



团 体 标 准

T/CWAN 0070—2023

铸铝搅拌摩擦焊接技术规范

Technical specification for friction stir welding of cast aluminum

2023-07-20 发布

2023-08-01 实施

中国焊接协会 发布

目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 技术要求.....	2
5 制造工艺.....	5
附录 A（资料性） 铸铝部件常见结构及搅拌摩擦焊典型应用.....	9
附录 B（规范性） 符号定义.....	12
附录 C（资料性） 铸铝合金及搅拌头资料.....	13

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。

本文件由航天工程装备（苏州）有限公司提出。

本文件由中国焊接协会归口。

本文件起草单位：航天工程装备（苏州）有限公司、广东鸿图南通压铸有限公司、安徽万宇机械设备有限公司、宁波旭升集团股份有限公司、孚斯威科技（嘉善）股份有限公司、广州瑞松智能科技股份有限公司、澳门发展及质量研究所、湖南坤鼎数控科技有限公司、江苏北人智能制造科技股份有限公司、艾因蒂克科技（上海）有限公司、北京石油化工学院、中国焊接协会焊接设备分会。

本文件主要起草人：徐晓霞、刘后尧、树西、张升芳、李继忠、焦向东、李宪政、朱志雄、唐国宝、谭立武、雷勋发、林涛、李丽、宋卫嗣、万龙、李文晓、郭达伟、李新松。

铸铝搅拌摩擦焊接技术规范

1 范围

本文件规定了YL101、YL102、YL104、YL112、YL113、YL117、YL302等铸造铝合金搅拌摩擦焊接的技术要求和制造工艺。

本文件适用于汽车行业及其它行业焊接厚度为0.5 mm~8 mm的铸铝材质部件的搅拌摩擦焊接制造，包括但不限于汽车领域的电控盒、电机壳、电池托盘等，其接头形式有对接、搭接和锁底接头等。铸铝部件常见结构及搅拌摩擦焊典型应用见附录A。

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 2649 焊接接头机械性能试验取样方法
- GB/T 2651 焊接接头拉伸试验方法
- 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 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法
- 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和伽玛射线技术
- GB/T 3375 焊接术语
- GB/T 14125 机械振动与冲击 振动与冲击对建筑物内敏感设备影响的测量和评价
- GB/T 15114 铝合金压铸件
- GB/T 15115 压铸铝合金
- 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 32259 焊缝无损检测 熔焊接头目视检测
- GB/T 32563 无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法
- 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 34630.2 搅拌摩擦焊 铝及铝合金 第2部分：焊接接头设计
- GB/T 34630.3 搅拌摩擦焊 铝及铝合金 第3部分：焊接操作工的技能评定
- GB/T 34630.4 搅拌摩擦焊 铝及铝合金 第4部分：焊接工艺规程及评定
- GB/T 34630.5 搅拌摩擦焊 铝及铝合金 第5部分：质量与检测要求
- QJ 20045-2011 铝合金搅拌摩擦焊超声相控阵检测方法
- T/CWAN 0012 焊接术语-压焊
- T/CWAN 0033 铝合金搅拌摩擦焊体积型缺陷相控阵超声检测规范
- T/CFA 0203113 压铸铝合金

