

第十二章 铝及铝合金搅拌摩擦焊技术

第一节 搅拌摩擦焊发展概述

早在 1956 年，人类就发明了摩擦焊，随着现代制造工业的发展，新型材料的大量应用以及交通运输工具的轻量化发展，使固相连接技术——摩擦焊，受到了前所未有的关注和发展。1991 年，英国焊接研究所（The Welding Institute，简称“TWI”）成功地发明了搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding，简称“FSW”），使摩擦焊技术在以往连续驱动摩擦焊、惯性摩擦焊等基础上又前进了一步，被誉为“继激光焊后又一革命性的焊接新技术”。

搅拌摩擦焊技术彻底解决了铝合金焊接方法问题。这种焊接工艺技术最初主要用于解决铝合金等低熔点材料的焊接，但是经过十多年的发展，搅拌摩擦焊迄今可以应用于铝合金、铜合金、镁合金、钛合金，甚至钢合金等金属材料。

与普通熔焊方法相比较搅拌摩擦焊具有如下突出的优点：

- 固态焊接技术，焊接过程不存在焊接材料熔化；
- 接头质量好、焊缝为细晶锻造组织结构，没有气孔、裂纹、夹渣等缺陷；
- 焊接效率高，在 0.4~100mm 厚度范围内可以实现单道焊接成型；
- 不受焊缝位置的限制，可实现多种接头形式的焊接；
- 焊件中残余应力低，变形小，可以实现高精度焊接；
- 接头强度高、疲劳性能好，冲击韧性优异；
- 焊接成本低，不需要焊接过程消耗，不需要填丝和保护气；
- 焊接操作简单、便于实现自动化焊接。

基于搅拌摩擦焊技术的诸多优越性，自 1991 年发明至今，在不到 10 年的时间里，搅拌摩擦焊已成功地实现了铝合金、镁合金等多种轻合金金属材料的焊接，并且已经在航天、航空、造船、列车、汽车、电力等多个工业制造领域得到广泛应用。

在中国，北京航空制造工程研究所于 2002 年 4 月与英国焊接研究所签署专利许可协议，并且在技术合作的基础上成立了中国搅拌摩擦焊中心。中国搅拌摩擦焊中心的成立象征着搅拌摩擦焊技术研究、开发和应用在中国的正式启动，在中国焊接发展史上具有里程碑的作用。

2003 年，为了加快搅拌摩擦焊技术在中国的市场化发展和应用，北京航空制造工程研究所在中国搅拌摩擦焊中心的基础上，成立了中国首家专业化的搅拌摩擦焊技术公司——北京赛福斯特技术有限公司，该公司是中国唯一得到 TWI 专利许可，可以设计和制造搅拌摩擦焊

设备的专业化公司。自此，北京赛福斯特技术有限公司为中国工业制造企业提供专业化的搅拌摩擦焊设备和系统，促进了这项革命性的技术在中国的推广和应用。

首先，在2003年中国搅拌摩擦焊中心为解放军3305厂提供了专业化的搅拌摩擦焊设备，使搅拌摩擦焊在兵器工业中得到应用。

2004年中国搅拌摩擦焊中心为航天三江集团红阳机械厂提供大型搅拌摩擦焊系统用于导弹系列筒形结构件的纵、环缝焊接，从此整个航天工业焊接工艺技术逐渐由熔焊转向搅拌摩擦焊技术，并且带动中国运载火箭连接技术实现了飞跃。2006年开始逐渐在航天149厂、211厂、7102厂等得到搅拌摩擦焊应用，2009年利用搅拌摩擦焊技术制造的长三丙运载火箭成功发射，标志着搅拌摩擦焊技术在中国航天工业的全面推广和应用。

自2005年，中国搅拌摩擦焊中心率先在中国研制成功焊接长度15米的大型船舶带筋铝合金型材壁板搅拌摩擦焊设备，焊接出宽6米、长15米的宽幅铝合金船舶壁板，使搅拌摩擦焊在中国船舶制造工业得到直接应用，提升了中国铝合金舰船制造技术能力和水平。

2006年，在电力行业，中国搅拌摩擦焊中心实现了交直流输变电项目铝合金热沉器的搅拌摩擦焊制造。自此以后，中国搅拌摩擦焊中心针对中空液冷（或气冷）热沉器和散热器结构进行了专项工艺技术和专用装备开发，掌握了中空散热器的设计、制造和焊接关键技术，研制成功了国内首台平面二维搅拌摩擦焊设备，使搅拌摩擦焊技术在电力和电子热沉器、散热器、冷板等产品中得到广泛应用，彻底改变了该类产品的焊接工艺技术，提升了产品的质量和可靠性。图12-1为搅拌摩擦焊制造的典型中空散热器产品。



图 12-1 搅拌摩擦焊制造的典型中空散热器产品

从2007年，搅拌摩擦焊技术的优越性在航空制造领域得到关注，尤其是搅拌摩擦焊可以焊接飞机高强铝合金，通过焊接可以代替大部分的传统“铆接”工艺，从而实现飞机结构的整体化制造，为飞机设计和制造提供了新的思路和途径。2008年中国搅拌摩擦焊中心和沈阳飞机设计所合作实现现役J11B飞机前机身下壁板模拟结构件的搅拌摩擦焊制造；2009年又在新型大型军用运输机货舱地板中得到应用；

2010年又实现了新一代战斗机外机身口盖零件的搅拌摩擦焊。未来搅拌摩擦焊还将在大飞机项目中得到应用。

在轨道列车制造工业，早在2003年中国搅拌摩擦焊中心就和长春轨道客车股份公司联系探讨搅拌摩擦焊在列车车体结构上的应用。2004年，中国搅拌摩擦焊中心为常州轨道车辆牵引研究中心研制了轨道行业第一台型材板搅拌摩擦焊设备，应用于地铁车辆驱动箱零件的焊接制造。但是直到2008年，中国搅拌摩擦焊中心才和南车集团株洲电力机车厂合作完成了列车铝合金材料搅拌摩擦焊常规力学性能和疲劳性能的基础研究。2009年和南车青岛四方机车车辆厂合作开始高速列车铝合金枕梁的搅拌摩擦焊。2010年搅拌摩擦焊在列车制造领域应用取得突破进展，首先在中国搅拌摩擦焊中心为北车集团长春轨道客车股份公司交付了一台静龙门式搅拌摩擦焊设备基础上，实现了车钩座的批量化焊接应用，并且开始了全搅拌摩擦焊高速铝合金车体样车的试制。同时，中国搅拌摩擦焊中心为南车集团株洲电力机车厂研制的地铁车厢侧墙壁板通过了技术鉴定，首次在广州三号地铁车辆中投入了批量化制造。从此，搅拌摩擦焊技术在列车制造行业的推广应用拉开了序幕，预计不远将来，搅拌摩擦焊将成为轨道列车产品的主导焊接技术。

第二节 搅拌摩擦焊原理

搅拌摩擦焊是一种连续的、纯机械化的固相连接工艺。圆柱状的带有轴肩的搅拌头，前端带有特殊形状的搅拌针，旋转着缓慢地插入到待焊缝中，待焊板材被夹具固定在砧板上，防止在焊接过程中被焊接工件的分开，由于搅拌针在结合面之间旋转产生了摩擦热，使被焊接板材得到热塑化，使搅拌针能顺利的在待连接焊缝方向上横向移动。

随着搅拌针的旋转，被塑化的金属材料由搅拌针的前端面向搅拌头的后端转移，经过与工件表面紧密接触的轴肩与搅拌针特定外形的锻压作用，在两工件之间形成了动态固相扩散连接。

搅拌摩擦焊可以被看作是固相的孔连接技术，因为焊接过程中产生了配合搅拌针的孔，在搅拌头经过的区域，孔又被流动的塑性金属填补。

搅拌摩擦焊的原理看上去很简单，其实施过程其实是很复杂的。虽然开始由于搅拌针与工件之间的直接摩擦接触产生一定的热，但是对于大多数焊缝摩擦不是主要的热源。焊接热主要来源于搅拌针旋转中金属塑性变形时搅拌针对工件材料的剪切应变，也就是说，大量的热是工件材料围绕搅拌针运动而发生的塑性变形而产生。

