

搅拌摩擦焊网

FSW.NET.CN

- [HOME](#)
- [行业新闻](#)
- [技术动态](#)
- [国际标准](#)
- [国内标准](#)
- [国外标准](#)
- [索引标签](#)
- [在线留言](#)
- [关于我们](#)

[« 上一篇](#)

2019-9-18 17:57:20

搅拌摩擦焊技术(网络文摘)

目录

- 一 搅拌摩擦焊的基本原理
- 二 搅拌摩擦焊工艺
- 三 FSW的温度分布和焊缝金属组织
- 四 FSW焊接接头的力学性能
- 五 搅拌摩擦焊的应用

前言

近年来,为了保护环境、节约能源,人们强烈希望汽车、飞机、机车车辆、船舶等运输机械轻量化。为此,积极开发、研制适用于这些运输机械的轻金属材料,例如铝及其铝合金。

铝及其铝合金材料由于重量轻、抗腐蚀、易成形等优点;随着新型硬铝、超硬铝等材料的出现,使得这类材料的性能不断提高,因而在航空、航天、高速列车、高速舰船、汽车等工业制造领域得到了越来越广泛的应用。除了运输机械外,土木建筑、桥梁等领域也引入了铝及其铝合金。

这些结构的安装连接主要以焊接为主要连接方式。在铝及其铝合金的焊接中,存在的主要问题之一是由于它的膨胀系数大而在焊接时产生较大的变形。为了防止变形,在施工现场,必须采用胎卡具固定,和由培训过的熟练工人操作。因为铝及其铝合金容易氧化,表面存在一层致密、坚固难熔的氧化膜,所以焊前要求对其表面进行去膜处理;焊接时,要用氩等惰性气体进行保护。铝及铝合金焊接时,易产生气孔、热裂纹等缺陷,也是焊接时必须注意的问题。对于热处理型铝合金来说,必须避免在焊接时热影响区产生软化,强度降低的问题。为了解决铝及铝合金熔化焊时出现的以上问题,开发研制出一种新的固相焊接方法,即搅拌摩擦焊。

搅拌摩擦焊的英文是Friction Stir Welding 缩写为FSW，于1991年由英国焊接研究所（TWI）发明的。它是利用间接摩擦热实现板材的连接。这种方法打破了原来摩擦焊只限于圆形断面材料焊接的概念，是上个世纪末本世纪初最新的铝及其合金的焊接技术。自从搅拌摩擦焊发明以来，搅拌摩擦焊技术在世界各国突然兴起，得到广泛的关注和深入的研究，并向生产适用化发展，特别是针对铝合金材料，世界范围的研究机构、学校以及大公司都对此进行了深入细致的研究和应用开发，并且在诸多制造工业领域得到了成功应用。

本文详细介绍了搅拌摩擦焊原理、特点，并且针对铝及其合金的搅拌摩擦焊的工艺及应用作了详细的阐述。



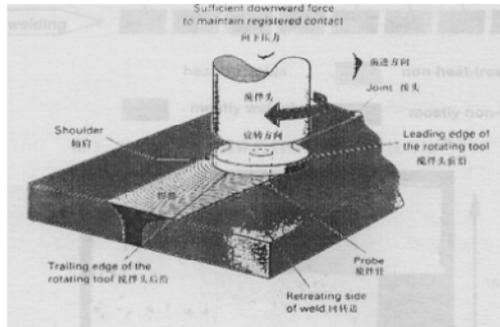
GB-FSW1 型五轴四联的计算机数控搅拌摩擦焊机工业造型



一、搅拌摩擦焊的原理

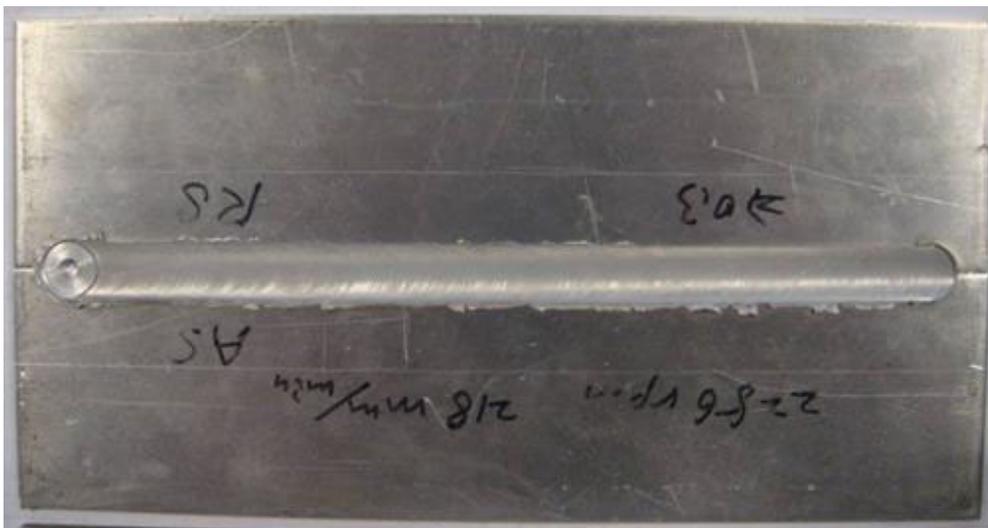
搅拌摩擦焊的原理如图2-1所示。

它是利用带有特殊形状的硬质搅拌指棒的搅拌头旋转着插入被焊接头，与被焊金属摩擦生热，通过搅拌摩擦，同时结合搅拌头对焊缝金属的挤压，使接头金属处于塑性状态，搅拌指棒边旋转边沿着焊接方向向前移动，在热-机联合作用下形成致密的金属间结合，实现材料的连接。



搅拌头由特殊形状的搅拌指棒和轴肩组成。搅拌指棒的长度等于板厚，但一般情况下，它的长度比母材的厚度稍短一些；而轴肩的直径大于搅拌指棒的直径。







搅拌头的轴肩的作用：

- 一是可以保证搅拌指棒插入的深度；
- 二是轴肩与被焊材料的表面紧密接触，防止处于塑性状态的母材表面的金属排出而造成的损失和氧化；
- 三是与母材表面摩擦生热，提供部分焊接所需要的搅拌摩擦热。

FSW接头焊缝的最大宽度决定于摩擦搅拌棒肩部直径大小。搅拌摩擦焊要求特殊形状的搅拌指棒，一般要用具有良好耐高温力学和物理特性的抗磨损材料制造。对于铝及其合金等轻型合金材料，在焊接过程中搅拌头的磨损程度很小。焊接过程中，因为搅拌头对焊接区域的材料具有向下挤压和侧向挤压的倾向，所以被焊工件要夹装背垫和夹紧固定，以便承受搅拌头施加的轴向力、纵向力（沿着焊接方向）以及侧向力。通过研究，在对接接头中，搅拌摩擦焊对焊接接头形状、清洁度以及接头装配间隙均有较大的工艺裕度，如搅拌摩擦焊对接焊时在接头间隙为厚度10%的条件下，同样可以得到优良的焊接接头。

搅拌摩擦焊的特点

搅拌摩擦焊由于它是一种固相连接，所以与其他焊接方法相比具有很多的优越性。

1.搅拌摩擦焊的优点

(1) 搅拌摩擦焊是一种高效、节能的连接方法 对于厚度为12.5mm的6XXX系列的铝合金材料的搅拌摩擦焊，可单道焊双面成型，总功率输入约为3kw；焊接过程不需要填充焊丝和惰性气体保护；焊前不需要开坡口和对材料表面作特殊的处理。

(2) 焊接过程中母材不熔化 有利于实现全位置焊接以及高速连接。

(3) 适用于热敏感性很强及不同制造状态材料的焊接 熔焊不能连接的热敏感性强的硬铝、超硬铝等材料可以用搅拌摩擦焊得到可靠连接；可以提高热处理铝合金的接头强度；焊接时不产生气孔、裂纹等缺陷；可以防止铝基复合材料的合金和强化相的析出或溶解；可以实现铸造 / 锻压以及铸造 / 轧制等不同状态材料的焊接。

(4) 接头无变形或变形很小 由于焊接变形很小，可以实现精密铝合金零部件的焊接。

(5) 焊缝组织晶粒细化接头力学性能优良 焊接时焊缝金属产生塑性流动，接头不会产生柱状晶等组织，而且可以使晶粒细化，焊接接头的力学性能优良,特别是抗疲劳性能。

(6) 易于实现机械化、自动化 可以实现焊接过程的精确控制，以及焊接规范参数的数字化输入、控制和纪录。

(7) 搅拌摩擦焊是一种安全的焊接方法 与熔焊方法相比，搅拌摩擦焊过程没有飞溅、烟尘、以及弧光的红外线或紫外线等有害辐射对人体的危害等。

2.存在的问题

随着搅拌摩擦焊技术的研究和发展，搅拌摩擦焊在应用领域的限制得到很好解决，但是受它本身特点限制，搅拌摩擦焊仍存在以下问题：

(1) 焊缝无增高 在接头设计时要特别注意这一特征。焊接角接接头受到限制，接头形式必须特殊设计。

(2) 需要对焊缝施加大的压力，限制了搅拌摩擦焊技术在机器人等设备上的应用。

(3) 焊接结束由于搅拌头的回抽在焊缝中往往残留搅拌指棒的孔，所以必要时，焊接工艺上需要添加“引焊板或退出板”。

(4) 被焊零件需要由一定的结构刚性或被牢固固定来实现焊接；在焊缝背面必须加一耐摩擦力的垫板。

(5) 要求对接头的错边量及间隙大小必需严格控制

(6) 目前只限于对轻金属及其合金的焊接。

总之，与熔焊相比，它是一种高质量、高可靠性、高效率、低成本的绿色连接技术。

目前，搅拌摩擦焊已经可以焊接全部牌号的铝及其合金，如1000系列（纯铝）、2000系列（AL-Cu合金）、3000系列（AL-Mn合金）、4000系列（AL-Si合金）、5000系列（AL-Mg合金）、6000系列（AL-Mg-Si合金）、7000系列（AL-Zn合金）、8000系列（其它铝合金）。也已实现铝基复合材料以及铸材和锻压板材的铝合金搅拌摩擦焊。铝合金搅拌摩擦焊的可焊厚度从初期的1.2~12.5mm，现已在工业生产中应用搅拌摩擦焊成功地焊接了厚度为12.5~25mm铝合金。并且已实现单面焊的厚度达50mm、双面焊可以焊接70 mm的铝合金。

搅拌摩擦焊也适用于钛合金、镁合金、铜合金、铁合金等材料的连接。

针对不同的零部件和应用对象，开发研制了系列的搅拌摩擦焊专用设备，并且在航空、航天、船舶、汽车等制造领域得到应用。设备主要由机械部分、主轴驱动系统、液压系统、高精度焊接平台及焊接夹具、控制系统、位置传感系统等组成。

影响FSW焊接的因素

影响FSW焊接过程稳定性和焊接质量的因素，主要有搅拌头的形状、搅拌头的位置、搅拌头的转速、焊接速度、接头精度以及材料拘束等。表2-1列出了影响FSW焊的主要工艺因素和它们的内容要点

表2-1 搅拌摩擦焊的工艺因素

工艺因素	内 容
搅拌头的形状	搅拌指棒的长度：约等于母材厚度 搅拌指棒的形状：要适合于不同的材料、板厚 搅拌头的角度：一定的前进角
搅拌头的位置	搅拌指棒插入的深度：约与板厚相等 搅拌头中心线的位置：正好处于接头中心线 搅拌头肩部：接触程度
搅拌头的转速	根据被焊材料厚度，搅拌头的形状， 电动机的输出功率，机械刚度， 转速一般为几百-几千转/分
焊接速度	根据确定的搅拌头的转速选择 焊接速度一般由几 cm/min 和 1-2m/ min，约与电弧焊相等
接头精度	接头间隙，推荐0mm间隙 材料的挤压加工精度、接头的加工精度、是防止产生缺陷的重要因素
材料拘束	为了保证接头精度，设计专用的夹具是非常重要的。

1.搅拌指棒的材质及形状

(1)搅拌指棒的材质

由于搅拌指棒要产生并承受摩擦热，高温剪切强度是搅拌指棒根部必须考虑的一个很重要的因素。目前英国焊接研究所采用工具钢来制作搅拌指棒，例如TWI的Nicholas采用工具钢AISI-H13。日本采用了SUS440马氏体不锈钢以及工具钢SKD61作为搅拌指棒的材料。从搅拌指棒的高温强度出发，目前搅拌摩擦焊只能焊接铝、镁及其合金和铜合金等。随着搅拌指棒的材质不断开发，可以预见会有更多的材料适用于搅拌摩擦焊焊接。

(2) 搅拌指棒的形状

搅拌指棒的形状为单纯圆柱形或加工成稍带锥形的圆柱形；也有得把单纯圆柱形加工成螺纹牙型或浅牙形，而端部形状一般为半球形。

TWI采用FSW焊接75m特大厚板时，采用的搅拌头表面如图2-2 (a) 所示，切削成螺纹牙型的螺旋沟，目的是增加对被焊金属的搅拌力。图2-2 (b) 所示为较为复杂形状的搅拌指棒。

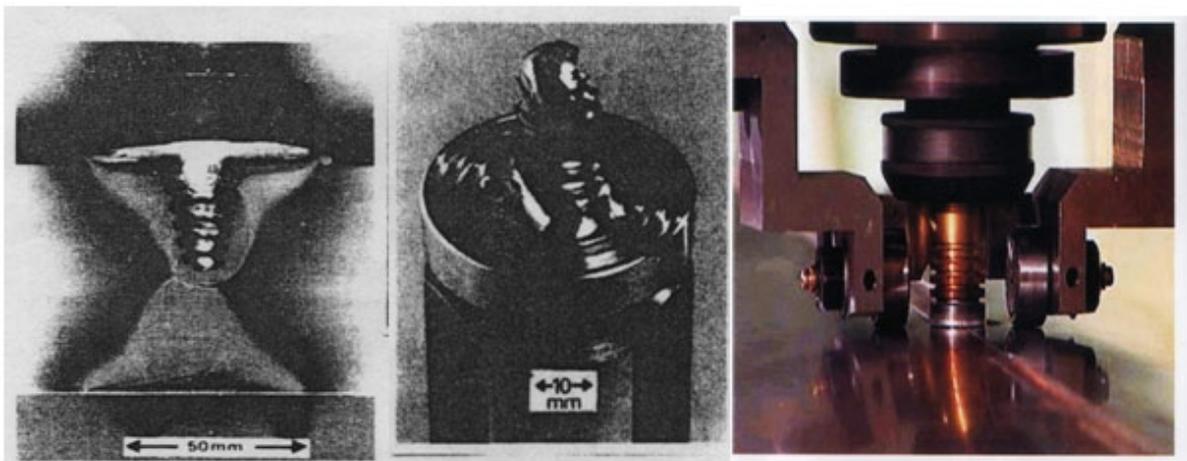


图2-2 新的搅拌头

2.搅拌头肩部的形状和材质

如图2-3所示，搅拌头的肩部不是平面状，而是稍带凹面的形状，凹的程度应通过实践来确定。这种肩部形状在旋转摩擦时，会促进其正下方母材表面金属的塑性流动，增强混合搅拌效果。