3 术语和定义

GB/T 3375、GB/T 34630.1和T/CWAN 0012界定的以及下列术语和定义适用于本文件。本文件中的缩写符号定义（已注明的除外）见附录B。

3.1

退刀台 location for keyhole

在铸铝部件的结构设计中，用于搅拌摩擦焊匙孔引出停留的结构。

3.2

焊缝下塌 weld collapse

焊缝区域过多金属穿过焊缝根部形成过量塌落焊缝金属的现象。焊缝下塌示意图见图1。

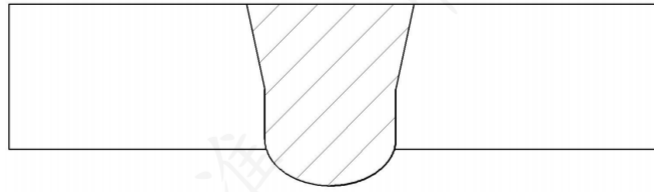


图1 焊缝下塌示意图

3.3

黏铝 sticky aluminum

铸铝件焊接过程中，搅拌头轴肩及针部表面黏着铝料，导致轴肩特征及针部螺纹不明显的现象。黏铝示意图见图2。

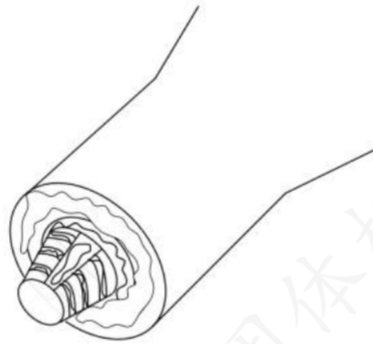


图2 黏铝示意图

4 技术要求

4.1 焊接母材

4.1.1 Al-Si、Al-Si-Cu、Al-Si-Mg 类铸铝的成分及质量应符合 GB/T 15114、GB/T 15115、T/CFA 0203112 等相关标准的规定。常用铸铝合金见附录 C。

4.1.2 铸铝搅拌摩擦焊接部位的表面应无明显凸起颗粒物或为机加工面，无影响焊接质量的流痕、拉伤、冷隔等铸造缺陷，应符合相关技术文件或技术协议的要求。

4.1.3 铸造浇口、飞边、溢流口、隔皮和顶杆痕迹等应避免留在焊接范围内；如无法避免，应进行清理，允许留下的凸起或凹陷不得大于 0.5 mm。

4.1.4 在搅拌头轴肩覆盖区域内，铸件不允许有裂纹、欠铸和任何穿透性缺陷，无夹渣等颗粒物杂质；不应存在聚集型或单个直径大于 0.5 mm 的气孔或缩孔缺陷，且相邻两个孔洞间距不小于搅拌针根部直径。

4.1.5 铸铝部件设计时建议留有退刀台以便引出搅拌摩擦焊匙孔。退刀台可以选用铸铝部件焊后待加工的光孔或螺纹孔等。退刀台尺寸根据搅拌头轴肩尺寸进行确定，见表 1。

4.1.6 焊接接头设计应参照 GB/T 34630.2，接头设计形式见表 2。

表1 退刀台尺寸

序号	搅拌头轴肩尺寸 (D)	退刀台直径或最小宽度 (M)
1	$D \leq 8 \text{ mm}$	$M \geq D + 2$
2	$8 \text{ mm} < D \leq 12 \text{ mm}$	$M \geq D + 4$
3	$10 \text{ mm} < D \leq 20 \text{ mm}$	$M \geq D + 6$

4.2 焊缝质量

焊接接头质量等级划分为三级：

I 级接头：受力要求高，适用于承受很大交变载荷或重要受力的关键焊缝；

II 级接头：受力要求较高，适用于承受较大载荷的重要焊缝；

III 级接头：受力要求一般，适用于其他承受较小载荷的一般焊缝。

焊接接头质量等级由设计人员根据焊件结构特点、工件使用条件、受力情况、重要程度及工艺上的可能性，会同工艺人员综合评定后确定。I 级、II 级接头应在设计文件中注明，未注明的为 III 级接头。

焊接质量要求除参照 GB/T 34630.5 外，还应满足下列要求。

4.2.1 尺寸要求

焊接深度及焊缝宽度要求见表2。焊缝尺寸还应符合客户设计文件或技术图纸相关要求。

表 2 焊接接头形式及尺寸要求

序号	接头形式	要求		图示
		焊接深度 (t)	焊缝宽度 (a)	
1	对接接头	$t = \delta_{min}$	$a \geq D$	
2	搭接接头	$t_0 \geq 0.2\delta_{min}$ 或 0.5 mm, 取较大值	$a \geq D,$ $a_0 \geq \delta_1$	
3	锁底接头	$t \geq \delta_{max}$	$a \geq D$	

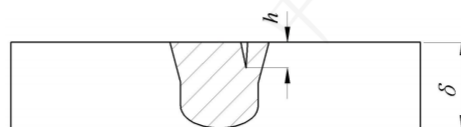
4.2.2 表面质量

对于焊道边缘的焊接飞边毛刺，若焊道后期进行加工，则清理易掉落的飞边毛刺；若焊道后期不进行加工，则须保证焊道边缘无凸起的飞边毛刺。

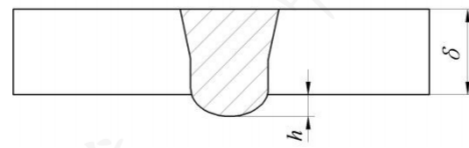
焊缝表面质量要求应符合表3的规定，焊缝表面缺陷示意图3。

表 3 焊缝表面缺陷

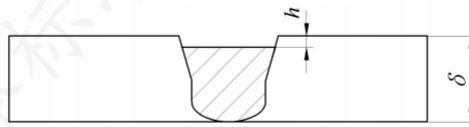
序号	缺陷类型	焊缝等级		
		I 级	II 级	III 级
1	表面沟槽	不允许	不允许	不允许
2	焊缝下塌	满足客户需求	满足客户需求	满足客户需求
3	表面下凹	$h \leq 0.3 \text{ mm}$	$h \leq 0.5 \text{ mm}$	$h \leq 0.8 \text{ mm}$



