5
	$15 \leq d < 25$	6	6.1-6.5
	$25 \leq d < 40$	8	8.1-8.8
	$d \geq 40$	8	8.1-8.8

总厚度 t_1+t_2 /mm	母材宽度 d	推荐铆钉公称直径 D	推荐预制孔公称直径范围 D_0
$8 < t_1+t_2 \leq 12$	$d < 15$	6	6.1-6.5
	$15 \leq d < 25$	8	8.1-8.8
	$25 \leq d < 40$	10	10.1-10.8
	$d \geq 40$	10	10.1-10.8
$12 < t_1+t_2 \leq 16$	$d < 15$	8	8.1-8.8
	$15 \leq d < 25$	10	10.1-10.8
	$25 \leq d < 40$	11	11.1-11.8
	$d \geq 40$	11	11.1-11.8
$16 < t_1+t_2 \leq 20$	$d < 15$	10	10.1-10.8
	$15 \leq d < 25$	11	11.1-11.8
	$25 \leq d < 40$	12	12.1-12.8
	$d \geq 40$	12	12.1-12.8

c) 公差：预制孔公称直径及公差、孔壁垂直度对应要求见表2。铝侧与钢侧预制孔需同轴加工，同轴度偏差 ≤ 0.1 mm，确保铆钉贯穿后无偏斜；

d) 布局要求：预制孔中心距母材边缘的距离 $\geq 1.5D_0$ ；相邻预制孔中心间距 $\geq 3D_0$ ；多排孔布置时，排距 $\geq 2.5D_0$ ，且需保证孔间无相互热影响区重叠。

表2 预制孔尺寸与加工要求

预制孔公称直径 D_0 /mm	加工方式	尺寸公差	孔壁垂直度偏差
$D_0 \leq 5$	精密钻孔	H11	≤ 0.05 mm/mm
$5 < D_0 \leq 8$	精密钻孔/激光打孔	H11	≤ 0.05 mm/mm
$8 < D_0 \leq 12$	激光打孔	H12	≤ 0.05 mm/mm
$D_0 > 12$	激光打孔	H13	≤ 0.05 mm/mm

4.2.3 铆钉设计

铆钉结构设计应符合GB/T 116的要求，通常采用圆柱状结构，可根据需要设计沉头或半圆头。铆钉直径D根据预制孔公称直径D₀确定。铆钉长度L需根据待焊板材厚度选择，铆钉长度L按照公式（1）进行计算，具体长度要求见表3。

$$L=t_1+t_2+\Delta h$$

(1)

L — 铆钉长度

t₁ — 铝板厚度

t₂ — 钢板厚度

Δh — 铆钉塑性变形余量

表3 铆钉长度要求

铝/钢母材总厚度/mm	铆钉塑性变形余量Δh/mm	极限偏差/mm
t ₁ +t ₂ ≤6	1.2	0~+0.1
6<t ₁ +t ₂ ≤8	1.4	0~+0.1
8<t ₁ +t ₂ ≤12	1.6	0~+0.15
12<t ₁ +t ₂ ≤16	1.8	0~+0.15
16<t ₁ +t ₂ ≤20	2.0	0~+0.2

4.3 设备与工装

4.3.1 焊接设备

应采用刚性良好的搅拌摩擦焊专用设备，具备恒位移或恒压力控制模式，且须具备主轴旋转、轴向压入、工作台移动等控制功能。另外，设备须具备紧急停止、过载保护、超温报警、主轴防松、工作台限位等功能，安全性能符合GB 9448要求。

4.3.2 工装夹具

设备需配备专用工装夹具，采用硬质合金或调质钢制作，夹具与母材接触面需喷涂防粘涂层做防粘处理，保证焊接过程中母材无滑移、翘曲，夹具应设计有定位销或限位块，保证上下板预制孔的同轴度。

4.3.3 搅拌头

a) 结构：采用无针搅拌头，端面为平面或带同心圆环槽/内凹涡状槽，见图2，以增加摩擦产热和塑化金属的驱动力；

- b) 材料：选用钨钼合金或热作模具钢，经淬火+回火处理后硬度 $\geq 55\text{HRC}$ ， 600°C 高温硬度保持率 $\geq 80\%$ ，具备良好的耐磨性、耐热性与抗粘焊性；
- c) 尺寸：无针搅拌头的轴肩直径 D_s 应根据预制孔公称直径 D_0 确定，推荐 $D_s=(1.5\sim 3)\times D_0$ ；
- d) 表面处理：轴肩工作面粗糙度 $\leq \text{Ra}3.2\ \mu\text{m}$ ，模具钢表面需进行氮化处理。

