

团体标准

T/CAMETA XX—2025

铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范

Process and Control Profiles of Friction Stir Welding of Medium and Thick
Aluminum Alloys

（征求意见稿）

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国机电一体化技术应用协会 发布

目次

前 言	3
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 总则	11
5 材料	11
5.1 母材	11
5.2 焊前清理	11
6 设备	12
6.1 搅拌摩擦焊设备	12
6.2 工装夹具与背部支撑板	12
6.3 搅拌头	12
6.4 辅助措施	12
7 焊接工艺规程与焊接工艺评定	12
7.1 总则	12
7.2 焊接工艺规程（WPS）	13
7.3 焊接工艺评定（PQR）	13
8 焊接工艺控制	15
8.1 焊前检查	15
8.2 焊接过程控制	15
8.3 焊后处理	15
9 质量控制与检验	16
9.1 检验人员	16
9.2 检验环节	16
9.3 焊后检验	16
9.4 缺陷处理：	16
10 安全要求	16
11 文件与记录	17
附录 A	18
附录 B	19
参考文献	21

前 言

本标准按照 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。

请注意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这些专利的责任。

本标准由中国机电一体化技术协会提出。

本标准由中国机电一体化技术协会归口。

本标准起草单位：哈尔滨工业大学、、、、、

本标准主要起草人：黄永宪、、、、、、谢聿铭、孟祥晨、

1 范围

本标准规定了铝合金中厚板对接接头的搅拌摩擦焊工艺和控制规范。

本文件适用于母材厚度为 5mm~120mm 的变形铝及铸造铝合金对接接头的搅拌摩擦焊。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性应用而构成本文件必不可少的条款。其中，标注日期的引用文件，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 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 3375 焊接术语

GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分

GB/T 1173 铸造铝合金

GB/T 19866 焊接工艺规程及评定的一般原则

GB/T 13298 金属显微组织检验方法

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 3323.1 焊缝无损检测 射线检测 第 1 部分：X 和伽马射线的胶片技术

GB/T 3323.2 焊缝无损检测 射线检测 第 2 部分：使用数字化探测器的 X 和伽马射线技术

GB/T 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定

T/CWAN 0012-2019 焊接术语 压焊

T/CWAN 0043-2021 搅拌摩擦焊搅拌头设计及制造标准

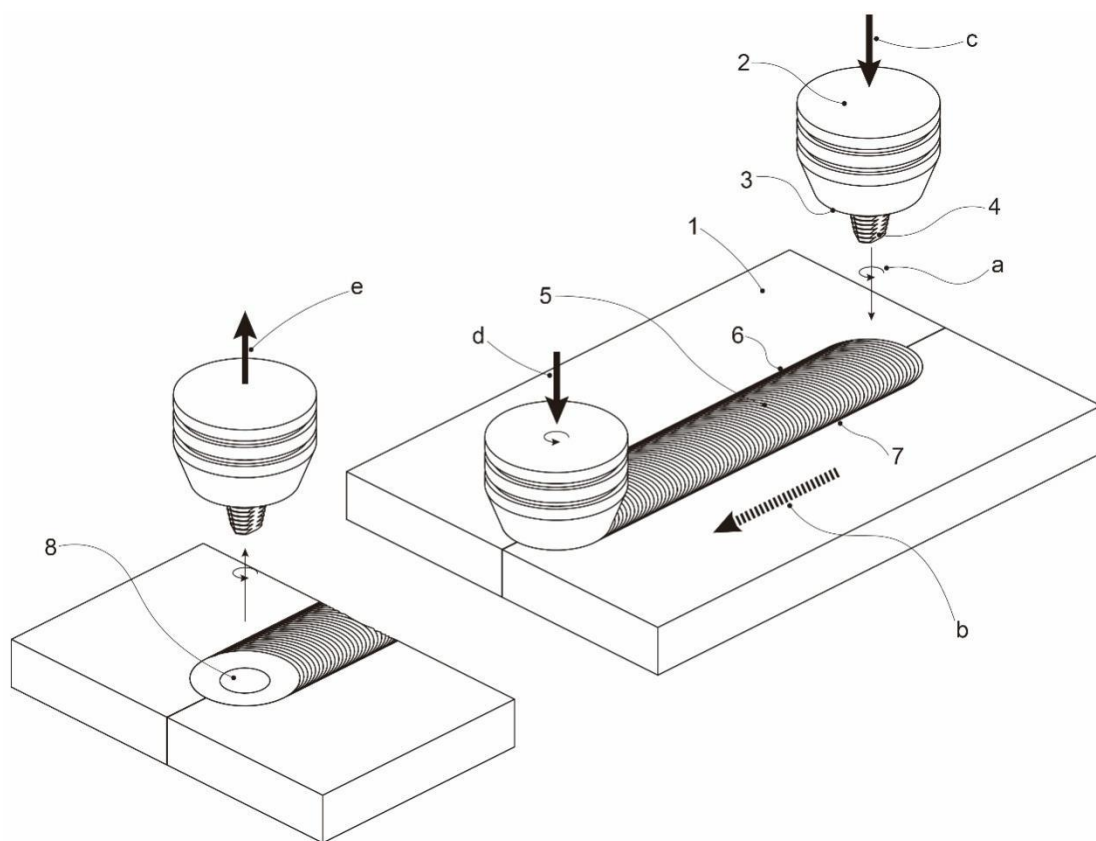
3 术语和定义

GB/T 3375、T/CWAN 0012-2019 及 T/CWAN 0043-2021 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

搅拌摩擦焊 friction stir welding

高速旋转的搅拌头扎入工件后沿待焊方向运动，在搅拌头与工件接触部位产生摩擦热和剧烈塑性变形热。使其附近金属形成塑性软化层，软化层在搅拌头旋转和锻压作用下填充搅拌针后方所形成的空腔，并在轴肩与搅拌针的搅拌及挤压作用下实现材料连接的固相焊接方法，如图 1 所示。



1: 母材 2: 搅拌头 3: 轴肩 4: 搅拌针 5: 焊缝 6: 前进侧 7: 返回侧 8: 匙孔
a: 旋转速度 b: 焊接速度 c: 搅拌头压入过程 d: 轴向力 e: 搅拌头抬起过程