a) 表面沟槽



b) 焊缝下塌



c) 表面下凹

图3 焊缝表面缺陷示意图

4.2.3 内部质量

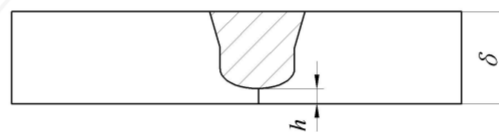
常见焊缝内部缺陷类型及质量要求应符合表4的规定，焊缝内部缺陷示意图4。

表4 常见焊缝内部缺陷类型及质量要求

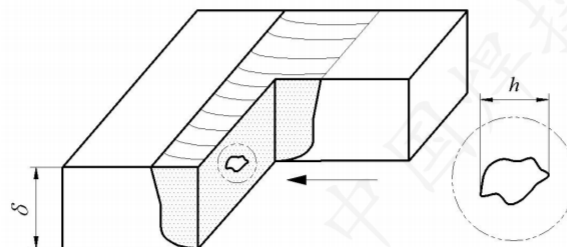
序号	缺陷类型	焊缝等级		
		I 级	II 级	III 级
1	裂纹	不允许	不允许	不允许
2	未焊透	不允许	$h \leq 0.1 \delta$	$h \leq 0.15 \delta$ 或 1.0 mm, 取较小值
3	隧道孔洞	$h \leq 0.2 \text{ mm}$	当 $\delta \leq 2 \text{ mm}$ 时, $h \leq 0.3 \text{ mm}$; 当 $2 \text{ mm} < \delta \leq 8 \text{ mm}$ 时, $h \leq 0.15 \delta$ 或 0.4 mm, 取较小值	当 $\delta \leq 2 \text{ mm}$ 时, $h \leq 0.6 \text{ mm}$; 当 $2 \text{ mm} < \delta \leq 8 \text{ mm}$ 时, $h \leq 0.3 \delta$ 或 0.8 mm, 取较小值
4	界面曲钩	$h \leq 0.05 \delta$	$h \leq 0.2 \delta$	$h \leq 0.4 \delta$



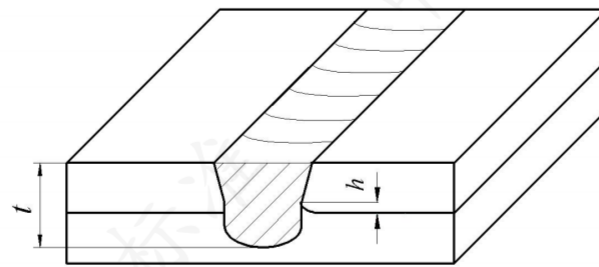
a) 裂纹



b) 未焊透



c) 隧道孔洞



d) 界面曲钩

图 4 焊缝内部缺陷示意图

4.2.4 接头强度

对于铸态条件下的搅拌摩擦焊接对接接头，其室温抗拉强度应满足：

- a) I级接头的抗拉强度应不低于母材金属抗拉强度下限的90%；
- b) II级接头的抗拉强度应不低于母材金属抗拉强度下限的80%；
- c) III级接头的抗拉强度应不低于母材金属抗拉强度下限的70%。

4.3 焊前处理

焊前应按照GB/T 34630.5中4.6.2的要求对待焊部位进行清洁处理，去除部件表面氧化皮、油污以及其他对焊缝质量有危害的多余物。

5 制造工艺

5.1 作业环境

- 5.1.1 铸铝部件的搅拌摩擦焊接区域应保持清洁和良好通风，环境温度-10℃~40℃，相对湿度不大于85%；超出范围的环境条件，制造厂和用户协商确定；
- 5.1.2 设备冷却及自动工装所需的压缩空气压力应满足使用要求；
- 5.1.3 振动源与设备之间的距离按照GB/T 14125执行。