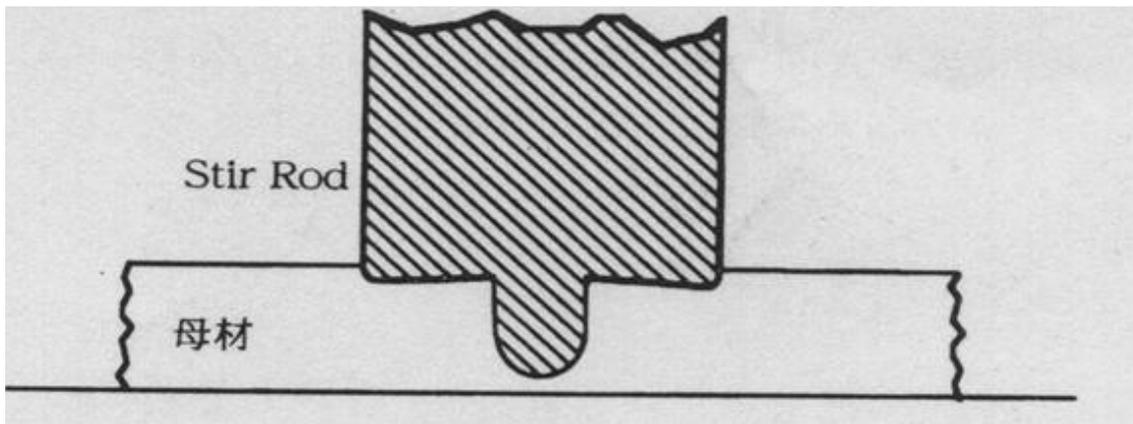


图2-3 搅拌头的肩部形状

因为搅拌头的肩部是产热之处，可采用热传导率低的二氧化锆作为肩部材料；而有的搅拌头为整体钢制。它与采用通常一体型全钢制搅拌头相比，向搅拌头传导的热减少，即减少了热损失；而且在相同条件下也不会增加FSW热影响区的宽度。

在FSW高速焊时，肩部的发热量增加了30-70%。只有当肩部材质为二氧化锆时，向搅拌头侧的热传导会得到有效的抑制，该搅拌头才适用于高速FSW焊接。

3. 搅拌头的寿命

搅拌头的寿命主要是以搅拌指棒根部的损伤为衡量标准。由于搅拌指棒根部易发生高温疲劳或剪切破坏，而造成损伤。

初步试验结果表明，搅拌头的材质、形状、被焊工件的板厚各异以及焊接工艺参数不同，其寿命会有差别。在实际施焊过程中，以达到规定的焊缝长度或达到规定的使用时间为其寿命。例如焊接板厚6mm的6082-T6铝合金时，焊接长度为800m。

当搅拌头损坏后，一定要把残留在焊缝内的破损的搅拌指棒取出。目前，采用肉眼观察检验搅拌头是否破损，是不容易的。在实际施焊过程中，达到规定的寿命，必须更换搅拌头，然后通过研磨等修复处理后再使用。

4. 搅拌头的前进角

搅拌头的前进角是指搅拌头中心轴线与工件表面垂线之间的夹角。在一般情况下，搅拌头的前进角定为 $3-5^\circ$ 。确定前进角的目的，一般认为它可以提高搅拌头的寿命，促进摩擦引起的焊缝金属塑性流动，消除产生缺陷的倾向。

搅拌头的前进角对焊缝金属塑性流动的影响如图2-4所示。当改变搅拌头的前进角时，焊缝金属的塑性流动停滞点发生很大变化。从图中可以看出，在搅拌头的前进角为零度时，即搅拌头与工件表面垂直，焊缝金属的塑性流动停滞点处于焊根部中心，随着前进角角度的增大，搅拌力增大，塑性流动的停滞点向焊缝上方移动，这有利于消除缺陷。

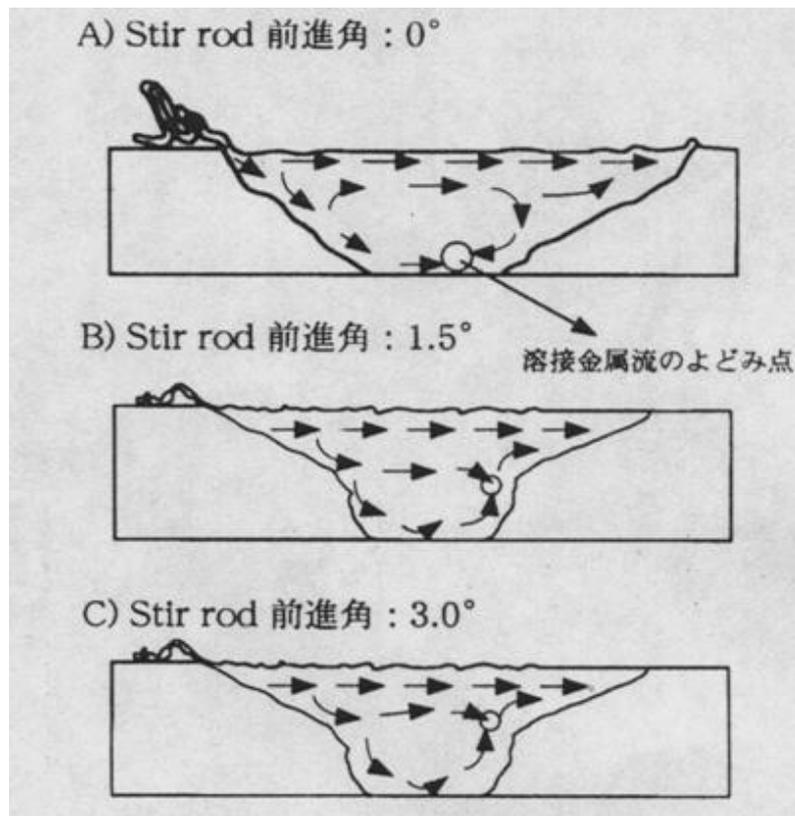


图2-4 搅拌头前进角对焊缝金属的塑性流动停滞点位置的影响

5. 搅拌头的位置

搅拌头的位置是被焊金属与搅拌头的相对位置有关的参数。为了获得没有缺陷的良好接头，被焊金属必须通过搅拌作用向板厚方向输入摩擦热。这就要求搅拌头的肩部必须完全与被焊金属表面接触，使搅拌指棒完全插入板厚的状态保持稳定。搅拌头中心线的位置正好处于接头中心线上。

6. 工件的固定

被焊工件的固定，要依据坡口加工精度、胎卡具的设计、被焊金属以及尺寸大小等综合考虑。在焊接过程中易产生横向张开，保持接头间隙不变比较困难，特别在焊接长尺寸的工件时，一定要重视胎卡具的设计

二 搅拌摩擦焊工艺

1. 接头形式

关于这种新焊接方法的接头形式，推荐如图2-5所示的各种接头形状。通常搅拌摩擦焊采用平板对接和搭接形式进行焊接。它也可实现多种接头的焊接，如多层对接、多层搭接、T形接头、V形接头、角接等，并在实际工业制造中得到了应用。对于角接来说，由于此种焊接方法焊接的焊缝没有增高，原来的接头设计标准已不适用，必须对接头侧的形状进行很好的设计，才能实现焊接。由图2-5 (d) 可以看到，多重板可实现一次焊接，这是此种焊接方法的一大优点。

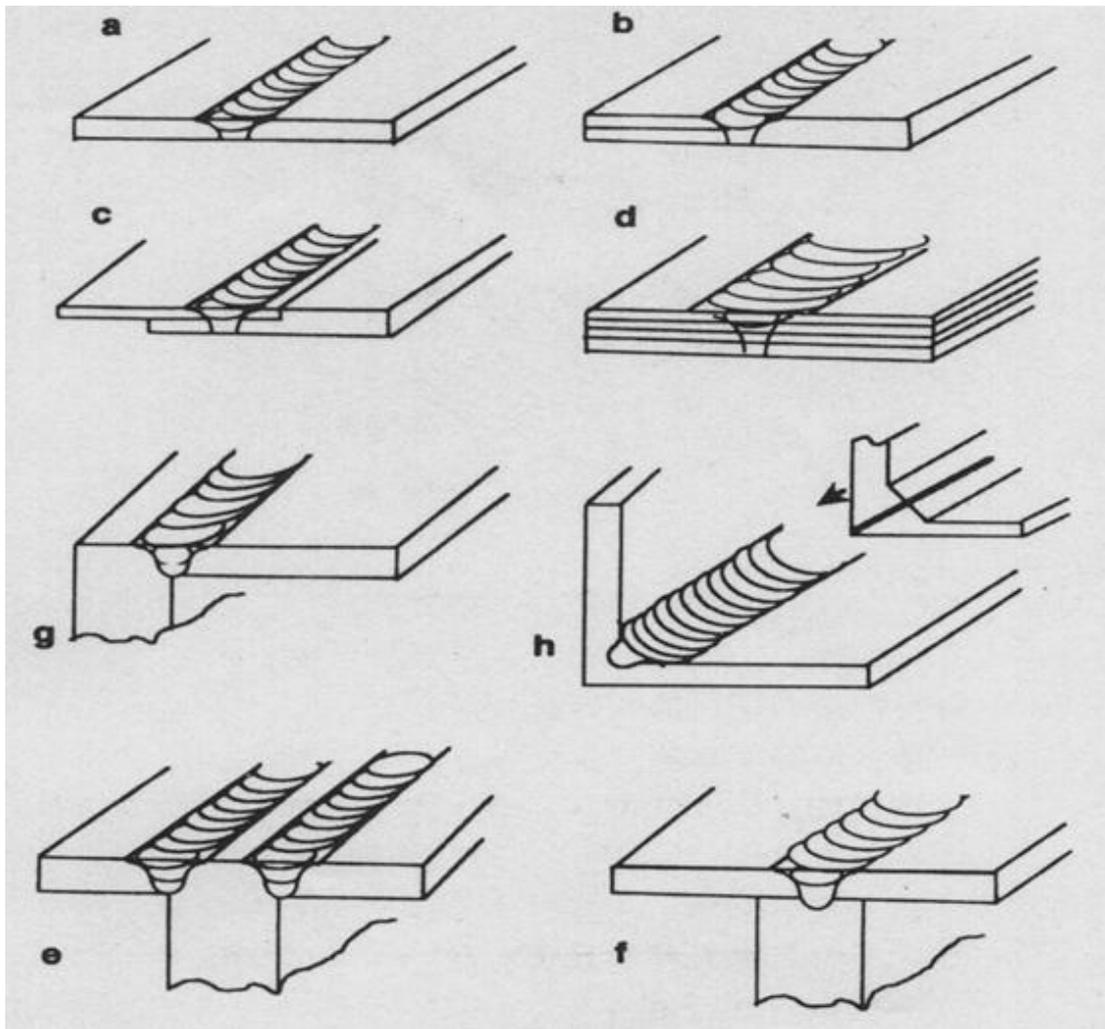


图2-5 搅拌摩擦焊接头形状图

除了以上典型接头形式外，经过不断的开发研究，针对不同的结构零件，研究人员设计了多种其它接头形式，如图2-6所示。

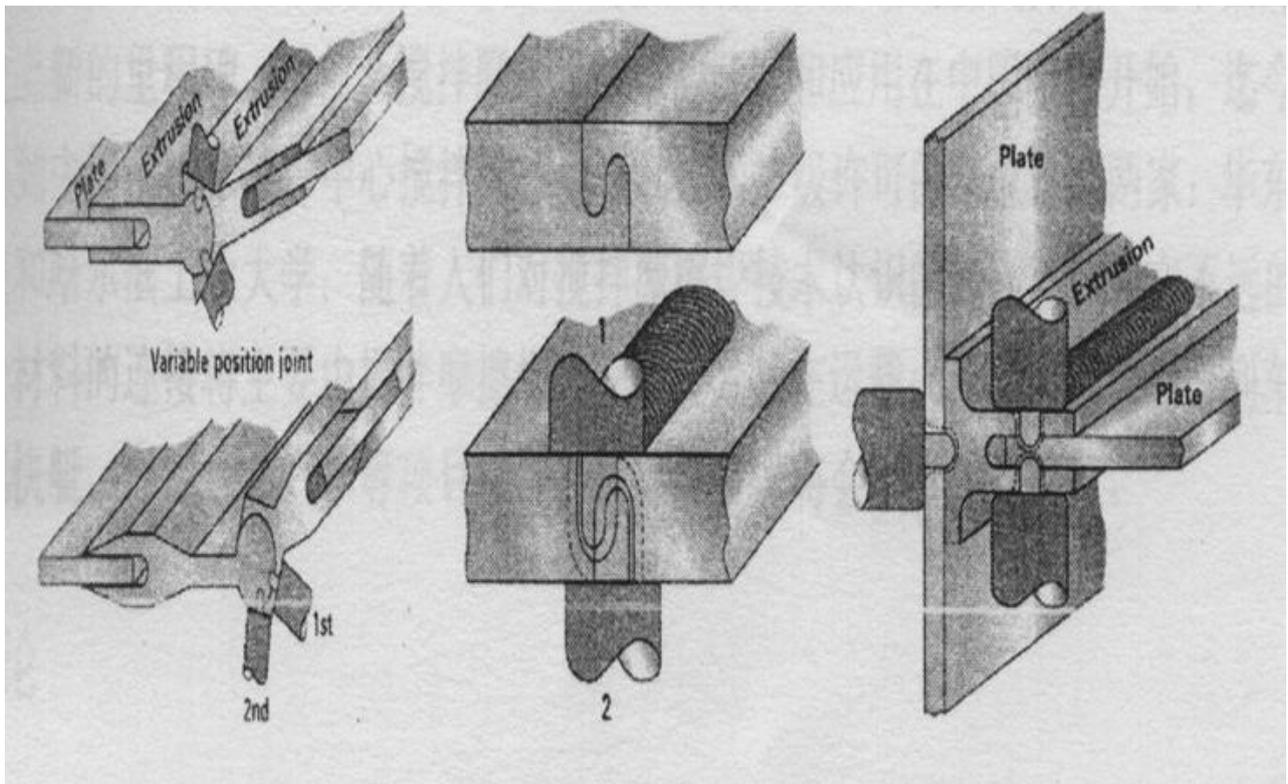


图2-7所示为热容量差较大的厚大工件与小薄件的焊接接头。厚大工件为铸态材料，薄件为轧制板材。工业生产中，搅拌摩擦焊不仅可以焊接筒形零件的环缝和纵缝，还可以实现全位置空间焊接，如水平焊、垂直焊、仰焊以及任意位置和角度的轨道焊。