搅拌摩擦焊原理如图12-2所示：

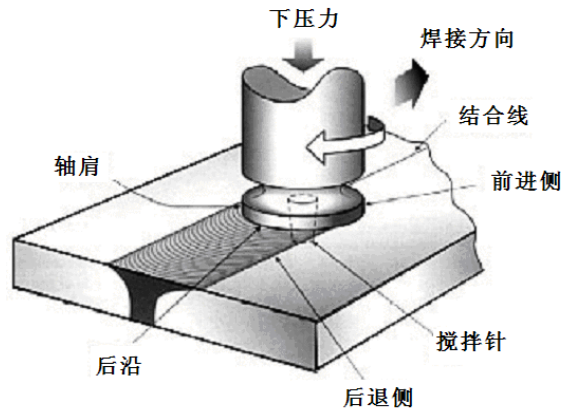


图 12-2 搅拌摩擦焊原理示意图

第三节 搅拌摩擦焊术语定义

术语对任何一种焊接工艺都是非常重要的。当一种全新的技术出现的时候，术语不统一，在文献中出现专业辞汇混淆的可能性就很大，搅拌摩擦焊接技术也不例外。下列术语已为搅拌摩擦焊专利授权协会成员认可（包括商用会员以及学术研究者），在此，首次对搅拌摩擦焊专业术语进行初步定义，希望为将来的专业术语规范奠定基础。

图 12-3 所示为搅拌摩擦焊接工艺中最主要的一些术语，其他的术语我们在下面做了简要的总结，同时对一些常用工艺参数的国际单位进行了标注。

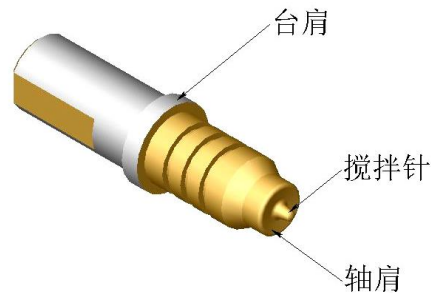


图 12-3 搅拌头外形示意图

轴肩： 搅拌头与工件表面旋转摩擦接触的部分。

搅拌针： 搅拌头插入到工件中的部分。

前进侧： 焊缝的一侧，在此轴肩的旋转方向与搅拌头的焊接方向一致。

后退侧： 焊缝的另一侧，在此轴肩的旋转方向与搅拌头的焊接方向相反。

轴向力（ F_z ）： 施加在搅拌头上使搅拌针可以插入到工件中、轴肩可以保持与

工件表面紧密接触的压力(KN)。

横向力 (Fx): 搅拌头向前移动需要的驱动力。

侧向力 (Fy): 搅拌头向前移动时向焊缝侧面施加压力。

搅拌头转速: 指搅拌头的旋转速度, 可以有列表示方式, 转速(rev/min), 线速度(m/s), 角速度(rads/sec)。

焊接速度: 焊接时, 搅拌头向前移动速度(mm/min)。

焊接扭矩: 搅拌头插入到工件中向前移动时所需要的旋转扭矩。

倾斜角: 搅拌头的轴线与工件平面的法线所成的角度 (例如: 0 度即搅拌头的轴线与工件平面垂直)。

侧倾角: 在横向移动方向上, 搅拌头轴线偏离垂线的角度。

搅拌头插入: 搅拌头在焊接开始的时候插入到工件中的过程, 插入速度以 mm/sec 为单位。

根部压入深度: 搅拌头的轴肩最低部与工件原始未焊接表面的距离(单位 mm)。

轴肩覆盖区: 轴肩与工件表面紧密摩擦接触的区域。

垫板: 置于被焊接工件的被面, 用来对工件施加反作用力减小工件变形的支撑部分以及防止焊接塑性材料从焊缝接头处被压出。

工件: 被焊接的基体或者元件。

搅拌区或者焊核区: 焊缝中心的再结晶冶金区域。

热机械影响区: 焊缝中既受到热影响又发生机械变形的冶金区域。

热影响区: 焊缝中只受到热影响的冶金区域。

母材: 焊接接头中既没有受到热影响又没有发生机械变形的区域。

引导孔: 在某些场合, 应在工件中预先钻一个孔, 使搅拌头可以容易插入到工件中。在焊接硬质或者比较厚的工件时, 引导孔的作用很显著。

匙孔: 指搅拌头退出时焊缝末端遗留下的搅拌孔, 孔洞形成是由于搅拌头插入时或者开引导孔时的金属材料置换。目前可以采用了一些特别工艺技术, 如: 可回抽搅拌头等来避免孔洞的出现。

停留时间: 指搅拌头插入到工件中旋转摩擦等待时间, 这段时间主要用来通过

摩擦生热，建立热温度场，使金属软化具有塑性。

焊缝根部：焊缝背面与搅拌针相对应的部分，如果焊接深度和参数不合适，该区域容易产生缺陷。

第四节 搅拌摩擦焊技术特点

搅拌摩擦焊是一种机械化的固相连接技术，主要有如下技术特点：

一、固相连接工艺，焊接过程中始终没有被焊接材料的熔化。

- 焊缝中无气孔缺陷；
- 无元素烧损；
- 无热裂纹；
- 无凝固时元素和组织的偏析；
- 接头显微组织各向同性。

二、单道焊接工艺，一般情况下，只要一道焊缝就可以满足生产需要。

- 对于 0.75mm~50mm 的铝合金可一道焊接完成；
- 至今还没有明确搅拌摩擦焊可焊厚度的上、下限；
- 在大厚度焊接时可以采用双面焊或多道焊。

三、机械化工艺，完全依靠机床设备来实现。

- 焊接过程类似于传统机械加工过程；
- 不需要传统焊接工人的培训；
- 适于自动化焊接过程；
- 工作噪音较低。

四、焊前不需开坡口和特殊清理。

- 允许对接间隙最大为 0.1t (t 为板厚)；
- 可以直接对剪裁板件进行焊接；
- 对氧化物不敏感（如阳极化层）；
- 无需焊后热处理，焊件表面污物处理要求一般。

五、不需要保护气和填充材料。

- 可在非浸蚀性环境中工作（如水下焊接）；
- 在某些情况下可对搅拌头材料采用气体保护；
- 在钢、钛合金等材料的焊接过程中可采用随焊气体保护，以获得良好的接

头性能和焊缝外观；

- 材料的自焊过程，无需填充材料；
- 如需要可以采用与母材成分不同的填充材料，亦可获得良好接头。

六、焊接变形小

- 焊接过程没有凝固收缩；
- 与熔焊相比，铝合金的搅拌摩擦焊变形很小；
- 铝合金的搅拌摩擦焊接头残余应力小；
- 钢和钛合金的搅拌摩擦焊接头变形比铝合金大，但比熔焊接头变形小。

七、接头性能优异

- 接头静态性能等于、甚至超过熔焊接头；
- 搅拌摩擦焊接头性能数据分散性小；
- 与熔焊接头相比，搅拌摩擦焊接头具有优异的抗疲劳性能；
- 对某些铝合金材料，焊缝和热影响区的断裂韧性超过母材。

八、无焊接烟尘和飞溅

- 工件不熔化，所以不会从产生烟尘；
- 因此不需要吸尘装置；
- 焊接环境良好；
- 不需去除飞溅。

九、无紫外和电磁辐射

- 没有弧光，因此没有有害的紫外辐射；
- 操作者可直接观看焊接过程；
- 没有 TIG 焊或其他焊接过程所产生的高频辐射；
- 焊接过程稳定；
- 没有电击危险。

十、效率高，能耗小

- 机械化过程可保证焊接缺陷减少和低的焊后修补率；
- 搅拌摩擦焊可用于修复熔焊或其他方法的焊缝；
- 焊前准备简单；
- 环境成本低；
- 没有消耗材料；

- 维修成本低。

十一、能源消耗低

- 只在焊接区产热；
- 没有焦耳热损失；
- 没有效率低的能量转换系统；
- 焊接热效率高。

十二、搅拌摩擦焊的缺点或不足：

- 焊接速度比某些熔焊过程低；
- 被焊工件必须刚性夹紧；
- 需要背面衬板；
- 焊后留有尾孔。

十三、FSW 焊后尾孔的处理：

- 引出板；
- 摩擦塞焊或熔焊填充；
- 装饰性挡板；
- 将尾孔留在安全区域；
- 如无害，可将尾孔保留在工件上；
- 亦可采用“可回抽式”搅拌头（retractable tool）直接获得无尾孔的焊缝。