5.2 焊接设备

5.2.1 焊接设备应具备焊接速度、转速、焊接压力值及压入量等工艺参数调整功能，能在设定参数下稳定工作。设备应满足如下条件：

- a) 主轴最大转速 ≥ 3000 rpm；
- b) 最大焊接深度 ≥ 8 mm；
- c) 控制模式具备恒压力或恒位移控制功能；
- d) 重复定位精度 $\leq \pm 0.1$ mm。

5.2.2 对于不同结构形式的铸铝部件推荐不同形式的设备以满足生产要求：

- a) 对于三维曲面焊接，建议使用具备五轴功能的设备或机器人搅拌摩擦焊接设备；
- b) 对于一维或二维焊接，可以使用龙门式设备、C型设备或机器人搅拌摩擦焊接设备。

5.2.3 搅拌摩擦焊接设备若出现下列情况，则在投入生产前应对设备进行工艺验证，经验证合格方可投入使用：

- a) 新设备落地安装；
- b) 设备重新安装；
- c) 设备大修后或连续工作满6个月；
- d) 影响焊接工艺参数的零部件更换后。

5.3 焊件装夹

焊前接缝保持贴紧、对齐和压平，装配间隙及错边量要求应符合GB/T 34630.5及表5规定，装配间隙及错边量示意图5。底部进行刚性支撑，焊件两侧通过工装夹具施加压紧力和侧向顶紧力。

表 5 装配间隙及错边量要求

序号	焊件厚度 (δ)	装配间隙 (b)	错边量 (p)
1	$\delta \leq 3 \text{ mm}$	$b \leq 0.1 \delta$	$p \leq 0.1 \delta$
2	$3 \text{ mm} < \delta \leq 5 \text{ mm}$	$b \leq 0.1 \delta$ 或 0.4 mm ，取较小值	$p \leq 0.1 \delta$ 或 0.4 mm ，取较小值
3	$5 \text{ mm} < \delta \leq 8 \text{ mm}$	$b \leq 0.1 \delta$ 或 0.6 mm ，取较小值	$p \leq 0.1 \delta$ 或 0.6 mm ，取较小值

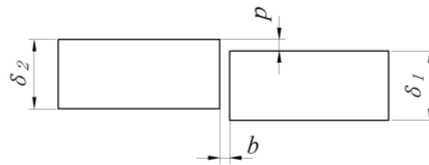


图 5 装配间隙及错边量示意图

5.4 搅拌头选择

5.4.1 根据铸铝部件的材料、结构及相关技术要求选择合适的搅拌头，搅拌头示意图见图 6。常用搅拌头材料见附录 C。当采用搅拌摩擦焊进行焊接时，部件设计应当遵循设计规范，有足够的边距、支撑台阶宽度，焊接区域不能有干涉或表面镂空；三维焊接时，部件设计应当满足三维焊接设备所需最小圆角。

5.4.2 搅拌头轴肩形状推荐选用内凹形状且具有同心环或三螺旋结构，以便加强对铸铝材料的收拢作用。搅拌针一般为带有螺纹结构和周向均布有三铣平面或三螺旋结构的圆锥形搅拌针，搅拌针长度 (l) 与焊接深度 (t) 的关系为： $l = t \cdot (0.2 \sim 0.3) \text{ mm}$ 。搅拌针根部直径 (d) 根据产品需要设计选定。

5.4.3 搅拌针上的螺纹旋向为：当搅拌针上加工的螺纹旋向为右旋时，搅拌针工作时应为逆时针旋转；当搅拌针上加工的螺纹旋向为左旋时，搅拌针工作时应为顺时针旋转。搅拌针长度及轴肩尺寸见表 6。

表 6 搅拌头尺寸

序号	搅拌针长度 (l)	轴肩尺寸 (D)
1	$l \leq 3 \text{ mm}$	$5 \text{ mm} < D \leq 10 \text{ mm}$
2	$3 \text{ mm} < l \leq 5 \text{ mm}$	$8 \text{ mm} < D \leq 16 \text{ mm}$
3	$5 \text{ mm} < l \leq 8 \text{ mm}$	$12 \text{ mm} < D \leq 22 \text{ mm}$