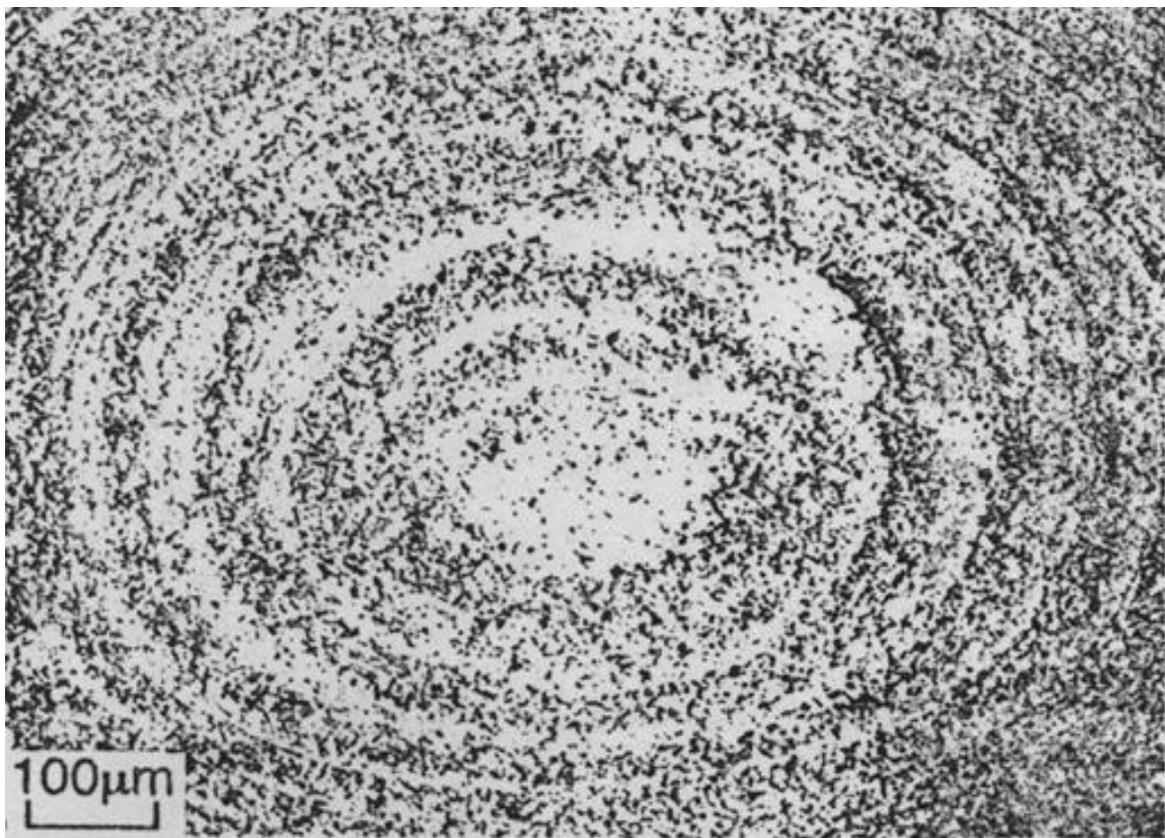


图2-7 不同厚度的铸铝和锻铝的搅拌摩擦焊接头的宏观断面

2. 工艺参数的选择

(1)焊接速度

焊接速度是根据搅拌头的形状和被焊金属来定。几乎与MIG焊相同，或稍比MIG焊快一些，一般为30-100cm/min

不同的被焊金属在不同板厚情况下最大焊接速度如图2-8所示。由图可以看出，在板厚为5mm时，焊接铝的焊速最大为700mm/min；焊接铜的焊速为100mm/min；焊接铝合金时焊速处于500mm/min~150mm/min范围内；异种铝合金的焊接焊速极低。镁的材料常数为400，比2000系铝合金的材料常数600还低，所以推荐在低速下进行焊接。

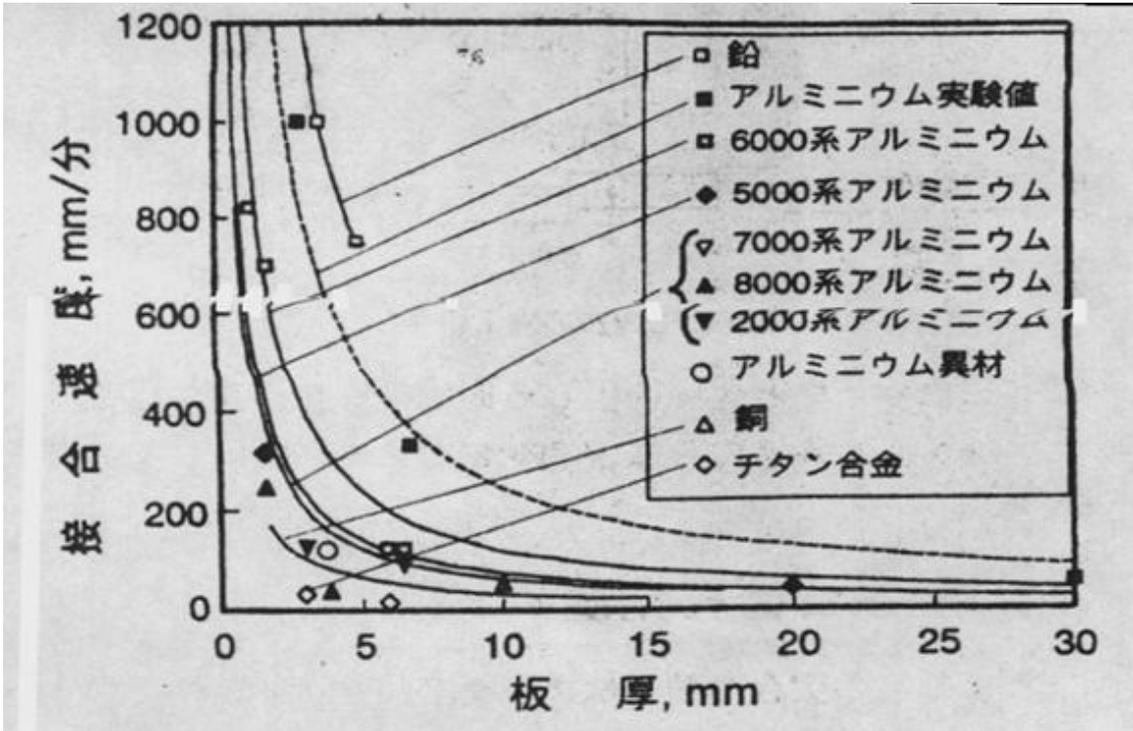


图2-8 各种材料的搅拌摩擦焊临界焊接速度计算值

焊接速度也可用如下公式进行计算：

$$V_{FSW} = \phi_{FSW} \times \psi_{FSW} \times \frac{1}{t} \quad (\text{mm/min})$$

式中 ϕ_{FSW} : 材料常数;

ψ_{FSW} : 搅拌棒常数，通常为1，高效率的搅拌头可取为2;

t: 板厚, 单位为mm

材料常数 ϕ_{FSW} 的大小，除了以上给出的一些金属的数据外，可通过图2-8的数据用以上公式换算出来。在使用以上公式计算时，一定要注意，t是以mm为计量单位的无量纲数带入的。

搅拌摩擦焊的焊接速度也与搅拌头转速有关，搅拌头的转速与焊接速度可在比较大的范围内选择，只有焊接速度与搅拌头转速相互配合才能获得良好的焊缝。

图2-9为5005铝镁合金的搅拌摩擦焊焊接速度与搅拌头转速的关系图，从图中可以看出，焊接速度与搅拌头的转速存在一最佳范围。在高转速低焊接速度的情况下，由于接头获得了搅拌过剩的热量，焊缝金属由肩部排出形成飞边，使焊缝外观显著不良。在低转速或高焊接速度范围内，由于获得的热量不足，焊缝金属的塑性流动不好，焊缝会产生空隙（中空）状的缺陷，乃至产生搅拌指棒的破损。最佳范围因搅拌头特

别是搅拌指棒的形状不同而不同。对于同一合金材料的搅拌摩擦焊，目前都是在适合范围内的较高焊速下进行施焊。

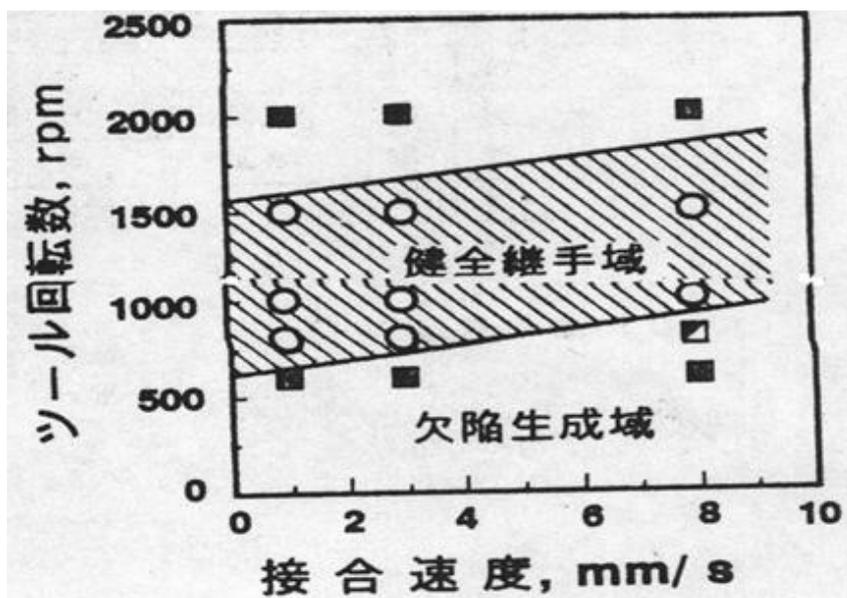


图2-9 5005铝合金搅拌摩擦焊的最佳规范图

图2-10为不同合金的最佳焊接规范参数。由图可以看出，6000系Al-Si-Mg铝合金（6N01）的搅拌摩擦焊的工艺适用性比5000系Al-Mg合金适用范围要大得多。

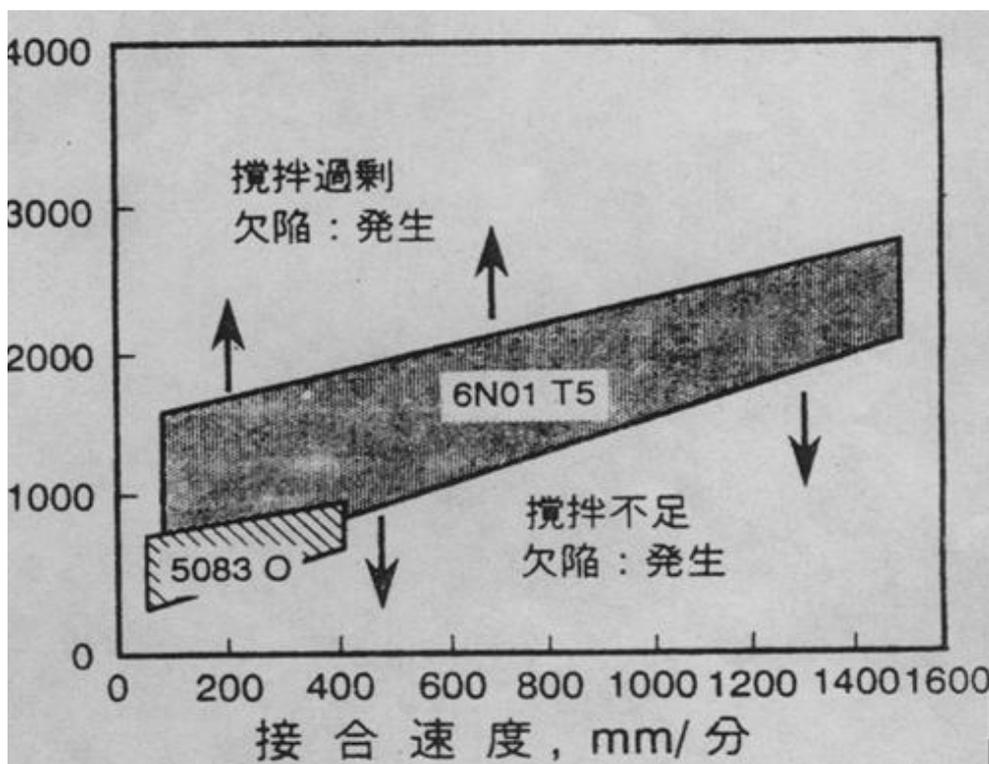


图2-10 各种铝合金的搅拌摩擦焊的最佳规范参数

(2) FSW的热输入

搅拌摩擦焊的热输入是以搅拌头的转速与焊接速度之比来表示，即1mm焊缝长度的搅拌头的转数。相对于电弧焊的焊接热输入定义来说，搅拌摩擦焊的热输入不是单位能的概念。搅拌摩擦焊是把机械能转变成热能，它的产热与搅拌头的转速大小有关。因而以搅拌头的转速与焊接速度的比值大小，可定性的说明在

搅拌摩擦焊焊接过程中对母材热输入的大小。比值越大，说明对母材的热输入越大。此值的大小，也对应着被焊金属焊接的难易程度。搅拌头的转速与焊速的比值，一般在2~8之间。搅拌摩擦焊的热输入在此值范围内，可获得无缺陷的优良焊接接头。搅拌摩擦焊对母材的热输入即搅拌头的转速与焊速的比值，根据被焊合金不同而取不同的数值。在实际生产中，焊接5083铝合金时此值可以取较小的值，焊接7075铝合金时可以取稍大一些，焊接2024铝合金时此值可以取较大的值。在实际应用时此比值不能取得过小，如果过小，焊缝会产生缺陷。

(3)接头的精度

被焊工件对接接头的装配精度比电弧焊要求更加严格。在搅拌摩擦焊时，接头的装配精度要考虑如图2-11所示的几种情况，即接头间隙、错边量大小和搅拌头中心与焊缝中心的偏差。

①接头间隙及接头错边量

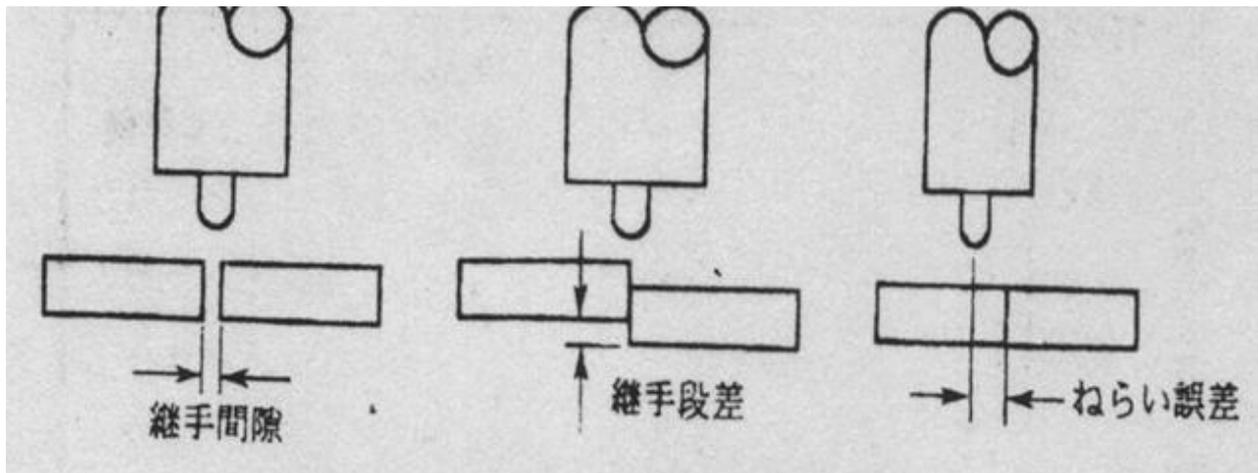


图2-11接头间隙、错边量及中心偏差

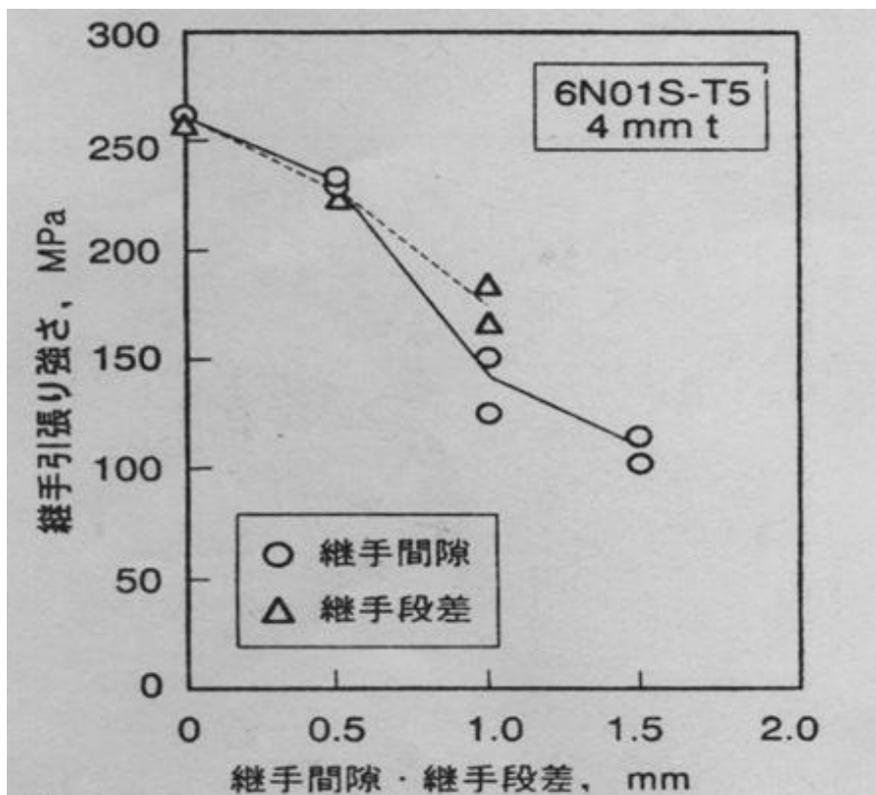


图2-12 接头精度对机械性能的影响

接头的精度和搅拌头的位置有关。图2-13表示了搅拌头肩部的直径与允许接头间隙的关系。从图中可以看出搅拌头的肩部直径越大，允许接头间隙越大。这是因为搅拌头肩部本身也与被焊金属的塑性流动现象有着极大的关系，间接说明了搅拌头的形状、肩部直径或形状有一个最佳形状。