第五节 搅拌摩擦焊工艺参数

搅拌摩擦焊工艺参数主要有搅拌头的倾角、搅拌头的旋转速度、搅拌头的插入深度、插入速度、插入停留时间、焊接速度、焊接压力、回抽停留时间、搅拌头的回抽速度。

一、搅拌头倾角

搅拌摩擦焊时，搅拌头通常会向前倾斜一定角度，以便焊接时搅拌头肩部的后沿能够对焊缝施加一定的焊接顶锻力。

搅拌头的倾角设计指标一般为 ± 5 度，对于薄板（厚度为1~6毫米）搅拌头倾角采用小角度，通常为1~2度，对于中厚板（厚度大于6毫米），根据被焊接

工件的结构和焊接压力的大小，搅拌头的倾角通常采用 3~5 度。

二、搅拌头的旋转速度

搅拌头的旋转速度与焊接速度相关，但通常由被焊接材料的特性决定，对于特定的材料，搅拌头的旋转速度一般对应着一个最佳工艺窗口，在此窗口内惯性摩擦焊的旋转速度可以在一定的范围内波动，以便和焊接速度相匹配，实现高质量的焊接。

据搅拌头的旋转速度，搅拌摩擦焊可以分为冷规范、弱规范和强规范，各种铝合材料焊接规范分类如表 12-1 所示。

表 12-1 搅拌摩擦焊规范分类以及铝合金材料

规范类别	搅拌头旋转速度 (RPM)	适合铝合金材料
冷规范	< 300	2024、2214、2219、2519、2195、7005、7050、7075
弱规范	300~600	2618、6082
强规范	>600	5083、6061、6063、6005

三、搅拌头插入深度

搅拌头的插入深度一般指搅拌针插入被焊接材料的深度，但有时可以指搅拌肩的后沿低于板材表面的深度。

对接焊时，焊接深度一般等于搅拌针的长度，由于搅拌针的顶端距离底部垫板之间保持一定间隙，搅拌针插入材料表面后还可以在一定范围内波动，所以焊接深度和搅拌针的长度又有较小的差别。

考虑搅拌针的长度一般为固定值（可伸缩搅拌头除外），所以搅拌头的插入深度也可以用搅拌肩的后沿低于板材表面的深度来表示搅拌头的插入深度。对于薄板材料，此深度一般为 0.1~0.3 毫米之间，对于中厚板材料此深度一般不超过 0.5 毫米。

四、搅拌头插入速度

搅拌头的插入速度一般指搅拌针插入被焊接材料的速度，其数值主要和搅拌针的类型以及板材厚度有关。在搅拌针与被焊板材接触的瞬间，轴向力会陡增，若插入速度过快，在被焊板材尚未完全达到热塑性状态的情况下会对设备主轴造成极大损伤；若插入速度过慢，则会造成温度过热影响焊接质量。

搅拌针为锥形时，插入速度大约为 15~30mm/min；若搅拌针为柱形，插入速度数值应适度降低，大约为 5~25 mm/min。

焊接厚板材（厚度大于 12mm）时，插入速度大约在 10~20 mm/min；焊接薄板（0.8~12mm）时，插入速度大约在 15~30 mm/min。

五、插入停留时间

插入停留时间指搅拌针插入被焊接材料到达预设插入深度后搅拌头未开始横向移动的时间。

插入停留时间数值主要和被焊材料和板材厚度有关。若停留时间过短，在被焊板材尚未完全达到热塑性状态，焊缝温度场未达到平衡状态开始焊接会在焊缝出现隧道形孔洞；若停留时间过长，被焊材料过热易于发生成份偏聚，会在焊缝表面出现渣状物，同时在焊缝内部也易出现“S”型黑线，影响焊缝质量。

该数值选取原则是，板材薄停留时间短；被焊材料易于塑性流动，停留时间短；被焊材料对热敏感，过热易于发生成份偏聚，停留时间短。一般停留时间在 5~20s 之间选择。

六、焊接速度

搅拌摩擦焊时的焊接速度指搅拌头沿焊缝移动速度，或者被焊接板材相对于搅拌头的移动速度。

焊接速度的大小一般由被焊接材料的厚度来决定，另外考虑生产效率以及搅拌摩擦焊工艺柔性等其他因素，搅拌摩擦焊的焊接速度可以在一定范围内波动。表 12-2 为针对不同厚度使用的搅拌摩擦焊速度范围。

表 12-2 不同厚度材料的搅拌摩擦焊速度范围。

板材厚度 mm	焊接速度范围 mm/min	适合材料
1~3	30~2500	5083、6061、6063
3~6	30~1200	6061、6063
6~12	30~800	2219、2195
12~25	20~300	2618、2024、7075
25~50	10~80	2024、7075

七、焊接压力

搅拌摩擦焊的焊接压力指焊接时搅拌头向焊缝施加的轴向顶锻压力。

焊接压力的大小与被焊接材料的强度、刚度等物理特性以及搅拌头的形状和焊接时的搅拌头压入被焊接材料的深度等有关。但对于特定厚度的材料和搅拌头，搅拌摩擦焊的焊接压力正常焊接时一般保持恒定。所以当工件和设备变形和饶度较大时，搅拌摩擦焊设备的控制方式一般采用恒压控制。

八、回抽停留时间

回抽停留时间指搅拌头横向移动停止后，搅拌针尚未从被焊接材料抽出的停留时间。

若回抽停留时间过短，在被焊板材热塑性流动尚未完全达到平衡状态，会在焊缝“尾孔”附近出现孔洞；若停留时间过长，被焊材料过热易于发生成份偏聚，会影响焊缝质量。

九、搅拌头的回抽速度

搅拌头的回抽速度一般指搅拌针从被焊接材料抽出的速度，其数值主要和搅拌针的类型以及板材厚度有关。

若回抽速度过快，被焊板材热塑性金属会随搅拌针的回抽造成的惯性向上运动，从而造成焊缝根部的金属缺失，出现孔洞。

搅拌针为锥形时，回抽速度大约为 15~30mm/min；若搅拌针为柱形，回抽速度数值应适度降低，大约为 5~25 mm/min。

第六节 搅拌摩擦焊设备

搅拌摩擦焊设备的发展随着搅拌摩擦焊技术的需求日益更新。早期的搅拌摩擦焊设备是利用传统铣床改装而成，主要用于铝合金薄板材料的基础工艺技术开发和研究。

随着搅拌摩擦焊技术应用领域的日趋扩大,以及被焊接材料厚度的增加和被焊接零件焊缝形式的复杂多样化，普通铣床的刚性以及操作控制系统都难以满足搅拌摩擦焊技术的工艺要求，搅拌摩擦焊设备逐渐从试验设备开始向商用专机化方向发展。

1991 年英国焊接研究所利用传统机床设备进行改造，成功制造出世界上第一台搅拌摩擦焊设备；此后世界上有诸多的焊接设备制造公司如:美国的 MTS、CTC、GTC、Nove-Tech、MegaStir、FSL、TTI，英国 PTG 公司和日本日立(HITACHI)公司

等在英国焊接研究所专利许可授权的基础上，生产和制造多种形式的专业化的搅拌摩擦焊设备。2004年英国PTG公司为英国焊接研究所设计生产世界上焊接能力最大的搅拌摩擦焊设备（图12-4所示），该设备单道焊接能力可以实现厚度为100mm铝合金材料的焊接，双面焊接可以实现150mm厚度的铝合金板材焊接。

在中国，中航工业北京航空制造工程研究所于2002年4月与英国焊接研究所签署专利许可协议。2003年，北京航空制造工程研究所在中国搅拌摩擦焊中心的基础上，成立了中国首家专业化的搅拌摩擦焊技术公司—北京赛福斯特技术有限公司，该公司是中国区域唯一得到TWI专利许可，可以设计和制造搅拌摩擦焊设备的专业化公司。