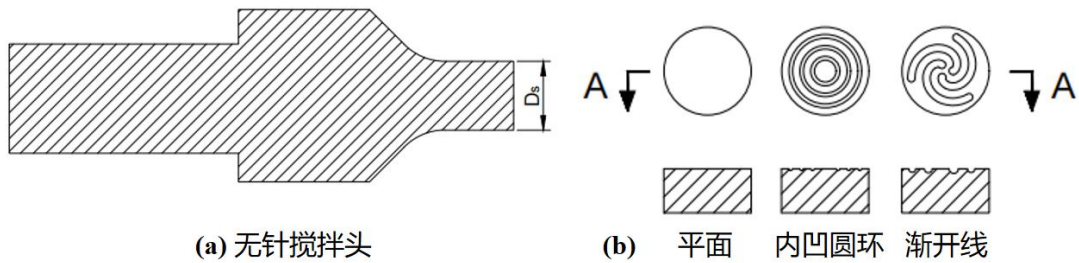


图2 搅拌头规格及轴肩花纹类型

4.4 工艺参数控制

4.4.1 工艺流程

铝/钢无针搅拌摩擦铆焊基本工艺流程包括：

- a) 焊前清理：机械打磨、化学清洗去除氧化层和油污；
- b) 板材装配：上下板预制孔对中；
- c) 压入铆钉：铆钉钉帽端面与铝板表面平齐，另一端高于钢板表面；
- d) 搅拌头定位：搅拌头中心对准铆钉中心；
- e) 搅拌头旋转下压；
- f) 搅拌头保压停留；
- g) 搅拌头复位。

其原理主要如图3所示。

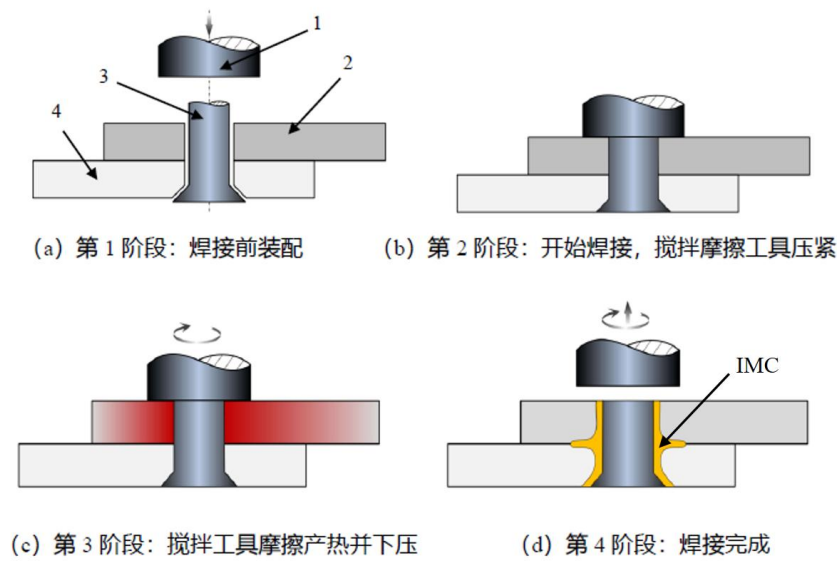


图3 无针搅拌摩擦铆焊复合连接技术的原理（1-无针搅拌头，2-钢板，3-铆钉，4-铝合金板）

4.4.2 关键工艺参数

焊接参数应根据材料种类与厚度、铆钉规格进行选择和优化，工艺文件应包括但不限于以下焊接参数：

- a) 旋转速度；
- b) 下压量；
- c) 停留时间；
- d) 下压速度。

常用铝/钢材料组合的推荐工艺参数范围参见附录A。当实际材料组合、板厚或铆钉规格超出附录A的推荐范围时，应通过工艺试验确定适用参数，所焊接头的性能应满足第6章的要求。

5 接头检验方法

5.1 外观检验

焊接接头外观检验应在焊接完成并冷却至室温后进行，采用肉眼检查。

5.2 尺寸检验

使用卡尺或显微镜测量铆钉顶部距钢板表面的距离，即铆钉下压量，应符合设计要求。

5.3 宏观金相检验

对焊接接头进行金相取样，取样位置为铆钉与母材的结合界面，经磨制、抛光、腐蚀后，按GB/T 26955的规定在金相显微镜下观察。

5.4 拉剪试验

按GB/T 26957进行搭接接头拉剪试验，拉剪试验接头形状如图4所示。

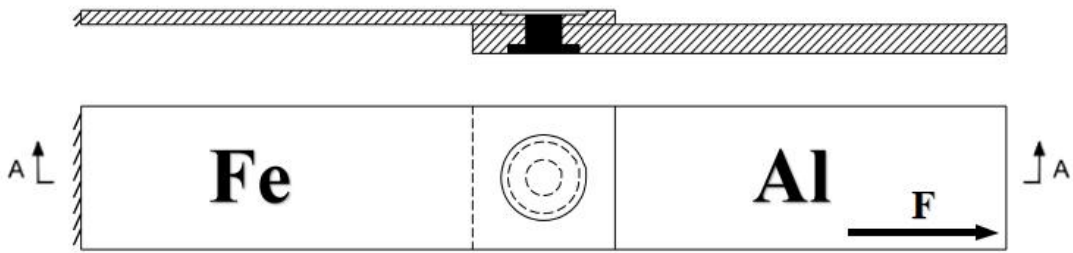


图4 搅拌摩擦铆焊剪切拉伸接头与拉剪疲劳试验接头示意图

5.5 疲劳性能试验

铝/钢无针搅拌摩擦铆焊接头的拉剪疲劳试验按 GB/T 15248 和 GB/T 15111 规定的试验原理和数据处理方法执行，拉剪疲劳试验接头形状如图 4 所示。