图 1 中厚板铝合金搅拌摩擦焊接过程示意图

3.2

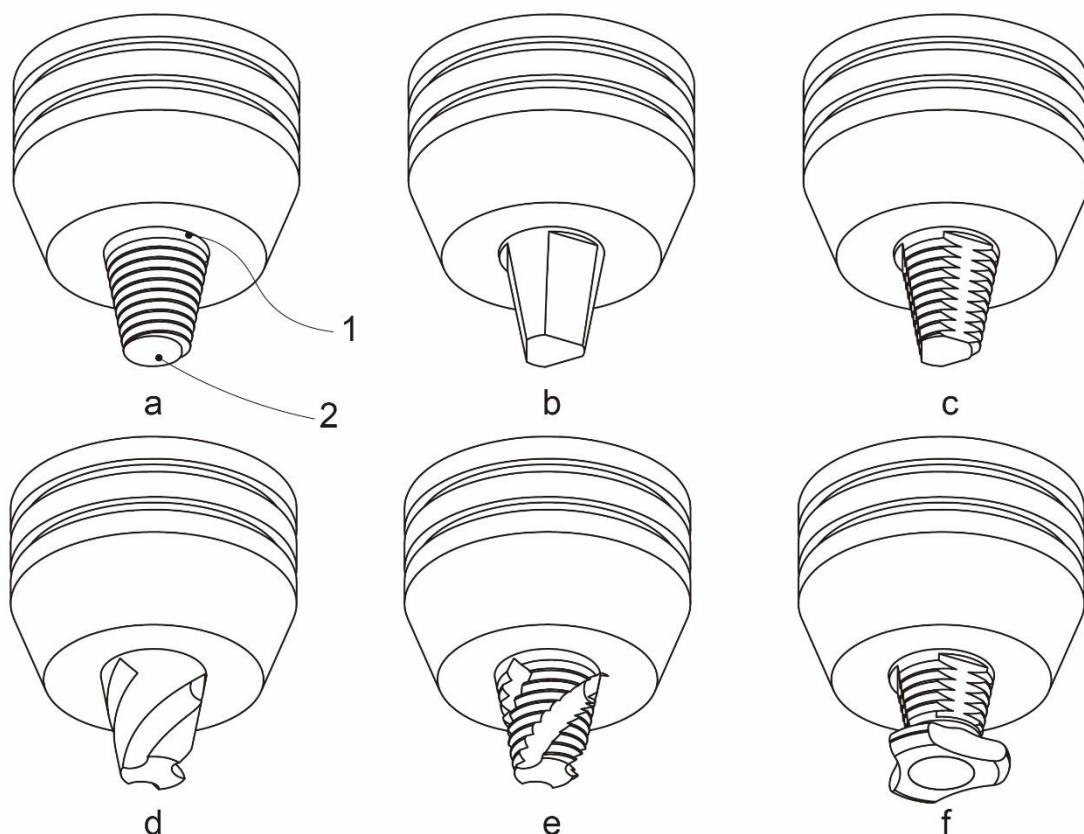
搅拌头 welding tool

搅拌摩擦焊接过程中由搅拌针和轴肩组成的旋转部件，对被焊材料施加搅拌摩擦效果的工具，属于搅拌摩擦焊的主要耗材之一，如图 1 所示。

3.3

搅拌针 pin

在焊接过程中，插入被焊接材料内部进行焊接，起到搅拌摩擦的作用，是搅拌摩擦焊热量来源之一，属关键功能部位，如图 1 所示。适用于铝合金中厚板焊接的搅拌针有多种不同的型式，根据不同的焊接材料、厚度及其他相关要求选配，典型结构如图 2 所示。



1: 搅拌针根部 2: 搅拌针端部

a: 螺纹针 b: 铣平面针 c: 螺纹铣平面针 d: 螺线槽针 e: 螺纹螺线槽针 f: 端部膨大针

图 2 中厚板铝合金搅拌摩擦焊接用搅拌针典型结构

3.4

搅拌针根部 pin root

搅拌针结构中靠近轴肩的部分，如图 2 所示，也是最容易出现搅拌头失效的位置之一。

3.5

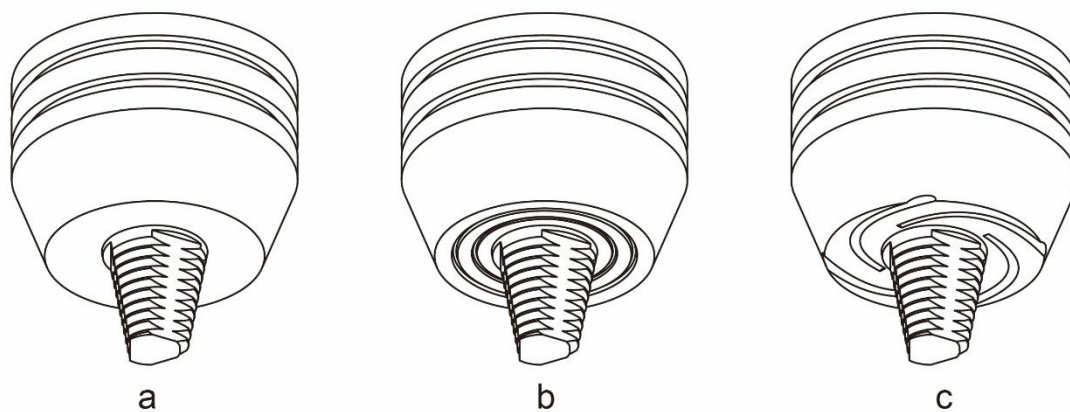
搅拌针端部 pin tip

搅拌针结构中远离轴肩的部分，如图 2 所示。

3.6

轴肩 shoulder

与搅拌针根部相连，焊接时与焊接母材表面发生摩擦作用，并起到对塑性材料的包络作用，如图 1 所示。适用于铝合金中厚板焊接的轴肩有多种不同的型式，根据不同的焊接材料、厚度及其他相关要求选配，典型结构如图 3 所示。