迄今，北京赛福斯特技术有限公司自主开发、设计了多个系列的近60多套搅拌摩擦焊设备，如：台式搅拌摩擦焊设备、桥式搅拌摩擦焊设备、旋臂搅拌摩擦焊设备、垂直力式搅拌摩擦焊设备、卧式搅拌摩擦焊设备及重型搅拌摩擦焊设备等；实现了纵缝、环缝、平面曲线和空间曲线等多种结构形式零件的焊接；铝合金材料可焊厚度从0.3mm~80mm；并且已经在航空、航天、铁路、船舶、电力、电子等诸多工业领域得到应用。其中图12-5就是中国搅拌摩擦焊中心2007年研制的焊接长度达到15米的宽幅型材壁板搅拌摩擦焊设备，该设备是迄今中国焊接长度最大的搅拌摩擦焊设备，主要应用于宽幅铝合金船舶壁板的搅拌摩擦焊接。



图12-4 英国PTG公司制造的焊接厚度100mm的大型搅拌摩擦焊设备



图 12-5 中国搅拌摩擦焊中心 2007 年研制的宽幅型材壁板搅拌摩擦焊设备

适合于列车结构产品的搅拌摩擦焊设备较多，大多数设备的功能是依靠结构的尺寸和形状来决定的。下面主要介绍两种常用的列车结构产品的搅拌摩擦焊设备，静龙门式搅拌摩擦焊设备和动龙门式搅拌摩擦焊设备。

一、静龙门式搅拌摩擦焊设备

静龙门式搅拌摩擦焊设备主要应用于列车短小零部件的焊接，例如：驱动箱体、窗体框架、端盖和侧墙等小尺寸产品，零件的有效焊接长度不大于 3 米，宽度一般不超过 2.5 米。

如图 12-6 为中国搅拌摩擦焊中心 2004 年为常州某列车制造企业设计制造的中国首台列车结构产品搅拌摩擦焊设备，该设备主要用于长 2600mm，宽 900mm，厚度不超过 10mm 的列车驱动箱体壁板和散热器结构的搅拌摩擦焊。



图 12-6 中国搅拌摩擦焊中心研制的中国首台列车产品搅拌摩擦焊设备

图 12-7 为典型的静龙门动工作台结构搅拌摩擦焊设备结构。设备主要包括：床身、工作台、立柱、横梁、横向滑板、Z 向滑板、主轴头以及 X、Y、Z 三个方向的传动机构和控制系统。

龙门式搅拌摩擦焊设备立柱和床身的联接采用侧固式联接，此种方式可以有效减小床身尺寸，简化床身铸造结构；另外，从立柱的受力特点分析，侧固式联接能够承受更大的负载。

床身采用铸件，并进行二次实效处理，以消除铸造和机械加工过程中产生的应力，保证床身精度在长时间内保持不变，保障焊接质量的稳定。工作台同样采用铸件，并进行二次实效处理，以消除应力和变形；工作台的铸造结构采用纵横筋交错，在获得良好刚度的前提下，尽量降低工作台的重量。立柱、横梁、横向滑板、Z向滑板均采用焊接件，并进行焊后热处理，以消除焊接过程中产生的应力，保持一定的精度。结构设计中设置筋板，以加强焊接件刚性，承受较大的焊接力。设备主轴头具有倾角调整机构：为了满足搅拌摩擦焊接工艺的要求，主轴头的旋转中心线在 X、Z 平面内可以在 $\pm 5^\circ$ 范围内调整。X、Y、Z 三个方向的传动机构基本相同，均采用“交流伺服电机+减速器+滚珠丝杠+滚动导轨”的传动机构。

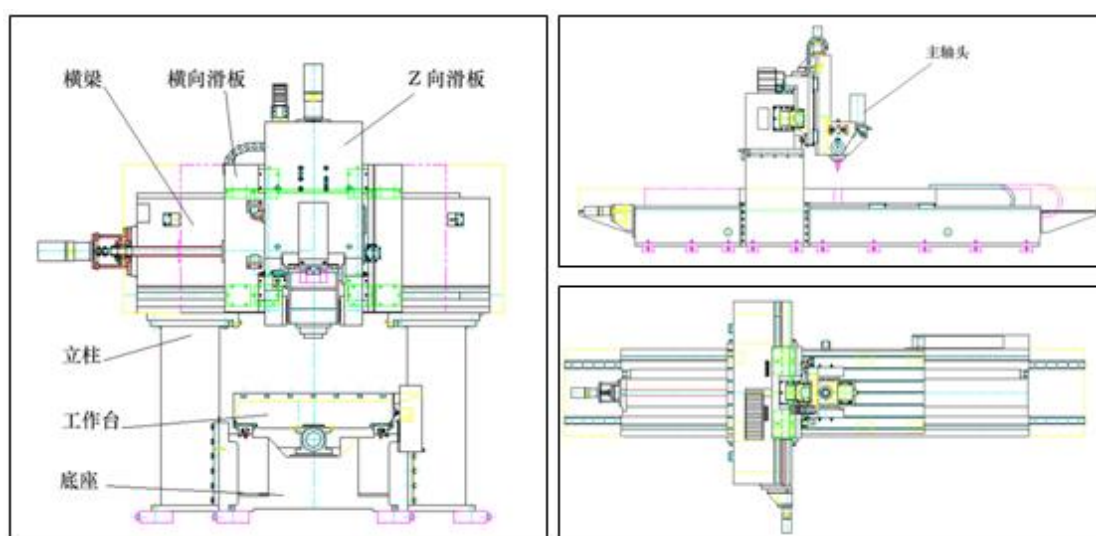


图 12-7 典型龙门式搅拌摩擦焊设备结构图

2010 年，中国搅拌摩擦焊中心为长春客车厂研制了中国列车行业第二台静龙门式搅拌摩擦焊设备（如图 12-8 所示），该设备为工业级别的焊接设备，有效焊接长度达到 3500mm，焊接厚度达 25mm，主要用于列车车钩座零件的搅拌摩擦焊。



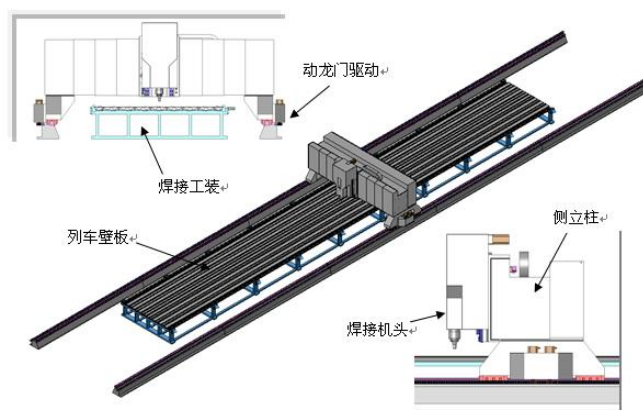
图 12-8 中国搅拌摩擦焊中心为长春客车厂研制的搅拌摩擦焊设备

二、动龙门式搅拌摩擦焊设备

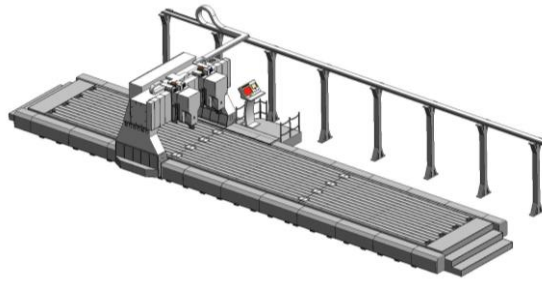
动龙门式搅拌摩擦焊设备，主体结构包括：基座床身、工作台、动立柱、横梁、主轴头等部件。作为龙门式搅拌摩擦焊设备的一种，区别于其他龙门式焊接设备的主要特征在于：焊接立柱和龙门机头等部件装配成为一体，沿着床身两侧的导轨运动，该类型搅拌摩擦焊设备主要用于有效焊接长度尺寸大于 6000mm 的零件的纵缝焊接。

动龙门式搅拌摩擦焊设备一般用于飞机、舰船和列车车体的大型壁板类零件的焊接，但是如果零件的宽度尺寸较大，就要求动龙门的立柱间的龙门跨距增大，当中间宽度大于 2500mm 时，焊接设备的龙门两侧需要采用两电机同步驱动，才能保证焊接过程运动平稳和顺利进行。