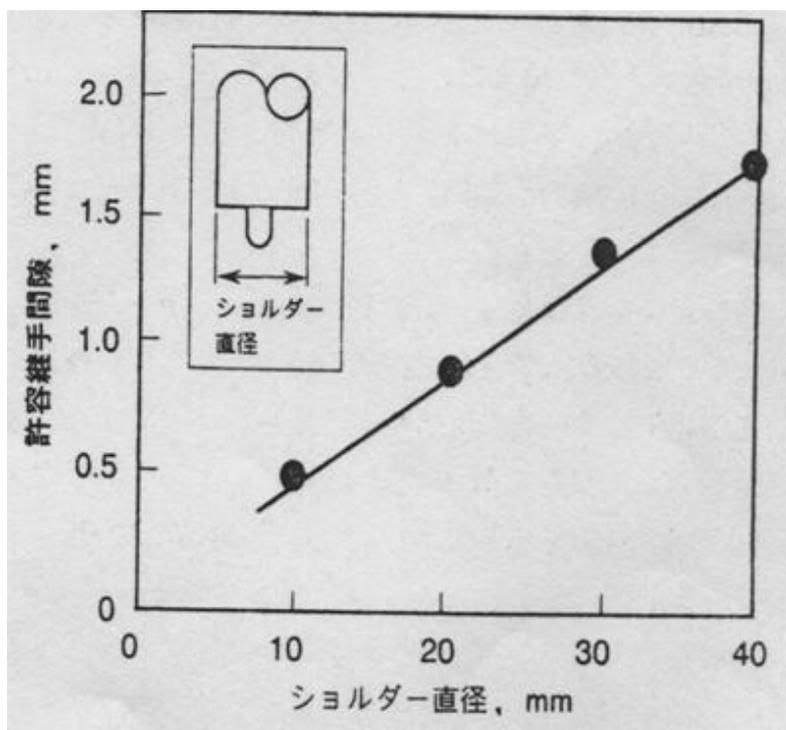


图2-13 搅拌头直径对允许接头间隙的影响

搅拌头肩部表面与母材表面接触程度，在焊接过程中也是一个很重要的因素。可通过焊接结束后的搅拌头肩部外观来判别焊接时的搅拌头旋转的方向，以及搅拌头肩部表面与母材表面接触程度。即搅拌头肩部表面完全被侵蚀，说明搅拌头肩部表面与母材表面接触是正常的；当肩部周围75%表面被侵蚀，说明搅拌头肩部表面与母材表面接触程度是在允许的范围内；肩部表面被侵蚀在70%以下，说明搅拌头肩部表面与母材表面接触不良，这种情况是不允许的。

② 搅拌头中心的偏差

在搅拌摩擦焊时，搅拌头的中心与焊接接头中心线的相对位置，对焊接接头的质量，特别是焊接接头的机械强度有很大的影响。图2-14是搅拌头的中心位置对焊接接头抗拉强度的影响。此图也表示出了搅拌头中心位置与焊接方向以及搅拌头旋转方向之间的关系。

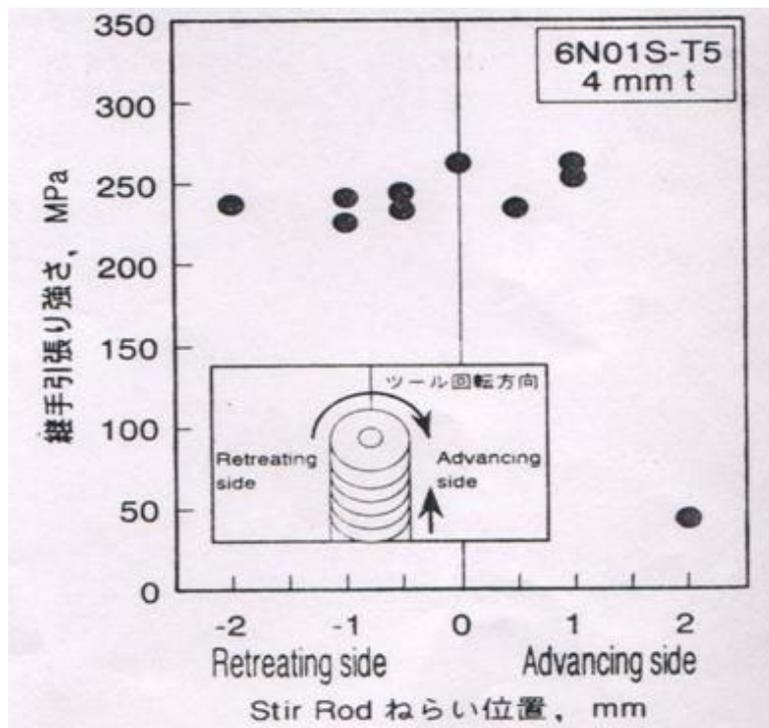


图2-14 搅拌棒中心位置对接头抗拉强度的影响

从图中可见，对于搅拌头旋转的反方向侧，在搅拌头的中心与焊接接头中心线偏差2mm时，对焊接接头的机械性能几乎无影响；而在与搅拌头旋转方向相同方向一侧，搅拌头的中心与焊接接头中心线偏差2mm时，便会造成焊接接头的机械性能显著降低。当搅拌头的搅拌指棒直径为5mm时，搅拌头的中心与焊接接头中心线允许偏差为搅拌指棒直径的40%以下，这是对于FSW焊接性好的材料而言，而对于焊接性较差的其它合金，允许范围就小得多。为了获得优良的FSW焊接接头，搅拌头的中心位置必须保持在允许的范围。接头间隙和搅拌头中心位置都发生变化时，对其中一个因素必须要严格控制。例如，接头间隙在0.5mm以下，搅拌头的中心位置大致允许偏差2.0mm。

另外，还要考虑接头中心线的扭曲、接头间隙的不均匀性、接合面的垂直度或平行度等。

在确定FSW工艺参数时，要考虑搅拌指棒的形状及焊接胎夹具等因素。此外还应考虑FSW焊机的其它部分对缺陷产生的可能性。这些因素对确定FSW最佳规范也有一定的影响。

三 FSW的温度分布和焊缝金属组织

搅拌摩擦焊时，由机械旋转的搅拌头与被焊金属摩擦产生的热能传输给被焊金属，焊缝金属在搅拌力的驱动下产生塑性流动。焊缝组织受到强塑性流动的影响，导致焊缝结晶的微细化，也许局部伴有粗大化。搅拌摩擦焊接头组织和其温度分布密切相关，因此必须要注意搅拌指棒的形状，对焊缝热循环的影响。

(一) 焊缝区的温度分布

搅拌摩擦焊的温度分布的测定是不容易的。因为，在采用热电偶测量焊接接头温度分布时，焊缝中金属的强塑性流动，使得热电偶端头易产生损坏。目前多是在焊缝区附近或热影响区进行测量。

图2-15为Backland等学者在板厚为4mm的A6063T6铝合金、搅拌头直径为15mm的情况测得的焊接接头的热循环曲线。从图中可以看到，离焊缝中心线2mm处的温度大于500°C。日本有人经过试验得到纯铝焊缝区的温度最高为450°C。由于铝的熔化温度为660°C，可以认为是在熔点以下的温度发生塑性流动。英国焊接研究所试验结果表明焊缝区的最高温度为熔点的70%，纯铝最高温度不超过550°C。总之，纯铝搅拌摩擦焊接时焊缝区的最高温度在500°C左右。热传导计算结果与以上的实测值基本一致。

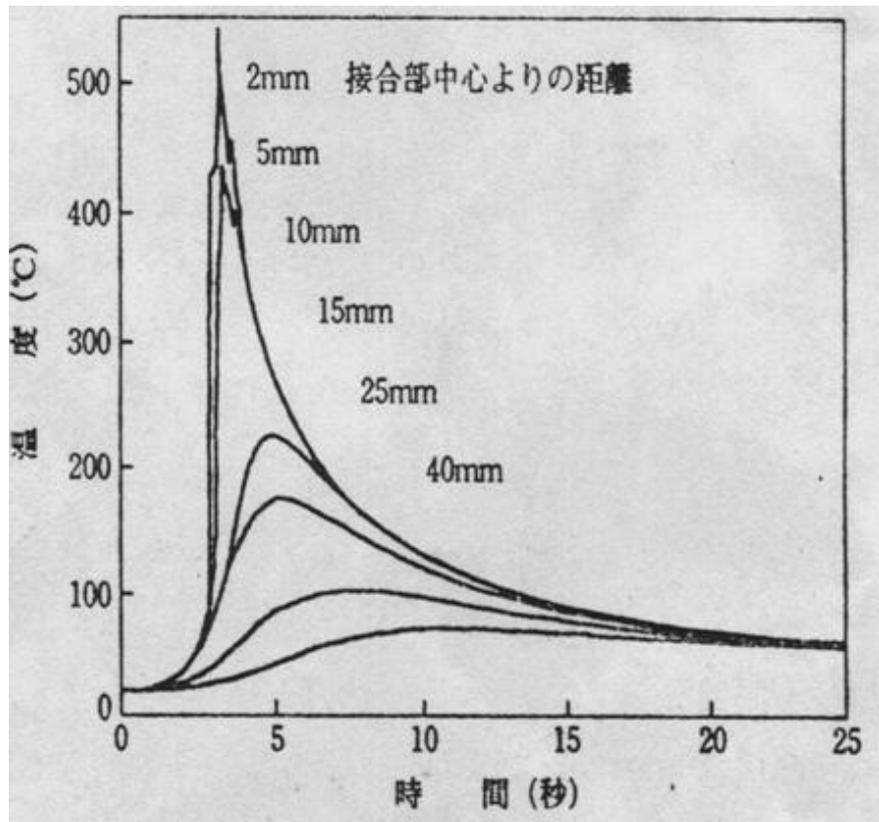


图2-15 A6063-T6合金搅拌摩擦焊的热循环曲线

搅拌指棒的温度是一个很重要的问题，至今还没有实测数据。因为搅拌指棒要在焊缝金属内旋转，测量十分困难。有人在被焊金属固定的情况下，将旋转的搅拌指棒压入到板厚为12.7mm的6061-T6铝中，测量距搅拌指棒的端部0.2mm处的温度，并根据这个温度，用计算机仿真的方法仿真出搅拌指棒外围的温度。在搅拌指棒的直径为5mm，长为5.5mm的条件下，其仿真结果如图2-16所示。

根据搅拌指棒压入的速度可以推定，约24秒搅拌指棒全部压入到被焊金属中。从图2-16可以看出，从15秒后到24秒，搅拌指棒外围温度为一常数约580°C，即达到6061合金固相线温度。在搅拌摩擦焊时搅拌指棒的温度不能高于以上温度，因为搅拌指棒的高温剪切强度或高温抗疲劳强度就处于这个温度范围。也可以看到，搅拌指棒外围区的温度比上述的焊缝金属的温度高出几十摄氏度。

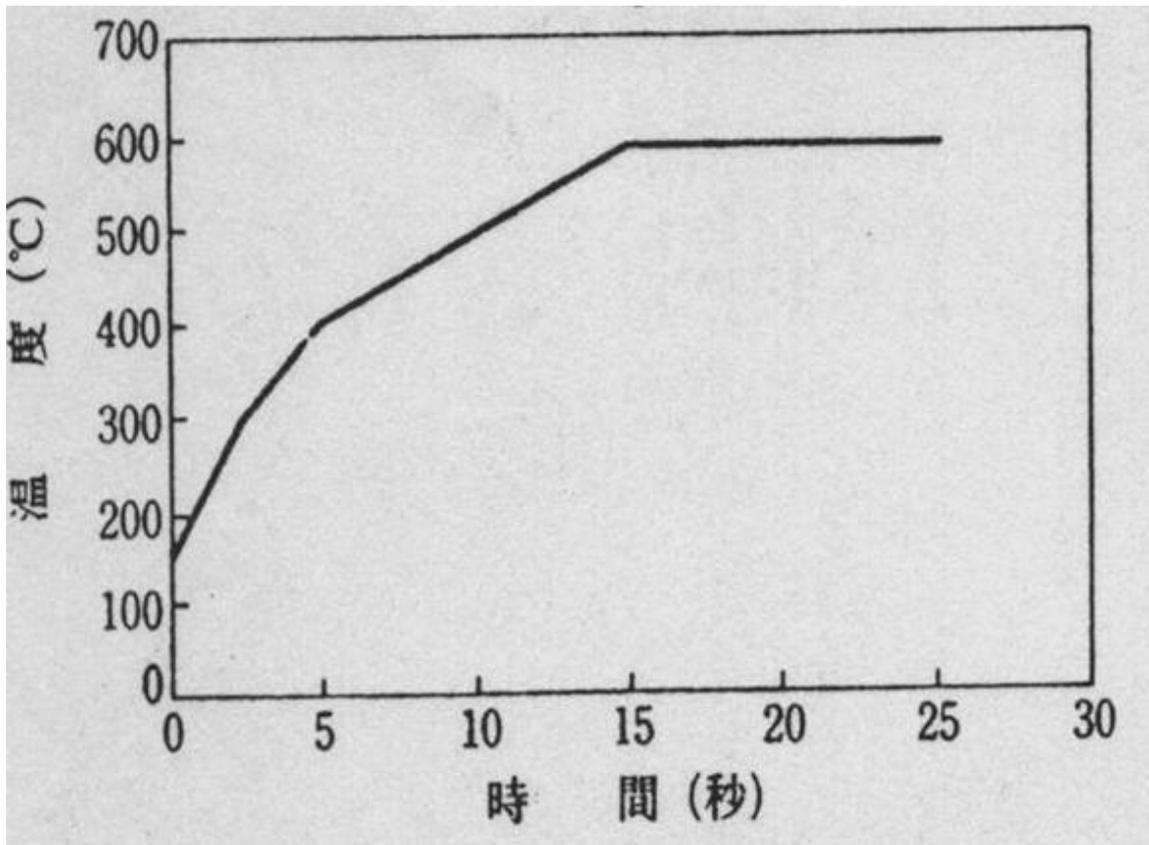


图2-16 搅拌指棒外围温度的仿真计算结果

焊接速度: 0.5mm/min 板厚: 4mm 搅拌头直径: 15mm

(二) 仿真计算结果

由于焊缝内搅拌区的温度是很难测量的，因而有人在研究残余应力分布时，用仿真的方法计算出其温度。图2-17所示是A6063铝合金搅拌摩擦焊焊缝区的温度分布仿真计算结果。图中的斑点为搅拌头的肩部区，图中的曲线为等温线，曲线上的数字是此等温线的最高温度。但是由于采用的铝的高温物理性能、粘度等的数据不十分精确，仿真结果与实际的温度分布会有一些差别。

