

welcome to www.chinaweld.com.cn [英文版]



首 页 || 关于我们 || 新闻中心 || 焊接工艺 || 切割工艺 || 应用实例 || 供求信息 || 招聘信息 || 论 坛 || 联系我们

您现在的位置是：中国焊接网

摩擦焊

双击自动滚屏

发布者：chinaweld 发布时间：2006-2-7 阅读：1616次

摩 擦 焊

摩擦焊是利用焊件相对摩擦运动产生的热量来实现材料可靠连接的一种压力焊方法。其焊接过程是在压力的作用下，相对运动的待焊材料之间产生摩擦，使界面及其附近温度升高并达到热塑性状态，随着顶锻力的作用界面氧化膜破碎，材料发生塑性变形与流动，通过界面元素扩散及再结晶冶金反应而形成接头。

一、摩擦焊原理及分类

1. 1 摩擦焊的分类

摩擦焊的方法很多，一般根据焊件的相对运动和工艺特点进行分类，主要方法如图1所示。在实际生产中，连续驱动摩擦焊、相位控制摩擦焊、惯性摩擦焊和搅拌摩擦焊应用的比较普遍。

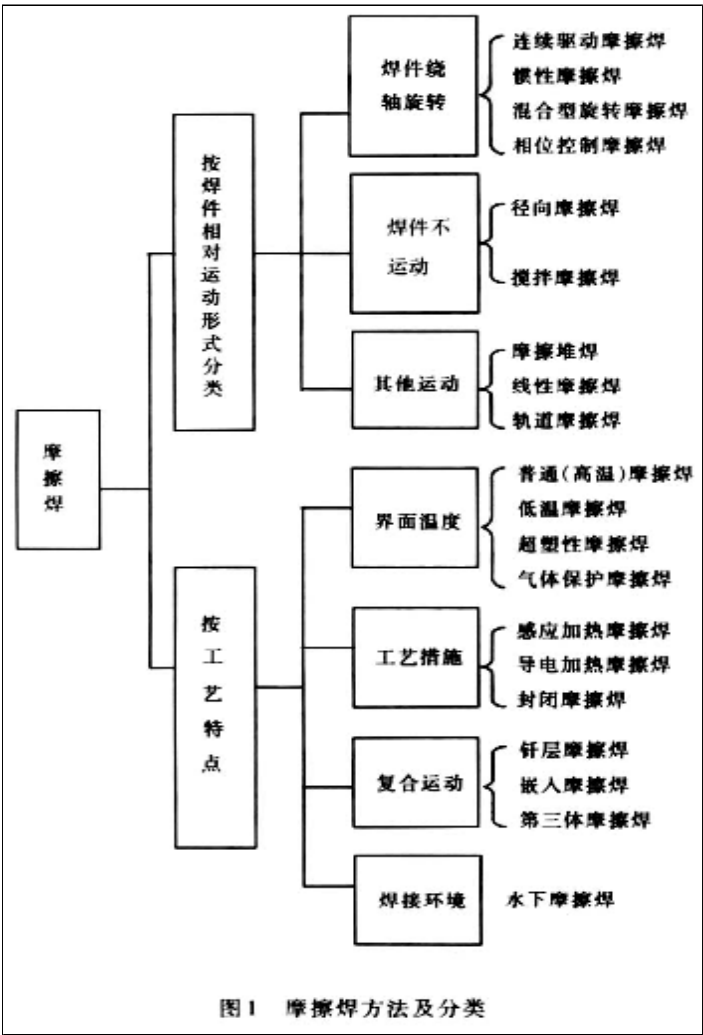


图1 摩擦焊方法及分类

通常所说的摩擦焊主要是指连续驱动摩擦焊、相位控制摩擦焊、惯性摩擦焊和轨道摩擦焊，统称为传统摩擦焊，它们的共同特点是靠两个待焊件之间的相对摩擦运动产生热能。而搅拌摩擦焊、嵌入摩擦焊、第三体摩擦焊和摩擦堆焊，是靠搅拌头与待焊件之间的相对摩擦运动产生热量而实现焊接。

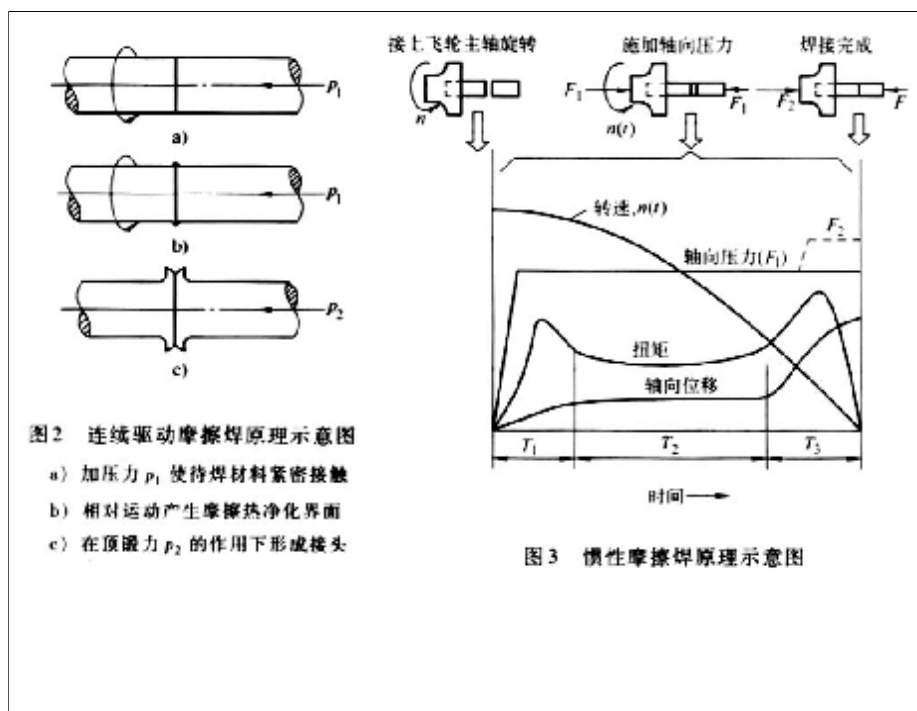
1. 2 摩擦焊原理

1. 连续驱动摩擦焊

连续驱动摩擦焊原理如图2所示，是在摩擦压力的作用下被焊界面相互接触，通过相对运动进行摩擦，使机械能转变为热能，利用摩擦热去除界面的氧化物，在顶锻力的作用下形成可靠接头。该过程所产生的摩擦加热功率为

$$P=\mu k p v$$
 (1)

式中 P——摩擦加热功率；
μ——摩擦系数；
k——系数；
p——摩擦压力；
v——摩擦相对运动速度。



2. 惯性摩擦焊

图3是惯性摩擦焊接示意图，工件的旋转端被夹持在飞轮里，焊接过程开始时首先将飞轮和工件的旋转端加速到一定的转速，然后飞轮与主电机脱开，同时，工件的移动端向前移动，工件接触后开始摩擦加热。在摩擦焊加热过程中，飞轮受摩擦扭矩的制动作用，转速逐渐降低，当转速为零时，焊接过程结束。惯性摩擦焊的飞轮储存的能量 A 与飞轮转动惯量 J 和飞轮角速度 ω 的关系为

$$A = \frac{J\omega^2}{2} \quad (2)$$

$$J = \frac{GR^2}{2g} \quad (3)$$

对实心飞轮

式中 G ——飞轮重力；

R ——飞轮半径；

g ——重力加速度。

惯性摩擦焊的主要特点是恒压、变速，它将连续驱动摩擦焊的加热和顶锻结合在一起。在实际生产中，可通过更换飞轮或不同尺寸飞轮的组合来改变飞轮的转动惯量，从而改变加热功率。

3. 相位摩擦焊

相位摩擦焊主要用于相对位置有要求的工件，如六方钢、八方钢、汽车操纵杆等，要求工件焊后棱边对齐、方向对正或相位满足要求。在实际应用中，主要有机械同步相位摩擦焊、插销配合摩擦焊和同步驱动摩擦焊。

(1) 机械同步相位摩擦焊 如图4所示，焊接前压紧校正凸轮，调整两工件的相位并夹持工件，将静止主轴制动后松开并校正凸轮，然后开始进行摩擦焊接。摩擦结束时，切断电源并对驱动主轴制动，在主轴接近停止转动前松开制动器，此时立即压紧校正凸轮，工件间的相位得到保证，然后进行顶锻。

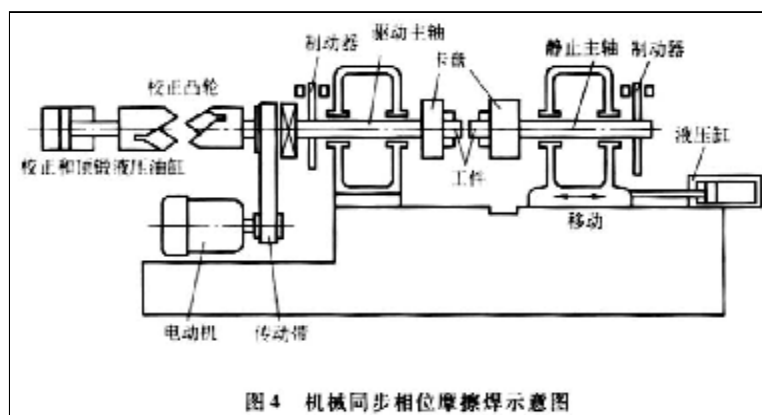


图4 机械同步相位摩擦焊示意图

(2) 插销配合摩擦焊 如图5所示，相位确定机构由插销、插销孔和控制系统组成。插销位于尾座主轴上，尾座主轴可自由转动，在摩擦加热过程中制动器B将其固定。加热过程结束时，使主轴制动，当计算机检测到主轴进入最后一转时，给出信号，使插销进入插销孔，与此同时，松开尾座主轴的制动器B，使尾座主轴能与主轴一起转动，这样，即可保证相位，又可防止插销进入插销孔时引起冲击。

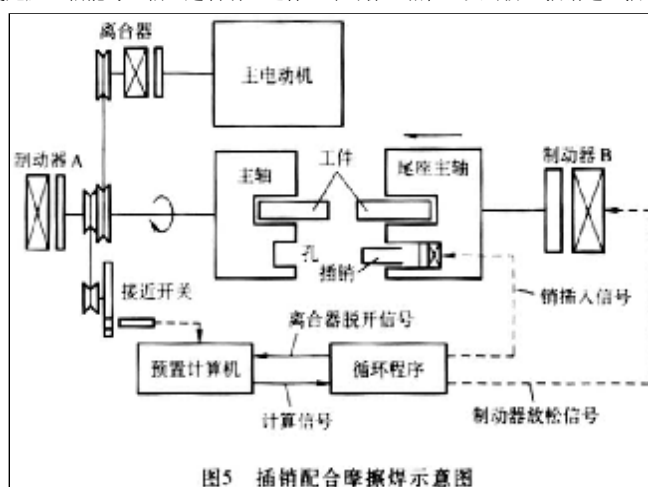


图5 插销配合摩擦焊示意图

(3) 同步驱动摩擦焊 采用两个电动机驱动，为了保证工件两端旋转时的相位关系，两主轴通过齿轮、同步杆和花键作同步旋转，在整个焊接过程保持工件的相位关系不变。

4. 径向摩擦焊

径向摩擦焊的原理如图6所示，待焊的管子2开有坡口，管内套有芯棒，然后装上带有斜面的旋转圆环1，焊接时圆环旋转并向两个管子施加径向摩擦压力 P 。当摩擦加热过程结束时，圆环停止旋转，并向圆环施加顶锻压力 P_0 。由于被焊接的管子本身不转动，管子内部不产生飞力，全部焊接过程大约需要10s，因此主要用于管子的现场装配焊接。

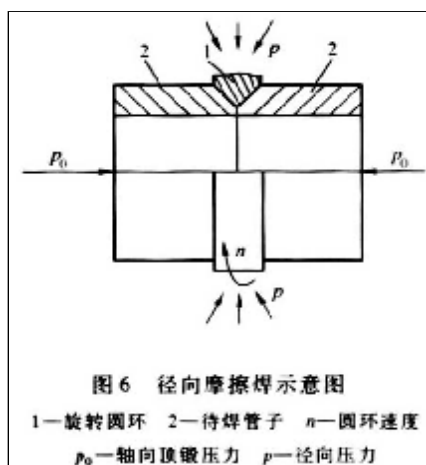
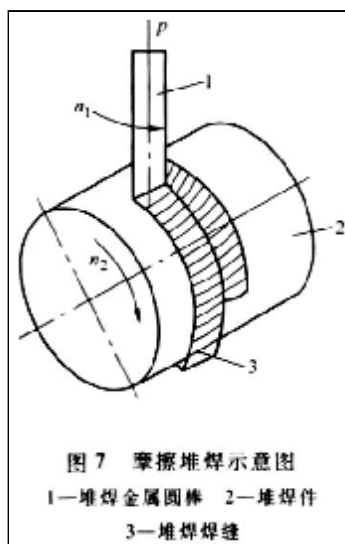


图6 径向摩擦焊示意图

1—旋转圆环 2—待焊管子 n —圆环速度
 P_0 —轴向顶锻压力 P —径向压力

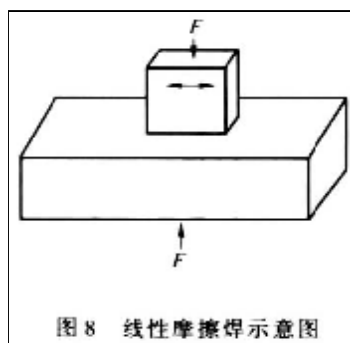
5. 摩擦堆焊

摩擦堆焊的原理如图7所示。堆焊时，堆焊金属圆棒1以高速 n_1 旋转，堆焊件（母材）也同时以转速 n_2 旋转，在压力 P 的作用下圆棒与母材摩擦生热。由于待堆焊的母材体积大，导热性好，冷却速度快，使堆焊金属过渡到母材上，当母材相对于堆焊金属圆棒转动或移动时形成堆焊焊缝。



6. 线性摩擦焊

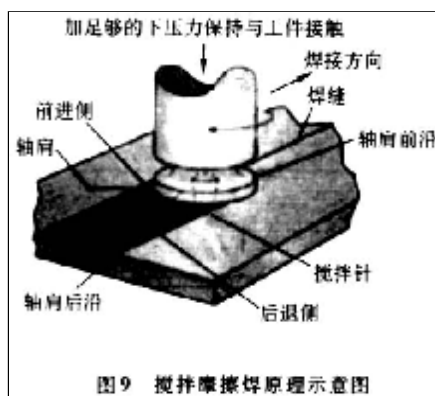
线性摩擦焊原理如图8所示。待焊的两个工件一个固定，另一个以一定的速度作往复运动，或在压力 F 的作用下两工件的界面摩擦产生热量，从而实现焊接。该方法的主要优点是，不管工件是否对称，均可进行焊接。近年来，线性摩擦焊的研究较多，主要用于飞机发动机涡轮盘与叶片的焊接，还用于大型塑料管道的现场焊接安装。



7. 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊（FSW）是英国焊接研究所（简称TWI）于1991年发明的一种用于低熔点合金板材焊接的固态连接技术。它是由摩擦焊派生发展起来的。由于这种工艺能进行板材的对接，并具有固相焊接接头独特的优点，因而在焊接高强度铝合金板材方面获得成功。

搅拌摩擦焊的工作原理如图9所示，将一个耐高温硬质材料制成的一定形状的搅拌针旋转深入到两被焊材料连接的边缘处，搅拌针调整旋转，在两焊件连接边缘产生大量的摩擦热，从而在连接处产生金属塑性软化区，该塑性软化区在搅拌针的作用下受到搅拌、挤压，并随着搅拌针的旋转沿焊缝向后流动，形成塑性金属流，并在搅拌针离开后的冷却过程中，受到挤压而形成固相焊接接头。