如图 12-9 (a、b) 为两种中国搅拌摩擦焊中心针对不同列车壁板结构设计的典型的动龙门式搅拌摩擦焊设备。其中图 9a 为中国搅拌摩擦焊中心 2010 年研制的大型数控单机头动龙门式搅拌摩擦焊设备。该设备主要针对宽度 3500mm、长度 25000mm 的高速列车车体壁板的搅拌摩擦焊设计制造，设备有效焊接长度达到 28 米，可以实现铝合金车体的弧形顶板、侧板和地板的中空型材焊接。图 9b 为中国搅拌摩擦焊中心与英国 PTG 公司合作联合研制的中国最大的大型数控双机头动龙门式搅拌摩擦焊设备。该设备的有效焊接长度达到 80000mm，可以实现高速列车车体的双工位高效焊接，设计焊接速度可以达到每小时 6000mm。



(a) 大型数控单机头动龙门式搅拌摩擦焊设备



(b) 有效焊接长度为 80 米的大型数控双机头动龙门式搅拌摩擦焊设备

图 12—9 中国搅拌摩擦焊中心研制的动龙门搅拌摩擦焊设备

为了提高列车车体中空型材壁板产品的生产效率，大多数车体搅拌摩擦焊设备为多机头动龙门搅拌摩擦焊设备，有些设备还具有多机头双面同时焊接功能，但是多机头搅拌摩擦焊设备控制系统复杂，机头具有焊缝测距、自动跟踪和柔性工艺调节功能。下图 12—10 为型材壁板的多机头搅拌摩擦焊。

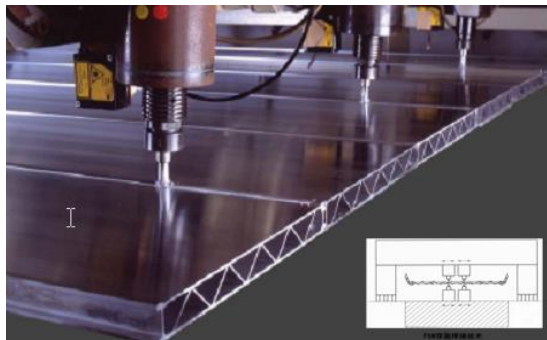


图 12—10 列车型材壁板多机头搅拌摩擦焊

第七节 搅拌摩擦焊在列车制造领域应用

作为一种革命性焊接技术，搅拌摩擦焊具有接头强度损失小、缺陷率低、加工过程控制简单、绿色环保等优点使其在航空、航天，轨道交通、船舶、汽车制造、建筑等工业制造领域获得了广泛的应用。在轨道交通行业，随着列车速度的不断提高以及轻量化发展要求，对列车车体结构和焊接接头强度及其安全性的要求也越来越高。尤其是高速和超高速（500km/小时）列车，用中空铝合金挤压型材和熔化焊（MIG）相结合的制造方式，虽然增加了结构集成合减轻了整车重量，但是熔化焊接头的强度低、冲击韧性差，成为了制约高速轨道车辆安全性的主导因素。所以，基于搅拌摩擦焊的接头强度和疲劳性能皆优于熔化焊接头，并且变形小，不需要焊后矫形，生产效率高，焊接速度可以达到 2000mm/min，节约成

本，焊接过程不需要焊丝和保护气等优越性，所以目前在海外高速列车的制造领域，搅拌摩擦焊已成为轨道车辆车体制造主导焊接工艺技术。

一、列车铝合金材料搅拌摩擦焊性能

搅拌摩擦焊可以焊接所有热处理状态下的铝合金材料，并且不论是板材和型材，皆可以获得优异的固相焊接接头，在保持原始铝合金材料性能的同时，可以实现高质量连接。下面分别介绍轨道列车常用铝合金材料的搅拌摩擦焊性能。

1、6061-T6 铝合金

6061-T6 铝合金是 Al-Mg-Si 系可热处理强化铝合金，其化学成分如表 12-3 所示。在高温下 6061-T6 铝合金具有良好的塑性，虽然强度不高，但具有优良的耐蚀性，没有晶间腐蚀倾向，焊接性能良好，常用于制造中等载荷零件、形状复杂锻件和模锻件。

表 12-3 6061-T6 铝合金的化学成分 (wt.%)

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Al
1.06	0.53	0.38	0.33	0.043	0.17	0.033	Bal

搅拌摩擦焊工具的轴肩直径为 15mm，搅拌针直径 3.5mm，长度 5.75mm，带有螺纹结构。采用优选的焊接参数进行搅拌摩擦焊，旋转速度 1400rpm，焊接速度 400mm/min，焊接倾角为 2.5°。焊前对接口表面进行机械打磨清理，并用酒精溶液擦拭去处油污。

6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头成形良好，图 12-11 所示为典型的焊缝横截面宏观形貌。对焊缝进行 X 光检测未发现缺陷。

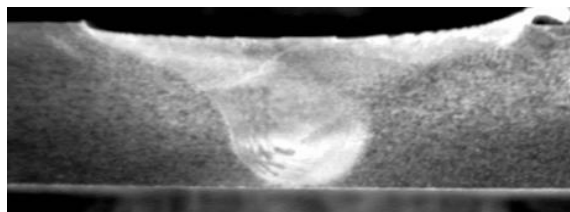


图 12-11 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头横截面宏观形貌

图 12-12 分别为焊缝接头不同部位金相组织照片。图 12 (a) 为母材原始组织，为典型的轧制形态，晶粒尺寸较大，且大小不均匀，形状不规则。图 12 (b) 为焊核区，与母材相

比，焊核区的组织发生了显著变化，晶粒形状由变成等轴状，晶粒得到显著细化。图 12 (c) 是紧邻焊核区的热机影响区的组织。可以看出，热机影响区晶粒发生明显的塑性变形。热机械影响区靠近搅拌头边缘外侧，该区搅拌头的搅拌作用不充分，不能使呈轧制状的母材组织完全破碎，而是在搅拌头旋转力和进给力的双重作用下，发生热剪切，相对于母材发生较大的晶粒变形。但是该区域温度较焊核区低，没有达到再结晶温度，所以不能发生类似焊核区的再结晶过程，高度塑性变形的晶粒形态被保留下来。图 12 (d) 是热影响区组织。热影响区未受到搅拌头的机械搅拌作用，其晶粒形态未发生改变。