6 合格判定标准

6.1 外观检验

- a) 表面质量：接头表面应平整、光滑，不允许存在裂纹、未填充孔洞、气孔、夹渣、飞边过大或搅拌头粘连导致的表面撕裂等缺陷。对于飞边，其最大高度不应超过焊点中心最高表面0.5 mm，且不应呈尖锐状；
- b) 轴肩压痕：轴肩压痕应完整、连续、轮廓清晰，形状规则，分布均匀。压痕深度应与工艺文件规定的轴肩压入量一致，目视检查不得出现明显偏离；
- c) 其他表面异常：接头表面不允许存在由搅拌头磨损、偏移或焊接参数失当引起的环状沟槽、螺纹状凸起或严重的热影响区变色等异常形貌。

6.2 尺寸检验

- a) 测量位置：应在通过焊点中心且相互垂直的两个截面上，分别测量轴肩压痕深度值（共4个点），取其算术平均值作为该焊点的最终压痕深度值；
- b) 测量工具：应使用精度不低于0.01 mm的数显深度千分尺、杠杆百分表或同等精度的非接触式光学测量仪进行测量。测量基准面应为未受焊接变形影响的母材原始表面；

c) 允许偏差：实测的轴肩压痕深度与工艺文件设定的名义值之间的偏差不应大于0.1 mm。若偏差超出此范围，该焊点应判定为不合格。

6.3 宏观金相检验

- a) 观察铆钉变形情况，应呈“T”字形或“T”字形，紧密锁住铝/钢板上、下表面；
- b) 观察金属填充情况，应完全填充铆钉与孔壁间隙，无明显孔洞；
- c) 检查钢/铝界面，应结合紧密，无贯穿性裂纹。

6.4 拉剪试验

接头剪切强度应达到铝合金母材剪切强度的90%以上。

6.5 疲劳性能试验

针对接头试验的特殊性，补充规定如下：

- a) 试样形式：采用两块被连接板材搭接形式的接头试样，接头位于搭接区域中心；
- b) 加载方式：沿试样纵向施加轴向等幅循环载荷，使接头承受拉剪复合应力，载荷比R和加载频率由供需双方协商确定；
- c) 失效判定：以接头发生完全分离或裂纹贯穿整个连接面为失效判据；
试验结果应记录接头疲劳寿命与施加应力幅值的关系曲线；
- e) 每组试验不少于5件试样；
- f) 当试件在剪切拉伸强度的30%以上载荷条件下，循环次数达到 10^7 次不断裂，则该试件疲劳试验合格；
- g) 疲劳断口应无明显冶金缺陷，裂纹萌生区域应位于接头应力集中区。

7 安全与环保要求

7.1 机械安全

搅拌摩擦焊设备具有较大的轴向力和扭矩。操作区域应设置物理隔离屏障保护，防止人员肢体卷入旋转主轴。

7.2 噪声防护

焊接操作位噪声8 h等效连续A声级应不大于85 dB(A)，瞬时最高声级不应超过115 dB(A)。当操作位噪声超过85 dB(A)时，应优先采取工程控制措施（隔声罩、吸声屏等）；在工程措施无法达标的情况下，操作人员应佩戴SNR≥25 dB的隔音耳塞或耳罩。企业应定期对操作人员进行听力检查，并建立职业健康监护档案。

7.3 废弃物管理

废弃搅拌头、铆钉等应按金属废物分类回收处置。焊接及焊前打磨产生的含铝、含锌粉尘应采用粉尘收集装置集中收集，密闭暂存。粉尘废弃物应按环保主管部门的规定分类处置，严禁随意排放或混入生活垃圾。

7.4 安全培训

从事铝/钢无针搅拌摩擦铆焊的人员应经过相应的专项培训，并通过相应的考核、鉴定和认证，取得上岗证书后方能上岗操作，考核、鉴定和认证按照GB/T 41979.3执行。

附录A
(资料性)
典型材料组合的推荐工艺参数范围

本附录给出了经验证的典型铝/钢无针搅拌摩擦铆焊工艺参数推荐范围。使用者应根据实际设备特性、搅拌头尺寸及工装散热条件，通过首件验证对表A.1中的参数进行微调。

当实际母材组合、板厚或铆钉规格超出表A.1所列范围时，应通过工艺试验确定适宜参数，并确保接头性能满足本标准第5章、第6章的要求。

表A.1 典型铝/钢材料组合推荐工艺参数范围

材料组合(铝/钢)	钢板厚度(mm)	旋转速度(rpm)	下压量(mm)	停留时间(s)	下压速度(mm/s)
6061-T6 / SS304	1.0	500~2000	0.1~0.3	10~60	1~3
6061-T6 / SS304	2.0	800~2000	0.1~0.6	10~60	1~3
6061-T6 / SS304	3.0	1000~2500	0.2~0.8	10~60	1~3