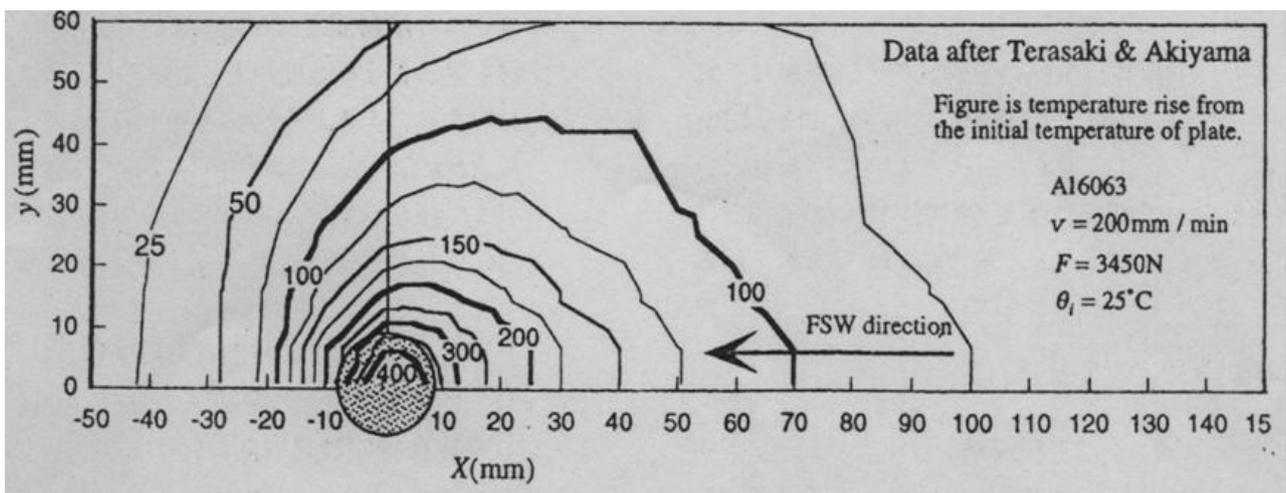


图2-17 搅拌摩擦焊焊缝区的等温线 (板厚: 5mm)

焊接速度对温度分布有相当大的影响。对于FSW来说，由于热源在固体中移动，在焊缝中心部最高温度的上限不会超过母材的固相线温度。由计算得出的焊接速度对焊缝最高温度的影响如图2-18所示。从图可以看出，在低速焊接情况下，焊缝的最高温度为490oC；在高速焊接时焊缝的最高温度为450oC。

从以上结果可以看出，在低速焊接和高速焊接下，虽然焊缝的最高温度温差并不大，但在实际搅拌摩擦焊时高速焊接是困难的，因为母材热输入低，焊缝金属塑性流动性不好，易造成搅拌头破损。最佳焊接规范的制定，是以在适当的摩擦热的作用下焊缝金属发生良好的塑性流动为依据。

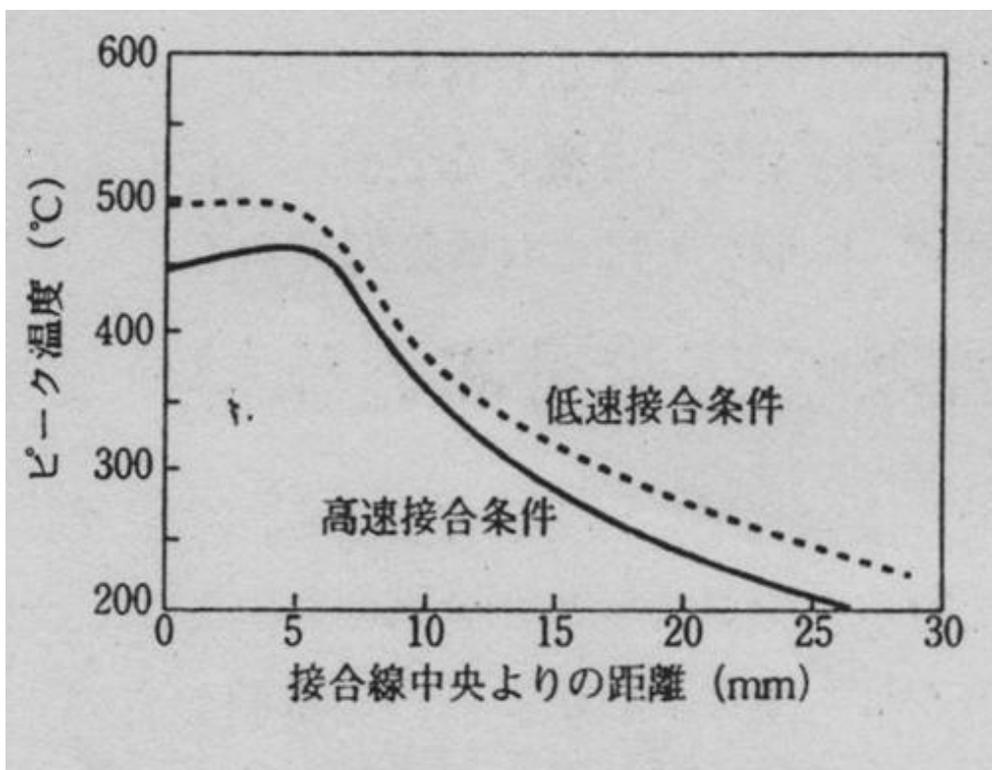


图2-18 焊接工艺参数对最高温度的影响图

(三) 焊接时的热量计测

日本有人对板厚为4mm的6N01铝合金的搅拌摩擦焊过程中的热量进行了测量。其方法是把在焊接过程中产生的热用水吸收，用温度计测量水温来进行测量搅拌摩擦焊过程中的热量，测量中不考虑焊缝背面垫块等的热损失。图2-19表示出了在相同的焊接速度和工件完全熔透的情况下，FSW和MIG焊的焊接热输入，FSW的热输入范围为120~230J/mm，它大约是MIG焊焊接热输入的一半。

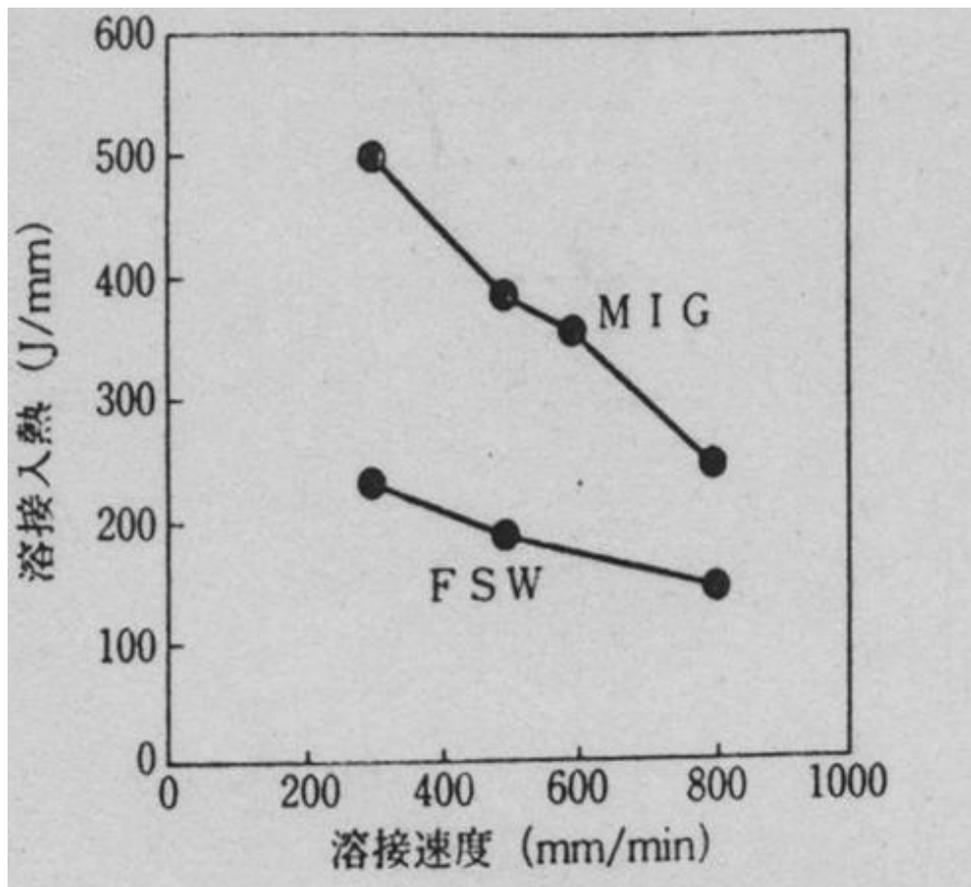


图2-19 FSW和MIG焊4mm铝合金

焊接热输入的比较

在搅拌摩擦焊焊接时，分别测量搅拌指棒和肩部的温度，然后由测得的温度循环换算为热量。也可以采取简单的方法计算，即在最高温度下组织变化的截面积与比热容、密度相乘。其计算结果如图2-20所示。从图中可以看出，对母材总的热输入量随着焊接速度的增大和搅拌头旋转速度的降低而降低。

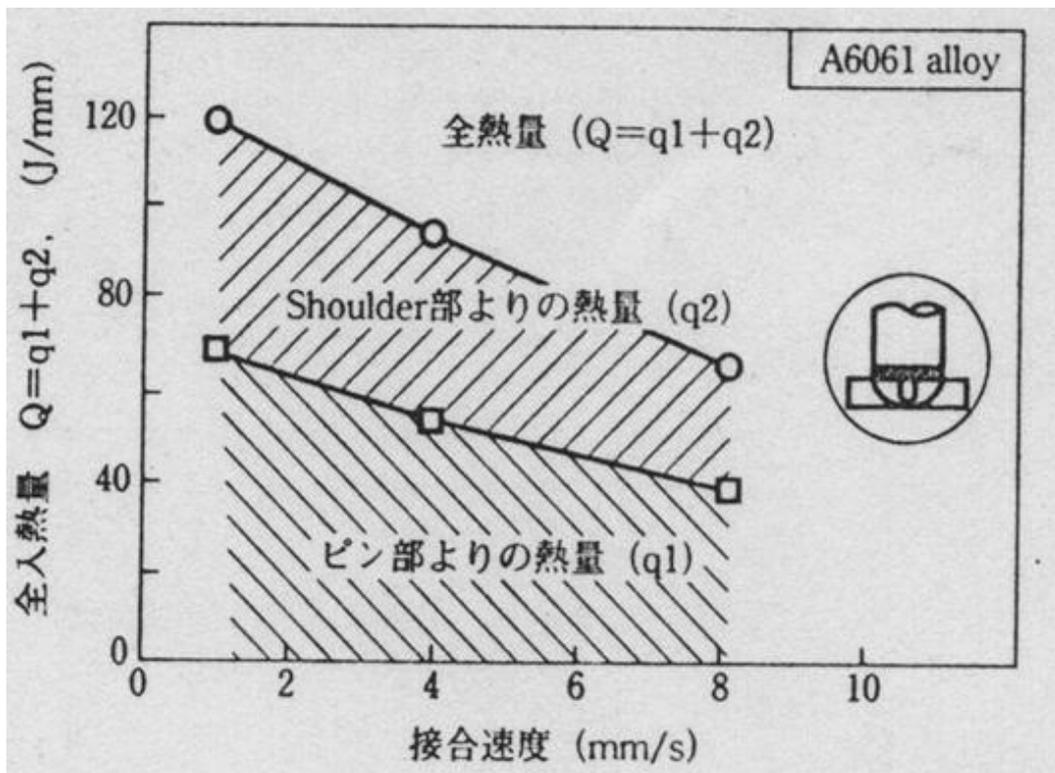


图2-20 搅拌摩擦焊焊接速度对热输入的影响

搅拌指棒形状以及肩部直径对总的热输入量也有很大的影响，搅拌头的搅拌指棒及肩部直径越大，使总的热输入量变大。这样的趋势在焊接6000系及2000系铝合金时是一样的。根据图4-20给出的结果，把总热输入分为搅拌指棒和肩部各自产生的热量进行比较，比较结果如图2-21所示。它是用不锈钢制造的搅拌头焊接的结果。有图可以看到，搅拌指棒的发热量为总的热输入的55~60%。这个发热量的比率在转速800~1600rpm的情况下几乎不受影响。

最近，带有螺纹的搅拌指棒已经用于生产，这种搅拌指棒对产热的影响特别明显。

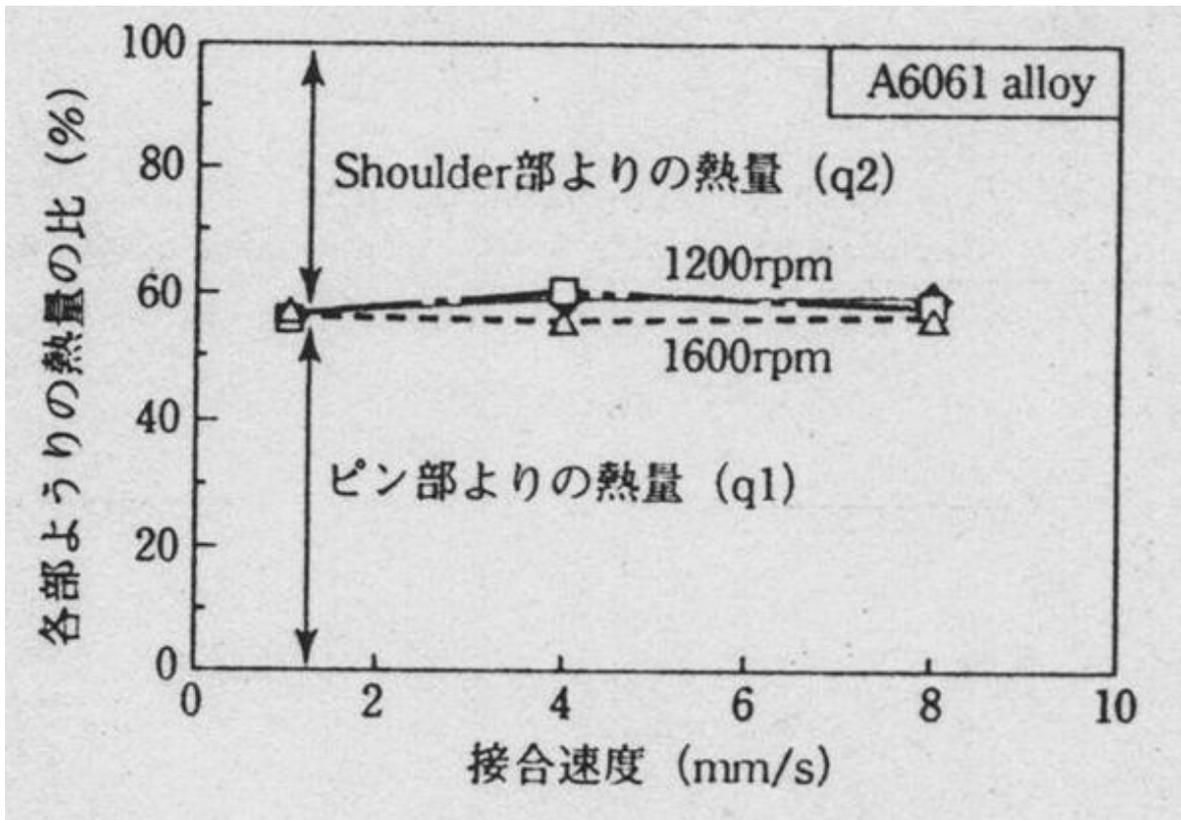


图2-21 焊接速度对搅拌指棒和肩部热量的影响

(四) 焊缝区的组织

搅拌摩擦焊焊缝由于是在摩擦热和搅拌指棒的强烈搅拌共同作用下形成的，焊缝金属组织与其它焊接方法的焊缝相比有很多特点。

搅拌摩擦焊焊缝的宏观断面经腐蚀后进行观察，其断面形状可分为2种，一种断面形状为圆柱状；另一种为熔核状（焊点）。大多数FSW焊缝为圆柱状或它的变形的绕杯状；而焊点状的断面多发生于高强度和轧制加工性不好的如7075A、5083铝合金合金的搅拌摩擦焊焊缝中。