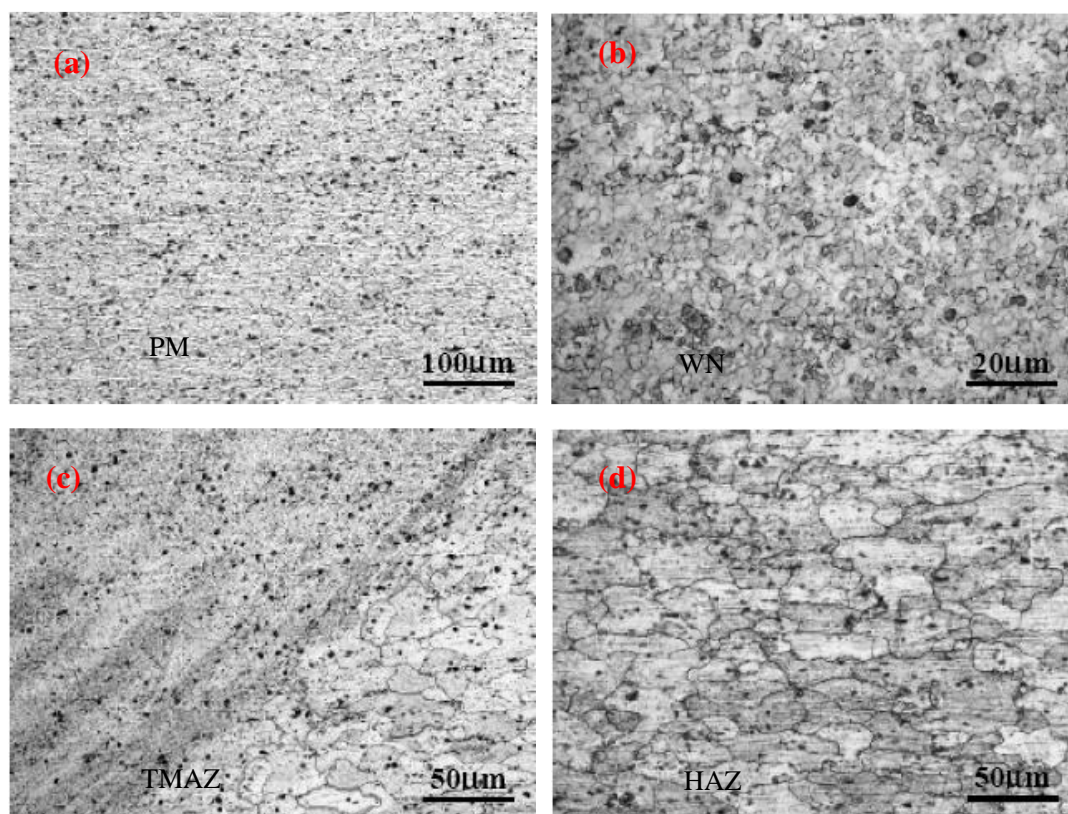


图 12—12 6061-T6 搅拌摩擦焊接头不同位置金相图

6061-T6 搅拌摩擦焊接头硬度是焊接接头力学性能及其分布和变化的直接反映。如图 12—13 可以看出，焊态下焊核区的硬度从母材的 HV120-140 降低到 HV70 左右。随着离开焊缝中心距离的增加，硬度逐渐恢复到母材硬度。随着时效时间的延长，焊缝硬度整体回升，其中尤以焊核区的硬度回升最为明显，经过 160°C/12h 的人工时效后，焊核区硬度接近 HV100，TMAZ 和 HAZ 硬度达到 HV95 左右。焊后人工时效处理使焊核区的硬度比自然时效大约高 HV10。

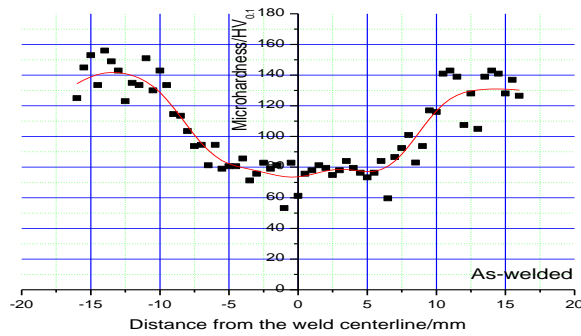


图 12—13 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头硬度分布

图 12—14 所示为时效对 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响。可以看出，原始接头的抗拉强度为 215MPa，仅为母材的 67%。随着时间的延长，接头抗拉强度逐渐提高。自然时效第 15 天后，接头抗拉强度提高到 224MPa，达到母材的 70%。自然时效第 30 天后，接头抗拉强度提高到 230MPa，达到母材的 72%。随着自然时效时间的延长，抗拉强度不断增长，但是增长速度逐渐减缓。30 天时已基本达到稳定状态。而人工时效可使接头抗拉强度大大提高到 270MPa，达到了母材强度的 84%。延伸率随时效时间的变化不明显，保持在 6%左右，经人工时效后降低为 5.24%。

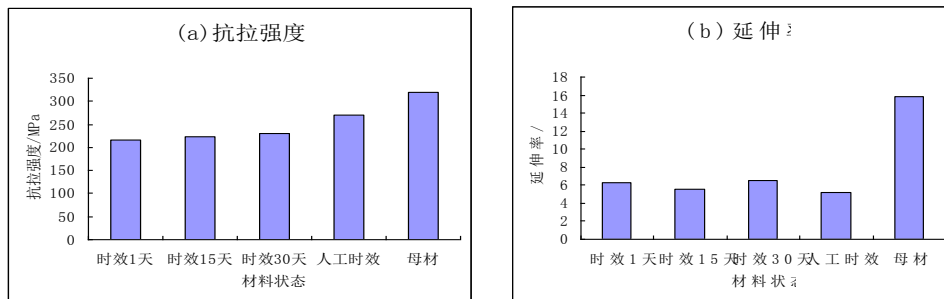


图 12—14 不同时效状态下 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能

2、6063-T5 铝合金

6063-T5 铝合金属于可热处理强化铝合金，合金中的主要强化相是 Mg_2Si 和 $AlSiFe$ 。退火状态下，6063 铝合金挤压型材的抗拉强度为 100~120MPa；淬火及自然时效处理后，可提高到 180~200MPa。6063 铝合金的主要化学成分如表 12—4 所示。

表 12—4 6063 铝合金的主要化学成分 (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
0.4	0.25	0.10	0.15	0.6	其余

板材厚度为 8mm，采用平板对接。焊接选用带螺纹的搅拌头，搅拌针长度为 7.6mm，轴肩直径为 24mm。焊前将焊接接头部分进行表面去除氧化皮和油污清洗处理。图 12—15 所示为不同焊接参数下搅拌摩擦焊接头的性能。从性能测试结果显示 6063-T5 搅拌摩擦焊接头强度系数可以达到母材的 90% 以上。

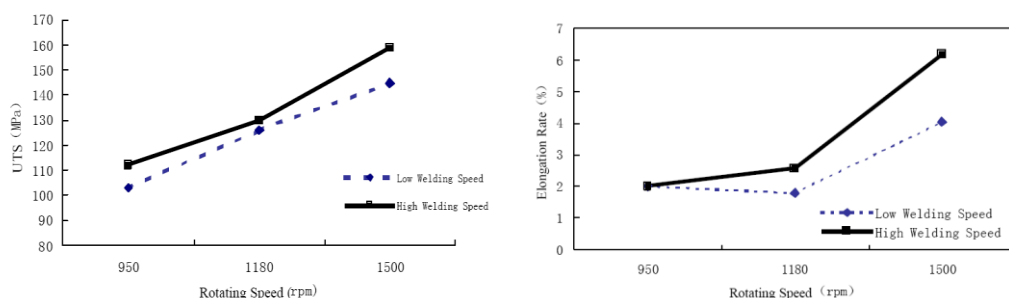


图 12—15 不同焊接参数下 6063-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能

3、6N01-T5 铝合金

6N01-T5 铝合金为日系铝合金中挤压型材常用的铝合金，相当于国内 6061 铝合金。这种铝合金在列车及轨道交通制造领域较常用。

6N01-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头与 MIG 熔化焊接头的拉伸强度对比如图 12—16 所示。疲劳性能对比如图 12—17 所示。6N01-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头性能数据说明利用搅拌摩擦焊代替 MIG 熔化焊没有任何问题。

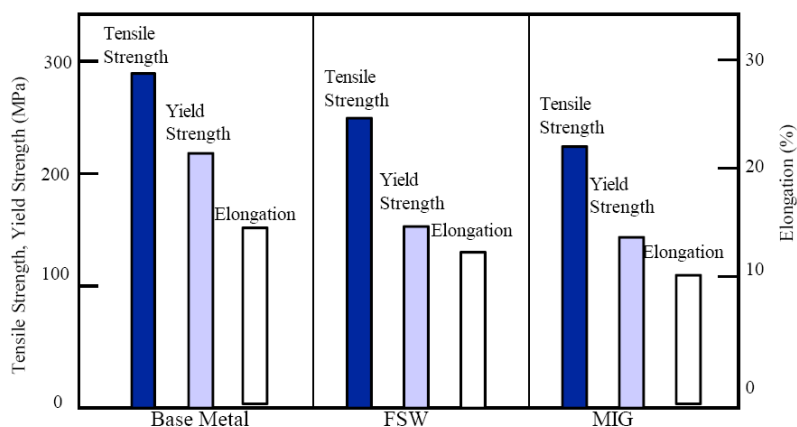


图 12—16 6N01-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能对比

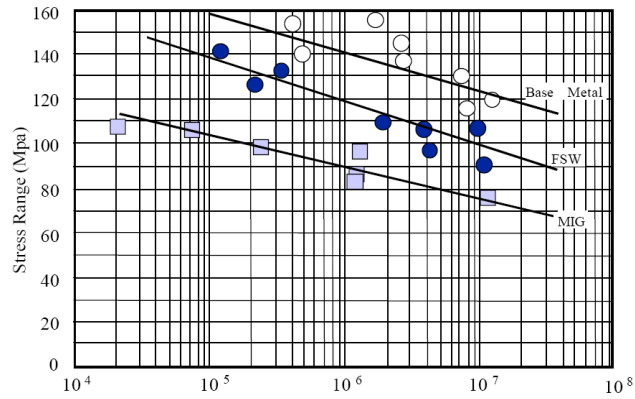


图 12—17 6N01-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能对比

4、7N01-T4/T5 铝合金

7N01 铝合金为具有中等强度的 Al-Zn-Mg 系合金，经过 T4/T5 处理（自然时效强化）后可以增加材料强度。凭借良好成形性能和焊接性，7N01 铝合金被广泛用于轨道列车领域。