二、连续驱动摩擦焊

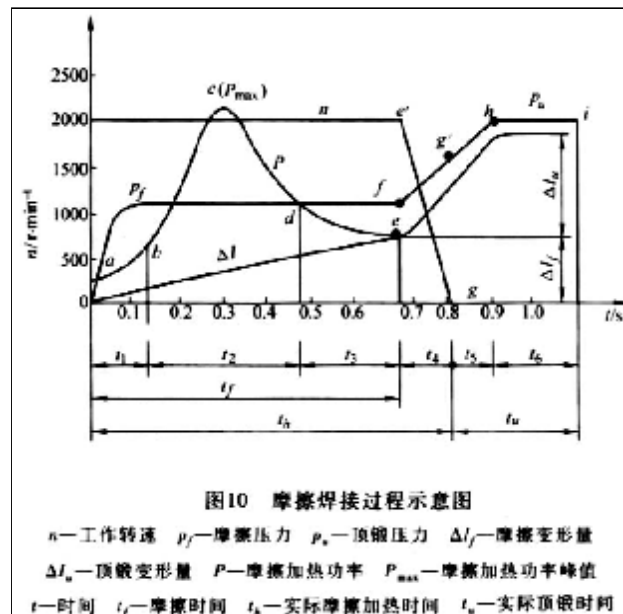
2.1 连续驱动摩擦焊基本原理

1. 焊接过程

连续驱动摩擦焊接时，通常将待焊工件两端分别固定在旋转夹具和移动夹具内，工件被夹紧后，位于滑台上的移动夹具随滑台一起向旋转端移动，移动至一定距离后，旋转端工件开始旋转，工件接触后开始摩擦加热。此后，则可进行不同的控制，如时间控制或摩擦缩短量（又称摩擦变形量）控制。当达到设定值时，旋转停止，顶锻开始，通常施加较大的顶锻力并维持一段时间，然后，旋转夹具松开，滑台后

退,当滑台退到原位置时,移动夹具松开,取出工件,至此,焊接过程结束。

对于直径为16mm的45号钢,在2000r/min转速、8.6MPa摩擦压力、0.7s摩擦时间和161MPa的顶锻压力下,整个摩擦焊接过程如图10所示。从图中可知,摩擦焊接过程的一个周期可分成摩擦加热过程和顶锻焊接过程两部分。摩擦加热过程又可以分成四个阶段,即初始摩擦、不稳定摩擦、稳定摩擦和停车阶段。顶锻焊接过程也可以分为纯顶锻和顶锻维持两个阶段。



(1) 初始摩擦阶段 (t_1) 此阶段是从两个工件开始接触的a点起,到摩擦加热功率显著增大的b点止。摩擦开始时,由于工件待焊表面不平,以及存在氧化膜、铁锈、油脂、灰尘和吸附气体等,使得摩擦系数很大。随着摩擦压力的逐渐增大,摩擦加热功率也慢慢增加,最后摩擦焊接表面温度将升到200~300℃左右。

在初始摩擦阶段,由于两个待焊工件表面互相作用着较大的摩擦压力和具有很高的相对运动速度,使凹凸不平的表面迅速产生塑性变形和机械挖掘现象。塑性变形破坏了界面的金属晶粒,形成一个晶粒细小的变形层,变形层附近的母材也沿摩擦方向产生塑性变形。金属互相压入部分的挖掘,使摩擦界面出现同心圆痕迹,这样又增大了塑性变形。因摩擦表面不平,接触不连续,以及温度升高等原因,使摩擦表面产生振动,此时空气可能进入摩擦表面,使高温下的金属氧化。但由于 t_1 时间很短,摩擦表面的塑性变形和机械挖掘又可以破坏氧化膜,因此,对接头的影响不大。当焊件断面为实心圆时,其中心的相对旋转速度为零,外缘速度最大,此时焊接表面金属处于弹性接触状态,温度沿径向分布不均匀,摩擦压力在焊接表面上呈双曲线分布,中心压力最大,外缘最小。在压力和速度的综合影响下,摩擦表面的加热往往从距圆心半径2/3左右的地方首先开始。

(2) 不稳定摩擦阶段 (t_2) 不稳定摩擦阶段是摩擦加热过程的一个主要阶段,该阶段从摩擦加热功率显著增大的b点起,越过功率峰值c点,到功率稳定值的d点为止。由于摩擦压力较初始摩擦阶段增大,相对摩擦破坏了焊接金属表面,使纯净的金属直接接触。随着摩擦焊接表面的温度升高,金属的强度有所降低,而塑性和韧性却有很大的提高,增大了摩擦焊接表面的实际接触面积。这些因素都使材料的摩擦系数增大,摩擦加热功率迅速提高。当摩擦焊接表面的温度继续增高时,金属的塑性增高,而强度和韧性都显著下降,摩擦加热功率也迅速降低到稳定值d点。因此,摩擦焊接的加热功率和摩擦扭矩都在c点呈现出最大值。在45号钢的不稳定摩擦阶段,待焊表面的温度由200~300℃升高到1200~1300℃,而功率峰值出现在600~700℃左右。这时摩擦表面的机械挖掘现象减少,振动降低,表面逐渐平整,开始产生金属的粘结现象。高温塑性状态的局部金属表面互相焊合后,又被工件旋转的扭力矩剪断,并彼此过渡。随着摩擦过程的进行,接触良好的塑性金属封闭了整个摩擦面,并使之与空气隔开。

(3) 稳定摩擦阶段 (t_3) 稳定摩擦阶段是摩擦加热过程的主要阶段,其范围从摩擦加热功率稳定值的d点起,到接头形成最佳温度分布的e点为止,这里的e点也是焊机主轴开始停车的时间点(可称为e'点),也是顶锻压力开始上升的点(图10的f点)以及顶锻变形量的开始点。在稳定摩擦阶段中,工件摩擦表面的温度继续升高,并达到1300℃左右。这时金属的粘结现象减少,分子作用现象增强。稳定摩擦阶段的金属强度极低,塑性很大,摩擦系数很小,摩擦加热功率也基本上稳定在一个很低的数值。此外,其它连接参数的变化也趋于稳定,只有摩擦变形量不断增大,变形层金属在摩擦扭矩的轴向压力作用下,从摩擦表面挤出形成飞边,同时,界面附近的高温金属不断补充,始终处于动平衡状态,只是接头的飞边不断增大,接头的热影响区变宽。

(4) 停车阶段 (t_4) 停车阶段是摩擦加热过程至顶锻焊接过程的过渡阶段,是从主轴和工件一起开始停车减速的e'点起,到主轴停止转动的g点止。从图10可知,实际的摩擦加热时间从a点开始,到g点结束,即 $t_f = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ 。尽管顶锻压力从f点施加,但由于工件并未完全停止旋转,所以g'点以前的压力,实质上还是属于摩擦压力。顶锻开始后,随着轴向压力的增大,转速降低,摩擦扭矩增大,并再次出现峰值,此值称为后峰值扭矩。同时,在顶锻力的作用下,接头中的高温金属被大量挤出,工件的变形量也增大。因此,停车阶段是摩擦焊接的重要过程,直接影响接头的焊接质量,要严格控制。

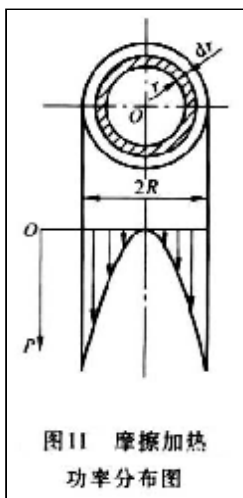
(5) 纯顶锻阶段 (t_5) 从主轴停止旋转的 g (或 g')点起,到顶锻压力上升至最大位的 h 点止。在这个阶段中,应施加足够大的顶锻压力,精确控制顶锻变形量和顶锻速度,以保证获得优异的焊接质量。

(6) 顶锻维持阶段 (t_6) 该阶段从顶锻压力的最高点 h 开始,到接头温度冷却到低于规定值为止。在实际焊接控制和自动摩擦焊机的程序设计时,应精密控制该阶段的时间 t_u ($t_u = t_3 + t_4$)。在顶锻维持阶段,顶锻时间、顶锻压力和顶锻速度应相互配合,以获得合适的摩擦变形量 Δl_f 和顶锻变形量 Δl_u 。在实际计算时,摩擦变形速度一般采用平均摩擦变形速度 ($\Delta l_f/t_f$),顶锻变形速度也采用其平均值 ($\Delta l_u/(t_4+t_5)$)。

总之,在整个摩擦焊接过程中,待焊的金属表面经历了从低温到高温摩擦加热,连续发生了塑性变形、机械挖掘、粘接和分子连接的过程变化,形成了一个存在于全过程的高速摩擦塑性变形层,摩擦焊接时的产热、变形和扩散现象都集中在变形层中。在停车阶段和顶锻焊接过程中,摩擦表面的变形层和高温区金属被部分挤碎排出,焊缝金属经受锻造,形成了质量良好的焊接接头。

2. 摩擦焊接产热

摩擦焊接过程中,两工件摩擦表面的金属质点,在摩擦压力和摩擦扭矩的作用下,沿工件径向与切向力的合成方向作相对高速摩擦运动,在界面形成了塑性变形层。该变形层是把摩擦的机械功转变成热能的热源,它的温度高、能量集中,具有很高的加热效率。



(1) 摩擦加热功率 摩擦加热功率的大小及其随摩擦时间的变化,决定了焊接温度及其温度场的分布,直接影响接头的加热过程、焊接生产率和焊接质量,同时也关系到摩擦焊机的设计与制造。摩擦加热功率就是焊接热源的功率,它的计算与分布如下:

对圆形的焊接工件,假设沿摩擦表面半径方向的摩擦压力 p_f 和摩擦系数 μ 为常数。为了求出功率分布,在摩擦表面上取一半径为 r 的圆环,该环的宽度为 dr (图11),其面积为 dA ,则 $dA = 2\pi r dr$,则作用在圆环上的摩擦力为

$$dF = p_f \mu dA = 2\pi p_f \mu r dr \quad (4)$$

以 O 点为圆心的摩擦扭矩为

$$dM = r dF = 2\pi p_f \mu r^2 dr \quad (5)$$

圆环上的摩擦加热功率为

$$dP \approx 1.02 dM \times 10^{-3} n \quad (6)$$

摩擦加热功率沿接合面半径 R 方向上的分布 dP/dr 如图11所示。加热功率在圆心处为零,在外边缘最大。

将式(5)、式(6)积分,可以得到摩擦焊接表面上总的摩擦扭矩和加热功率为

$$M = 2\pi p_f \mu R^3 / 3 \quad (7)$$

$$P = 2 \times 10^{-3} \pi p_f \mu R^3 / 3 \quad (8)$$

式中 M ——摩擦扭矩;

P ——摩擦加热功率;

p_f ——摩擦压力;

n ——工件转速;

μ ——摩擦系数;

r ——圆环半径;

R ——待焊工件半径。

实际上 $p_f(r)$ 不是常数,在初始摩擦阶段和不稳定摩擦阶段的前期,摩擦表面还没有全面产生塑性变形,主要是弹性接触,摩擦压力在中心高,外圆低。因此沿摩擦焊接表面半径 R 的摩擦加热功率最大值不在外圆,而在距圆心 $2/3R$ 左右的地方,这一点不仅符合计算结果,也被试验所证实。在稳定摩擦阶段,摩擦表面全部产生塑性变形,成为塑性接触时, $p_f(r)$ 才可以认为等于常数。此外, $\mu(r)$ 在初始摩擦阶段和不稳定摩擦阶段也不是常数,由高温金属组成的高速塑性变形层热源,在距圆心 $1/2 \sim 1/3$ 半径处形成环状加热带,随着摩擦加热的进

行, 环状加热带向圆心和外圆迅速展开, 当进入稳定摩擦阶段时, 摩擦表面的温度才趋于平衡, 此时可以认为 $\mu(r)$ 是常数。

摩擦表面上总的加热热量为

$$Q = \int_{t_0}^{t_n} P dt = k \int_{t_0}^{t_n} M n dt \quad (9)$$

式中 Q ——接合面总的摩擦加热热量;

t ——摩擦时间;

t_0 ——摩擦加热开始时间 (设 $t_0=0$);

t_n ——实际摩擦加热时间;

k ——常数。

(2) 摩擦焊接表面温度 摩擦焊接表面的温度会直接影响接头的加热温度、温度分布、摩擦系数、接头金属的变形与扩散。其加热面的温度由摩擦加热功率和散热条件所决定。

在焊接圆断面工件时, 摩擦焊接热源被认为是一个线性传播的连续均布的面状热源。如果不考虑向周围空间的散热, 根据雷卡林的焊接热过程计算公式, 同种金属摩擦焊接表面的温度为

$$T(0, t) = q_2 \sqrt{t} / \sqrt{\pi \lambda c} \quad (10)$$

式中 $T(0, t)$ ——摩擦焊接表面温度 (0 表面热源中心, t 是摩擦加热时间);

q_2 ——单位面积上的加热热量;

λ ——焊件热导率;

c ——焊件热容。

在式 (10) 中, 如果选定焊接所需要的温度为 T_w , 热源温度升高到 T_w 所需要的摩擦加热时间为 t_f' , 则该式可以写成

$$t_f' q_2^2 = c \pi \lambda T_w^2 = \text{常数} \quad (11)$$

从式 (11) 可以看出, 当 T_w 和 t_f' 确定以后, 能够计算出 q_2 的数值, 并可以根据 q_2 的要求选择焊接参数。式 (10) 和式 (11) 适合于计算以稳定摩擦阶段为主的摩擦加热过程。

实际上, 不论何种材料的摩擦焊接, 摩擦表面的最高温度是有限制的, 不能超过焊件材料的熔点, 此外, 在采用式 (10) 和式 (11) 进行运算时, 还应该考虑到摩擦焊接表面温度与加热功率之间的内在联系、相互制约及摩擦加热功率随摩擦时间变化的特殊规律。

2.2 摩擦焊焊接工艺

1. 工艺特点

1) 焊接施工时间短, 生产效率高。例如发动机排气门双头自动摩擦焊机的生产率可达800~1200件/h。对于外 $\phi 127\text{mm}$ 、内径 $\phi 95\text{mm}$ 的石油钻杆与接头的焊接, 连续驱动摩擦焊仅需要十几秒钟。

2) 因焊接热循环引起的焊接变形小, 焊后尺寸精度高, 不用焊后校形和消除应力。用摩擦焊生产的柴油发动机预燃烧室, 全长误差为 $\pm 0.1\text{mm}$; 专用焊机可保证焊后的长度公差为 $\pm 0.2\text{mm}$, 偏心度为 0.2mm 。

3) 机械化、自动化程度高, 焊接质量稳定。当给定焊接条件后, 操作简单, 不需要特殊的焊接技术人员。

4) 适合各类异种材料的焊接, 对常规熔化下不能焊接的铝-钢、铝-铜、钛-铜、金属间化合物-钢等都可以进行焊接。

5) 可以实现同直径、不同直径的棒材和管材的焊接。

6) 焊接时不产生烟雾、弧光以及有害气体等, 不污染环境。同时, 与闪光焊相比, 电能节约5~10倍。

但是, 摩擦焊也具有如下缺点与局限性:

1) 对非圆形截面焊接较困难, 所需设备复杂; 对盘状薄零件和薄壁管件, 由于不易夹固, 施焊也比较困难。

2) 对形状及组装位置已经确定的构件, 很难实现摩擦焊接。

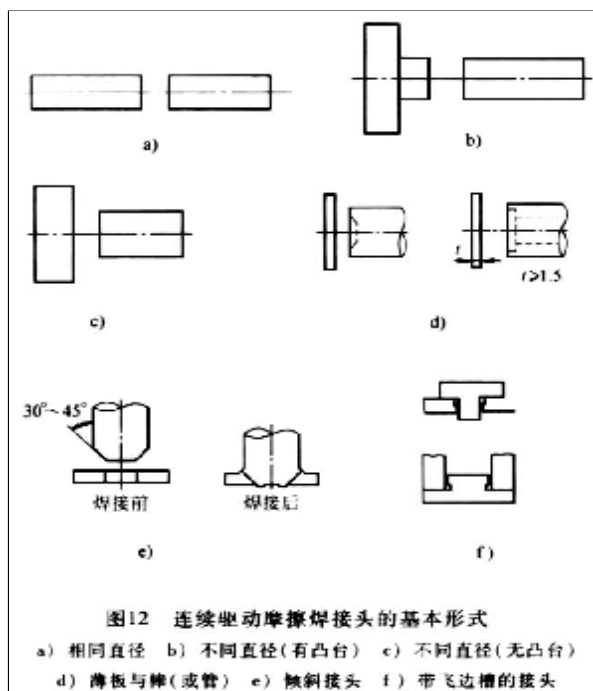
3) 接头容易产生飞边, 必须焊后进行机械加工。

4) 夹紧部位容易产生划伤或夹持痕迹。

2. 接头形式设计

连续驱动摩擦焊可以实现棒材-棒材、管材-管材、棒材-管材、棒材-板材及管材-板材的可靠连接。接合面形状对获得高质量的接头非常重要, 图12a给出了常用的接头形式。图12a的接头形式具有相同形状的接合面, 如果是同种材料, 两者的产热及散热均相同, 温度场对称, 可以获得较宽的焊接参数和得到可靠性高的接头。如果是异种材料连接, 因材料的物理性能不同, 产热及散热不一样, 温度场不对称, 需要在寻找合适的焊接参数和质量上下功夫。在实际生产中类似图12b的接头形式较多, 两个待焊件的直径不同, 此时需将直径大的材料进行焊前加工出凸台, 使接合部位的形状相同。为了节省焊前加工的生产成本, 可以采用图12c的接头形式直接进行焊接, 但应保持使大直径的接合面不产生倾斜; 同时, 要增大摩擦压力, 必须在短时间内停止相对运动, 要求设备要有好的刚性。薄板和棒材的摩擦焊接头形式如图12d所示, 对设备的同心度要求高。如果是异种材料连接, 高温强度好的母材应采用较小的直径。12e是具有斜度的接头形式, 主要用于机械设备中