a: 凹面轴肩 b: 同心圆槽轴肩 c: 螺线槽轴肩

图 3 中厚板铝合金搅拌摩擦焊接用轴肩典型结构

3.7

变形铝 wrought aluminum

以压力加工方法生产的铝及铝合金加工产品。其所指包含变形纯铝及变形铝合金。

3.8

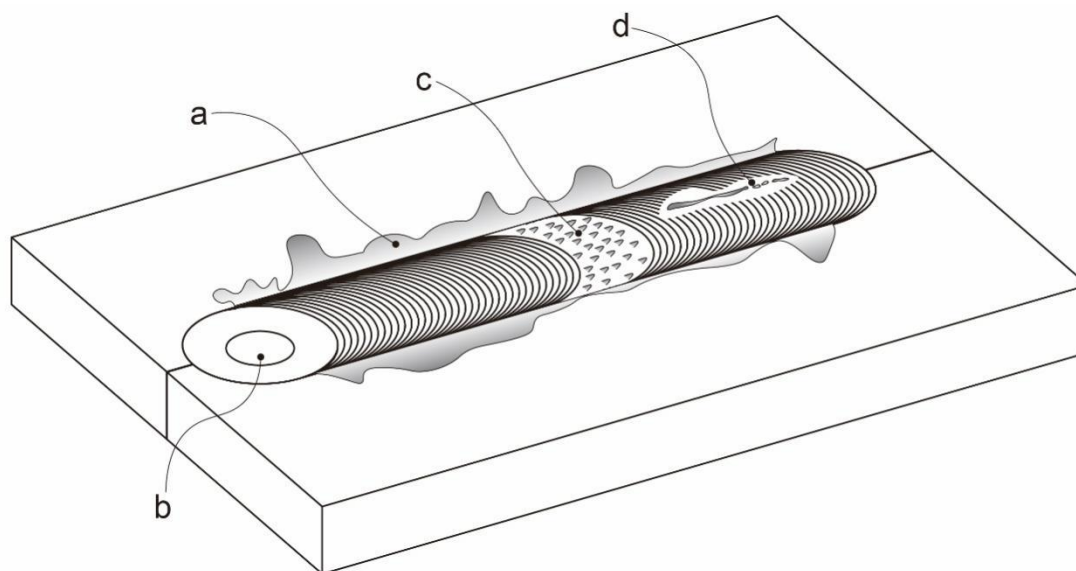
铸造铝 casting aluminum

以铸造方法生产的铝及铝合金加工产品。其所指包含铸造纯铝及铸造铝合金。

3.9

飞边 toe flash

搅拌摩擦焊后残留在接头正面沿焊缝单侧或双侧翻卷的金属（见图 4）。



a: 飞边 b: 匙孔 c: 起皮 d: 犁沟

图 4 中厚板铝合金搅拌摩擦焊典型表面特征/缺陷示意图

3.10

匙孔 keyhole

搅拌摩擦焊结束，搅拌针退出焊缝后未得到母材金属的填充而在焊缝尾端形成的空洞（见图 4）。

3.11

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 4）。

3.12

犁沟 furrow

搅拌摩擦焊缝正面产生沿焊缝方向分布的连续或不连续的沟槽，对接头力学性能有较大负面影响（见图 4）。

3.13

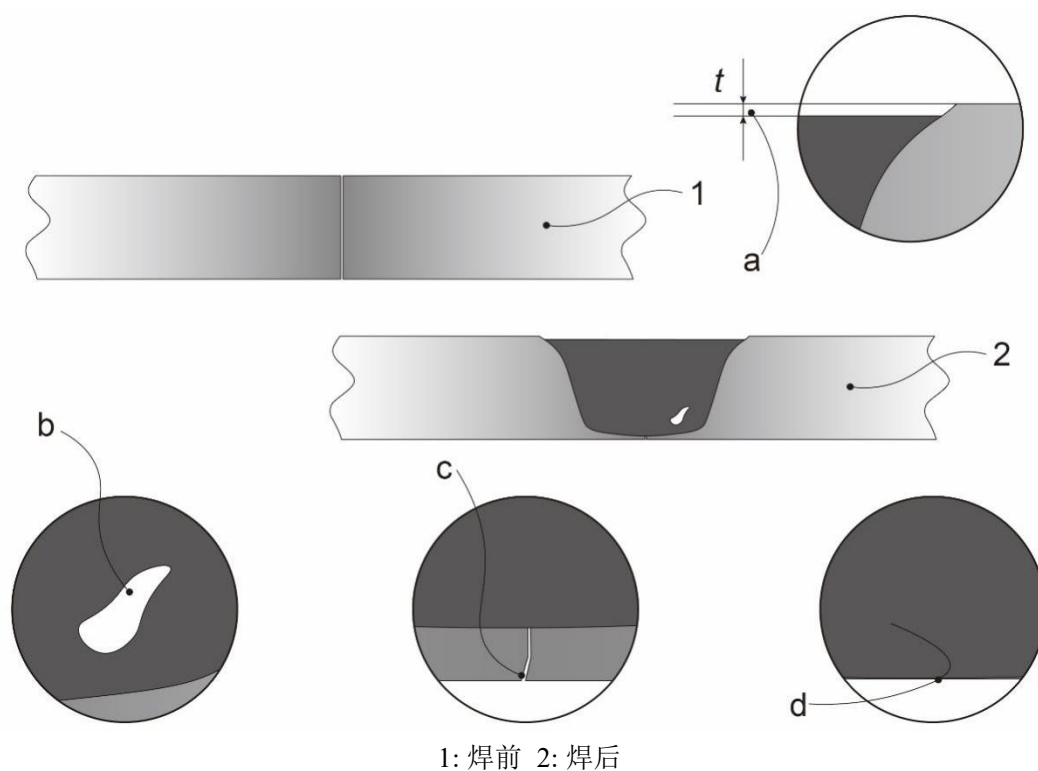
焊缝减薄 weld thinning

搅拌摩擦焊后，焊缝正面低于原始母材表面的现象，焊缝减薄严重时对接头力学性能有较大负面影响（见图 5）。

3.14

孔洞 cavity

搅拌摩擦焊缝内部存在的孔洞状空隙，常分布于焊缝根部中间区域或前进侧，对接头力学性能有较大负面影响（见图 5）。



1: 焊前 2: 焊后

a: 焊缝减薄 b: 孔洞 c: 未焊透 d: 根部弱连接

图 5 中厚板铝合金搅拌摩擦焊焊缝减薄及典型内部特征/缺陷示意图

3.15

未焊透 lack of penetration

搅拌摩擦焊缝根部中心区域由于搅拌针未完全扎入，局部材料不流动或仅轻微塑性流动，产生的未焊接区域，对接头力学性能有较大负面影响（见图 5）。

3.16

根部弱连接 kissing bond

搅拌摩擦焊缝根部中心存在的明显线状结构，对接头力学性能可能存在一定负面影响（见图 5）。

3.17

焊接速度 welding speed

焊接过程中，搅拌头沿焊缝方向移动的速度，单位为 mm/min 或 mm/s。

3.18

旋转速度 rotational velocity

焊接过程中，搅拌头绕轴线每分钟旋转的转数，单位为 rpm。

3.19

倾角 tilt angle

焊接过程中，搅拌头旋转轴线与工件表面法线之间的夹角，一般情况下倾角应在工件表面法线与焊接速度方向构成的平面内，并定义搅拌头偏向焊缝后侧的状态为正值，单位为°。当倾角不在工件表面法线与焊接速度方向构成的平面内时，则称为侧倾角，应特殊注明。

3.20

位移控制模式 displacement control mode

焊接过程中，焊接设备通过控制搅拌头（轴肩或搅拌针末端）在垂直于工件表面方向（通常是 Z 轴方向）的绝对位置或相对位置来实施焊接的一种控制模式。

3.21

压力控制模式 axial force control mode

焊接过程中，焊接设备通过控制和维持搅拌头施加在工件表面上的垂直作用力（通常是 Z 轴力，即轴向力）的大小来实施焊接的一种控制模式。

3.22

压入量 plunge depth

适用于位移控制模式。指焊接过程中，轴肩末端压入工件表面的深度，单位为 mm。

3.23

压入速度 plunge speed

适用于位移控制模式。指焊接压入阶段，搅拌头沿垂直于工件表面方向的压入速度，单位为 mm/min 或 mm/s。

3.24

轴向力 axial force

适用于压力控制模式。指焊接过程中，焊接设备通过搅拌头施加在工件表面上的垂直作用力的大小，单位为 N 或 kN。

3.25

压力调节系数 regulation coefficient of axial force

适用于压力控制模式。指焊接过程中，所设置的轴向力与实际传感器反馈的轴向力存在偏差时，焊接设备主动进行轴向力修正时的调节速度，单位为 mm/(s·N)。

3.26

焊前停留时间 pre-welding dwell time

焊接压入阶段结束后并且焊接行进阶段开始前，搅拌头维持旋转并在原地停留的时间，单位为 s。对于位移控制模式，焊接压入阶段结束定义为实际压入量达到所设置的压入量时；对于压力控制模式，焊接压入阶段结束定义为实际轴向力与所设置的轴向力差值 $\leq 5\%$ ，且在 0.3s 内波动不超过 10% 时。