图2-22是接头的宏观断面，由图可以看出，焊接断面为一倒三角形，其中心区是由搅拌指棒产生的摩擦热和强烈搅拌作用下形成的，其上部是由摩擦搅拌头的肩部与母材表面的摩擦热而形成的。焊缝没有增高，通常与母材表面平齐稍微有些凹陷。

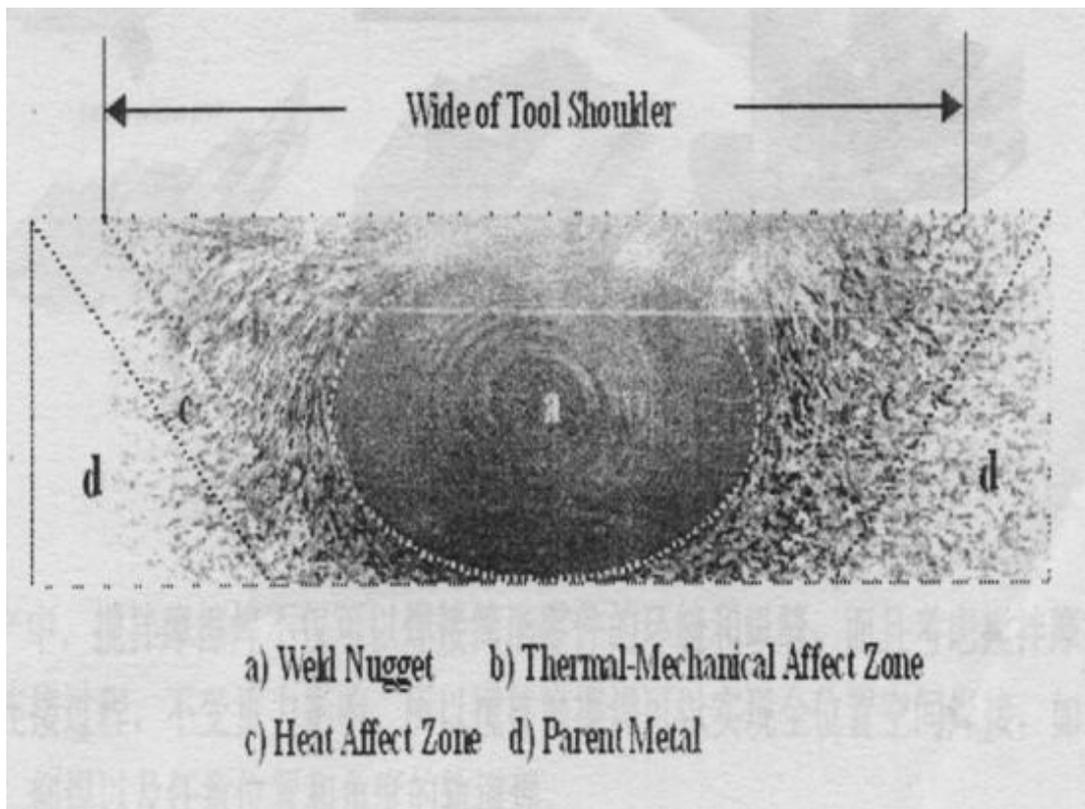


图2-22 接头的宏观断面

图2-23所示是搅拌摩擦焊焊接接头组成的划分。它是根据如图2-23所显示的焊接接头的金相组织进行观察而划分的。搅拌摩擦焊焊接接头依据金相组织的不同分为四个区域。即图中A区为母材，B区为热影响区，C区为塑性变形和局部再结晶区，D区即焊缝中心区为完全再结晶区。

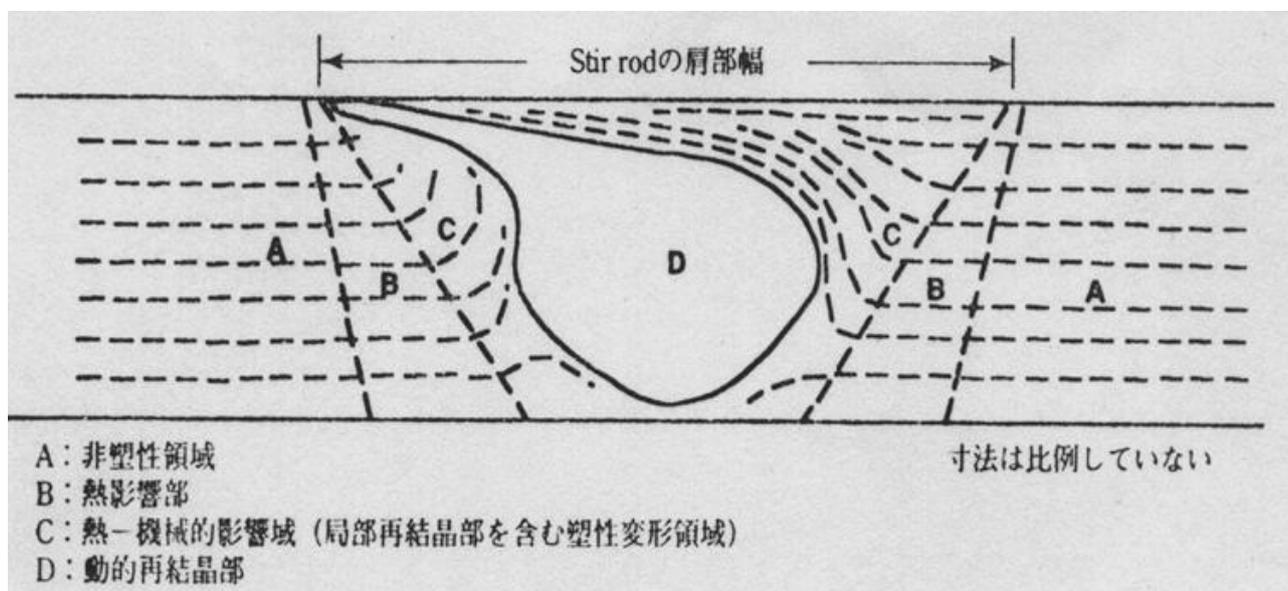


图2-23搅拌摩擦焊焊接接头组成

根据对搅拌摩擦焊焊缝金相组织的观察，在C区可以看到部分晶粒发生了明显的塑性变形和部分再结晶。D区是一个晶粒非常细小的焊核区域。此区域的焊缝金属经历了完全再结晶的过程。通过观察A5005铝合金搅拌摩擦焊焊缝金相组织，在焊缝中心区发现了等轴结晶组织，如图2-24所示。但是晶粒细化不很明显，晶粒大小多在20~30 μm 。这是由于热输入过大，产生过热而造成的。

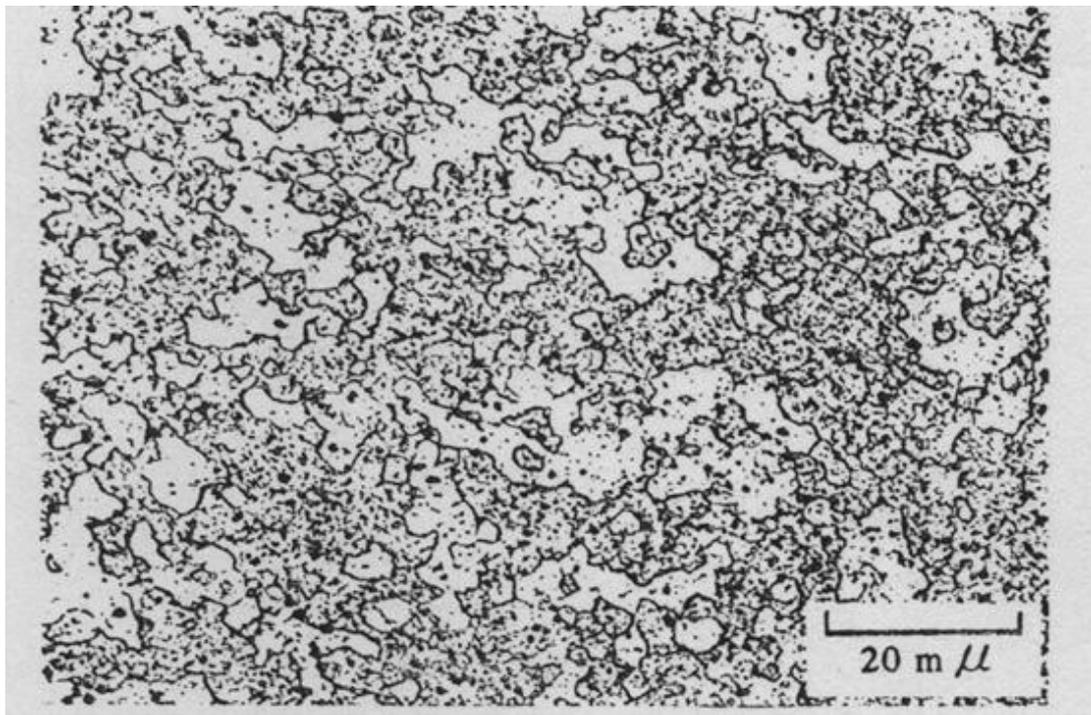


图2-24 搅拌摩擦焊焊缝中心的等轴等轴结晶图

图2-25是搅拌摩擦焊焊缝微观组织照片。它是2024铝合金和AC4C铸铝的异种金属搅拌摩擦焊接头。由于圆柱状的焊缝金属的塑性流动，出现环状组织，称为洋葱状环组织。这种洋葱状环组织是FSW焊接接头特有的组织。

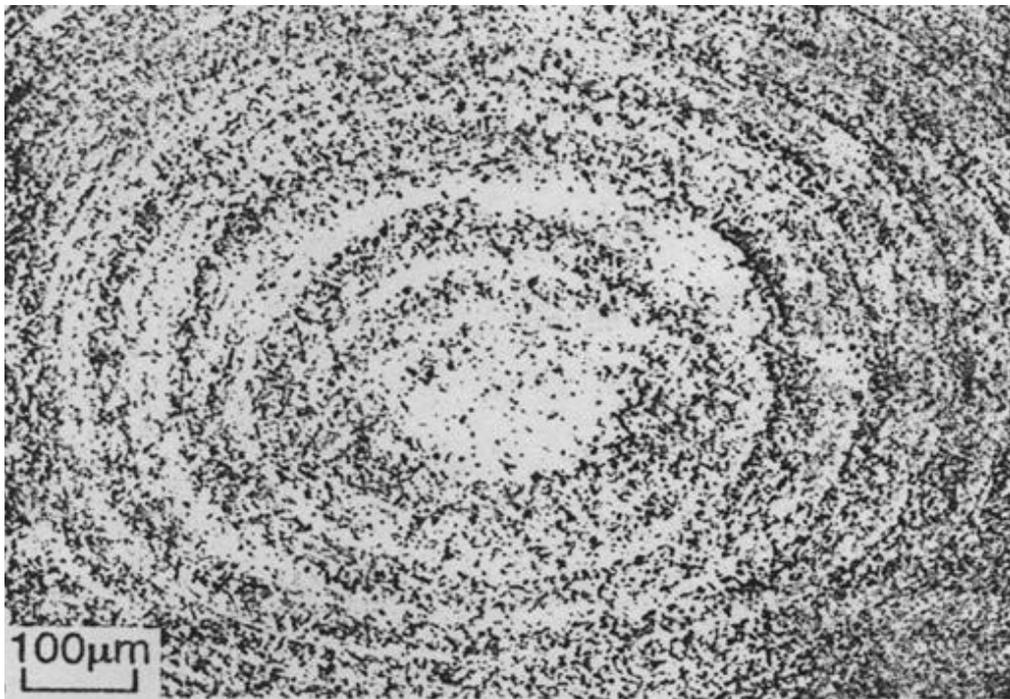


图2-25 搅拌摩擦焊焊缝微观断面

(A5005铝合金 板厚6mm)

对于FSW来说，由于对焊缝给予摩擦热加之旋转搅拌，产生强烈的塑性流动，其焊缝为非熔化状态，所以归类为固相焊接。但Bjorneklett等研究发现，在搅拌头的肩部正下方温度高，对于7030铝合金搅拌摩擦

焊来说，焊缝为固液共存状态。由于搅拌头肩部正下方焊缝金属的温升为330oC/s，造成局部熔化现象也是可能的。

四 FSW焊接接头的力学性能

在一般情况下，搅拌摩擦焊焊接接头的力学性能，大约与母材和MIG焊接接头性能相当。

(一) 接头的抗拉强度和弯曲性能

最近英国焊接研究所 (TWI) 认为，2000、5000、7000等系铝合金的搅拌摩擦焊焊接接头的常态强度与母材等强度，但也有的低于母材。表2-2给出了铝合金搅拌摩擦焊焊接接头的力学性能数据。

表2-2 铝合金的搅拌摩擦焊焊接接头的拉伸试验结果

母材	焊接速度/cm.mmin ⁻¹	0.2%屈服点/Mpa	抗拉强度/Mpa	延伸率%	断裂位置
5083-0	—	142	299	23	PM
5083	9.2	144	—	16.2	WM
5083	13.2	141	—	13.6	WM
5083	6.6	156	—	20.3	WM
5083	9.2	154	—	18.8	WM
5083	4.6	143	—	19.8	WM
5083-H112	15.0	156	315	18.0	HAZ/ PM
6082	75.0	136	—	8.4	HAZ/ PM
6082	26.4	132	—	11.3	WM
6082	37.4	144	—	10.7	HAZ
6082	53.0	141	—	10.7	HAZ
6082	75.0	—	254	—	HAZ
6082-T5	—	—	260	—	—
6082-T4时效	—	285	310	9.9	—
6082-T6	150	145	220	7	—
6082-T6时效	150	230	280	9	—
6005-T4	—	94	175	22	—
6005-T4	等离子弧焊	107	194	20	—
6005-T4	MIG焊	104	179	18	—
6N01	25.0	199	133	12	HAZ/ PM
7075-T7351	—	208	384	5.5	HAZ/ PM
7108-T79	90	205	317	11	—
2014-T6	—	247	378	6.5	HAZ