齿轮的摩擦焊。3-12f的接头允许一定量的飞边存在，主要用于柴油机燃烧室喷嘴、推土机下部动轮的制造。



连续驱动摩擦焊接头形式在设计时主要遵循以下原则：

- 1) 在旋转式摩擦焊的两个工件中，至少要有有一个工件具有回转断面。
- 2) 焊接工件应具有较大的刚度，夹紧方便、牢固，要尽量避免采用薄管和薄板接头。
- 3) 同种材料的两个焊件断面尺寸应尽量相同，以保证焊接温度分布均匀和变形层厚度相同。
- 4) 一般倾斜接头应与中心线成 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的斜面。
- 5) 对锻压温度或热导率相差较大的异种材料焊接时，为了使两个零件的顶锻相对平衡，应调整界面的相对尺寸；为了防止高温下强度低的工件端面金属产生过多的变形流失，需要采用模子封闭接头金属。
- 6) 为了增大焊缝面积，可以把焊缝设计成搭接或锥形接头。
- 7) 焊接大断面接头时，为了降低加热功率峰值，可以采用将焊接端面倒角的方法，使摩擦面积逐渐增大。
- 8) 对于棒—棒和棒—板接头，当中心部位材料被挤出形成飞边时要消耗更多的能量，而焊缝中心部位对扭矩和弯曲应力的承担又很少，所以，如果工件条件允许，可将一个或两个零件加工成具有中心孔洞，这样，既可用较小功率的焊机，又可提高生产率。
- 9) 待焊表面应避免渗氮、渗碳等。
- 10) 设计接头形式的同时，还应注意工件的长度、直径公差、焊接端面的垂直度、不平度和表面粗糙度。

3. 摩擦焊焊接参数

(1) 连续驱动摩擦焊 主要参数有转速、摩擦压力、摩擦时间、摩擦变形量、停车时间、顶锻时间、顶锻压力、顶锻变形量。其中，摩擦变形量和顶锻变形量（总和为缩短量）是其他参数的综合反应。

1) 转速与摩擦压力。转速和摩擦压力直接影响摩擦扭矩、摩擦加热功率、接头温度场、塑性层厚度以及摩擦变形速度等。转速和摩擦压力的选择范围很宽，它们不同的组合可得到不同的规范，常用的组合有强规范和弱规范。强规范时，转速较低，摩擦压力较大，摩擦时间短；弱规范时，转速较高，摩擦压力小，摩擦时间长。

2) 摩擦时间。摩擦时间影响接头的加热温度、温度场和质量。如果时间短，则界面加热不充分，接头温度和温度场不能满足焊接要求；如果时间长，则消耗能量多，热影响区大，高温区金属易过热，变形大，飞边也大，消耗的材料多。碳钢工件的摩擦时间一般在 $1 \sim 40$ s范围内。

3) 摩擦变形量。摩擦变形量与转速、摩擦压力、摩擦时间、材质的状态和变形抗力有关。要得到牢靠的接头，必须有一定的摩擦变形量，通常选取的范围为 $1 \sim 10$ mm。

4) 停车时间。停车时间是转速由给定值下降到零时所对应的时间，直接影响接头的变形层厚度和焊接质量。当变形层较厚时，停车时间要短；当变形层较薄而且希望在停车阶段增加变形层厚度时，则可加长停车时间。

5) 顶锻压力、顶锻变形量和顶锻速度。顶锻压力的作用是挤出摩擦塑性变形层中的氧化物和其他有害杂质，并使焊缝得到锻压，结合牢靠，晶粒细化。顶锻压力的选择与材质、接头温度、变形层厚度以及摩擦压力有关。材料的高温强度高时，顶锻压力要大；温度高、变形层厚度小时，顶锻压力要小（较小的顶锻压力就可得到所需要的顶锻变形量）；摩擦压力大时，相应的顶锻压力要小一些。顶锻变形量是顶锻压力作用结果的具体反映，一般选取 $1 \sim 6$ mm。顶锻速度对焊接质量影响很大，如顶锻速度慢，则达不到要求的顶锻变形量，一般为 $10 \sim 40$ mm/s。

m/min。

(2) 对于惯性摩擦焊 在参数选取上连续驱动摩擦焊有所不同,主要的参数有起始转速、转动惯量和轴向压力。

1) 起始转速。起始转速具体反映在工件的线速度上,对钢-钢焊件,推荐的速度范围为152~456m/min。低速(< 91m/min)时,中心加热偏低,飞边粗大不齐,焊缝成漏斗状;中速(91~273m/min)焊接时,焊缝深度逐渐增加,边界逐渐均匀;如果速度大于360m/min时,焊缝中心宽度大于其他部位。

2) 转动惯量。飞轮转动惯量和起始转速均影响焊接能量。在能量相同的情况下,大而转速慢的飞轮产生顶锻变形量较小,而转速快的飞轮产生较大的顶锻变形量。

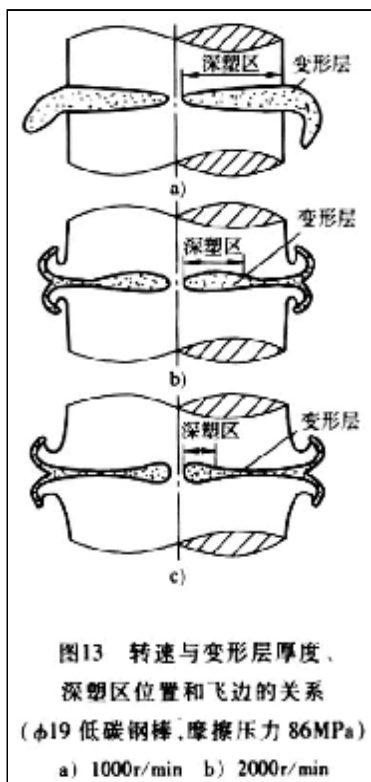
3) 轴向压力。轴向压力对焊缝深度和形貌的影响几乎与起始转速的影响相反,压力过大时,飞边量增大。

4. 焊接参数对接头质量的影响

以低碳钢的连续驱动摩擦焊接为例,介绍摩擦焊参数对接头质量的影响。

(1) 转速和摩擦压力 在摩擦焊接参数中,转速和摩擦压力是最主要的焊接参数。当工件直径一定时,转速代表摩擦速度。一般将达到焊接温度时的转速称为临界摩擦速度,为了使界面的变形层加热到金属材料的焊接温度,转速必须高于临界摩擦速度。一般来讲,低碳钢的临界摩擦速度为0.3m/s左右,平均摩擦速度的范围为0.6~3m/s。

在稳定摩擦阶段,转速对焊接表面的摩擦变形层厚度及深塑区的位置如图13所示。当转速为1000r/min时,由于外圆的摩擦速度大,外侧金属的温度升高,此时,摩擦表面的温度比高速摩擦时低,摩擦扭矩和摩擦变形速度增大,并移向外圆,因此外圆的变形层较中心厚。这时变形层金属非常容易流出摩擦表面之外,形成不对称的肥大飞边(13a)。这种接头的温度分布梯度大,变形层金属容易被大量挤出,焊缝金属迅速更新,能够有效地防止氧化。



当转速升高时,摩擦表面温度升高,摩擦扭矩和摩擦变形速度小,深塑区移动时,受到较大的阻碍,形成了对称的小薄翅状飞边(图13 c)。这种接头由于扭矩小,挤出的金属少,所以接头的温度分布较宽,变形层金属也容易氧化。

摩擦压力对焊接接头的质量有很大影响,为了产生足够的摩擦加热功率,保证摩擦表面的全面接触,摩擦压力不能太小。在稳定摩擦阶段,当摩擦压力增大时,摩擦扭矩增大,摩擦加热功率升高,摩擦变形速度增大,变形层加厚,深塑区增宽并向外圆移动,在压力的作用下形成粗大而不对称的飞边。摩擦压力大时,接头的温度分布梯度大,变形层金属不容易氧化。在摩擦加热过程中,摩擦压力一般为定值,但是为了满足焊接工艺的特殊要求,摩擦压力也可以不断上升,或采用两级或三级加压。

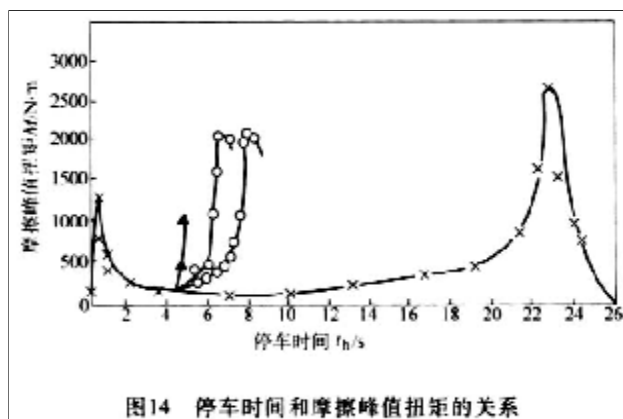
不同的转速与摩擦压力的组合,可以得到不同的焊接加热参数。摩擦焊接可选用的规范很宽,而最常用的组合方式有两种:一种是强规范,即转速较低,摩擦压力大,摩擦时间短;另一种是弱规范,即转速较高,摩擦压力小,摩擦时间长。

(2) 摩擦时间与摩擦变形量 摩擦时间决定了接头摩擦加热过程,直接影响接头的加热温度、温度分布和焊接质量。摩擦时间短时,焊接表面加热不完全,不能形成完整的塑性变形层,接头上的温度和温度分布不能满足焊接质量要求。摩擦时间过长,接头温度分布宽,高温区金属容易过热,摩擦变形量大,飞边大,消耗的加热能量多。选择摩擦时间时,一般希望在摩擦终了的瞬间,接头上有较厚的变形层或较宽的高温金属区,接头有较小的飞边;而在顶锻焊接过程中产生较大的顶锻变形量,使变形层的面积沿工件径向有很大的扩展,交中的高

温金属挤碎、挤出、产生一定的飞边。这样整个飞边的尺寸不大，但形状封闭圆滑，有利于改善接头的焊接质量。因此，碳钢在强规范焊接时，当摩擦加热功率越过极值、下降到稳定值左右时，就应立即停车，并进行顶锻焊接。在弱规范焊接时，通过一段较长时间的稳定摩擦以后，才能停车顶锻焊接。连续驱动摩擦焊的摩擦时间通常在1~40s之内。

当摩擦变形速度一定时，摩擦变形量与摩擦时间成正比，因此常常用摩擦变形量代替摩擦时间来控制摩擦加热过程。在焊接低碳钢时，摩擦变形量可在1~10mm的范围内选择。

(3) 停车时间 图14是停车时间与摩擦峰值扭矩的关系，由于停车时间对摩擦扭矩、变形层厚度和焊接质量有很大影响，因此应根据变形层厚度正确选择该参数。当摩擦表面的变形层很厚时，停车时间要短；当表面上的变形层比较薄时，为在停车阶段能产生较厚的变形层，停车时间可以延长。有时为了改善焊接质量，消除焊缝中的氧化物或脆性化合物层，必须增大停车时的变形层厚度。一般在停车前就施加顶锻压力，或停车时不制动。但是，要防止过大的后峰值扭矩使接头金属产生扭曲组织，通常停车时间选择范围为0.1~1s。



(4) 顶锻压力与变形量 顶锻压力的作用是挤碎和挤出变形层中的氧化金属及其他有害杂质，并使接头金属在压力作用下得到锻造，促进晶粒细化，从而提高接头力学性能。顶锻变形量是顶锻压力作用的结果，如果顶锻力太小，接头质量低；如果顶锻压力过大，会使接头变形量增加，飞边增大，严重时会在焊缝金属中形成低温横向流动的弯曲组织，使接头的疲劳强度降低。

顶锻压力的大小取决于焊接工件的材料、接头的温度大小及分布、变形层的厚度，此外还决定于摩擦压力的大小。如果焊接材料的高温强度高，就需要大的顶锻压力。如果接头的温度高，变形层较厚，就必须采用较小的顶锻压力。此外，在顶锻压力确定以后，为了得到一定要求的顶锻变形量，对顶锻压力的施加速度也有要求，如果不在一定的高温下进行锻，将得不到合适的顶锻变形量。

2.3 焊接参数检测及控制

1. 焊接参数检测

摩擦焊接参数大体上可以分为独立参数和非独立参数。独立参数可以单独设定和控制，主要包括主轴转速、摩擦压力、摩擦时间、顶锻压力、顶锻维持时间。所谓非独立参数，就是该参数需要由两个或两个以上的独立参数以及材料的性质所决定，主要包括摩擦焊扭矩、焊接温度、摩擦变形量、顶锻变形量等。

(1) 摩擦开始信号的判定 连续驱动摩擦焊时，无论检测摩擦时间或检测摩擦变形量，都涉及摩擦开始时刻的判定问题。在实际中应用的主要方法有功率极值判定法、压力判定法、主机电流比较法。功率极值判定法是以摩擦加热功率达到峰值的时刻作为摩擦时间的起点。需要注意的是，大面积工件摩擦焊时，在不稳定摩擦阶段存在功率的多峰值现象。压力判定法是当工件接触、开始摩擦时，作用在工作上的压力逐渐升高，以压力继电器动作的时刻作为摩擦时间的开始。主机电流比较法是工件摩擦开始后，以主机电流上升到某一给定值所对应的时刻作为摩擦计时的始点。这三类检测方法都可以通过硬件或软件实现开始信号的检测和判定。

(2) 变形量的测量 变形量的测量比较简单，常采用电感式位移传感器（含差动式）、光栅位移传感器等。摩擦焊接时，将传感器的输出信号输入到计算机中，取出对应于各阶段的特征值（如摩擦开始、顶锻开始、顶锻维持结束等时刻），这些特征值作为计算相应阶段变形量的相对零点。

(3) 主轴的转速和压力的测量 主轴转速测量常采用磁通感应式转速计、光电式转速计以及测速发电机等。压力测量除通常采用压力表外，还采用电阻丝应变片和半导体应变片等。

(4) 接头温度的测量 焊接温度测量一般采用热电偶和红外测温仪两种方法。采用热电偶可以测量摩擦焊工件的内部温度。为了解决工件在转动时的测量问题，可将布置在旋转工件上的热电偶通过补偿导线连接到引电器上，焊接时，引电器的内环随工件一起旋转，各输入端始终与相应内环的输入端相连。应注意，测量前必须对热电偶的动特性进行标定，还应应对测得的数据进行修正，才能得到真实的温度。这种测量方法的缺点是热惯性大，反应不够灵敏。红外测温属非接触测量，用于测量工件的表面温度场。该法用光学探测器瞬间接受工件上某个部位的单元信息，扫描机构依次对工件进行二维扫描，接收系统按时间先后依次接受信号，经放大处理，变为一维时序视频信号送到显示器，与同步机构送来的同步信号合成后，显示出焊件图像和温度场的信息。

(5) 摩擦扭矩的测量 摩擦扭矩综合反映了轴向压力、工件转速，界面温度、材质特性及其相互之间的影响，是连续驱动摩擦焊接的

一个重要参数, 该参数变化速度快、变化范围大。主要测量方法有电阻应变片法 (将电阻应变片贴在工件上), 好处是灵敏度高; 不足之处是不适宜生产现场, 当主轴刚度大、被焊面积小且采用软规范时误差较大。另外, 还有磁弹扭矩传感器法 (利用铁磁材料受机械力作用时导磁性能发生变化的磁弹现象, 测量误差较大)、轮辐射扭矩传感器法 (测主电动机的输出扭矩, 是一种近似测量法) 和主电动机定子电压电流法。