3.27

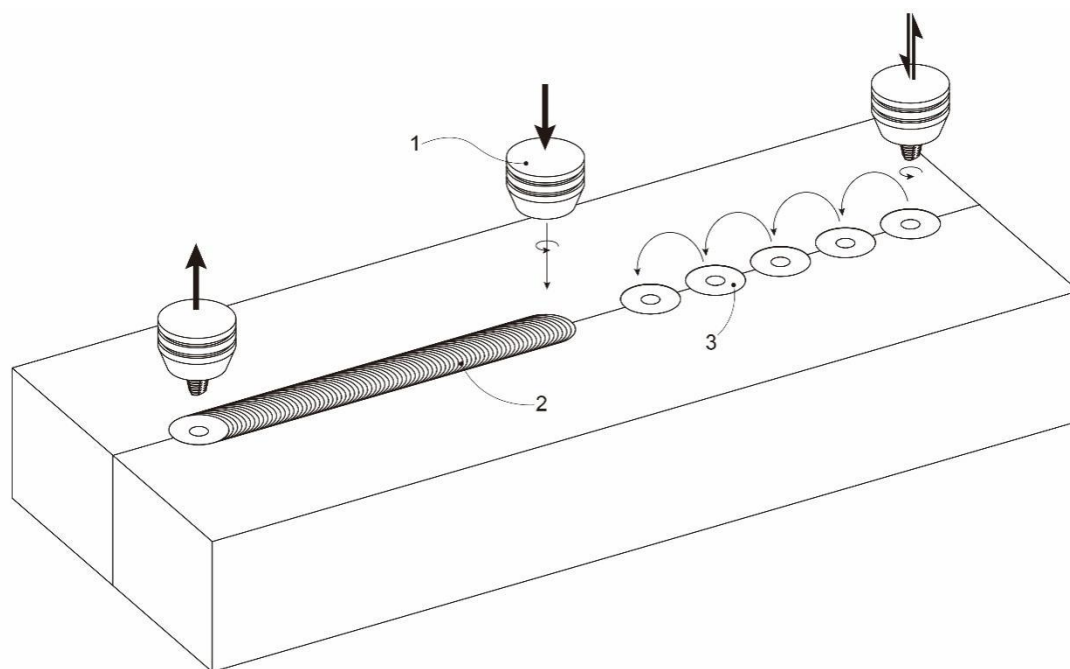
背部支撑板 backing support

进行搅拌摩擦焊接时，放置在待焊接工件的正下方，与其紧密接触的一个刚性工装部件，用于承受焊接压力、控制热量散失、约束塑性金属溢出，并提供一个焊接过程中的基准面。

3.28

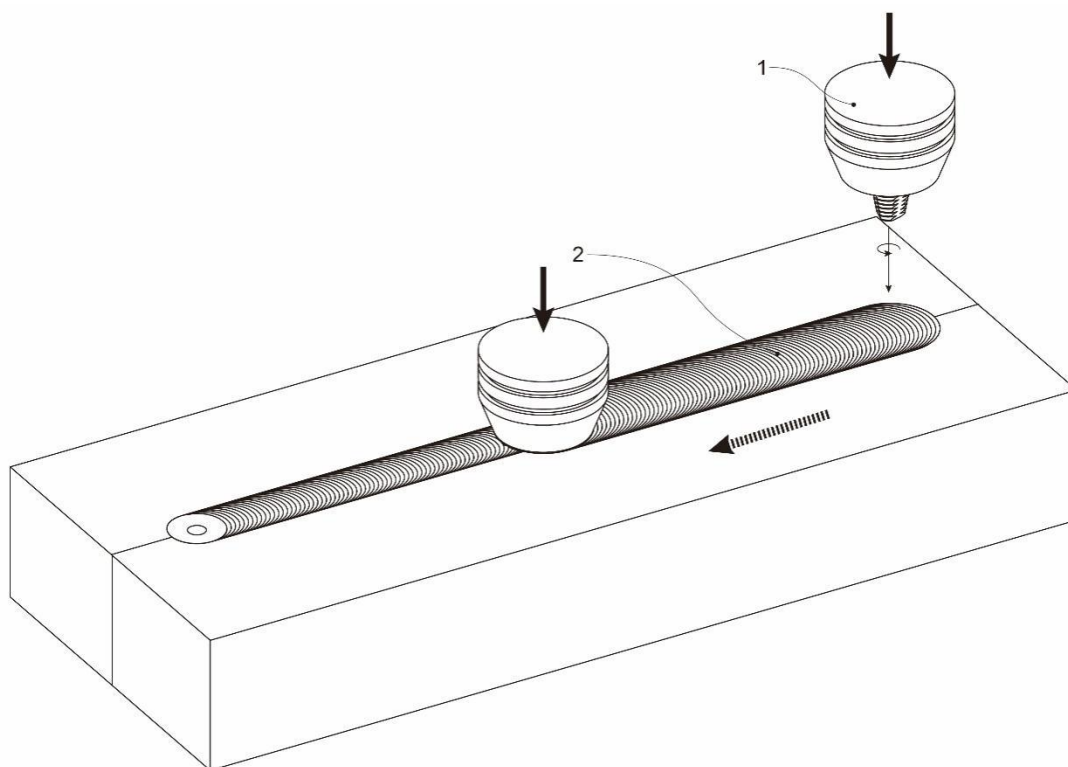
定位焊 positioning welding

对于厚度大于等于 15mm 的中厚板铝合金搅拌摩擦焊接，在正式焊接前，使用一个具有较短搅拌针长度的搅拌头进行预固定焊接的工艺步骤，其可以采用全长上全部施焊（缝焊）、或若干个点（点焊）进行板材固定，如图 6 和图 7 所示。



1: 定位焊搅拌头 2: 缝焊模式 3: 点焊模式

图 6 定位焊（第一阶段）示意图



1: 正式焊搅拌头 2: 正式焊缝
图 7 定位焊（第二阶段）示意图

4 总则

- 4.1 从事铝合金中厚板搅拌摩擦焊的生产单位应建立完善的质量保证体系。
- 4.2 焊接操作人员、检验人员应经过专业培训，具备相应的理论知识和操作技能，并按规定进行资格认证或能力确认。
- 4.3 焊接环境应清洁、干燥，避免风、雨、雪等直接影响焊接过程和质量。
- 4.4 采用的设备、量具应按规定进行校准和维护，确保其精度和性能满足工艺要求。

5 材料

5.1 母材

- 5.1.1 用于焊接的铝合金中厚板应符合相关国家标准（如 GB/T 3190、GB/T 1173 等）或技术协议的规定，并具有质量证明文件。
- 5.1.2 板材表面应平整，无裂纹、严重划伤、腐蚀、油污等缺陷。
- 5.1.3 对于有特殊要求的（如包铝层去除、阳极氧化膜去除等），应按规定进行处理。

5.2 焊前清理

- 5.2.1 待焊区域（包括板材边缘、上下表面一定宽度范围）应进行清理，去除氧化膜、油污、水分及其他污染物。
- 5.2.2 清理方法可采用机械方法（如刮削、打磨）或化学方法（如碱洗、酸洗），或两者结合。机械清理时应避免过度打磨或引入新的污染。
- 5.2.3 清理后应尽快进行焊接，避免再次氧化或污染。存放时间应根据环境条件和工艺要求确定，一般不宜超过 4 小时（可根据试验确定）。

6 设备

6.1 搅拌摩擦焊设备

6.1.1 设备应具有足够的刚度、承载能力和运动精度，能够精确控制和记录搅拌头的位置、旋转速度、焊接速度、轴向力（或压入量）、X、Y、Z 轴及主轴实时力与扭矩。

6.1.2 设备应具备可靠的参数控制系统，能在焊接过程中稳定维持设定的工艺参数。

6.1.3 设备应具备安全防护装置，确保操作人员安全。

6.1.4 鼓励使用具备实时监控和数据采集功能的设备。

6.2 工装夹具与背部支撑板

6.2.1 工装夹具应具有足够的刚度和夹紧力，能可靠地固定工件，保证焊接过程中工件位置稳定，有效控制焊件变形。

6.2.2 工装夹具应保证对接接头的良好对中，控制错边量和间隙满足工艺要求。

6.2.3 背部支撑板用于支撑焊缝底部，承受焊接压力，防止熔融或塑性金属下塌。背垫材料应具有足够的高温强度和硬度，且不易与铝合金发生反应（常用钛合金板、热作模具钢等）。