材料厚度为 15mm，焊接参数为转速 500rpm，焊速 200mm/min，焊接倾角 2.5°。图 12—18 为 7N01-T5 和 7N01-T4 不同热处理状态铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝金相组织图

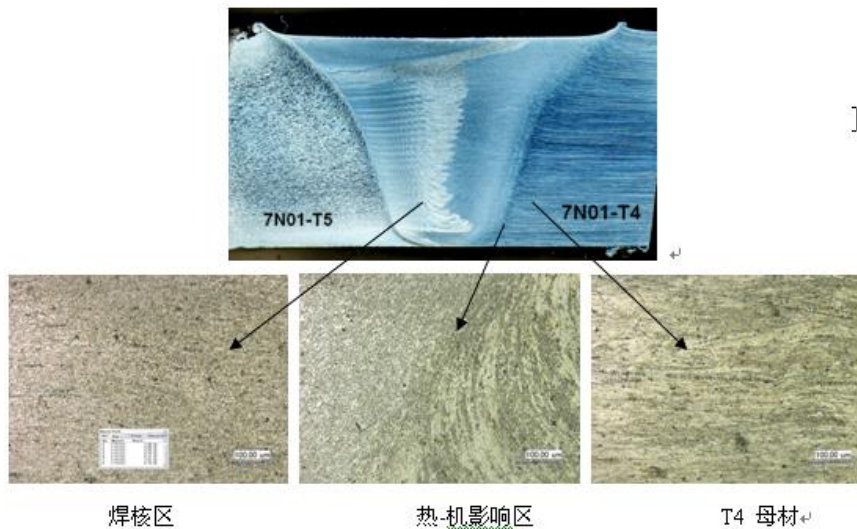


图 12—18 7N01-T5/T4 铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝金相组织图

针对 T4 状态，7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头拉伸性能 0.2% 强度为 347MPa，绝对拉伸强度可以达到 391MPa，为母材强度的 92%。T5 状态的 7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头 0.2% 强度为 306MPa，绝对拉伸强度可以达到 439MPa，为母材强度的 82%。延伸率可以达到母材的 30~45%。

针对搅拌摩擦焊接头不同部位进行夏比冲击韧性试验，试验结果表明搅拌摩擦焊接头各

方向冲击韧性值均优于母材，是母材的 150%~250%左右；但是搅拌摩擦焊接头冲击韧性值存在一定的方向性：平行焊缝方向是垂直焊缝方向韧性值的 110%~120%左右。搅拌摩擦焊接头不同位置冲击韧性值存在差异：后退侧 > 焊缝中心 > 前进侧。后退侧是焊缝中心 120%，是前进侧的 150%左右。

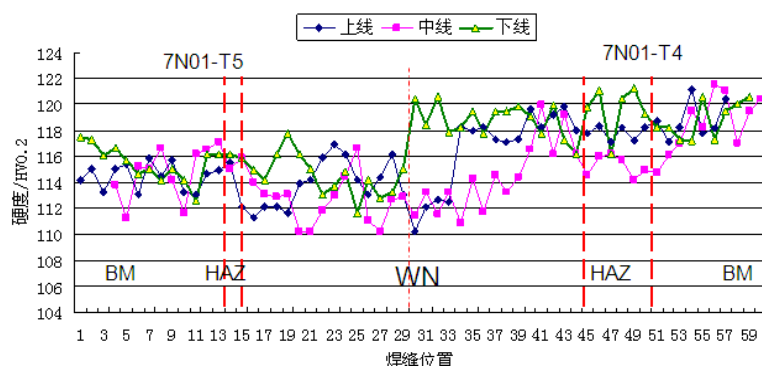


图 12—19 7N01-T5/T4 铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝硬度分布

针对如图 12—18 所示的厚度 15mm 的 7N01-T5/T4 接头进行接头的硬度分布测试，测试位置分上、中、下三个位置。测试结果如图 12—19 所示。以焊缝中心为界，焊缝两侧接头材料的硬度不同；后退侧的 7N01-T4 比前进侧 7N01-T5 硬度高 10%左右；焊缝区硬度分布均匀，硬度值基本与相邻母材接近；但是在前进侧焊缝上中下区域硬度基本相同，在后退侧，焊缝上下区域硬度略高于中间区域硬度。

二、列车型材结构搅拌摩擦焊接头设计

现代高速列车的车体结构设计已经形成以中空铝合金结构和搅拌摩擦焊接为设计主线的模块化设计方法，如下图 12—20 所示为高速列车中空铝合金型材结构和搅拌摩擦焊示意图。

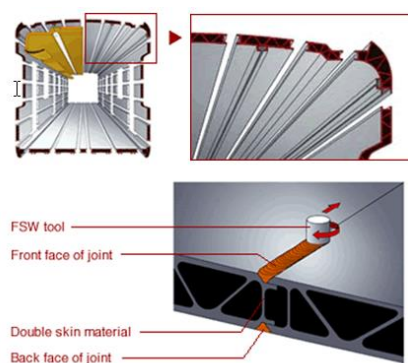


图 12—20 中空铝合金结构车体搅拌摩擦焊制造示意

传统的列车车体铝合金型材结构的焊接为熔化极氩弧焊（MIG）为主，如图 12-21b 所示，熔焊接头设计要考虑材料熔化后焊缝的成型，所以接头下部会有成型垫板类结构设计，另外考虑到焊接深度有限，所以接头必须设计一定的坡口，便于熔化添丝焊接。但是搅拌摩擦焊过程没有材料的熔化，并且焊缝的厚度由搅拌摩擦焊工具的长度决定，所以接头设计不需要开坡口，另外考虑到焊接过程较大的焊接锻压力，所以焊缝的底部必须设计有效的刚性支撑，如图 12-21a 所示。