5.4.4 焊接前应按要求对搅拌头形状、黏铝情况及磨损程度进行定期检验，确保其符合要求：

- 搅拌头形状应保持有完整的螺纹及切面结构；
- 为防止搅拌头发生黏铝情况，推荐采用表面附有耐黏着涂层的搅拌头，若搅拌头发生黏铝情况，可用 20% NaOH 水溶液浸泡，以去除表面黏铝；
- 搅拌头磨损量应满足表 7 要求。

表 7 铸铝焊接搅拌针磨损量要求

序号	搅拌针长度 (l)	搅拌针磨损量	
		搅拌针长磨损量 (Δl)	搅拌针根部磨损量 (Δd)
1	$l \leq 3 \text{ mm}$	$\Delta l \leq 0.05 l$	$\Delta d \leq 0.1 \text{ mm}$
2	$3 \text{ mm} < l \leq 5 \text{ mm}$	$\Delta l \leq 0.05 l$	$\Delta d \leq 0.2 \text{ mm}$
3	$5 \text{ mm} < l \leq 8 \text{ mm}$	$\Delta l \leq 0.05 l$	$\Delta d \leq 0.3 \text{ mm}$

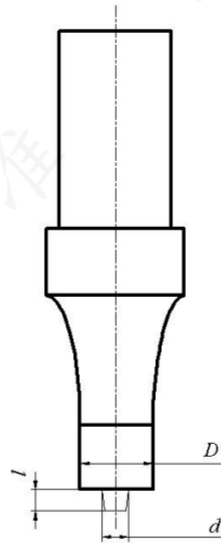


图6 搅拌头示意图

5.5 工艺参数

5.5.1 搅拌摩擦焊主要工艺参数为焊接倾角、旋转速度、焊接速度、压入量（压力值）、预热时间、停留时间、横向偏移量。在试制或批量焊接生产前，应确定和验证焊接工艺参数，按照 GB/T 34630.4 进行焊接工艺评定。所用样件与被焊母材的材料牌号、热处理状态和厚度尺寸相同。

5.5.2 若出现下列所属任一情况，则应按 5.5.1 重新调整焊接工艺参数并按照 GB/T 34630.4 进行焊接工艺评定：

- a) 被焊母材的材料牌号、热处理状态、厚度尺寸发生变化；
- b) 每日首件产品生产前需进行设备点检及焊接参数确认；
- c) 焊接设备经过大修或连续三个月未使用；
- d) 产品结构或焊接工装更换；
- e) 搅拌头更换；
- f) 铸造设备、模具、铸造工艺参数和操作连续发生任何重大变化。

5.6 人员要求

5.6.1 企业应配置搅拌摩擦焊接技术人员，负责焊接工艺试验和工艺制定工作；

5.6.2 从事铸铝搅拌摩擦焊接设备的操作人员应符合 GB/T 34630.3 规定的资质要求。操作人员应熟悉搅拌摩擦焊原理，掌握铸铝焊接工艺特点，能熟练操作搅拌摩擦焊设备，经考核合格后上岗操作。

5.7 操作安全要求

5.7.1 搅拌摩擦焊设备运行过程中，操作人员应处于安全区域内，佩戴安全帽、防护眼镜、防尘口罩和隔音耳塞；

5.7.2 焊接过程中禁止肢体接触搅拌头和焊缝，更换搅拌头和焊接工件时小心烫伤；

5.7.3 焊接过程中注意工装夹具运动范围，防止夹伤。

5.8 焊后处理

对焊缝表面无粗糙度要求的，手动或机械去除飞边，不可损伤母材基体；对表面有粗糙度要求的，结构设计应考虑预留加工余量，建议进行机加工铣平。

5.9 检测方法

5.9.1 无损检测

焊缝表面质量应进行目视检测，焊缝表面不允许出现表面沟槽缺陷，目视检测参照GB/T 32259中第5部分进行。

焊接接头X射线检测方法按GB/T 3323.2进行，建议采用工业CT进行检测。

焊接接头超声检测建议采用相控阵超声检测，检测方法按GB/T 32563、QJ 20045-2011或T/CWAN 0033进行。

5.9.2 破坏性检测

a) 焊接接头宏观和微观金相检验按 GB/T 26955 进行；

b) 力学性能检验：

焊接接头拉伸试样取样按GB/T 2649的规定进行，拉伸测试方法按GB/T 2651的规定进行。有要求时，需要进行弯曲、硬度、疲劳试验，按照设计文件执行。弯曲试样制备及检测按照GB/T 2653进行；硬度试样制备及检测按照GB/T 2654进行；疲劳试样制备及检测按照GB/T 3075进行。