主电动机定子电压电流法缩写为VCMM (voltage and current of major motor), 连续驱动摩擦焊时, 摩擦扭矩 $M(t)$ 和摩擦加热功率 P 分别为:

$$M(t) = 2\pi \int_0^R \mu(r,t) p(r,t) r^2 dr \quad (12)$$

$$P = \frac{\pi^2}{15} \int_0^R n(t) \mu(r,t) p(r,t) r^2 dr \quad (13)$$

式中 $\mu(r,t)$ ——摩擦系数;
 $p(r,t)$ ——摩擦压力;
 R ——工件半径;
 r ——工件摩擦表面某点到工件轴心的距离;
 $n(t)$ ——摩擦转速。
 由于 $n(t)$ 与 r 无关, 所以

$$P = \frac{\pi}{30} n(t) M(t) \quad (14)$$

目前, 可采用计算机实现主电机定子电压和电流以及摩擦转速的实时同步检测, 首先计算出电动机的输入功率, 再通过对摩擦焊接过程各种功率损耗的分析、计算, 求出作用于摩擦焊接头的加热功率, 根据式 (14) 求出摩擦焊过程的动态扭矩。

2. 焊接参数控制

当焊接材料、接头形式和焊接参数确定后, 摩擦焊接接头的质量主要取决于焊接参数的稳定。因此, 进行焊接过程控制时, 主要是控制工艺过程和焊接参数, 对于连续驱动摩擦焊, 控制方法主要有以下几种。

(1) 时间控制 主要是控制摩擦时间, 可采用计算机的计数器或定时器进行控制。

(2) 功率峰值控制 利用摩擦加热功率峰值与稳定值之间时间不变的原则进行控制。主要应用于碳钢和低合金钢的强规范 (即转速较低、摩擦压力较大、摩擦时间短) 焊接。实际上, 由于加热功率的多峰值现象以及焊接参数的变化和工件表面状态的差异, 都会引起峰值与稳定值之间的时间不同, 因而, 这种控制方法的应用受到限制。

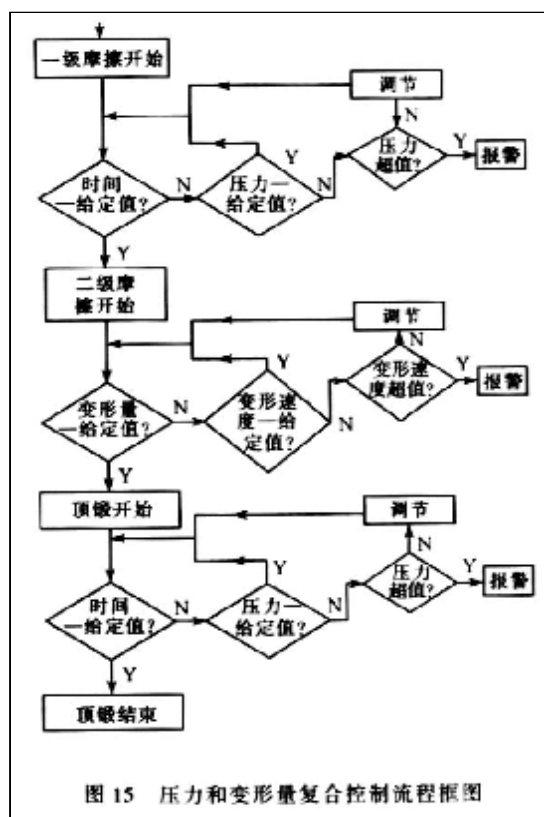
(3) 变形量控制 通常是控制摩擦变形量, 但为了克服由于工件表面状态和其他参数变化对这种控制方法带来的不利影响, 还可同时对摩擦焊接时间进行监控。

(4) 温度控制 主要通过对工件表面温度的非接触测量而进行相应的控制。

(5) 变参数复合控制 该方法主要针对大截面工件的摩擦焊接, 其核心是在不同阶段采用不同的控制方案。在一级摩擦阶段, 同时进行时间控制和压力控制 (时间和压力复合控制); 在二级摩擦阶段同时进行变形量和变形速度控制 (变形量和变形速度复合控制); 在顶锻阶段, 同时进行压力控制和时间控制 (时间和压力复合控制)。

(6) Mt 控制 该方法是通过摩擦扭矩 M 对摩擦时间 t 的积分运算来实现焊接能量控制。具体方法是从功率达到最大值的 t_0 时刻起计算摩擦热量, 在摩擦热量达到 Q_0 时的 t_n 时刻停止摩擦加热过程而进入顶锻过程, 从而实现焊接过程的能量控制。

(7) 微计算机控制 目前的焊接设备大多数具有计算机控制功能, 可控制整个焊接过程, 包括液压系统控制、摩擦开始点和焊接参数检测, 焊接参数复合控制和参数记录、输出等, 图15为压力和变形量复合控制流程框图。



2. 4 典型材料的摩擦焊

1. 材料的摩擦焊接性

材料的摩擦焊接性是指材料在摩擦焊接过程中形成优质接头的能力。所谓优质接头，一般是指与母材等强度及等塑性，所涉及的材料有金属材料、陶瓷材料、复合材料、塑料等。

影响材料摩擦焊接性的因素主要有：

- 1) 材料的互溶性。同种材料或互溶性好的异种材料容易进行摩擦焊接；有限互溶、不能相互溶接和扩散的两种材料，很难进行摩擦焊接。
- 2) 材料表面的氧化膜。金属表面上的氧化膜如果容易破碎，则焊合比较容易，如低碳钢的摩擦焊接性比不锈钢好。
- 3) 材料的力学性能。高温强度高、塑性低、导热性好的材料不容易焊接；力学性能差别大的异种材料也不容易焊接。
- 4) 合金的碳当量。碳当量高、淬硬性好的合金材料焊接比较困难。
- 5) 高温氧化性。一些活性金属及高温氧化性大的材料难以焊接。
- 6) 生成的脆性相。凡是能形成脆性化合物层的异种材料，很难获得高可靠性的焊接接头。对这类材料，在焊接过程中必须设法降低焊接温度或减少焊接时间，以控制脆性化合物层的长大，或者添加过渡金属层进行摩擦焊接。
- 7) 摩擦系数。摩擦系数低的材料，加热功率低，得到的焊接温度低，就不容易保证接头的质量，例如焊接黄铜、铸铁等就比较困难。
- 8) 材料的脆性。大多数金属材料都具有很好的摩擦焊接性能，而对于焊接性不好的陶瓷材料及异种材料，为了提高接头性能，摩擦焊接时应选用合适的过渡金属层。

图16是同种和异种材料组合的摩擦焊接性。应注意，某些摩擦焊接性能不好的材料，随着摩擦焊工艺的发展和设备的改进有可能成为焊接性好的材料。

[illegible]

图16 同种和异种材料组合的摩擦焊接性

2. 焊接参数选择

一般来讲, 碳钢的连续驱动摩擦焊接参数选择范围为: 摩擦速度0.6~3m/s, 摩擦压力20~100MPa, 摩擦时间1~40s, 变形量1~10mm, 停车时间0.1~1s, 顶锻压力100~200MPa, 顶锻变形量1~6mm, 顶锻速度10~40mm/s。中碳钢、高碳钢、低合金钢及其组合的异种钢焊接时, 其焊接参数选择可以参考低碳钢的焊接参数。为了防止中碳钢、高碳钢和低合金钢焊缝中的淬火组织, 减少焊后回火处理工序, 应选用较弱的焊接规范。应注意, 焊接高温强度差的高合金钢时, 需要增大摩擦压力和顶锻压力, 适当延长摩擦时间。焊接管子时, 为了减少内毛刺, 在保证焊接质量的前提下应尽量减小摩擦变形量和顶锻变形量。

焊接高温强度差别比较大的异种钢或某些不产生脆性化合物的异种金属时,除了在高温强度低材料一方加楔子以外,还要适当延长摩擦时间,提高摩擦压力和顶锻压力。焊接容易产生脆性化合物的异种金属时,需要采用一定的模具封闭接头金属,降低摩擦速度,增大摩擦压力和顶锻压力。

焊接大直径工件时，在摩擦速度不变的情况下，应相应地降低转速。工件直径越大，摩擦压力在摩擦表面上的分布越不均匀，摩擦变形阻力越大，变形层的扩展也需要较长的时间。焊接不等端面的碳钢和低合金钢时，由于导热条件不同，在接头上的温度分布和变形层的厚度也不同，为了保证焊接质量，应该采用强规范焊接。

目前在生产中所采用的焊接参数,都需要通过试验方法确定,还很难采用计算的方法进行参数优化和确定。

表1为几种材料的连续驱动摩擦焊接参数,表2是典型材料的惯性摩擦焊接参数。

表1 几种材料的连续驱动摩擦焊接参数

			焊 接 参 数	
--	--	--	---------	--

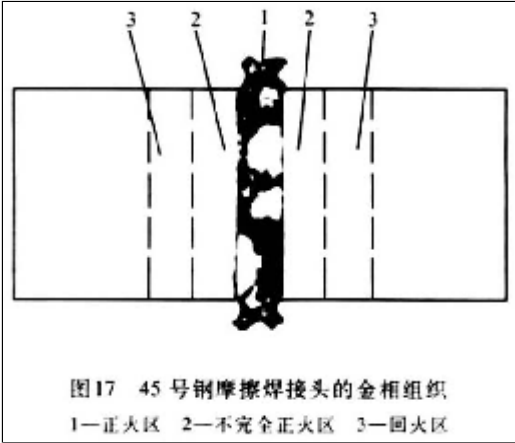
序号	焊接材料	接头直径/mm	转速/r.min ⁻¹	摩擦压力/MPa	摩擦时间/s	顶锻压力/MPa	备 注
1	45钢+45钢	16	2000	60	1.5	120	—
2	45钢+45钢	25	2000	60	4	120	—
3	45钢+45钢	60	1000	60	20	120	—
4	不锈钢+不锈钢	25	2000	80	10	200	—
5	高速钢+45钢	25	2000	120	13	240	采用模子
6	铜+不锈钢	25	1750	34	40	240	采用模子
7	铝+不锈钢	25	1000	50	3	100	采用模子
8	铝+铜	25	208	280	6	400	采用模子
9	铝+铜, 端面锥角60° ~120°	8~50	1360~3000	20~100	3~10	150~200	两端采用模子
10	GH4169	20	2370	90	10	125	—
11	GH3536	20	2370	65	16	95	—
12	30CrMnSi Ni 2A	20	2370	30	6	55	—
13	40CrMnSnMoVA	20	2370	35	3	78	—
14	1Cr18Ni 9Ti	25	2000	40	10	100	—

表2 典型材料的惯性摩擦焊接参数

材 料	转速/r. mi n ⁻¹	转动惯量/kg. m ⁻²	轴向力/kN
20钢	5730	0. 23	69
45钢	5530	0. 29	83
合金钢30CrA	5530	0. 27	110
超高速钢40CrNi 2Si MoVA	3820	0. 73	18. 6
纯钛	9550	0. 06	20. 7
镍基合金GH600	4800	0. 60	206. 9
GH4169	2300	2. 89	206. 9
GH901	3060	1. 63	206. 9
GH738	3060	1. 63	206. 9
GH141	2300	2. 89	206. 9
GH3536	2300	2. 89	206. 9
镁合金MB7	3060~11500	0. 41~0. 03	51. 7
镁合金MB5	3060~11500	0. 22~0. 02	40. 0

3. 典型材料的摩擦焊接

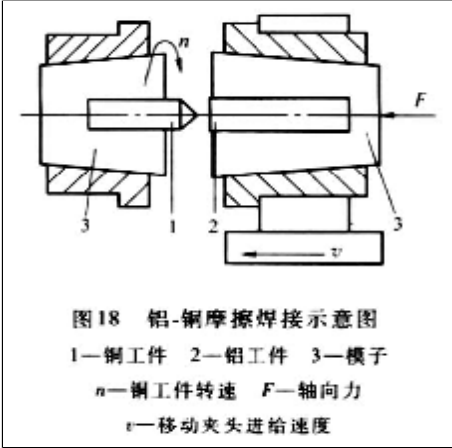
(1) 45号钢的接头组织和性能 45号钢的摩擦焊接参数见表2，接头的金属组织如图17所示，可以分为正火区、不完全正火区和回火区。正火区是接头金属被加到850℃以上的区域，又称高温区，主要包括未被挤出的高速摩擦塑性变形金属以及在高温产生塑性变形的母材。该区组织通常是力学性能良好的索氏体，但接头加热时间太短或太长时，也可能产生硬度很高的马氏体组织或晶粒粗大的过热组织。不完全正火区是接头金属被加热到723~850℃之间的区域，通常这个区域的金相组织都是索氏体和铁素体组织。但是，当接头的加热和冷却速度太快时，也可能产生马氏体组织。回火区是接头金属被加热至723℃以下的区域。由于加热时间很短，其金相组织不产生明显的变化。



对上述规范下摩擦焊接头的质量检验表明，在焊缝中没有产生未焊透、夹杂、气孔、裂缝和金属过热等缺陷，接头的加热区很窄，拉伸试验断裂在母材，弯曲试验可达180°，韧性高，焊接质量好。

(2) 铝—铜过渡接头的焊接 对于φ8~50mm铝—铜过渡接头，摩擦焊接参数如表1中的9所示。为了防止铝在焊接过程中的流失，以及铝、铜试件由于受压失去稳定而产生弯曲变形，采用如图18所示的模子对铝、铜进行封闭加热。接头的力学性能表明，静载拉伸大多断裂在

铝母材一侧，并可以弯曲成180°。但是，如果焊接加热温度过高或焊接加热时间过长，摩擦焊接表面的温度超过铝—铜共晶温度（548℃），甚至达到铝的熔点，在高温下容易形成大量的脆性化合物层，使接头发生脆性断裂。



为了获得优质接头，可采用低温摩擦焊工艺，其规范参数如表1中的8所示。该工艺的特点是转速低，顶锻压力大。为了增大后峰的摩擦扭矩，增加接头的变形量，以达到破坏摩擦表面上的脆性合金薄层和氧化膜的目的。低温摩擦焊工艺可以控制摩擦表面的温度在460~480℃范围内，保证摩擦表面金属能充分发生塑性变形和促进铝—铜原子之间的充分扩散，不产生脆性金属间化合物，接头的力学性能高，热稳定性也好。

（3）高速钢-45号钢的焊接 高速钢和45号钢焊接时，由于高速钢的高温强度高而导热率低，而45号钢的温度强度差，为了控制45号钢的变形和流失，提高摩擦压力，增大摩擦加热功率和保证接头外圆不透，必须采用合适的模子，如图19所示。将45号钢进行封闭加压，按照表3选择焊接参数。在摩擦加热过程中，随着摩擦加热时间的延长，接头温度升高，高速摩擦塑性变形层由高速钢和45号钢的交界处向高速钢内部移动，形成了高速钢与高速钢的摩擦过程。因此，为了使接头产生足够的塑性变形和足够大的加热功率，必须提高摩擦压力和顶锻压力。应注意，为了防止接头的焊接热裂纹，材料尽量选择不会产生碳化物严重偏析的高速钢外，焊前应将高速钢进行完全退火，焊接时接头要均匀加热，使温度分布较宽，摩擦时间不能太短。焊接后应进行缓冷，并立即在750℃进行炉中保温，然后再进行退火。

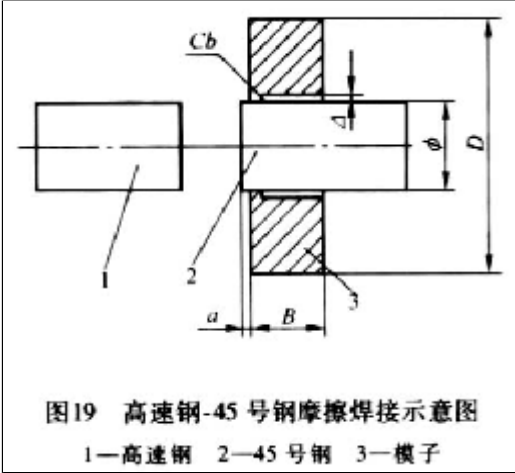


表3 高速钢-45号钢摩擦焊接参数

接头直径/mm	转速/r. min ⁻¹	摩擦压力/MPa	顶锻时间/s	顶锻压力/MPa	备 注
14	2000	120	10	240	采用模子
20	2000	120	12	240	采用模子
30	2000	120	14	240	采用模子
40	1500	120	16	240	采用模子
50	1500	120	18	240	采用模子
60	1000	120	20	240	采用模子

（4）锅炉蛇形管的摩擦焊接 锅炉制造中，为了节省能量，采用材料为20号钢、直径为32mm、壁厚4mm的蛇形管制造。在摩擦焊接时，由于管子长达12m左右，需要解决长管的平稳旋转、焊接质量稳定和减少内毛刺等问题。表4是焊蛇形管的焊接参数，焊接过程采用功率极值控制，最后快速停车、快速顶锻。采用上述焊接参数的接头内毛刺小，内外毛刺形状短粗，平整圆滑，抗拉强度达510~550MPa，全部断在母材上，弯曲角达到130°。接头的金相组织表明，焊缝区为细晶粒索氏体和铁素体组织，没有发现任何缺陷，提高了接头寿命。用摩擦焊连续焊接了数十万个接头，每批以3%抽样进行破坏性检验，质量全部合格。