注：PM—断裂在母材，WM—断裂在焊缝，HAZ—断裂在热影响区，HAZ/ PM—断裂在热影响区和母材交接处

Kluken等对采用各种焊接方法和搅拌摩擦焊焊接的A6005铝合金接头的静态强度进行了比较，从表2-2中可以看出，等离子弧小孔焊焊接接头的抗拉强度值最高，为194MPa；搅拌摩擦焊最低，为175Mpa，而接头的延伸率却最高，为22%。但是搅拌摩擦焊焊接接头没有气孔、裂纹等缺陷。2000系铝合金的搅拌摩擦焊焊接接头，断裂发生在热影响区。

铝合金分为热处理型和非热处理型。对于热处理型合金来说，采用熔焊时，焊接接头性能发生改变是一个大问题。飞机制造用的2000、7000系硬铝，时效后进行搅拌摩擦焊，或搅拌摩擦焊之后进行时效处理，两者焊接接头的静态抗拉强度约为母材的80~90%。

6000系的6N01-T6铝合金广泛用于日本的铁路车辆制造。焊接和时效处理顺序对机械性能有很大的影响。表2-3是12mm的6No1-T6铝合金在大气中和水冷中进行搅拌摩擦焊，焊接接头的抗拉强度试验结果。从试验结果可以看出，经时效处理后，焊接接头的抗拉强度得到了提高。

表2-3 焊接中冷却方式和时效处理对抗拉强度的影响

	抗拉强度/ $N \cdot mm^{-2}$	0.2%屈服点/ $N \cdot mm^{-2}$	延伸率/%
空冷	203	122	12.5
空冷时效处理	230	185	7.6
水冷	220	143	11.1
水冷时效处理	267	238	6.0

摩擦焊的焊接强度和板厚的关系:

特别是在水冷中焊接的试件经时效处理后, 改善效果最为显著。这是因为, 水冷使软化区变小, 采用这样的时效处理, 硬度回复效果特别好。在一边水冷一边进行搅拌摩擦焊的情况下, 接头强度的大小和被焊金属的厚度有关, 如图2-26所示。随着板厚的增大, 接头强度下降。

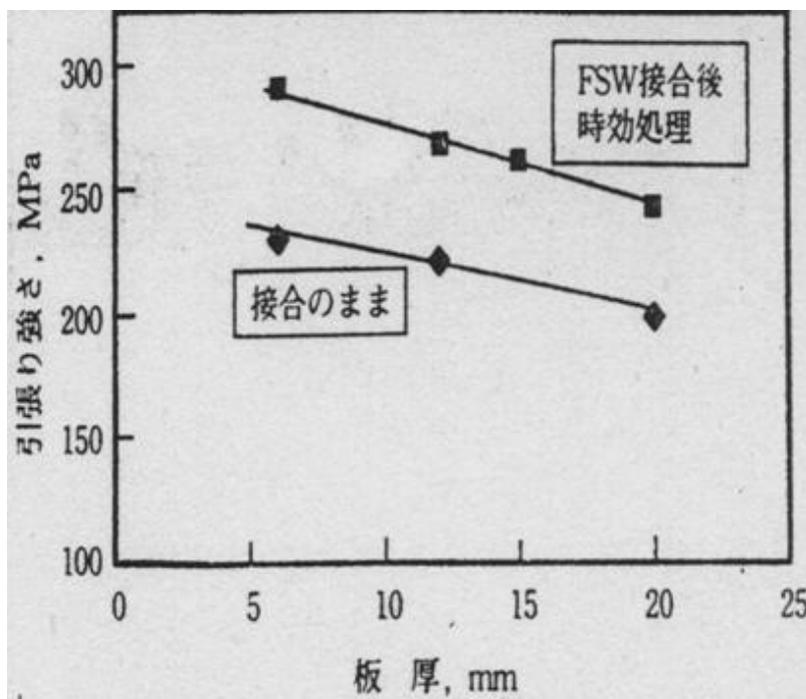


图2-26 6No1-T6铝合金在水冷中搅拌图

搅拌摩擦焊焊接焊头的弯曲试验, 与电弧焊接头弯曲试验不同, 弯曲半径为板厚的4倍以上。试验结果表明, 在这样的试验条件下, 无论是铝及其合金还是钢的搅拌摩擦焊焊接焊头的180°弯曲性能都很好。

由于搅拌摩擦焊是单道焊, 被焊母材是被固定在垫板上。焊接时, 为了避免搅拌头的搅拌指棒与垫板接触, 搅拌头的搅拌指棒长度往往稍微比被焊金属厚度小一些, 从而造成被焊金属的背面留有一定的间隙, 它导致焊接接头在背弯试验时背面张开, 相当于熔化焊的根部缺陷。如果焊缝根部有缺陷, 可用砂轮将焊缝根部缺陷处轻轻打磨平。

(二) 接头的硬度

搅拌摩擦焊接接头的硬度, 由于被焊金属及时效方法等不同, 焊接接头的硬度分布不同。

图2-27表示出了6No1-T5铝合金FSW接头的硬度分布, 并与MIG焊接头的硬度分布进行比较。从图中可以看到, 搅拌摩擦焊焊接接头的硬度比较高。

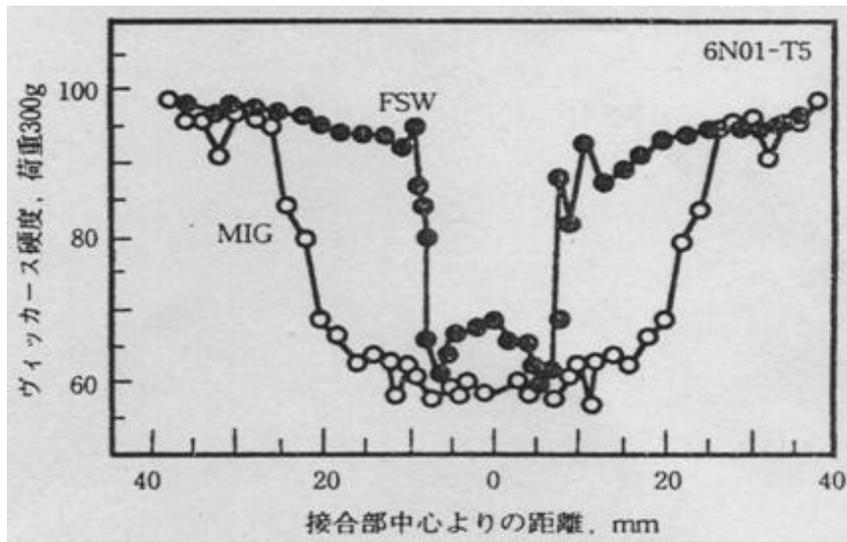


图2-27 FSW与MIG焊焊接接头硬度分布

材料时效有自然时效和人工时效之分。对2014A及7075铝合金搅拌摩擦焊焊接接头焊后进行了9个月自然时效，自然时效初始2个月硬度回复速度剧烈，经自然时效9个月后，2014A及7075铝合金焊接接头都没有回复到母材的硬度值，但7075铝合金焊接接头硬度的回复大。

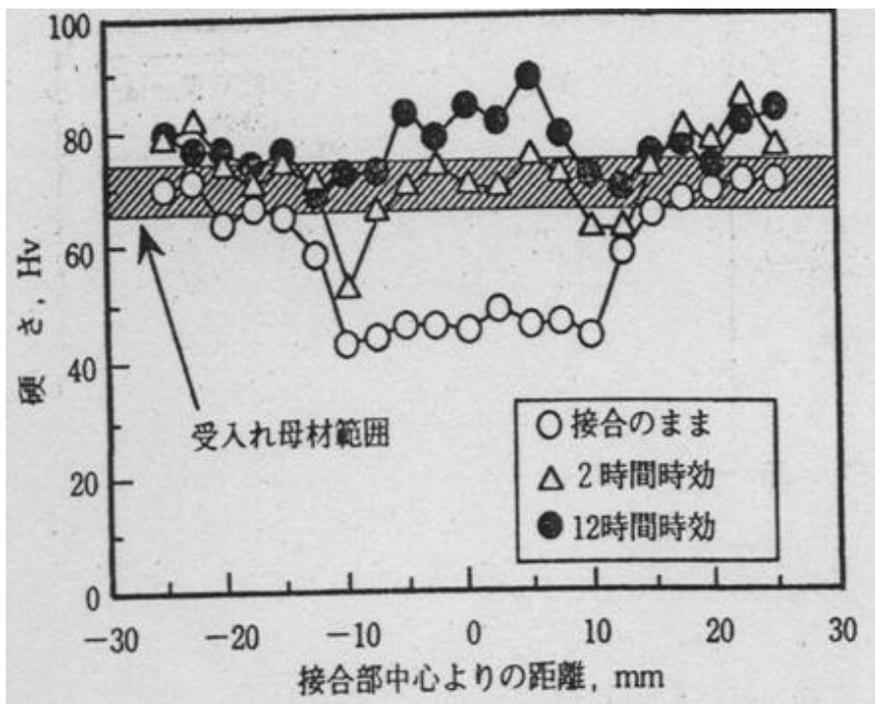


图2-28 6063-T5铝合金搅拌摩擦焊焊接接头人工时效硬度的变化图

对于人工时效来说，板厚6mm的6063-T5 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头，经过人工时效的硬度的分布变化如图2-28所示。

由图可知，在175oC下保温2小时后接头硬度几乎达到了母材的硬度；人工时效12小时后，一部分处于过时效状态。人工时效处理促使焊缝金属中的针状析出物和β/相析出，导致接头硬度的恢复。

(三) 疲劳强度

与TIG和MIG等熔焊方法相比较，铝合金的搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳性能具有明显的优势。其原因有二：

- 1、因为搅拌摩擦焊的焊缝材料经过搅拌头的摩擦、挤压、顶锻得到的是精细的等轴晶组织；
- 2、由于焊接过程是在低于材料熔点温度条件下完成，焊缝组织中没有熔焊经常出现的凝固偏析和凝固过程中产生的缺陷。

搅拌摩擦焊焊接接头综合性能优良。对于不同材料的铝合金如 A12014-T6、A12219、A15083-O、A17075等的搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳性能研究表明，铝合金材料的搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳性能均优于熔焊接头，其中A15083-O铝合金的搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳性能完全可以达到与母材相同的水平。系列疲劳试验结果表明，铝合金的疲劳性能指标远超过工业设计熔焊标准。

等人在悬臂拉伸的疲劳试验（应力比为0.5）中得到了与6005-T4母材几乎相同的S-N曲线图。搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳破坏处于焊缝上表面位置，而熔化焊焊接接头的疲劳破坏则处于焊缝根部。图2-29显示出了板厚为40mm的6N01-T5铝合金搅拌摩擦焊焊接接头，应力比为0.1的疲劳性能试验结果。试验结果表明，107次疲劳寿命达到母材的70%，即50MPa，此值为激光焊、MIG焊的2倍。

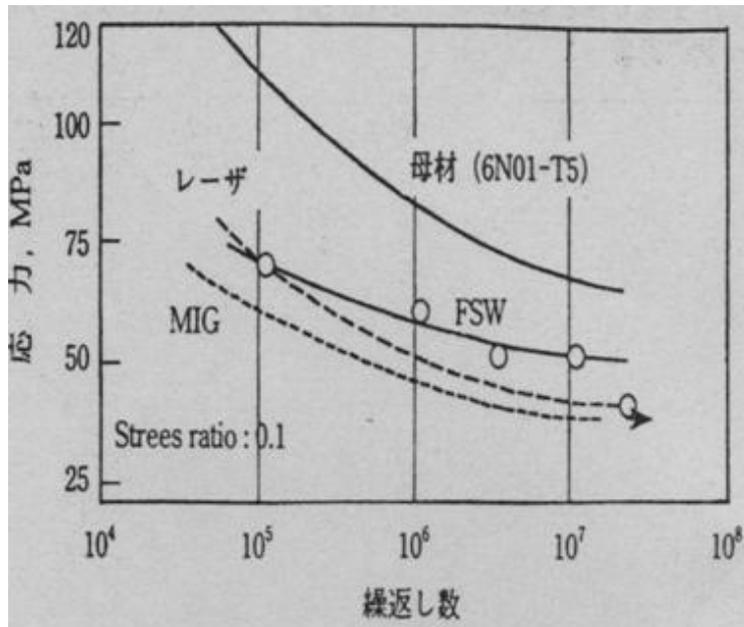


图2-29 6N01-T5铝合金各种焊接方法的疲劳强度

为了确定6N01-T5的铝甲板构造物的疲劳强度，疲劳试件进行了比较大的改造，进行了箱型梁疲劳试验。试件为宽200mm、腹板高250mm的异型箱型断面，长2m。

图2-30给出了这一试件的疲劳试验结果。在106次以上疲劳强度降低。但大于欧洲标准Eurocod 9的疲劳强度极限的一倍以上。同一研究者做的20mm宽的小型试件的结果，在图中用点线标出的曲线，显示出同样的疲劳强度降低的现象。与大型试件相比较，下降的程度小。梁翼板由于受拉伸载荷作用，其搅拌摩擦焊焊缝产生疲劳龟裂。

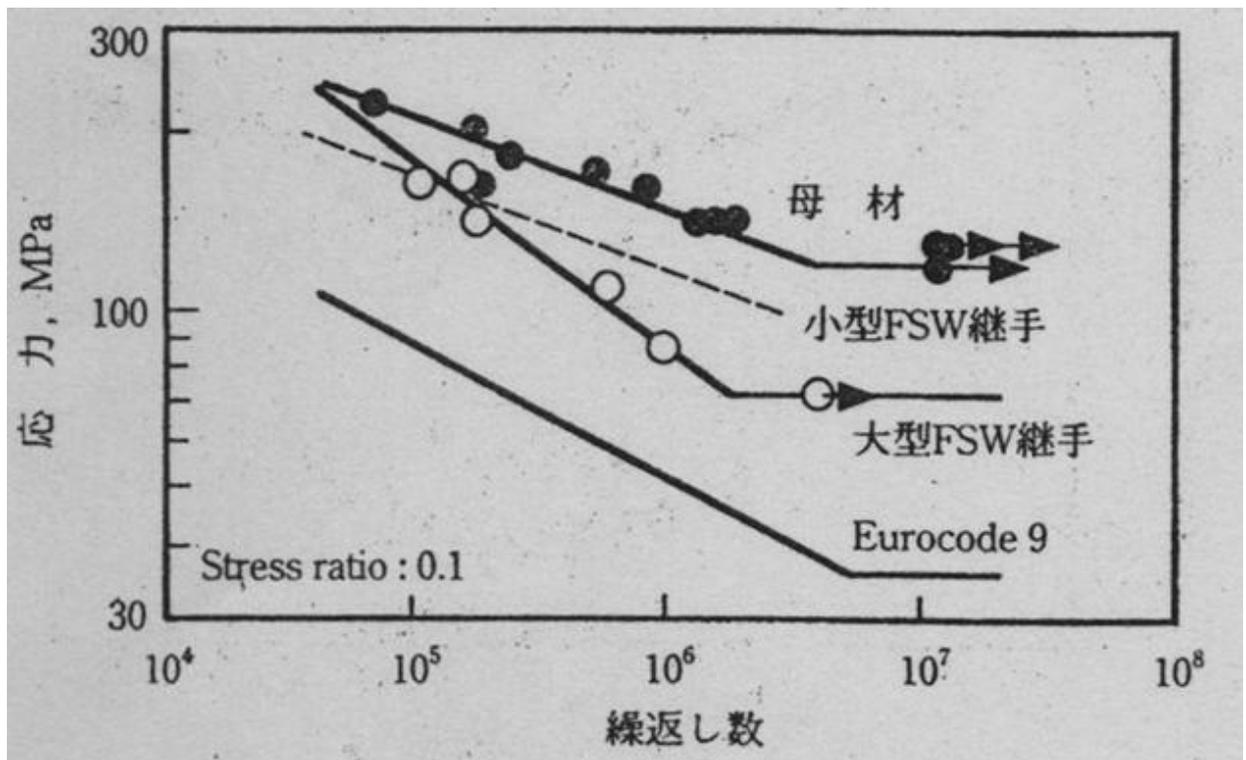


图2-30 6No1S-T5的铝甲板构造物的疲劳强度图

(四) 冲击韧度和断裂韧度

对板厚为30mm的5083-O铝合金，在焊速为40mm/min规范下，进行了双道搅拌摩擦焊，用焊得的接头制备了比较大型试件，进行了接头的低温冲击韧性试验，试验结果如图2-31所示。