5.9.3 密封性检测

密封性检测根据客户要求可用气密、液压或氦质谱检漏等方法检测。检测方法按设计文件或相关技术文件的规定进行。检测报告应包含检测压力、保压时间、合格标准。

5.9.4 爆破耐压检测

爆破耐压检测根据客户要求用于检测铸铝焊件内部水道所能承受的最大瞬时耐压能力。通过往焊件水道内持续注入液态介质（水、油等），检测水道盖板破裂或其变形量超过设定值时的压力，即为爆破压力。

5.9.5 耐久检测

耐久检测根据客户要求用于评估铸铝焊件在模拟工况下的疲劳强度。通过往焊件水道内注入一定温度、压力的工作介质（水、油等），介质的压力值按设定频率进行循环充放，检测一定循环次数内是否存在泄漏。检测报告应包含检测介质、检测压力、频率、脉冲次数。

5.10 返工要求

若采用搅拌摩擦焊补焊处理，补焊次数应不超过2次，并对补焊焊缝进行全部相关检测。

附录 A
(资料性)
铸铝部件常见结构及搅拌摩擦焊典型应用

A.1 铸铝部件常见结构

铸铝电机壳示意图及搅拌摩擦焊焊缝位置见图A.1，铸铝电控盒示意图及搅拌摩擦焊焊缝位置见图A.2，铸铝电池托盘示意图及搅拌摩擦焊焊缝位置见图A.3。

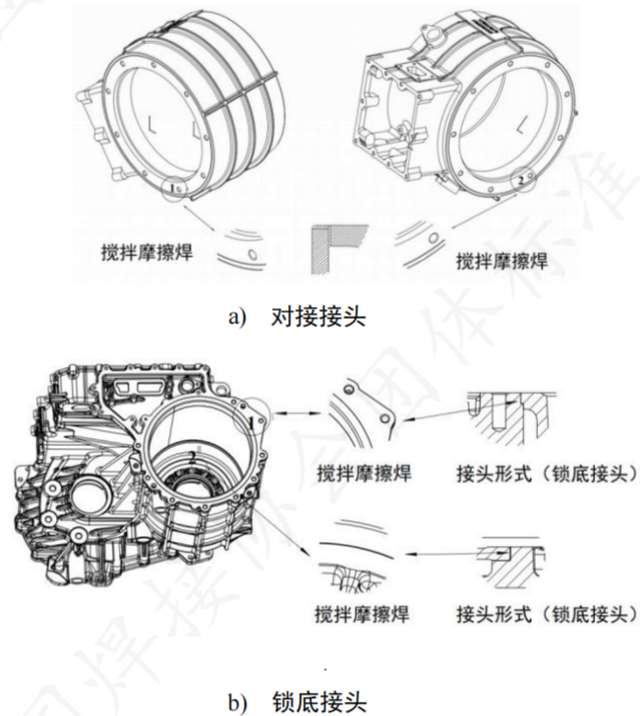


图 A.1 铸铝电机壳示意图及搅拌摩擦焊焊缝位置

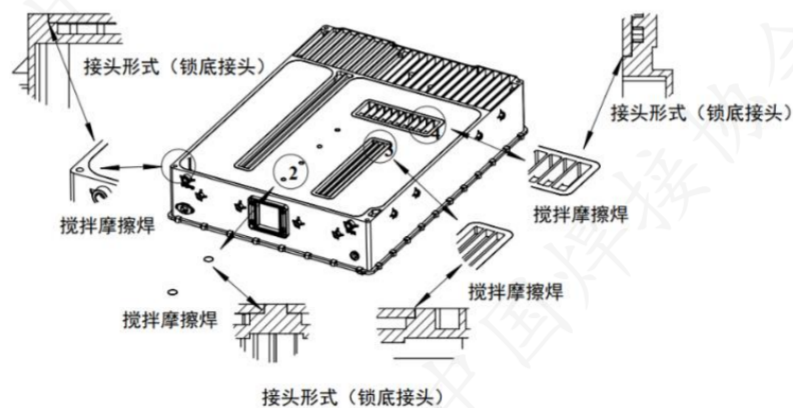


图 A.2 铸铝电控盒示意图及搅拌摩擦焊焊缝位置

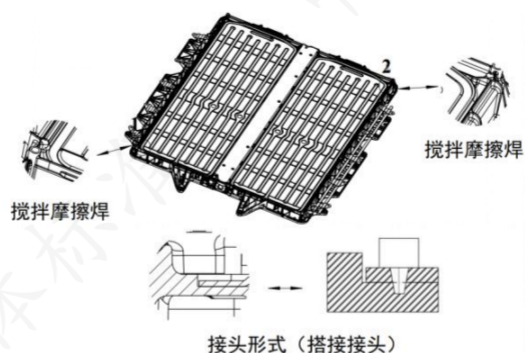


图 A.3 铸铝电池托盘示意图及搅拌摩擦焊焊缝位置

A.2 铸铝部件搅拌摩擦焊典型应用

铸铝部件搅拌摩擦焊典型应用见表 A.1。

表 A.1 铸铝部件搅拌摩擦焊典型应用

序号	典型应用	图示
1	用于连接盖板和电控箱	
2	用于连接盖板和电控箱上定位点	
3	用于连接盖板和电控箱上散热筋条	
4	用于连接盖板和电控箱上散热筋条	
5	用于连接电机壳和水套上表面	
6	用于连接电机壳和水套下表面	

序号	典型应用	图示
7	用于连接盖板和电池托盘	
8	用于连接盖板和电池托盘	

附录 B
(规范性)
符号定义

正文及表格中使用的符号定义如下：

h ——缺陷尺寸

Δ ——焊件厚度

T ——焊接深度

D ——搅拌头轴肩尺寸

M ——退刀台直径或最小宽度

A ——焊缝上表面宽度

a_0 ——搭接界面宽度