表4 蛇形管的摩擦焊接参数（直径32mm，壁厚4mm）

转速/r. min ⁻¹	摩擦压力/MPa	摩擦时间/s	顶锻压力/MPa	接头变形量/mm	备 注
1430	100	0. 82	200	2. 3~2. 4	采用功率极值控制

（5）石油钻杆的焊接 石油钻杆是石油钻探中的重要工具，它由带螺纹的工具接头与管体焊接而成。工具接头材料为35CrMo钢，管体材料为40Mn2钢。常用钻杆的焊接断面为φ140mm×20mm、φ127mm×10mm。由于焊接面积大，焊接管体长，需要采用大型焊机。为了降低摩擦加热功率（特别是峰值功率），需采用表5的弱规范焊接。为消除焊后的内应力，改善焊缝的金属组织和提高接头性能，必须进行焊后热处理。热处理规范选择为500℃回火或850℃正火 +650℃回火处理，或者采用840℃淬火+650℃回火处理，其力学性能见表6。

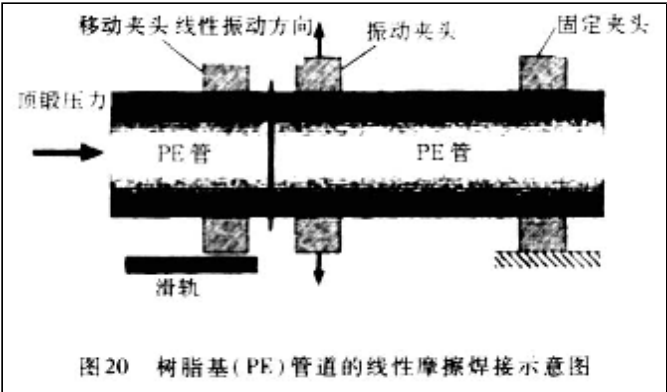
表5 石油钻杆的摩擦焊接参数（直径140和127mm）

转速/r. min ⁻¹	摩擦压力/MPa	摩擦时间/s	顶锻压力/MPa	接头变形量/mm	备 注
530	5~6	30~50	12~14	摩擦变形量12mm 顶锻变形量8~12mm	钻杆工具接头 焊接端面倒角

表6 石油钻杆摩擦焊接接头力学性能

接头直径/mm	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	断面收缩率(%)	冲击初度/J. cm ⁻²	弯曲角/(°)	焊后热处理规范
127	770	18. 5	69	57	113	500℃工频回火
140	697	23. 8	66. 5	45	96	850℃正火+650℃回火空冷

（6）树脂基管道的线性摩擦焊接 近年来，随着热硬化性树脂材料的发展，树脂基管道在城市建设、石油化工等领域的应用越来越多，连接问题也比较突出。对于大型管道的现场安装，可采用线性摩擦焊的方法进行焊接。图20是树脂基管道的线性摩擦焊接示意图，采用振动夹头使待焊界面上下摩擦，当达到可以接合的温度后停止振动摩擦，施加顶锻压力进行焊接。树脂基管道线性摩擦焊接的主要参数是振动频率、振幅和顶锻压力。对于外径216mm、壁厚16mm的管道，振幅可选择1mm左右，振动频率在150Hz以下，接头的屈服强度可达20MPa以上，几乎与母材等强度，伸长率达到了母材的72%。



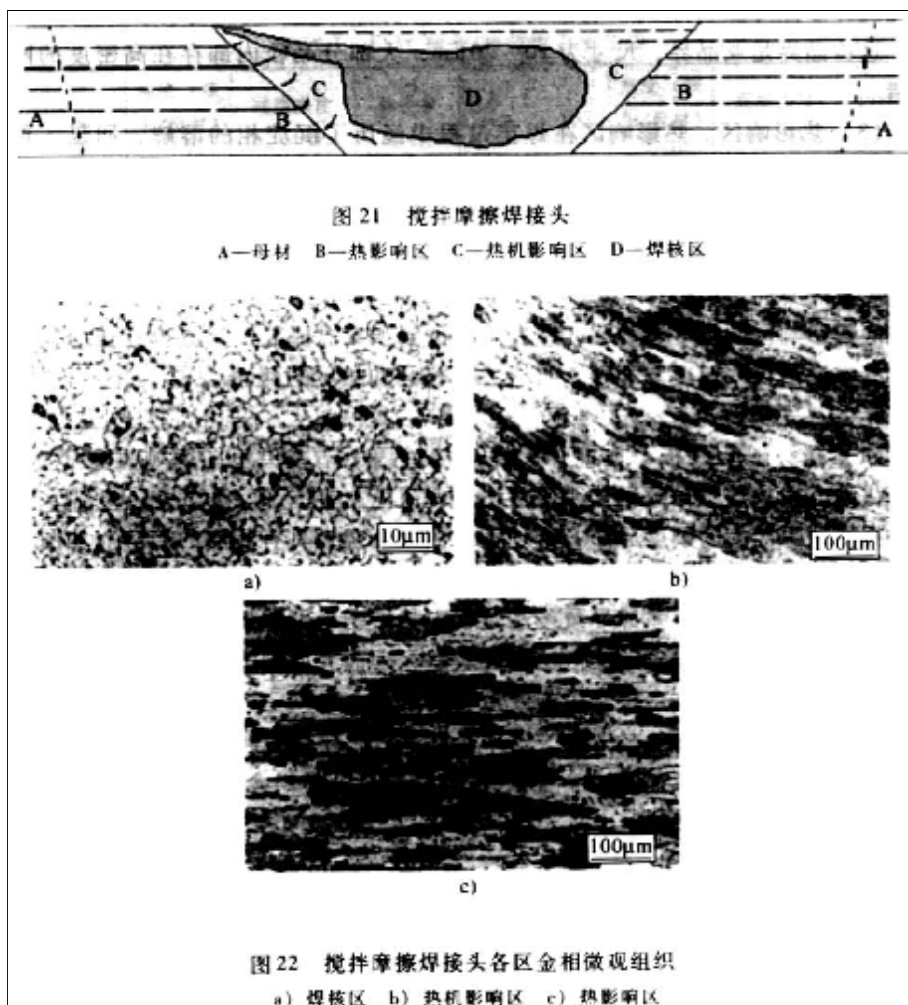
三、搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊接在飞机制造、机车车辆和船舶制造中已经得到应用，主要用于铝合金、镁合金、铜合金、钛合金和铝基复合材料的焊接，钛合金和钢的焊接也有研究。

3. 1 搅拌摩擦焊接过程

1. 接头形成及组织

搅拌摩擦焊接时，由于轴肩与焊件上表面紧密接触，因而焊缝通常呈V形，接头一般形成三个组织明显不同的区域，如图21、图22所示。焊核区（weild nugget xone,WNZ）位于焊缝中心靠近搅拌针扎入的位置，一般由细小的等轴再结晶组织构成；热机影响区（thermal -mechanically affected zone,TMAZ）位于焊核区两侧，该区域的材料发生程度较小的变形；热影响区（heat-affected zone; HAZ）是在焊接过程中仅受到热循环作用，而未受到搅拌头搅拌作用的影响。不同区域所形成的最终组织与焊接过程中的局部热、机械搅拌的循环历史有关，并且经历了差异较大的塑性流动和热载荷，导致应变、应变率和温度存在较大的差异。



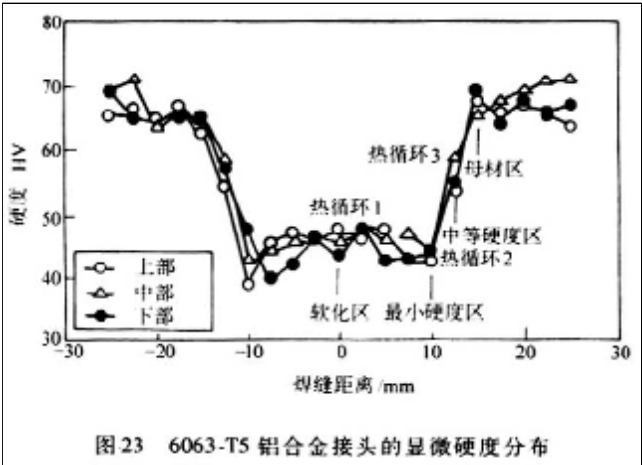
(1) 焊核区 焊核区的塑性流动是非对称性的，该区经历了高温、大应变后，焊核的中心发生了强烈的变形。大应变导致焊核区在焊接过程中发生了动态再结晶，铝锂合金的晶粒尺寸一般为 $1\sim 4\mu\text{m}$ ，并导致该区出现高密度的沉淀相，从而有利于抑制焊接过程中晶粒的长大。这些沉淀颗粒的尺寸为 $1\sim 3\mu\text{m}$ ，与亚晶粒的尺寸相似。在焊接过程中，材料与搅拌针之间的相互作用导致焊核区出现同心环（洋葱环组织）。

(2) 热机影响区 热机影响区是一个过渡区域，虽然也经历了连续的温度变化和机械搅拌，但该区的局部应变较焊核区小，明显导致初始拉长晶粒的旋转变形。热机影响区和焊核区间的组织变化没有过渡，变化非常显著。对6061铝合金搅拌摩擦焊接头热机影响区的组织分析表明，该区内的晶界大多为小角晶界。这些晶界是亚晶界，尺寸为 $10\sim 20\mu\text{m}$ ，大部分晶粒内部存在高密度的网状位错。

(3) 热影响区。热影响区在焊接过程中经历了沉淀相的溶解、回复、再结晶和晶粒长大，具体发生何种的变化与合金种类、合金的初始热处理状态和距焊缝中心的距离有关。热影响区的晶粒尺寸与母材相近，铝合金的平均晶粒尺寸为 $20\sim 62\mu\text{m}$ ，而热影响区的平均晶粒尺寸为 $17\sim 60\mu\text{m}$ 。焊缝前进侧和后退侧的热影响区宽度不同，AA6081-T6（美国）接头前进侧热影响区的宽度为 $13\sim 16\text{mm}$ ，后退侧热影响区的宽度为 30mm 左右。前进侧和后退侧分别对应于旋转的搅拌头在焊缝方向的切线速度与搅拌头行进方向相同的相反的侧面。

2. 接头力学性能

(1) 接头硬度分布 在搅拌摩擦焊接过程中，接头不同区域发生了软化，其软化程度的差异，导致了接头硬度分布呈“W”形，图23为6063-T5铝合金搅拌摩擦焊接头的硬度分布，其他型号的铝合金也具有相同的趋势。从图中可以看出WNZ/TMAZ界面两侧的硬度值相差较小；HAZ/TMAZ界面两侧的硬度值则相差较大。这种硬度差异导致冷却过程中热影响区和热机影响区界面两侧材料的收缩程度不同，即二者的变形协调性较差，因而界面处易形成较大的残余应力集中，导致该区为整个接头中强度最弱的区域。



(2) 接头强度 从国内外的研究情况来看，目前所开展的FSW研究主要集中在铝合金、镁合金以及纯铜等软质、易于成形的材料上，对钛合金、不锈钢、铝基复合材料也有少量研究。从表7可以看出，无论哪种材料，包括难熔焊的硬铝和超硬铝，其FSW接头的抗拉强度均能达到母材的70%以上。接头性能的具体数值，除了与母材本身的性能有关外，在很大程度上还取决于FSW的焊接参数。

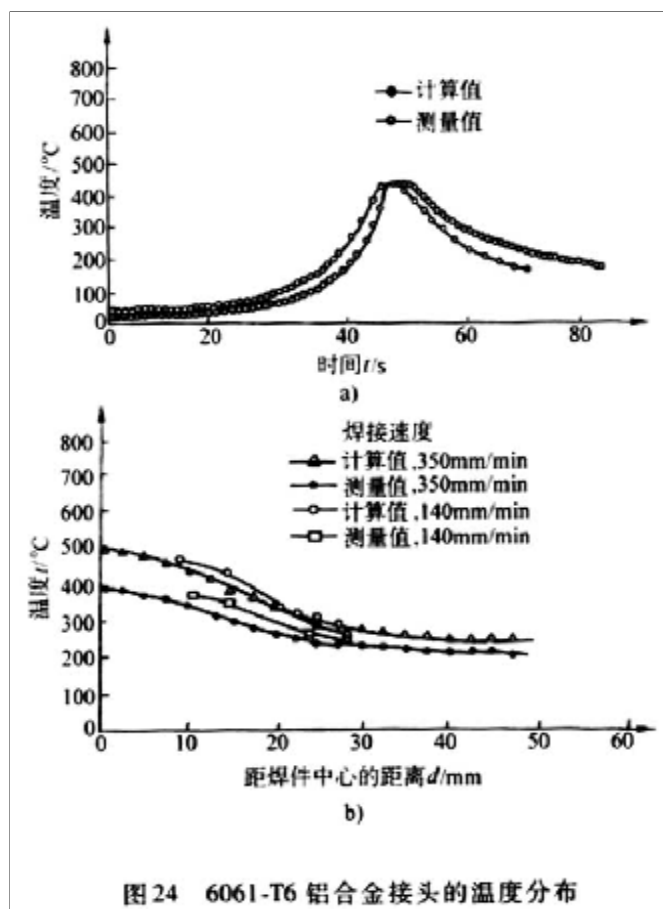
表7 FSW接头/母材的力学性能

母 材	强度(接头 /母材) σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ (%)	母 材	强度(接头 /母材) σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ (%)
2024-T3	432/497	304/424	7.6/14.9	AM50(日本)	180/215	115/117	4.5/10.5
2024-T6	400/477	—/280	—/20.5	AM60	198/240	110/130	6.5/13
5083-0	271/275	125/124	23/24	AZ31(日本)	201/288	127/219	3.5/6.5
6013-T6	322/398	292/349	—	AZ61	285/300	100/140	17/25
6061-T6	199/320	—	11/16	Cu	220/250	—	—
6082-T6	245/317	150/291	5.7/11.3	6061+20%B ₄ C	210/248	137/124	4/12
7027-T6	325/385	242/326	4.5/13.6	DH36钢	559/483	469/345	8.6/21
7075-T6	470/585	—/560	—/12	304钢	740/740	300/280	68/68

3. 搅拌摩擦焊产热

搅拌摩擦焊过程中形成了大量的生成热，这些生成热主要来源于轴肩与焊件材料上表面、搅拌针与接合面间的摩擦热、搅拌针附近材料的塑性变形产生的热，其中摩擦热是焊接产热的主体。随着搅拌头沿焊缝方向行走，这些热量对焊缝及焊缝附近的母材施以热循环作用，导致材料中沉淀相的溶解、焊缝和热影响区发生较程度的软化。通过建立合适的传热模型，可以从理论上预测材料在一定的焊接参数下所经历的热过程，对优化焊接参数、接头形式、获得符合性能要求的接头具有重要作用。

目前，还不能对搅拌摩擦焊的产热进行精确计算，产热机制的解释和计算方法有很多种，某些学者认为在稳定搅拌摩擦焊接阶段，搅拌针插入过程的产热可以不考虑，也有人把轴肩、搅拌针的产热分别进行了计算和测量。在热输入和温度分布的计算中，由于搅拌针插入过程的产热比较复杂，预热结束后的稳定焊接阶段可以不考虑这部分热量，并假设轴肩/焊件界面的热输入是恒定的，在此基础上建立热输入数值模型，并通过实验数据来调节计算的热输入量，使计算温度与测量值相匹配。C M Chen等人基于6061-T6铝合金搅拌摩擦焊过程的产热分析，考虑了轴肩与母材、搅拌头与母材之间的摩擦产热，计算了接头的温度场和残余应力分布，图24是计算结果和测量结果的对比。试验时的焊接速度为140mm/min、搅拌头旋转速度500r/min。图a显示出距离焊缝中心10mm、距离焊缝上部1.6mm位置的温度分布。从图中可知，刚开始焊接时的初始计算温度高于测量温度，经过高温以后，实测温度比计算温度高，这主要是垫板在刚开始焊接时吸收热量，当焊接到一定程度后，由于温度累积降低了散热所致。图24b是垂直焊接方向的横向温度分布，可以看出，随着焊接速度的增加，焊接温度明显下降。