6.2.4 根据需要，工装夹具和背部支撑板内可设计冷却通道，以控制焊接热输入。

6.3 搅拌头

6.3.1 搅拌头材料应具有优良的高温强度、硬度、耐磨性及抗氧化性（常用高速工具钢、热作模具钢、钨钼合金、镍基合金、聚晶立方氮化硼等）。

6.3.2 搅拌头的几何尺寸（轴肩直径、形状、内凹角，搅拌针长度、形状、锥度等）对焊接质量至关重要，应根据母材牌号、厚度、接头形式和性能要求进行设计和选择。

6.3.3 搅拌头表面的几何结构（轴肩表面同心圆槽、螺线圆槽，搅拌针表面螺纹、均布铣平面等）对增强焊接过程中材料流动行为非常关键，应根据母材牌号、厚度、接头形式和性能要求进行设计和选择。

6.3.4 如需重点关注中厚板铝合金焊接根部弱连接或未焊透等情况，搅拌针端部可采用局部膨大的设计，增强焊缝根部流动，抑制根部弱连接与未焊透。

6.3.5 搅拌头应定期检查磨损情况，磨损超标时应及时更换或修复。应建立搅拌头使用寿命管理制度。

6.4 辅助措施

6.4.1 焊接中厚板铝合金厚度大于等于 15mm 或铝合金对热较敏感的情况下，建议采用水浸搅拌摩擦焊接（焊接全过程母材全部浸没于 4~30℃ 静态水或循环水中，水面应至少高于铝合金上表面 10mm）或冷却介质辅助搅拌摩擦焊接（采用水、液氮或干冰等在焊接过程中持续喷射至或放置于焊缝区域）模式，以避免焊接峰值温度过高，抑制局部液化及各种焊接缺陷。

6.4.2 根据需求，搅拌头或母材上可持续施加超声，降低材料流动应力，提高焊接质量。

7 焊接工艺规程与焊接工艺评定

7.1 总则

7.1.1 所有用于生产的中厚板铝合金搅拌摩擦焊焊接接头，均应制定相应的焊接工艺规程（Welding Procedure Specification, WPS）。

7.1.2 WPS 应基于焊接工艺评定（Procedure Qualification Record, PQR）的结果制定，或基于已有的、适用的 PQR 制定。

7.1.3 WPS 和 PQR 是指导焊接生产和保证焊接质量的重要文件。

7.2 焊接工艺规程（WPS）

7.1.1 WPS 应至少包含以下内容：

- a) WPS 编号、PQR 编号；
- b) 标准依据；
- c) 焊接方法：搅拌摩擦焊；
- d) 接头形式：对接接头；
- e) 母材：牌号（或化学成分）、状态（供货状态/热处理状态）、厚度范围；
- f) 焊前准备：清理方法、装配要求（对中、错边量、间隙）；
- g) 搅拌摩擦焊设备型号或类型；
- h) 控制模式：位移控制模式或压力控制模式；
- i) 搅拌头：材料、几何尺寸/几何结构（图示或详细描述）、编号或标识；
- j) 背部支撑板：材料、尺寸、是否内设冷却通道；
- k) 辅助措施：是否水浸、是否冷却介质辅助、是否施加超声、超声施加方式及位置；
- l) 定位焊：是否采用、具体工艺方法；
- m) 焊接参数：
 - 旋转速度 (rpm)；
 - 焊接速度 (mm/min 或 mm/s)；
 - 倾角 (°)；
 - 如采用位移控制模式，需提供压入量 (mm)与压入速度 (mm/min)；
 - 如采用压力控制模式，需提供轴向力 (kN)与压力调节系数 (mm/(s·N))；
 - 焊前停留时间 (s)；
 - 焊接方向与焊接次序；
- n) 焊后热处理（若需要）：热处理规范；
- o) 焊后处理（若需要）；
- p) 检验要求：外观检查、无损检测（方法、比例、标准）、破坏性试验（方法、标准，主要用于 PQR）。

7.2.2 WPS 格式可参考附录 A。

7.3 焊接工艺评定（PQR）

7.3.1 目的：验证所拟定的 WPS 能否保证焊接接头满足设计或标准要求的性能。

7.3.2 评定条件：当出现以下情况之一时，通常需要进行焊接工艺评定或重新评定：

- a) 首次采用搅拌摩擦焊接工艺或应用于新的母材牌号/状态/厚度范围；
- b) 焊接设备类型或关键性能参数发生重大改变；
- c) 搅拌头材料或关键几何尺寸（如搅拌针长度、形状等）发生显著变化；
- d) 焊接参数与辅助措施超出原 PQR 覆盖范围；
- e) 改变焊后热处理规范；
- f) 其他可能显著影响接头性能的因素改变。

7.3.3 评定试件：按照焊接工艺预规程（Pre-Welding Procedure Specification, pWPS）

焊接评定试件，pWPS 为初步拟定且未经过焊接工艺评定的 WPS。试件尺寸应足够进行后续的各项检验和试验。

7.3.4 检验与试验项目：PQR 试件通常应进行以下检验和试验：

a) 外观检查：100% 检查焊缝及附近区域，评估表面成形、飞边、匙孔、起皮、犁沟、焊缝减薄、未焊透（背部表面可见）等。

b) 无损检测：包含射线检测或超声检测，用于检测内部缺陷，如孔洞、根部弱连接、未焊透、异物夹杂（如工具碎片）等。超声检测对搅拌摩擦焊接头中的面状缺陷（如根部弱连接、未焊透）通常更敏感。检测方法和验收标准应参照相关标准（如 GB/T 3323.1、GB/T 3323.2、GB/T 11345）或专门制定的搅拌摩擦焊检测标准。

c) 破坏性试验：

- 横向拉伸试验：评估接头的抗拉强度，具体要求参照 GB/T 2651。试样数量和验收标准（如不低于母材最小抗拉强度标准的百分比或特定值）应规定或参考如下要求：

对于热处理强化变形铝合金及铸造铝合金，如 2XXX、6XXX、7XXX、部分 1XXX 系列的变形铝合金及 ZL101A、ZL105A、ZL114A、ZL115、ZL116、ZL118、ZL201A、ZL204A、ZL205A、ZL207、ZL305 等铸造铝合金，如其母材处于时效强化态下，焊接接头焊后如不再进行热处理，测试所得的室温接头力学性能应满足：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 70%，且断后伸长率应不低于母材金属技术条件规定的材料断后伸长率极限下限值的 50%；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 60%，且断后伸长率应不低于母材金属技术条件规定的材料断后伸长率极限下限值的 50%；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 50%；

对于热处理强化变形铝合金及铸造铝合金，如 2XXX、6XXX、7XXX、部分 1XXX 系列的变形铝合金及 ZL101A、ZL105A、ZL114A、ZL115、ZL116、ZL118、ZL201A、ZL204A、ZL205A、ZL207、ZL305 等铸造铝合金，如其母材处于时效强化态下，焊接接头焊后如进行热处理至峰时效状态，测试所得的室温接头力学性能应满足：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%，且断后伸长率应不低于母材金属技术条件规定的材料断后伸长率极限下限值的 50%；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%，且断后伸长率应不低于母材金属技术条件规定的材料断后伸长率极限下限值的 50%；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%；