t_0 ——搭接深度

B ——装配间隙

P ——错边量

L ——搅拌针长度

D ——搅拌针根部直径

Δl ——搅拌针长磨损量

Δd ——搅拌针根部磨损量

附录 C
(资料性)
铸铝合金及搅拌头资料

C.1 铸铝合金

常用铸铝合金特点及应用举例见表 C.1。

表 C.1 常用铸铝合金特点及应用举例

合金系	牌号	代号	合金特点	应用举例
Al-Si 系	YZAlSi12	YL102	共晶合金, 具有较好的抗热裂性能、气密性及流动性, 不能热处理强化, 抗拉强度低。	用于负载低、形状复杂的薄壁铸件制造, 如壳体、汽车机匣、牙科设备、活塞等。
Al-Si-Mg 系	YZAlSi10Mg	YL101	亚共晶合金, 较好的抗腐蚀性能, 较高的冲击韧性和屈服强度, 铸造性能稍差。	用于汽车车轮罩、摩托车曲轴箱、自行车车轮、船外机螺旋桨等部件。
	YZAlSi10	YL104		
Al-Si-Cu 系	YZAlSi9Cu4	YL112	兼具较好的抗热裂性、气密性、流动性, 力学性能及切削加工性良好, 铸造性能好。	典型用途为带轮、活塞和气缸头等, 包括刹车、发动机箱体、缸盖和缸体、3C 产品壳体等。
	YZAlSi11Cu3	YL113	过共晶合金, 具有优异的流动性、抗热裂性及耐磨性, 气密性中等, 热膨胀系数低。	用于发动机机体、刹车、带轮、泵和其他要求耐磨的零件。
	YZAlSi17Cu5Mg	YL117		
Al-Mg 系	YZAlMg5Si1	YL302	优异的耐蚀性能及冲击韧性, 但塑性及铸造性能较差。	用于汽车变速器的油泵壳体、摩托车衬垫和车架联结器、农机具连杆、船外机螺旋桨、钓鱼杆及其卷线筒等零件。

C.2 搅拌头材料

常用搅拌头材料特性见表 C.2。

表 C.2 常用搅拌头材料特性

材料	最高工作温度 / °C	适应性	加工性	化学活性	热稳定性
工具钢	500	极佳	好	低	好
不锈钢	800	极佳	好	低	极佳
镍基合金	800	一般	一般	低	好
金属间化合物	≥800	很差	很差	低	最好
钨基复合材料	800	极佳	好	低	极佳
金属陶瓷	800	极佳	很差	低	极佳
钴基合金	1000	好	良好	低	好
高熔点金属	1000	好	差	低	易氧化
陶瓷	1000	不稳定	很差	低	极佳

中国焊接协会

中国焊接协会团体标准

中国焊接协会

中国焊接协会团体标准

中国焊接协会团体标准

中国焊接协会团体标准

中国焊接协会团体标准