3. 2 搅拌摩擦焊工艺

1. 工艺特点

(1) 与传统摩擦焊及其他焊接方法相比, 搅拌摩擦焊有以下优点

1) 焊接接头质量高, 不易产生缺陷。焊缝是在塑性状态下受挤压完成的, 属于固相焊接, 避免了熔焊时熔池凝固过程中产生裂纹、气孔等缺陷, 这对裂纹敏感性强的7000、2000系列铝合金的高质量连接十分有利。

2) 不受轴类零件的限制, 可进行平板的对接和搭接, 可焊接直焊缝、角焊缝及环焊缝, 可进行大型框架结构及大型筒体制造、大型平板对接等。

3) 便于机械化、自动化操作, 质量比较稳定, 重复性高。

4) 焊接成本较低, 不用填充材料, 也不用保护气体。厚焊接件边缘不用加工坡口。焊接铝材工件不用去氧化膜, 只需去除油污即可。对接时允许留一定间隙, 不苛求装配精度。

5) 焊件有刚性固定, 且固相焊时加热温度较低, 故焊件不易变形。这点对较薄铝合金结构(如船舱板、小板拼成大板)的焊接极为有利, 这是熔焊方法难以做到的。

6) 安全、无污染、无熔化、无飞溅、无烟尘、无辐射、无噪声、没有严重的电磁干扰及有害物质的产生, 是一种环保型连接方法。

(2) 搅拌摩擦焊本身也存在如下缺点

1) 不同的结构需要不同的工装夹具, 设备的灵活性差。

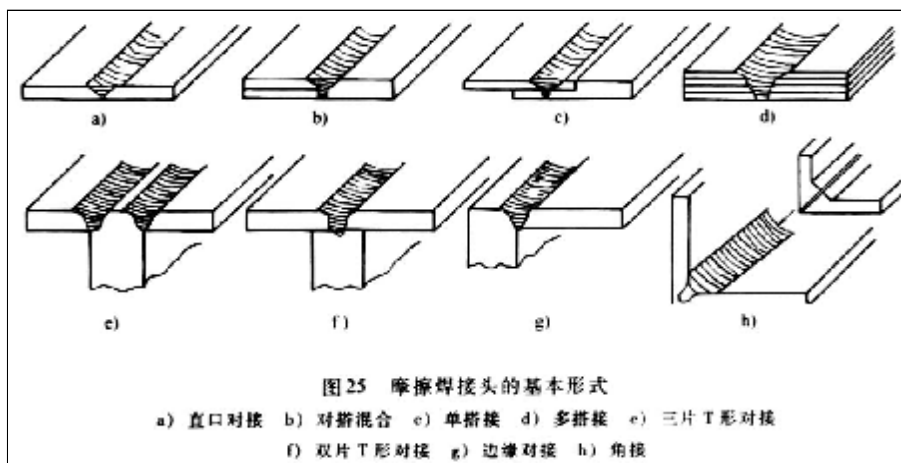
2) 如不采用专门的搅拌头, 焊接结束后搅拌头退出时在焊缝末端会产生凹坑, 需要用其他焊接方法补焊。

3) 目前焊接速度不高。

4) 焊缝背面需要有垫板, 在封闭结构中垫板的取出比较困难。

2. 搅拌摩擦焊接头形式

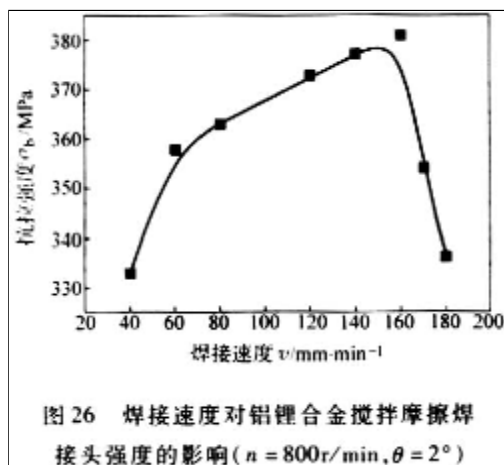
搅拌摩擦焊可以实现棒材—棒材、管材—管材、板材—板材的可靠连接(图25), 接头形式可以设计为对接、搭接, 可进行直焊缝、角焊缝及环焊缝的焊接。



3. 搅拌摩擦焊参数选择

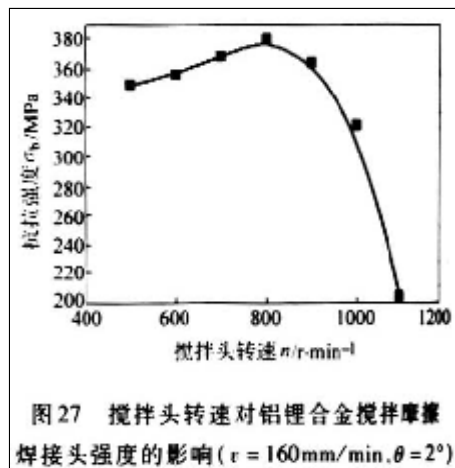
搅拌摩擦焊接参数主要包括焊接速度（搅拌头沿焊缝方向的行走速度）、搅拌头转速、搅拌头仰角和轴肩压力。

(1) 焊接速度 图26为焊接速度对铝锂合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响。由图可见，接头强度随焊接速度的提高并非单调变化，而是存在峰值。当焊接速度小于160mm/min时，接头强度随焊接速度的提高而增大，并于 $v=160\text{mm/min}$ 时达到381MPa的最大值。从焊接热输入可知，当转速为定值，焊接速度较低时，搅拌头/焊件界面的整体摩擦热输入较高。如果焊接速度过高，使塑性软化材料填充搅拌针行走所形成的空腔的能力变弱，软化材料填充空腔能力不足，焊缝内易形成一条狭长且平行于焊接方向的疏松孔洞缺陷，严重时焊缝表面形成一条狭长且平行于焊接方向的隧道沟，导致接头强度大幅度降低。如 $v=180\text{mm/min}$ 时，焊核区与热机影响区界面处形成较大的孔洞缺陷，接头强度仅为336MPa。

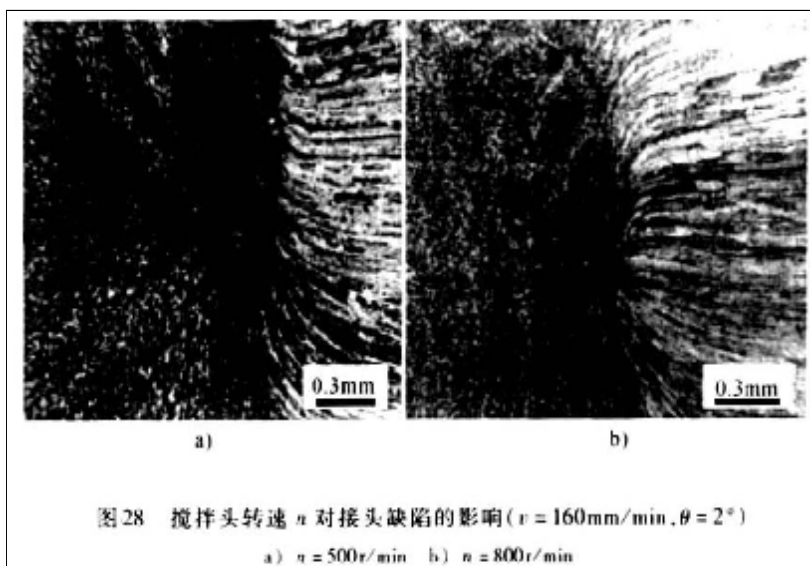


(2) 搅拌头转速 保持焊接速度一定，改变搅拌头旋转速度进行试验，结果表明当旋转速度较低时，不能形成良好的焊缝，搅拌头的后边有一条沟槽。随着旋转速度的增加，沟槽的宽度减小，当旋转速度提高到一定数值时，焊缝外观良好，内部的孔洞也逐渐消失。在合适的旋转速度下接头才获得最佳强度值。

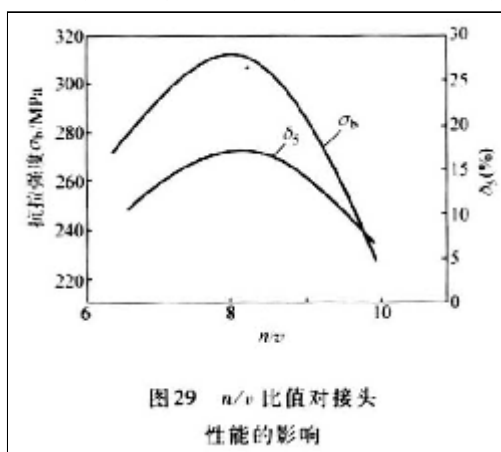
对于高强度铝锂合金，在焊接速度 $v=160\text{mm/min}$ 、仰角 $\theta=2^\circ$ 的条件下，搅拌头转速对接头强度的影响如图27所示。由该图可见，当 $n \leq 800\text{r/min}$ 时，接头强度随着转速的提高而增加，并于 $n=800\text{r/min}$ 时达到最大值；当 $n > 800\text{r/min}$ 时，接头强度随着转速的提高而迅速降低。



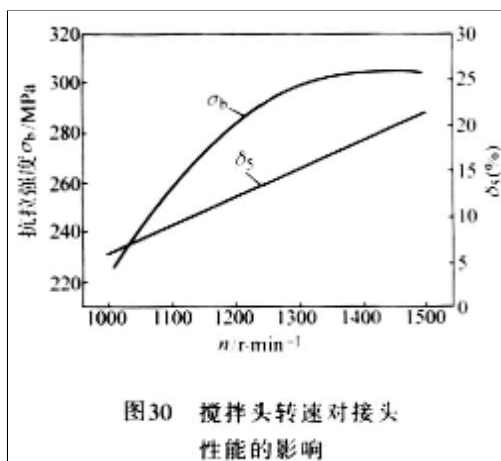
搅拌头转速也是通过改变焊接输入和软化材料流动来影响接头微观结构,进而影响接头强度。当焊接速度为定值、转速较低时(如 $n=500\text{r/min}$, $v=160\text{mm/min}$, $\theta=2^\circ$),焊接热输入较低,搅拌头前方不能形成足够的软化材料填充搅拌针后方所形成的空腔,焊缝内易形成空洞缺陷(图28a),从而弱化接头强度。转速提高,焊接峰值温度增大,因而在一定范围内提高转速,热输入增加,有利于提高软化材料填充空腔的能力,避免接头内缺陷的形成,接头内无缺陷(图28b)。



搅拌头旋转速度和焊接速度的比值对接头性能有一定影响,图29是旋转速度 $n=1000\text{r/min}$ 时,不同 n/v 比值对抗拉强度的影响,试验材料为含5%质量分数Mg的铝合金。从图中可知,随着 n/v 值的增加,强度和塑性都增加,最大抗拉强度达到310MPa,与母材的实测值相同,伸长率为17%,是母材实测值的63%。在达到最大强度值后,继续增加 n/v 的数值,强度和塑性反而下降。

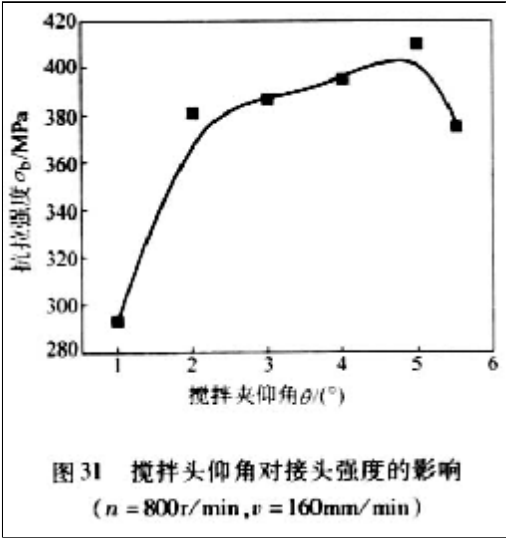


对于Al-5Mg合金的搅拌摩擦焊接,当 n/v 比值一定时,增加旋转速度,接头力学性能有所提高,如图30所示。在 n/v 比值为10时(图29中性能最低的点),随着搅拌头转速的增加,力学性能增加,但当 n 超过1300r/min时,强度增加的速率开始变缓,塑性与转速的增加近似呈线性关系。最佳的抗拉强度为304MPa,达到母材实测值的97%,伸长率为21.4%,是母材实测值的78%。由此可知,焊接接头性能的高低,除了与 n/v 比值有关外,还与搅拌头转速的绝对值有关。



(3) 搅拌头仰角 搅拌摩擦焊接时,一般都使搅拌头向后倾斜,以此对焊缝施加压力。所谓搅拌头仰角是指搅拌头与焊接工件法线的

夹角，它表示向后倾斜的程度。对于高强铝锂合金，在 $n=800\text{r/min}$ 、 $v=160\text{mm/min}$ 的条件下，搅拌头仰角对接头力学性能的影响如图31所示。仰角 $\theta=1^\circ$ 时，接头抗拉强度为293.3MPa；当 $1^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$ 时，接头强度随着仰角的增大而迅速上升；当 $2^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ 时，接头强度随着仰角的增大呈缓慢上升的趋势，并于 $\theta=5^\circ$ 时达到411MPa最大值；当 $\theta>5^\circ$ 时，接头强度随着仰角的增大而降低。



仰角主要是通过改变接头致密性、软化材料填充能力、热循环和残余应力来影响接头性能。如果仰角较低，由于轴肩压入量不足，轴肩下方软化材料填充空腔的能力较弱，焊核区/热机影响区界面处易形成孔洞缺陷，导致接头强度较低。若仰角增大，搅拌头轴肩与件的摩擦力增大，焊接热作用程度增大。

(4) 轴肩压力 轴肩压力除了影响搅拌摩擦产热以外，还对搅拌后的塑性金属施加压力。试验表明，轴肩压力主要影响缝成形。压紧程度偏小时，热塑性金属“上浮”溢出焊缝表面，焊缝内部则由于缺少金属填充而形成孔洞。如果压紧程度偏大，轴肩与焊件的摩擦力增大，摩擦热容易使轴肩平台发生粘附现象，焊缝两侧出现飞边和毛刺，焊缝中心下凹量较大，不能形成良好的焊接接头。关于压力对接头性能的定量影响，还有待于深入研究。

3. 3 典型材料的搅拌摩擦焊

1. 铝合金的焊接

铝合金利用搅拌摩擦焊技术，可以克服熔焊时产生气孔、裂纹等缺陷。特别是高强铝合金，熔化焊接的强度系数比较低，采用搅拌摩擦焊接可以大大提高接头强度。图32给出了铝合金熔焊与搅拌摩擦焊的焊接性比较，搅拌摩擦焊可以焊接所有系列的铝合金。

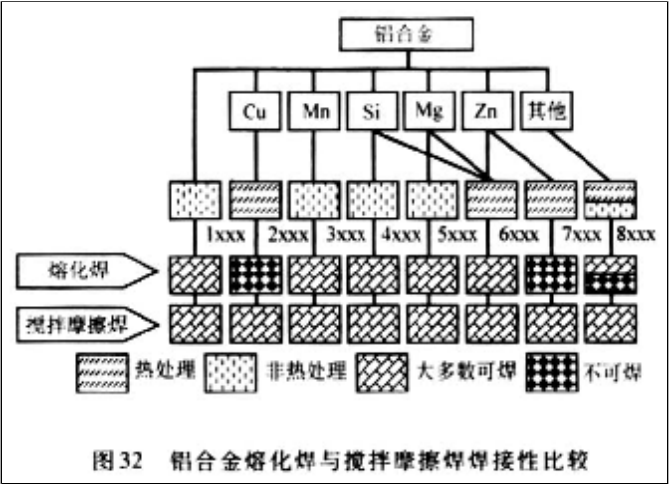


表8给出了铝合金搅拌摩擦焊焊接参数。通过研究焊接速度、搅拌头转速、轴向压力、搅拌头仰角以及焊具几何参数对接头性能的影响规律，并进行参数优化，可以找到最佳的焊接参数匹配区间。当以这个区间内的参数进行FSW时，可以获得最佳性能的FSW接头。

表8 铝合金搅拌摩擦焊焊接参数

材 料	板 厚 /mm	焊 接 参 数		
		转 速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	焊接速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	仰 角/ $(^\circ)$
1050	6.3	400	—	—
	5	560~1840	155	—
2024—T6	6.5	400~1200	60	—
2024—T3	6	—	80	—
	6.4	215~360	77~267	—
2095	1.6	1000	246	—

2195	5.8	200~250	1.59	—
5052—0	2	2000	40	—
5083	3	—	100~200	2
	8	—	100	—
		500	70~200	2.5
5182	1.5	—	100	—
6061—T6	6.3	800	120	—
	6.5	400~1200	60	—
	4	600	—	—
AA6081—T4(美国)	5.8	1000	350	—
6061铝基复合材料	5	1500	500	—
6082	5	2200~2500	700~1400	—
7018—T79	6	—	600	—
7075—T6	4	1000	300	—
2024	4	2000	37.5	—