对于形变强化变形铝合金及不可热处理铸造铝合金，如部分 1XXX、3XXX、4XXX、5XXX、部分 8XXX 系列的变形铝合金与 ZL102、ZL110 等铸造铝合金，以及退火态下的热处理强化变形铝合金及铸造铝合金，测试所得的室温接头力学性能应满足：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%，且断后伸长率应不低于母材金属技术条件规定的材料断后伸长率极限下限值的 80%；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%；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%。

- 弯曲试验（面弯和/或背弯）：评估接头的塑性，具体要求参照 GB/T 2653。试样数量、弯曲角度、弯芯直径应规定。

- 宏观金相检验：观察焊缝横截面形貌，具体要求参照 GB/T 26955，检查是否存在严

重焊缝减薄、孔洞、根部弱连接、未焊透、异物夹杂（如工具碎片）等，并评估焊核区、热机影响区、热影响区的形态。

- 硬度测试：测量焊缝横截面上的硬度分布（通常包括焊核区、热机影响区、热影响区和母材），具体要求参照 GB/T 2654，评估焊接对接接头性能的影响。

- 根据需要可增加其他试验，如显微组织观察、疲劳试验、断裂韧性试验等。

7.3.5 结果评定：所有检验和试验结果均满足相关标准或技术协议规定的验收标准时，该 pWPS 方可通过评定，形成 PQR。

7.3.6 PQR 应记录所有焊接参数、检验和试验的详细结果。PQR 格式可参考附录 B。

7.3.7 PQR 的适用范围：一份 PQR 通常可以覆盖一定范围的母材厚度、牌号（同组别）、焊接参数、辅助措施等。具体的适用范围应根据相关标准或规定确定。

8 焊接工艺控制

8.1 焊前检查

8.1.1 核对工件材料牌号、状态、厚度是否与 WPS 要求一致。

8.1.2 检查待焊区域清理质量是否合格。

8.1.3 检查工件装配质量，包括对中情况、错边量（通常要求小于板厚的 5%或特定值）、对接间隙（通常要求零间隙或极小间隙）。

8.1.4 检查搅拌头型号、尺寸是否与 WPS 一致，检查搅拌头是否有损伤或过度磨损。

8.1.5 检查设备运行状态、参数设置是否正确。

8.1.6 检查设备是否处于设定的压力控制模式或位移控制模式下。

8.1.7 检查夹具、背垫、辅助措施是否安装到位、状态良好。

8.2 焊接过程控制

8.2.1 严格按照 WPS 规定的参数进行焊接。控制模式应保证正确，关键参数（旋转速度、焊接速度、轴向力/压入量、倾角等）应在焊接过程中保持稳定，并在允许的波动范围内。

8.2.2 监控焊接过程中的声音、振动、焊缝表面成形情况，发现异常应及时处理。

8.2.3 确保搅拌头沿预定轨迹精确移动。

8.2.4 对于厚度大于等于 15mm 的焊缝，可采用定位焊与正式焊接复合的方式进行焊接。在进行正式焊接前，使用搅拌针长度不大于实际板厚 30%的搅拌头（通常搅拌针长度在 2~5mm 之间）进行沿焊接方向进行定位焊接（可采用缝焊或点焊的方式），实现焊缝位置的预固定，避免焊接过程中装夹松脱、接头张开等问题的出现。

8.2.5 对于焊缝起始段和末段，可设计特定的程序，以减少缺陷（如起焊点未焊透、末段匙孔）。可采用导入/导出板、或使用特殊退针技术（回抽式搅拌摩擦焊接装备）等方法。

8.2.6 记录实际焊接参数，鼓励采用设备自动记录功能。

8.3 焊后处理

8.3.1 搅拌头完全停止旋转并抬起后，方可移动工件。

8.3.2 及时清理焊缝表面的飞边、起皮和其他残余物。

8.3.3 对于需要焊后热处理的接头，应按 WPS 规定执行。

8.3.4 妥善处理焊接结束时起始段非稳态区与末段留下的匙孔，如设置导入/导出板可

切除。如未设置导入/导出板，可采用后续填补（如填充式搅拌摩擦焊、摩擦塞补焊、熔化焊修复等）或切除的方法，具体取决于应用要求。

9 质量控制与检验

9.1 检验人员

检验人员应具备相应的资质或能力，熟悉本标准、相关检验标准和搅拌摩擦焊接缺陷特征。

9.2 检验环节

质量检验应贯穿于焊前准备、焊接过程和焊后成品等各个环节。

9.3 焊后检验

9.3.1 外观检查：

a) 所有焊缝均应进行 100%外观检查。

b) 检查内容：焊缝成形是否均匀、平滑；是否存在过量飞边、起皮、犁沟、严重焊缝减薄、未焊透（背部表面可见）。

c) 验收标准：应专门制定的搅拌摩擦焊接外观验收要求，或按设计图纸和技术协议要求。通常要求焊缝表面平整，不允许有过量飞边、起皮、犁沟、严重焊缝减薄、未焊透（背部表面可见）等严重缺陷。对飞边、焊缝减薄等允许限度应有规定。

9.3.2 无损检测：

a) 无损检测的方法（射线检测或超声检测等）、检测比例（100%或抽检）、检测时机（焊后或热处理后）应根据产品的重要性、设计要求或技术协议确定。

b) 超声检测：是检测搅拌摩擦焊内部缺陷（尤其是面状缺陷，如根部弱连接、未焊透）的常用且有效方法。应采用适合搅拌摩擦焊缝特点的探头、扫查工艺和评定标准。

c) 射线检测：可用于检测体积型缺陷，但对搅拌摩擦焊中常见的与焊缝界面近乎平行的根部弱连接、未焊透等缺陷可能不敏感。

d) 无损检测验收标准应参照相关标准（GB/T 3323.1、GB/T 3323.2、GB/T 11345 等）或专门制定的搅拌摩擦焊接无损检测验收要求，或按设计图纸和技术协议要求。

9.3.3 破坏性试验：

a) 通常用于 PQR，也可作为生产过程中的抽样检验（如产品批次检验、定期工艺验证）。

b) 试验项目、试样制备、试验方法及验收标准应参照 PQR 的要求（见 7.3.4）。

9.4 缺陷处理：

9.4.1 经检验发现的不合格焊缝，应进行返修或报废处理。

9.4.2 搅拌摩擦焊缝的返修通常较为困难，应尽可能避免。若需返修，必须制定经过评定的返修工艺规程。常用的返修方法可能包括打磨去除缺陷后重新焊接（若条件允许）、采用其他熔焊方法进行补焊（需评估可行性和性能影响）等。