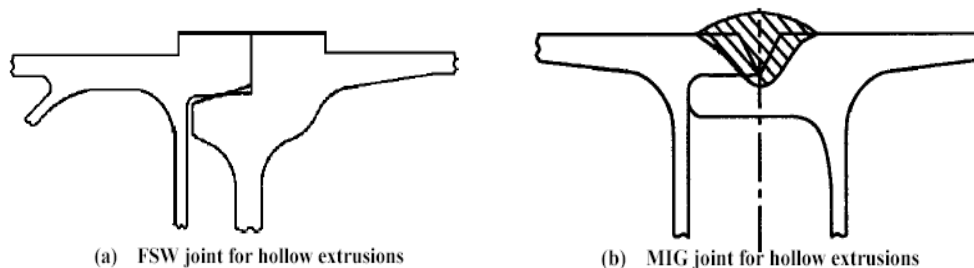


图 12-21 列车结构搅拌摩擦焊接头和熔化焊接头设计对比

图 12-22 所示为目前高速列车车体常用的双面中空铝合金型材熔化焊结构和搅拌摩擦焊的结构对比。一个显著的特点是搅拌摩擦焊接头的中间部位必须有刚性支撑结构设计。

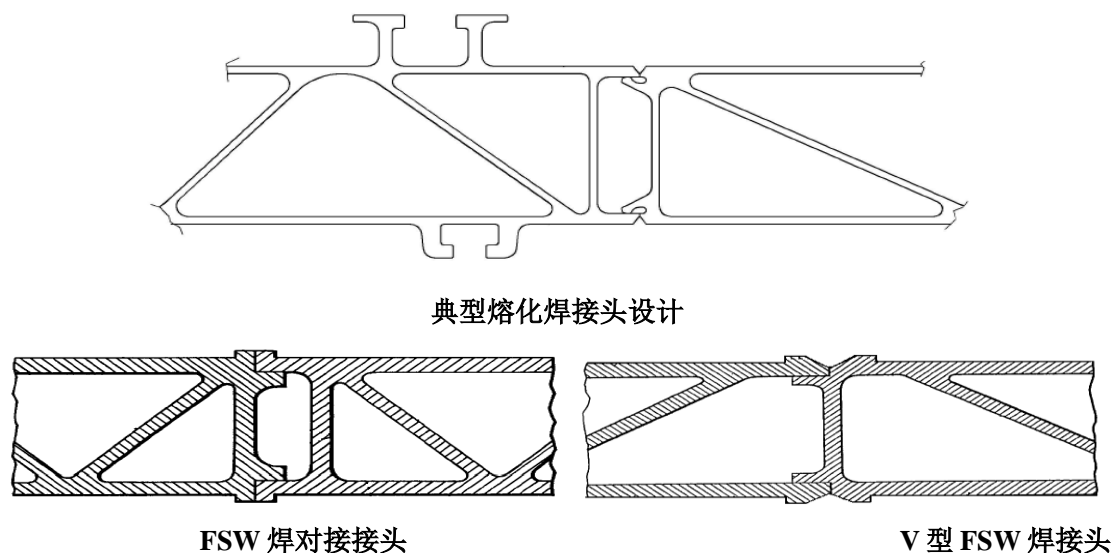


图 12-22 列车结构搅拌摩擦焊接头和熔化焊接头设计

针对搅拌摩擦焊特点，一般情况下，列车中空型材壁板搅拌摩擦焊需要双面焊接完成。如图 12-23 所示，首先要完成零件单面的焊接，清理焊缝，然后翻转整个壁板零件，再进行另外一面的焊接。但是由于大型壁板零件的翻转有可能引起结构的变形和生产效率的降低，如图 12-24 所示，利用中间盖板设计，可以在增加一条焊缝的条件下，不需要零件翻

转就可以实现中空型材壁板零件的搅拌摩擦焊。

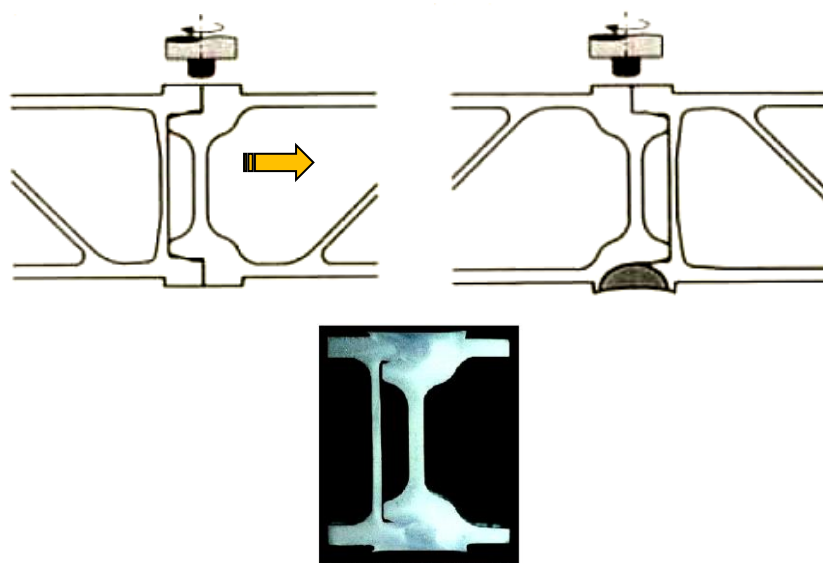


图 12-23 列车中空型材结构双面双道搅拌摩擦焊

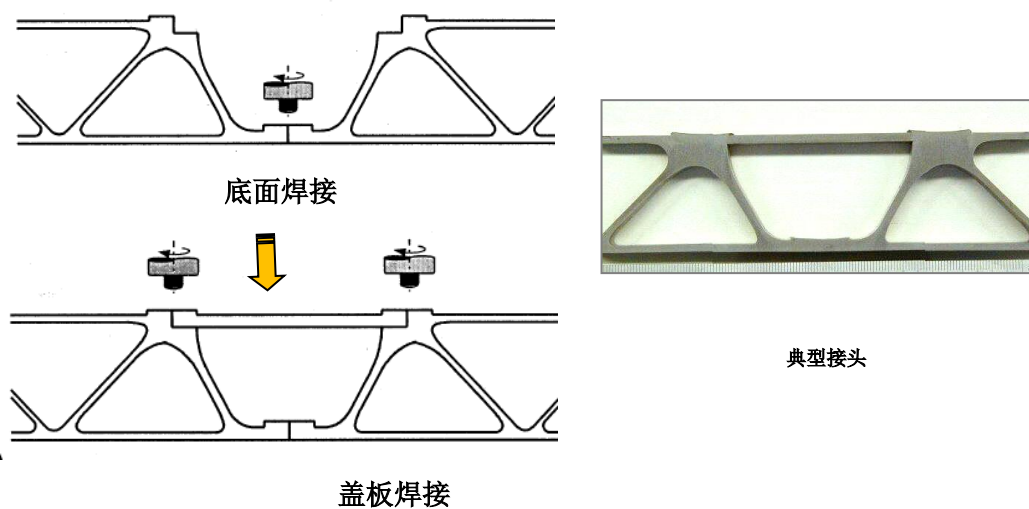


图 12-24 列车中空型材结构单面多道搅拌摩擦焊

三、搅拌摩擦焊在列车制造中的典型应用

迄今，搅拌摩擦焊已经在国内外地铁列车、轻轨列车、高速列车等产品中得到普遍应用。下面图 12-25 到图 12-32 重点介绍几种搅拌摩擦焊在中国列车结构产品中得典型应用。



图 12-25 轨道车辆电源型材箱体搅拌摩擦焊

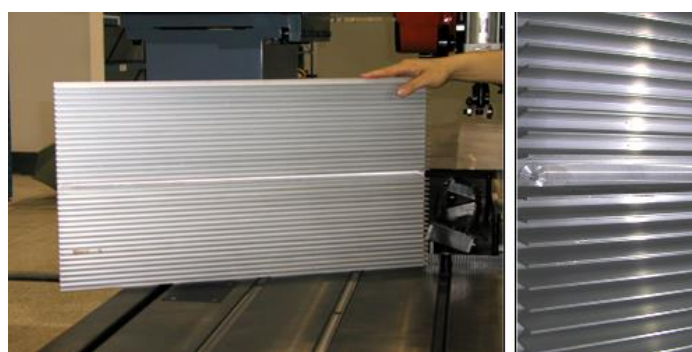


图 12-26 地铁车辆驱动箱体散热器搅拌摩擦焊



图 12-27 地铁车辆中空散热器结构搅拌摩擦焊

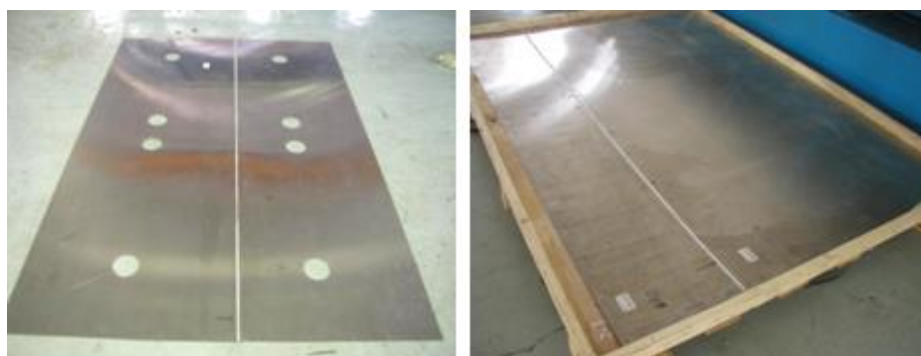


图 12-28 2mm 厚 5754 铝合金列车壁板搅拌摩擦焊



图 12-29 中空型材地铁列车侧墙壁板搅拌摩擦焊接



图 12-30 高速列车枕梁结构产品搅拌摩擦焊接



图 12-31 高速列车窗体框架产品搅拌摩擦焊接



图 12-32 高速列车车钩座产品搅拌摩擦焊接