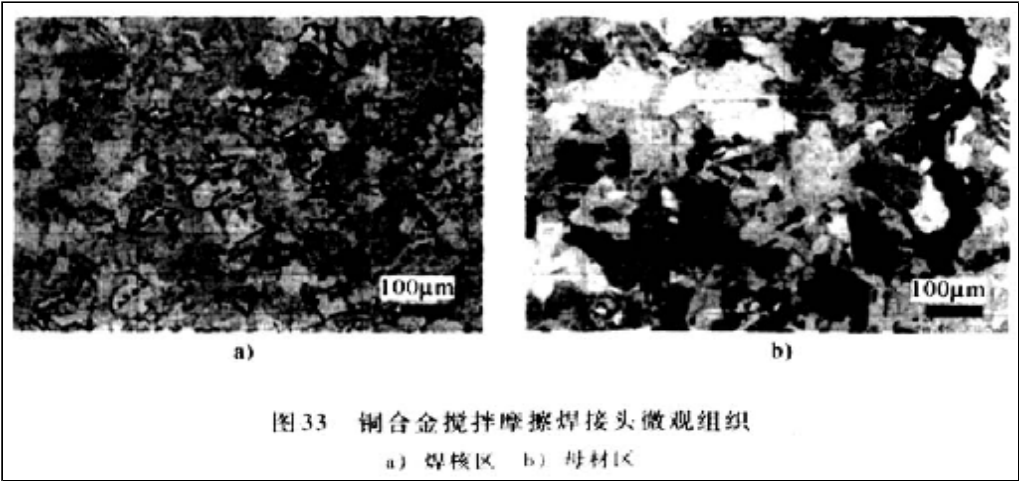
2. 镁合金的焊接

目前有文献报道的采用搅拌摩擦焊接方法焊接的镁合金主要有AZ31(日本)、AZ61、AZ91、MB3等。

对于MB3镁合金，当搅拌头转速过低时，工件不能形成完好的焊缝，在搅拌头后方形成一条沟槽，两试件之间只实现了局部结合，焊缝外观成形不好，内部存在小的空洞和组织疏松，且试样的抗拉强度也低。当旋转速度提高到1500r/min以上时，焊缝组织致密，接头强度可以达到母材强度的90%~98%。当焊接速度变化时，接头强度呈山形变化。对于3mm厚的MB3镁合金板（强度245MPa、伸长率6%），焊速为25mm/min时，其强度最低；焊速为48mm/min时，强度上升到最高值；进一步增加焊速到60mm/min，强度反而下降。金相组织观察可知，焊速为25mm/min的焊缝存在明显的过热组织，热影响区晶粒长大严重。这是由于在焊速较慢的情况下，内部金属晶粒经历了长时高温的缘故。焊速为60mm/min的焊缝存在微小的空洞或组织疏松，此现象是因为当焊速过高时，焊接热输入变低，热塑性软化层厚度小，不足以使焊缝完全闭合的结果。

3. 铜合金的焊接

搅拌摩擦焊接Cu合金，可以消除熔化焊时的焊缝成形能力差、热裂倾向大、难于熔合、未焊透、表面成形差等外观缺陷以及焊缝及热影响区热裂纹、气孔等内部缺陷。在轴肩压力基本恒定的条件下，当 $4 < (n/v) < 8$ 时，焊缝外观成形良好，焊缝内部无缺陷；当 $n/v < 4$ 时，由于单位长度焊缝上的热输入量过小，容易产生孔洞等缺陷；当 $n/v > 8$ 时，焊接区温度过高，焊缝表面由于过热而氧化成暗褐色。当选用尺寸合适的锥形螺纹形搅拌针时，焊缝成形良好；而选用圆柱形搅拌针时，焊缝容易产生缺陷。这说明螺纹形搅拌针的螺纹槽能改善热塑性材料的流动，从而有利于形成致密的焊缝。图33为铜的搅拌摩擦焊接接头组织形貌，焊缝中无任何缺陷，接头成形良好，焊核区平均晶粒尺寸约为70μm（母材的平均晶粒尺寸约为100μm），并有变形孪晶存在。这说明，焊核区晶粒在搅拌摩擦焊中发生了再结晶而得到了细化。接头横截面显微硬度测试结果显示，焊核区的显微硬度低于母材区的显微硬度值，这是由于焊核区发生了再结晶的原因。

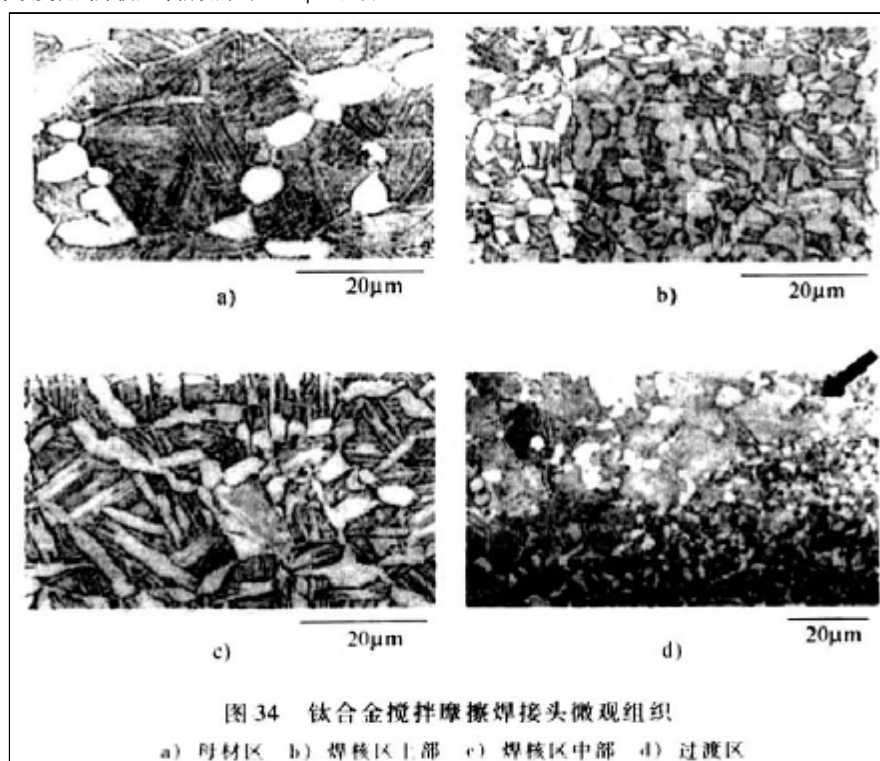


试验结果表明，6mm厚的T2纯铜板，最佳焊接规范为：搅拌头旋转速度600~950r/min，焊接速度75~150mm/min。接头强度超过242MPa，达到母材的88%；接头的伸长率超过12%，最高为14%，是母材的77%。

4. 钛合金的焊接

图34是Ti-6Al-4V搅拌摩擦焊后接头各区的微观组织照片。与铝合金搅拌摩擦焊接接头微观组织相比，钛合金搅拌摩擦焊接头明显没有热机影响区。焊核区与热影响区之间没有变形晶粒的过渡。钛合金母材的微观组织由等轴α和(α+β)板条状组织构成（图34a）。焊核区上部显微组织为等轴α晶粒和(α+β)的小晶团组织构成（图34b）。并且，等轴α晶粒和(α+β)的尺寸要比母材内的晶粒尺寸小。焊核区中部的显微组织与上部显微组织相近，中介尺寸大一些（图34c）。这可能是因为焊核区中部散热条件较焊缝上表面差，较长的保温时间，使焊

核区中部的组织有时间长大的原因。图34d为焊核区和热影响区交界处的微观组织，该区组织变化较明显，晶粒组织直接从母材较粗大的等轴 α 和 $(\alpha+\beta)$ 板条状变化到焊核区等轴状的 α 和 $(\alpha+\beta)$ 组织。



5. 铝基复合材料的焊接

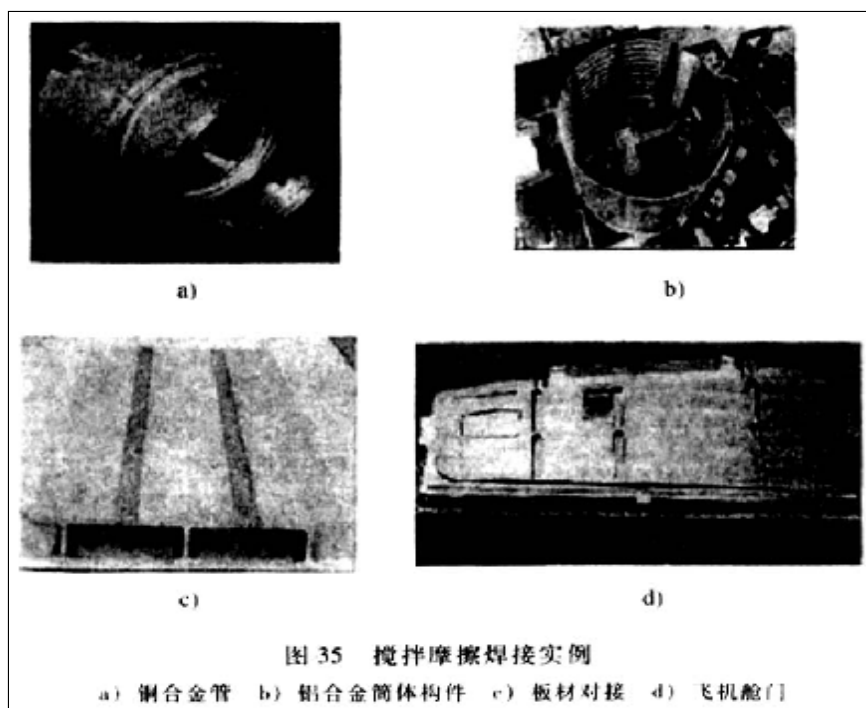
目前用于搅拌摩擦焊接研究的复合材料主要有铝基复合材料6061+20% Al_2O_3 、6061+20%B₄C等。

由铝基复合材料6061+20%B₄C的接头微观组织分析可知，焊核区的微观组织和母材区的微观组织非常接近。在整个接头上很难区分出焊缝区和母材区。接头的拉伸性能测试结果表明，搅拌摩擦焊接头的力学性能优于TIG焊，并且与母材性能很接近。当母材的增强相分布不均匀时，搅拌摩擦焊接头的强度比母材高。铝基复合材料搅拌摩擦焊接时，增强相对搅拌头有较大的摩擦作用，这种磨损使搅拌头产生很大的损耗，损耗的Fe元素最终沉积到焊缝前进侧和焊缝区金属一起形成接头。因此，急需开发耐磨性好的搅拌头。

6. 钢的搅拌摩擦焊接

近年来，对钢的搅拌摩擦焊接性的研究越来越多。与铝合金相类似，钢的搅拌摩擦焊接头同样存在焊核区、热机影响区和热影响区。对于平均晶粒尺寸约为22.2 μm 的304奥氏体不锈钢，焊接后的焊核区为等轴晶粒组织，晶粒内部含有一定量的位错，平均晶粒尺寸约为14.1 μm ，比母材区略小。焊核区以外为热机影响区为亚晶组织结构，平均晶粒尺寸约为11.2 μm ，与焊核区相近，约为母材区的一半，焊核区和热机影响区的组织发生了回复和再结晶，这与铝合金的搅拌摩擦焊接相类似。

图35是搅拌摩擦焊接应用的典型例子，图a为铜合金管的焊接样件，b为航空航天用铝合金筒体构件的焊接现场照片，c为板材对接，d为飞机舱门的焊接。

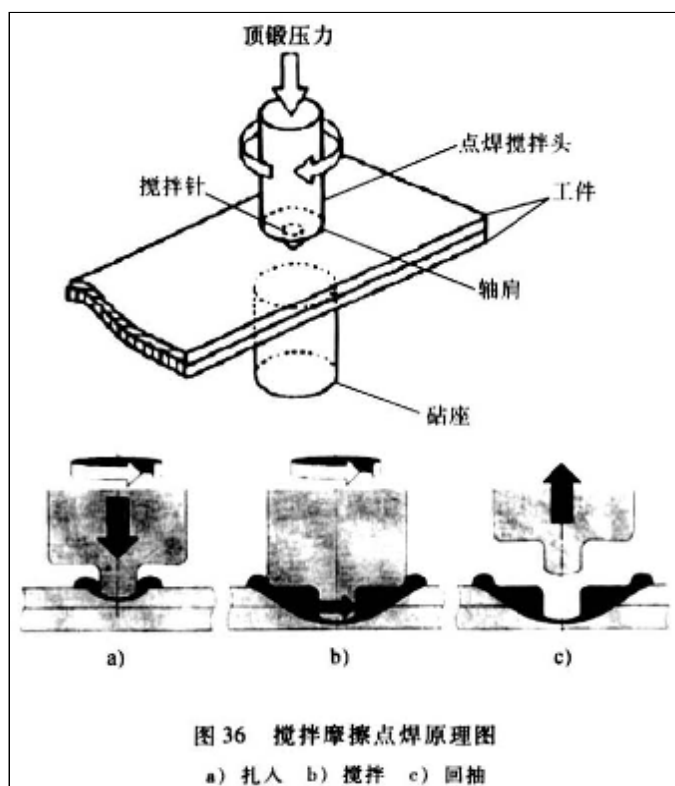


3.4 搅拌摩擦焊新技术

近年来,与搅拌摩擦焊接有关的新技术及其应用研究比较多,如搅拌摩擦点焊、搅拌摩擦表面改性技术、细晶材料制备、搅拌摩擦焊接修复、搅拌摩擦—激光复合焊接技术和搅拌焊接机器人技术等。

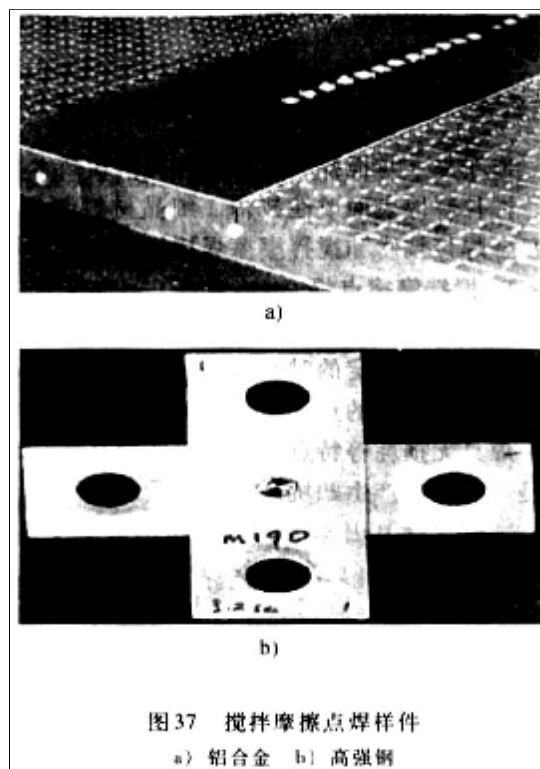
1. 搅拌摩擦点焊

图36为搅拌摩擦点焊原理图,旋转的搅拌头在上部顶锻压力的作用下压入工件,保持一定的时间后(一般为几秒钟),将搅拌头回抽提起,完成搅拌摩擦点焊。



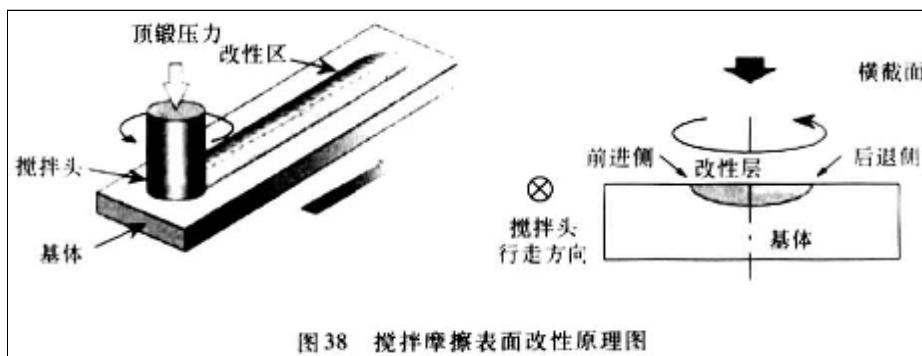
与传统的点焊方法相比,搅拌摩擦点焊具有变形小、无需进行表面清理、焊具无损耗等特点,既可以实现高质、高效的目标,又可以节约成本。其缺点是焊点部位产生凹坑。