9.4.3 返修后的焊缝应按原要求重新进行检验。

10 安全要求

10.1 操作人员应佩戴适当的个人防护用品，如防护眼镜、工作服、安全鞋等。

10.2 设备应有可靠的接地和防护罩，防止触电和机械伤害。高速旋转的搅拌头具有危险性，严禁在设备运行时接触。

10.3 焊接过程中产生的热量较高，注意防止烫伤。

10.4 如采用液氮、干冰等冷却介质辅助搅拌摩擦焊接，注意防止冻伤。

10.5 焊接区域应保持通风良好，防止清理剂挥发气体、铝屑积聚。

10.6 遵守相关的工厂安全生产规章制度。

11 文件与记录

11.1 应建立并妥善保管以下技术文件和记录：

a) 焊接工艺规程（WPS）；

b) 焊接工艺评定（PQR）；

c) 人员资格证书或能力证明文件；

d) 设备校准和维护记录；

e) 材料质量证明文件；

f) 焊接生产记录（至少包括工件标识、所用 WPS 编号、操作者、焊接日期、关键参数记录等）；

g) 焊缝检验记录（外观检查、无损检测、破坏性试验报告）；

h) 不合格品处理记录；

i) 返修记录（若有）。

11.2 文件和记录的保存期限应符合相关法规或合同要求。

附录 A

焊接工艺规程（WPS）与焊接工艺预规程（pWPS）示例格式

WPS/pWPS 编号		修订号	
PQR 编号		日期	
焊接方法	搅拌摩擦焊	接头形式	对接
母材	(类型、成分、供货状态、引用标准)		
牌号/状态		厚度范围 (mm)	
焊前准备			
清理方法			
装配要求	(对中、错边量、间隙)		
焊接设备型号/类型			
控制模式	☐ 位移控制模式 ☐ 压力控制模式		
搅拌头编号/尺寸		文件号 (若需要)	
背部支撑板	(材料、尺寸、是否内设冷却通道)		
辅助措施			
水浸条件 (若需要)		冷却介质辅助条件 (若需要)	
超声条件及施加方式 (若需要)			
定位焊			☐ 是 ☐ 否
定位焊搅拌头编号/尺寸		文件号 (若需要)	
定位焊参数	(焊接模式、焊接速度、旋转速度、轴向力/压入量、倾角、焊前停留时间、焊接方向等)		
焊接参数			
焊接速度 (mm/min)		旋转速度 (rpm)	
倾角 (°)		焊前停留时间 (s)	
焊接方向与焊接次序			
位移控制模式适用本行	压入量		压入速度
压力控制模式适用本行	轴向力		压力调节系数
焊后热处理			☐ 是 ☐ 否
热处理制度	(固溶温度、时间, 时效温度、时间)		
焊后处理			
导入导出板去除方式 (若需要)			
匙孔修复方式 (若需要)			
检验要求			
外观检查	(比例/标准)		
无损检测	(方法/比例/标准)		
编制		日期	
审核		日期	
批准		日期	

附录 B

焊接工艺评定 (PQR) 示例格式

PQR 编号		修订号	
pWPS 编号		日期	
焊接方法	搅拌摩擦焊	接头形式	对接
母材	(类型、成分、供货状态、引用标准)		
牌号/状态		厚度 (mm)	
焊前准备			
清理方法			
装配要求	(对中、错边量、间隙)		
焊接设备型号/类型			
控制模式	☐ 位移控制模式 ☐ 压力控制模式		
搅拌头编号/尺寸		文件号 (若需要)	
背部支撑板	(材料、尺寸、是否内设冷却通道)		
辅助措施			
水浸条件 (若需要)		冷却介质辅助条件 (若需要)	
超声条件及施加方式 (若需要)			
定位焊			☐ 是 ☐ 否
定位焊搅拌头编号/尺寸		文件号 (若需要)	
定位焊参数	(焊接模式、焊接速度、旋转速度、轴向力/压入量、倾角、焊前停留时间、焊接方向等)		
实际焊接参数记录			
焊接速度 (mm/min)		旋转速度 (rpm)	
倾角 (°)		焊前停留时间 (s)	
焊接方向与焊接次序			
位移控制模式适用本行	压入量		压入速度
压力控制模式适用本行	轴向力		压力调节系数
焊后热处理			☐ 是 ☐ 否
热处理制度	(固溶温度、时间, 时效温度、时间)		
焊后处理			
导入导出板去除方式 (若需要)			
匙孔修复方式 (若需要)			
检验要求			
外观检查	(标准)		
测试结果	(报告编号/结果/评定结论)		
无损检测	(方法/标准)		
测试结果	(报告编号/结果/评定结论)		
破坏性试验	(方法/标准)		

测试结果	(报告编号/结果/评定结论)		
编制		日期	
审核		日期	
批准		日期	

参考文献

- [1] GB/T 1.1-2020 标准化工作导则
- [2] GB/T 2651-2023 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验
- [3] GB/T 2653-2008 焊接接头弯曲试验方法
- [4] GB/T 2654-2008 焊接接头硬度试验方法
- [5] GB/T 3375-1994 焊接术语
- [6] GB/T 3190-2020 变形铝及铝合金化学成分
- [7] GB/T 1173-2013 铸造铝合金
- [8] GB/T 19866-2005 焊接工艺规程及评定的一般原则
- [9] GB/T 13298-2015 金属显微组织检验方法
- [10] GB/T 26955-2011 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验
- [11] GB/T 3323.1-2019 焊缝无损检测 射线检测 第 1 部分：X 和伽马射线的胶片技术
- [12] GB/T 3323.2-2019 焊缝无损检测 射线检测 第 2 部分：使用数字化探测器的 X 和伽马射线技术
- [13] GB/T 11345-2013 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定
- [14] T/CWAN 0012-2019 焊接术语 压焊
- [15] T/CWAN 0043-2021 搅拌摩擦焊搅拌头设计及制造标准

《铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺 和控制规范》

编制说明

一 工作简况

（一） 任务来源

随着我国高端装备制造业的快速发展，铝合金中厚板在航空航天、轨道交通、船舶制造等领域的应用日益广泛。搅拌摩擦焊（FSW）作为一种高效、环保的固相连接技术，因其在铝合金焊接中的独特优势（如低变形、无气孔、无烟尘等），逐渐成为中厚板焊接的核心工艺之一。然而，目前国内针对铝合金中厚板搅拌摩擦焊的工艺规范和控制标准尚不完善，行业内缺乏统一的技术指导文件，导致焊接质量参差不齐，严重制约了该技术的规模化应用。

在此背景下，中国机电一体化技术应用协会积极响应《国家标准化发展纲要》中“加强重点领域标准制定”的号召，结合行业需求和技术发展趋势，于 2025 年正式立项“铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范”团体标准编制任务。本标准由哈尔滨工业大学牵头，联合多家科研院所、行业协会及龙头企业共同参与编制。任务来源具体包括以下三方面：

国家战略需求：《中国制造 2025》明确提出要突破先进制造技术瓶颈，推动高端装备轻量化发展。铝合金中厚板搅拌摩擦焊接是轻量化制造的关键环节，亟需通过标准化手段提升工艺水平。

行业迫切需求：铝合金搅拌摩擦焊接在不规范的工艺下极易出现焊接缺陷，尤其是中厚板铝合金焊接，表面缺陷和内部缺陷是制约其工业化应用的关键瓶颈。因工艺参数失控导致的未焊透、根部弱连接等问题占比超过 60%。现有国家标准（如 GB/T 19866）主要针对传统熔焊工艺，无法覆盖搅拌摩擦焊的特殊性。行业亟需一套涵盖工艺参数、设备选型、检验方法的专项标准，以指导企业规范生产。

技术创新推动：近年来，国内在搅拌头材料、焊接控制模式、焊接辅助措施等领域取得突破性进展。但这些技术成果尚未形成标准化推广路径，亟需通过标准编制实现技术固化与共享。