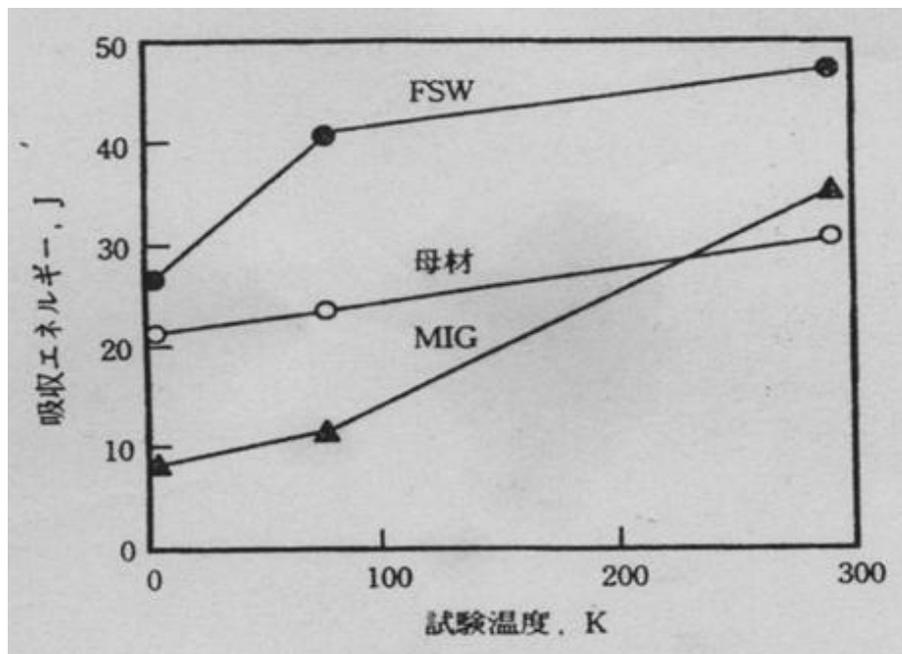


图2-31 5083铝合金搅拌摩擦焊接头的冲击试验结果

无论是在液氮温度，还是液氦温度下，搅拌摩擦焊接头的低温冲击韧性都高于母材，断面呈现韧窝状。而MIG焊接接头在室温以下的低温冲击韧性均低于母材。同时采用KIC来评价接头的断裂韧性，与冲击韧性实验一样，搅拌摩擦焊接头的断裂韧度值高于母材，而在低温下发生晶界断裂。

一般来说，铝的搅拌摩擦焊焊缝金属承受载荷的能力，等于或高于母材在垂直于轧制方向的承载能力。板厚为5mm多种铝合金的搅拌摩擦焊接头，在室温下做了尖端裂纹张开位移CTOD (δ_5) 试验，其结果如表2-4所示。

表2-4 各种铝合金的搅拌摩擦焊接头断裂韧性值

CTOD (δ_5) m /mm			
合金	母材	搅拌摩擦焊	
		焊缝	塑性流动区和热影响区
5005 H14 (板厚: 3mm)	0.43	1.62	1.47
	0.34	1.68	1.52
	0.29	1.41	1.20
2020 T351 (板厚: 5mm)	0.31	0.23	0.21
	0.29	0.23	0.18
	0.29	0.21	—
6061 H6 (板厚: 5mm)	0.28	1.01	0.62
	0.31	0.95	0.66
	0.24	0.92	0.61
7020 T6 (板厚: 5mm)	0.41	0.52	评价中
	0.39	0.44	
	0.39	—	

断裂韧性试验采用在通常尺寸的试件 (CT50, a/w为0.5) 上预先开一疲劳尖端裂纹。从表中可见搅拌摩擦焊焊缝区都有良好的断裂韧性。7020铝合金搅拌摩擦焊的焊缝区，尖端张开位移CTOD最高值大于母材的0.39mm。而2024硬铝合金搅拌摩擦焊的焊缝区CTOD最高值稍微低于母材。搅拌摩擦焊的焊缝区具有良好的断裂韧性，其原因是搅拌摩擦焊的焊缝组织晶粒细化的结果。

(五) 应力腐蚀裂纹

7000系硬铝是制造飞机用的材料。对其以下两种工艺的搅拌摩擦焊接头，进行了应力腐蚀裂纹试验，一是先时效后进行搅拌摩擦焊；二是先搅拌摩擦焊后进行时效处理。试验结果表明，焊后时效处理的焊缝组织中析出许多微细的 η 相，具有良好抗应力腐蚀裂纹的性能；而先时效后再进行搅拌摩擦焊时，由于焊缝组织中析出的微细 η 相，再固溶时产生溶解，因而焊缝产生了应力腐蚀裂纹。

五 搅拌摩擦焊的应用

搅拌摩擦焊经历十几年的研究发展，已经进入工业化应用阶段。搅拌摩擦焊在美国的宇航工业、欧洲的船舶制造业、日本的高速列车制造等制造领域得到了非常成功的应用。

船舶制造和海洋工业是搅拌摩擦焊首先获得应用的领域，主要应用于船舶零部件的焊接上，如甲板、侧板、防水壁板和地板；还有船体外壳和主体结构件等。已成功焊接了6m×16m的大型铝合金船甲板。此甲板采用厚度甲板6mm、宽为200-400mm的6082-T6铝合金进行纵缝拼焊成。

在航空制造方面，搅拌摩擦焊在飞机制造领域的开发和应用还处于试验阶段。主要利用FSW实现飞机蒙皮和桁梁、筋条、加强件之间的连接，以及框架之间的连接。图2-32 是欧洲计划用搅拌摩擦焊焊接的空中列车A319机、A321机和大型空中列车A380的机身结构图。

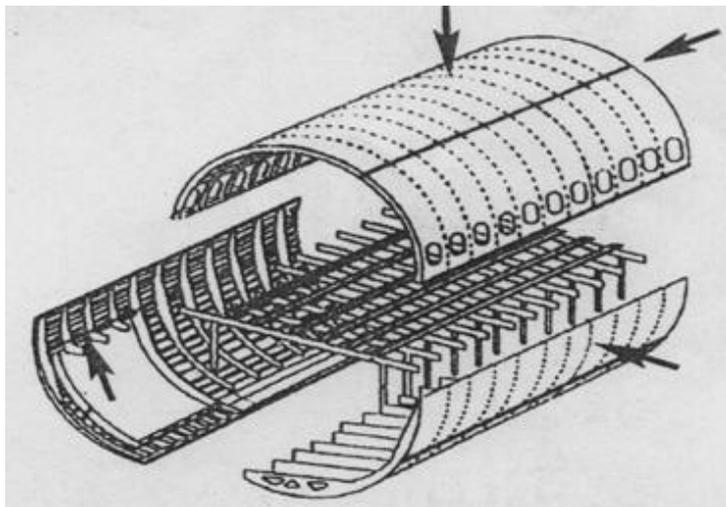


图2-32 搅拌摩擦焊焊接的空中列车

机身结构（图中箭头所指）

在航天领域，搅拌摩擦焊已经成功应用在火箭和航天飞机助推燃料筒体的纵向对接焊缝和环向搭接接头的焊接，如图2-33所示。用ESAB公司生产的称为SuperStir的搅拌摩擦焊机焊接了直径2.4m、板厚22.2mm、型号为2014-T6铝合金 δ 火箭燃料筒的纵缝，与MIG焊相比，搅拌摩擦焊缺陷率很低，MIG焊焊缝长832cm出现一个缺陷，而搅拌摩擦焊焊缝长7620cm出现一个缺陷，相当MIG焊的1/10。最近在 δ IV火箭中搅拌摩擦焊焊接的1200m长焊缝中无任何缺陷出现。



图2-33 搅拌摩擦焊焊接的

运载火箭低温燃料筒

在铁道车辆中，搅拌摩擦焊已经用来制造高速列车、货车车厢、地铁车厢和有轨电车等；搅拌摩擦焊为汽车轻合金结构的制造也提供了巨大的可能。图2-34为高速列车用结构25m长的搅拌摩擦焊焊缝。

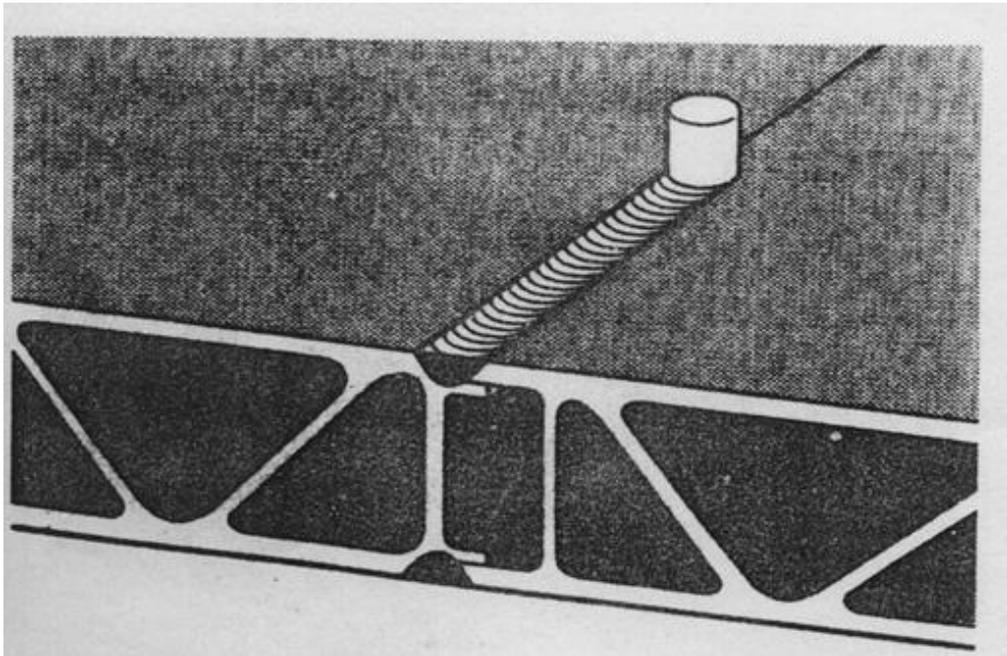


图2-34 日本新干线高速列车结构

在建筑工业方面，采用搅拌摩擦焊焊接了蜂窝状结构的大型地面。面板厚为2.5mm、翅板厚为5mm、中心高为100mm，焊接规范为搅拌头转速1500rpm，焊接速度250 mm/min。此外，搅拌摩擦焊在铝合金桥梁和铝合金、镁合金、铜合金的装饰板的制造中获得了应用。

在电子工业方面，搅拌摩擦焊已用于大型铝合金散热片的焊接，使散热片具有很好的热性能和耐振动特性。

铜的熔点和热传导率比铝高，铜及铜合金采用一般熔焊方法也是极困难的。在欧洲用搅拌摩擦焊制作了大型铜容器，用来储藏高能放射性物质，将盖和筒体焊接在一起，熔深为58mm，搅拌头的肩部直径为60mm，接头附近的温度高达750°C。与非真空电子束焊相比，非真空电子束焊的焊速为254mm/min，而搅拌摩擦焊为100.4mm/min，焊速较慢，但没增加热输入，所以能满足要求。

为了实现搅拌摩擦焊的三维空间焊接，应积极研制和开发机器人搅拌摩擦焊，因受机器人臂的刚性和载荷能力的限制，目前有报道开发了缺陷修补的机器人搅拌摩擦焊。采用3kw的马达作为搅拌头的驱动，机器人臂载荷限制在150kg，搅拌头的转速为1000~1600rpm，焊速350mm/min。采用机器人搅拌摩擦焊焊接了6061-T6铝合金，接头强度为230Mpa，修补焊缝的强度为225 Mpa，其机械性能达到母材的55%~60%。

随着人们对搅拌摩擦焊技术认识的提高，预计在不远的将来，铝合金材料的连接将主要由搅拌摩擦焊来完成，尤其在运载火箭、高速铝合金列车、铝合金高速快艇、全铝合金汽车等项目中搅拌摩擦焊技术将会占到主导地位。

发布:吕小默 | 分类:技术动态 | 评论:0 | 浏览:1

发表留言:

名称(*)

邮箱

网站链接

验证(*) 

正文(*) (留言最长字数:1000)

记住我,下次回复时不用重新输入个人信息

◎欢迎参与讨论, 请在这里发表您的看法、交流您的观点。

[« 2019年9月 »](#)

日 一 二 三 四 五 六

1 2 3 4 5 6 [7](#)

8 9 10 11 12 13 14

15 16 17 [18](#) 19 20 21

22 23 24 25 26 27 28

29 30

控制面板

您好,吕小默 (管理员)

[\[后台管理\]](#) [\[新建文章\]](#)

网站分类

- [网站公告 \(1\)](#)
- [行业新闻 \(12\)](#)
- [技术动态 \(34\)](#)
- [国际标准 \(6\)](#)
- [国内标准 \(8\)](#)
- [国外标准 \(2\)](#)
- [联系我们 \(2\)](#)

友情链接

- [DBS主机](#)
- [中国焊接信息网](#)
- [搅拌头](#)
- [焊接杂志](#)
- [焊接学报](#)
- [电焊机杂志](#)
- [焊接云网](#)
- [谷歌镜像1](#)
- [谷歌镜像2](#)
- [美国BTI](#)

- [英国TWI](#)
- [赛融公司](#)

图标汇集

- 
-  订阅我

最新留言

文章归档

- 2019年
[9月\(4\)](#) [8月\(10\)](#) [7月\(2\)](#) [6月\(16\)](#) [5月\(14\)](#)
- 2017年
[9月\(1\)](#) [8月\(1\)](#) [7月\(1\)](#)
- 2015年
[12月\(1\)](#)
- 2014年
[2月\(15\)](#)

搜索

网站收藏

- [ZBlogger社区](#)
- [菠萝的海](#)
- [Z-Blog微博](#)

Powered By [Z-Blog 2.2 Prism Build 140101](#)

Copyright © www.fsw.net.cn Some Rights Reserved. 搅拌摩擦焊网 版权所有 中华人民共和国工业和信息化部ICP备案:[鲁ICP备16009846号-2](#) 51La