（二） 国内关于铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范的制定情况及最新要求

目前国内与搅拌摩擦焊相关的标准主要包括以下三类：

基础通用标准：

GB/T 3375-1994《焊接术语》：定义了焊接基本概念，但未涵盖搅拌摩擦焊接专有术语（如轴肩、匙孔等）。

GB/T 19866-2005《焊接工艺规程及评定的一般原则》：规定了焊接工艺文件框架，但并不适用于搅拌摩擦焊接过程。

行业专项标准：

T/CWAN 0043-2021《搅拌摩擦焊搅拌头设计及制造标准》：首次规范了搅拌头技术要求，但未涉及工艺参数与焊接质量控制。

QJ 20043-2011《铝合金中厚板搅拌摩擦焊技术要求》：航天行业标准，适用于铝合金中厚板力学性能控制要求，但未涉及到搅拌摩擦焊接工艺与控制的标准化要求。

综上可见，工现有标准对搅拌摩擦焊接核心参数（如轴向力控制模式下的压力调节系数、位移控制模式下的压入速度）仅作原则性描述，缺乏具体数值范围与匹配关系。国内尚未建立针对搅拌摩擦焊接头的工艺开发标准，亟待实现相关技术的突破

（三） 标准编制的目的、意义

铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范的编制，旨在通过系统化、科学化的技术指引，填补国内在该领域标准化建设的空白，推动行业技术水平的整体提升与高质量发展。当前，随着铝合金材料在高端装备制造中的广泛应用，搅拌摩擦焊技术因其绿色环保、低热输入、高接头性能等优势，已成为中厚板焊接的核心工艺之一。然而，由于缺乏统一的工艺规范和质量控制标准，行业内普遍存在工艺参数依赖经验调试、焊接质量波动大、缺陷分类能力不足等问题，严重制约了技术的规模化应用与产业升级。本标准的制定，首先着眼于解决技术应用的规范性难题，通过明确焊接设备选型、工艺参数范围、检验方法等核心内容，为生产单位提供可操作的技术依据，减少因工艺失控导致的焊接缺陷，提升接头可靠性与一致性。其次，标准通过整合前沿技术成果与工程实践经验，将多模式控制、缺陷分类、绿色工艺等创新方向纳入规范框架，引导行业从传统经验驱动向科学化、数据化模式转型，为技术迭代提供基础支撑。此外，标准注重对接国际先进技术规范，通过建立与国际接轨的工艺要求和质量评价体系，助力国产装备与技术走向全球市场，增强我国在先进焊接领域的话语权。从行业生态层面，本标准的实施将促进产学研深度融合，加速科研成果向实际生产力的转化，同时通过规范设备管理、工艺优化、人员培训等环节，推动全产业链协同发展，为高端装备

制造的轻量化、高效化、可持续发展注入动力。长远来看，这一标准不仅为铝合金中厚板搅拌摩擦焊技术的高质量应用奠定了技术基石，更通过标准化手段提升了行业整体竞争力，为我国制造业向绿色化转型升级提供了有力保障。

编制本标准的意义非常重大，原因在于：1）铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范亟需标准指导；2）目前缺乏铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范标准。

（四） 标准特点

本标准主要涵盖铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范的术语和定义、材料、设备、焊接工艺规程与焊接工艺评定、焊接工艺控制、质量控制与检验、安全要求、文件与记录。这一标准填补了铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范领域的规范性需求，旨在推动铝合金中厚板搅拌摩擦焊的规范化，提高生产效率和生产质量。

（五） 主要工作过程

1. 编制准备阶段

2025 年 1 月。主编单位接到编制任务后，组织专业技术人员成立编制组，开展大量的资料收集和前期调研工作，编写完成标准大纲、标准初稿等。

2. 征求意见阶段

未进行

3. 送审阶段

未进行

4. 报批阶段

未进行

二 标准编制原则

（一）科学性原则：本标准编制是在科学理论和实践经验基础上，确保技术要求和规范具有科学性和可行性，能够有效指导实际施工过程。

（二）统一性原则：本标准编制统一了各方的要求和标准，确保项目参建单位在铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制开发过程中能够按照该标准进行操作。

（三）公正性原则：本标准编制过程公正、公平、透明，确保标准的制定过程中各方利益的平衡，不偏袒任何一方，保证标准的客观性和公信力。

（四）可操作性原则：本标准编制时充分考虑了可操作性，确保项目参建

单位能够对照标准的要求进行铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制开发，避免标准过于理论化或难以实施的情况。

（五）合规性原则：本标准编制符合国家法律法规和相关行业的规范和标准，确保标准的合法性和合规性，遵循国家政策和法律要求。

三 标准主要内容

1. 范围：介绍铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范的制定背景、目的和适用范围等；
2. 规范性引用文件：本标准编制时引用的标准规范等文件；
3. 术语与定义：对本标准中所涉及的名词术语进行定义；
4. 总则：铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺与控制规范的总体要求；
5. 材料：铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺与控制规范对材料状态的具体要求；
6. 装备：铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺与控制规范对装备能力的具体要求；
7. 焊接工艺规程与焊接工艺评定：铝合金中厚板进行搅拌摩擦焊工艺开发需遵循的焊接工艺规程与焊接工艺评定要求；
8. 焊接工艺控制：铝合金中厚板进行搅拌摩擦焊工艺开发过程中需要关注的控制点；
9. 质量控制与检验：搅拌摩擦焊铝合金中厚板焊缝质量控制与检验要求；
10. 安全要求：铝合金中厚板进行搅拌摩擦焊过程中需要关注的安全要求；
11. 文件与记录：本标准中所涉及的文件与记录要求。

四 预期经济效益

铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范标准的实施，预期将带来显著的经济效益。目前，铝合金中厚板的搅拌摩擦焊在轻量化制造领域的应用规模正在快速增长，已成为提升生产效率和生产质量的关键技术。然而，企业、机构在应用铝合金中厚板搅拌摩擦焊时面临高昂的研发成本和时间压力。通过制定铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范，预期将显著降低这些开发成本。标准的实施将明确设计目标和必需的设计任务，提升研发效率，减少重复劳动。此外，统一的设计框架将促进团队间的协作，降低资源浪费，并简化测试和验证过程，进

一步缩短研发周期。这将使企业、机构能够更专注于技术创新和应用推广，最终推动轻量化制造领域的整体进步，实现可观的经济回报。

五 采用国际标准和国外先进标准情况

在编制铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范标准过程中，我们充分借鉴了国际标准和国外先进标准，结合国内实际情况进行了深入研究与修订。通过与国际接轨，确保我国铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范标准达到国际先进水平，为产业发展提供有力支撑。

六 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

在编制铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范标准过程中，我们严格遵循了相关的现行法律、法规和强制性国家标准，确保标准的合规性和权威性。同时，我们也充分考虑了铝合金中厚板搅拌摩擦焊工艺和控制规范标准的发展趋势和应用需求。

七 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在起草过程中未出现重大分歧意见。

八 标准性质的说明

建议本标准为推荐性标准。

九 贯彻标准的要求和措施建议

本标准经征求各相关方意见，已形成共识，标准实施之日起，各相关方将遵照执行。

十 废止现行有关标准的建议

无。

十一 主要起草单位和联系方式

本标准主编单位：哈尔滨工业大学,,,,,

本标准参编单位：,,,,,

本标准主要起草人：黄永宪、、、、、谢聿铭、孟祥晨、、、