图37为采用搅拌摩擦点焊方法获得的铝合金和高强钢的点焊样件。通过对2mm厚6061-T4铝合金薄板进行搅拌摩擦点焊研究发现,点焊接头的结合强度不仅与焊接参数有关,而且与搅拌头的形貌尺寸密切相关。焊接时间一般均为小于1s,较少的焊接时间可以提高结合强度。采用搅拌摩擦的方法可以实现高强钢的点焊连接,焊接时间为3s。



2. 表面改性

(1) 直接表面改性强化 图38为搅拌摩擦加工方法实现表面改性的原理图。与搅拌摩擦焊接技术相比，用于表面改性的搅拌头只有轴肩而没有搅拌针。这样，搅拌头所经过的区域即形成了一道表面改性层，多道搭接即可实现表面改性的目的。铸造铝合金采用熔焊的方法改性处理时（例如：激光、等离子、TIG等），会产生晶间液化裂纹、气孔等缺陷。通过搅拌摩擦改性工艺处理，不仅可以实现表面改性的目的，而且可以避免由于熔焊所带来的焊接缺陷问题。从铸造铝合金搅拌摩擦表面改性后的微观组织可以看出，在基体上表面形成了一层改性层。与基体组织相比，改性层的微观组织得到了细化，而且Si粒子被打碎而均匀分布在改性层中。



(2) 制备复合材料表面改性层 复合材料具有高强度、高弹性模量、耐磨性好、抗蠕变和抗疲劳性能优异等特点，但由于陶瓷增强相的加入，使得复合材料延展性、韧性显著降低，通过表面改性可以克服此缺点。表面熔化改性的方法无法避免脆性相的生成，使得改性层容易开裂或与母材剥离。搅拌摩擦表面制备复合材料改性层，可以解决这些问题。制备过程是先在5083铝合金表面预涂SiC粉，然后采用搅拌摩擦加工工艺获得表面为复合材料的改性层。如图39所示，SiC颗粒在铝基体上分布均匀，而且通过控制预涂粉末的厚度、搅拌摩擦工艺等参数可以获得强化相含量不同的复合材料表面改性层。

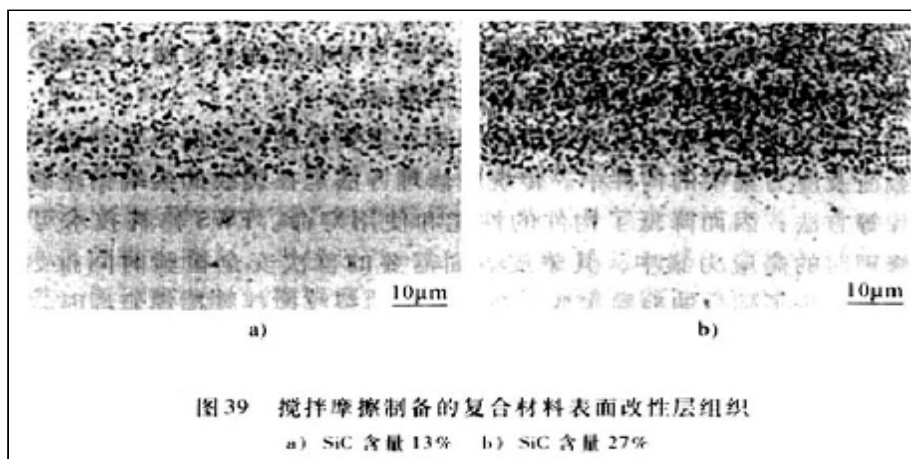


图 39 搅拌摩擦制备的复合材料表面改性层组织

a) SiC 含量 13% b) SiC 含量 27%

3. 制造超细晶材料

超细晶材料由于具有异常优异的力学性能而受到人们广泛关注（例如：强度高、韧性好、高温和低温具有超塑性等特点）。超细晶材料的制备通常采用强烈塑性变形（SPD）和等径弯曲通道变形（ECAP）的方法，这两种手段适合于中等强度的材料，而对于变形、延性差的材料则相对困难，而且也很难获得大面积的超细晶材料。搅拌摩擦加工工艺由于在高温下完成，因此可以实现在常温下难变形材料的细晶制备工艺。

对7075铝合金采用搅拌摩擦加工处理可制备出超细晶材料，晶粒得到了很好的细化，晶粒平均尺寸达到了亚微米级（约250nm）。图40是7075铝合金的细晶材料微观组织照片，经过搅拌摩擦加工工艺处理，原始母材板条状的微观组织转变为细化的等轴晶粒。等轴晶粒在高温下退火有长大现象。

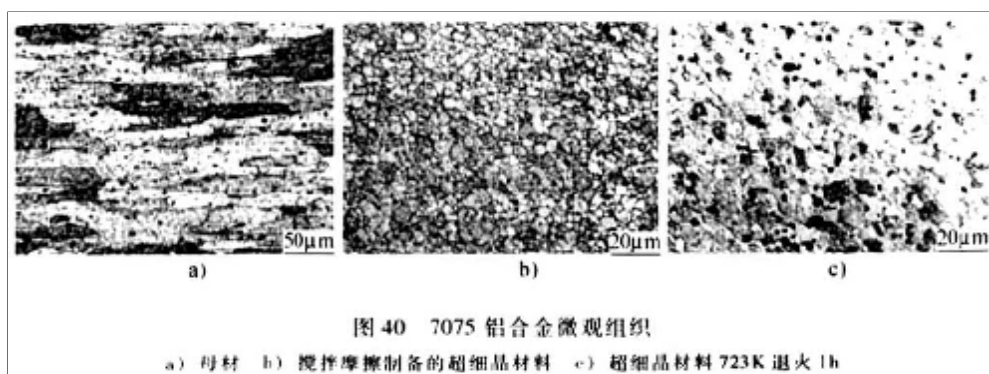


图 40 7075 铝合金微观组织

a) 母材 b) 搅拌摩擦制备的超细晶材料 c) 超细晶材料 723K 退火 1h

4. 搅拌摩擦焊接修复

通过在原始焊缝上开槽的方式模拟了搅拌摩擦焊接的修复过程，首先用尺寸略大于缺口的铝合金塞块对其进行封孔，用相同尺寸的搅拌头对其进行两次修复。两道焊缝之间有一个偏移量，其目的是消除由于塞块的加入产生的两个新界面。通过采用这种两道焊缝搭接的方法，完全可以实现搅拌摩擦焊接接头的有效修复，尤其在航空修理领域中有广阔的应用前景。

裂纹是航空修理中极为常见的损伤形式，主要发生在蒙皮、发动机叶片等承受交变载荷及应力集中的构件中。传统的修理方法是在裂纹的尖端终止裂孔、铆接加强片等方法，因而降低了构件的性能和使用寿命。FWS修补技术可消除机翼裂纹修理时的高应力集中，其蒙皮表面需要的首次安全检验时间推迟了3.5倍，同时也减少了随后的检验次数。在对框、肋裂纹搅拌摩擦焊修理时，通过优化焊接参数，搅拌头沿裂纹方向进行焊接修补，不仅可消除裂纹，而且焊缝力学性能优良，减少了大量铆钉和衬片，消除铆接修补时引起的内应力，提高了修理速度和修理质量。

破孔是军用飞机特有的一种损伤形式，当蒙皮出现破孔损伤时，以前主要采用堵盖法、贴补法、胶螺等方法进行修补，这些方法均存在不同程度的缺陷。搅拌摩擦焊接修补时，先将破孔切割成规则形状如圆形、矩形等，然后用FSW方法焊上一个与破孔形状和尺寸相同的补片，接头形式应采用斜面对接，以免影响飞机的气动性能。

5. 搅拌摩擦—激光复合焊接技术

激光辅助搅拌摩擦焊（LAFSW）是最新提出的搅拌摩擦焊技术，在搅拌摩擦焊中所需的热量来自搅拌头与工件之间摩擦，需要很大的压力和夹紧力，这就导致了搅拌摩擦焊设备笨重、价格昂贵，搅拌头磨损率高。激光辅助搅拌摩擦焊使用激光作为辅助能源加热工件，可以降低搅拌摩擦焊的焊接成本，同时简化焊接设备。激光辅助搅拌摩擦焊原理图及其说明参见绪论的相关部分，这里不再赘述。

四、摩擦焊设备

4.1 传统摩擦焊设备

摩擦焊的机械化程度较高，焊接质量对设备的依赖性很大，要求设备要有适当的主轴转速，有足够大的主轴电动机功率、轴向压力和夹

紧力，还要求设备同轴度好、刚度大。根据生产需要，还需配备自动送料、卸料、切除飞边等装置。

1. 连续驱动摩擦焊机

(1) 设备组成及要求 普通型连续驱动摩擦焊机主要由主轴系统、加压系统、机身、夹头、检测与控制系统以及辅助装置等六部分组成。

1) 主轴系统。主要由主轴电动机、传动皮带、离合器、制动器、轴承和主轴等组成，主要作用是传送焊接所需要的功率，承受摩擦扭矩。

2) 加压系统。主要包括加压机构和受力机构。加压机构的核心是液压系统。液压系统包括夹紧油路、滑台快进油路、滑台工进油路、顶锻保压油路以及滑台快退油路等五个部分。夹紧油路主要通过对离合器的压紧与松开完成主轴的启动、制动以及工件的夹紧、松开等任务。当工件装夹完成之后，滑台快进；为了避免两工件发生撞击，当接近到一定程度时，通过油路的切换，滑台由快进转变为工进。工件摩擦时，提供摩擦压力，依靠顶锻油路调节顶端力和顶锻速度的大小；当顶锻保压结束后，又通过油路的切换实现滑台快退，达到复位后停止运动，一个焊接循环结束。

受力机构的作用是为平衡轴向力（摩擦压力、顶锻压力）和摩擦扭矩及能防止焊机变形，保持主轴与加压系统的同心度。扭矩的平稳常利用装在机身上的导轨来实现。轴向力的平衡可采用单拉杆或双拉杆结构，即以工件为中心，在机身中心位置设置单拉杆或以工件为中心、对称设置双拉杆。

3) 机身。机身一般为卧式，少数为立式。为防止变形和振动，应有足够的强度和刚度。主轴箱、导轨、拉杆、夹头都装在机身上。

4) 夹头。夹头分为旋转和固定两种。旋转夹头又有自定心弹簧夹头和三爪夹头之分。弹簧夹头适宜于直径变化不大的工件；三爪夹头适宜于直径变化较大的工件。为了使夹持牢靠，不出现打滑旋转、后退、振动等，夹头与工件的接触部分硬度要高、耐磨性要好。

5) 检测与控制系统。参数检测主要涉及时间（摩擦时间、刹车时间、顶锻上升时间、顶锻维持时间）、加热功率、摩擦压力（一次压力和二次压力）、顶锻压力、变形量、扭矩、转速、温度、特征信号（如摩擦开始时刻、功率峰值及所对应的时刻）等。

控制系统包括程序控制和参数控制。程序控制用来完成上料、夹紧、滑台快进、滑台工进、主轴旋转、摩擦加热、离合器松开、刹车、顶锻保证、车除飞边、滑台后退、工件退出等顺序动作及其联锁保护等。焊接参数控制，则根据方案进行相应的诸如时间控制、功率峰值控制、变形量控制、温度控制、变参数复合控制等。

6) 辅助装置。主要包括自动送料、卸料以及自动切除飞边装置等。

(2) 典型设备的技术参数 表9和表10是部分国内连续驱动摩擦焊机和混合式摩擦焊机的型号、技术指标和适用范围，表11是部分国外厂家的设备型号及主要技术指标。

表9 连续驱动摩擦焊机型号及技术指标

产品型号	主要技术参数					
	顶锻力 /kN	焊接直径 /mm	旋转夹具夹持焊件 长度/mm	移动夹具夹持焊件 长度/mm	转速 /r.min ⁻¹	功率 /kW
MCH-2型	320	15~50	60~450	120	1300	37
MCH-4型	20~40	4~16	20~300	100~500	2500	11
MCH-20B	200	10~35	50~300	80~450	1800	18.5
MCH-63型	630	35~65	100~380	250~1400	1200	55
C-0.5A ^①	5	4~6.5	—	—	6000	—
C-1A	10	4.5~8	—	—	5000	—
C-2.5D	25	6.5~10	—	—	3000	—
C-4D	40	8~14	—	—	2500	—
C-4D	40	8~14	—	—	2500	—
C-12A-3	120	10~30	—	—	1000	—
C-20	200	12~34	—	—	2000	—
C-20A-3	250	18~40	—	—	1350	—
CG-6.3	63	8~20	—	—	5000	—
CT-25	250	18~40	—	—	5000	—
RS45	450	20~70	—	—	1500	—

①—A、B、C、D为机型序号。

表10 混合式摩擦焊机型号及技术指标

可焊焊件规格		型号	HAMM- (轴向推力kN)						
			50	100	150	280	400	800	1200
低碳钢焊接最大直径/mm	空心管	20×4	38×4	43×5	75×6	90×10	110×10	140×16	
	实心棒	18	25	30	45	55	80	95	
焊件长度/mm	旋转夹具	50~140	55~200	50~200	50~300	50~300	80~300	100~500	
	移动夹具	100~500	100-不限	100-不限	100-不限	120-不限	300-不限	200-不限	

表11 国外部分摩擦焊机型号及技术指标

生产厂家	产品型号	主要技术参数			
		主轴转速 /r.min ⁻¹	最大轴向力 /4.4N	焊接直径 /25.4cm	最大管面积 /645.1cm ²
FPE & Gatwick Fusion Ltd	Modular NC-4000	—	—	—	—
	Modular 7000	—	—	—	—
	Compact 25	—	—	—	—
Manufacturing Tech, Inc.	Model 40	—	—	—	—
	Model 2000	—	—	—	—
Inertia Friction Welding, Inc	7.5 ton	3000	15000	1.0	1.0
	10 ton	3000	20000	1.125	1.4
	15 ton	2400	30000	1.5	2.0
	30 ton	2400	60000	1.875	4.0
	60 ton	1500	120000	2.375	8.0
	100 ton	1000	200000	3.5	14.0
	125 ton	1000	250000	4.0	17.0
ETA	150 ton	1000	300000	4.5	20.0
	FW 10/250	—	—	—	—

2. 惯性摩擦焊机

惯性摩擦焊机由电动机、主轴、飞轮、夹盘、移动夹具、液压缸等组成。表12是惯性摩擦焊机的型号和技术指标。这些焊机可以有不同的组合和改动，所有焊机均可配备自动装卸、除飞边装置和质量控制检测器，转速均可由0调节到最大。

表12 惯性摩擦焊机的型号和技术规格

型号	最大转速 /r.min ⁻¹	最大转动惯量 /kg.m ²	最大焊接力 /kN	最大管形焊缝 面积/mm ²	变 型
40	45000/60000	0.00063	222	45.2	B. D. V
60	12000/24000	0.094	40.03	426	B. BX. D. V
90	12000	0.21	57.82	645	B. BX. D. T. V
120	8000	0.21	124.54	1097	B. BX. D. T. V
150	8000	2.11	222.4	1677	B. BX. T. V
180	8000	42	355.8	2968	B. BX. T. V
220	8000	25.3	578.2	4194	B. BX. T. V
250	4000	105.4	889.6	6452	B. BX. T. V
300	3000	210	1112.0	7742	B. BX
320	2000	421	1556.8	11613	B. BX
400	2000	1054	2668.8	19355	B. BX
480	1000	40535	3780.8	27097	B. BX
750	1000	21070	6672.0	48387	B. BX
800	500	42140	20000	145160	B. BX

4. 2 搅拌摩擦焊设备

搅拌摩擦焊接设备的部件很多，从设备功能结构上可以把搅拌摩擦焊机分为搅拌头、机械转动部分、行走部分、控制部分等。

1. 搅拌摩擦设备

2002年，英国焊接研究所（TWI）拥有了大尺寸的龙门式搅拌摩擦焊设备，该设备的焊接范围为8m（长）×5m（宽）×1m（高）。瑞典E SAB公司为挪威一家公司设计制造了一台商业用搅拌摩擦焊设备，可以焊接16m长的焊缝，此设备已经通过挪威船社的验收，投入使用。2003年5月，中国设计制造了型号为FSW-1DB-001型搅拌摩擦焊设备，可以焊接厚度为25mm的铝合金、镁合金，15mm的铜合金以及10mm的钛合金材料，可以焊接1.5m长的纵缝和直径2m的筒形件。

（1）常用搅拌摩擦焊接设备 常用的搅拌摩擦焊接设备大致可以分为悬臂式、C型和龙门式三大类型。悬臂式搅拌摩擦焊接设备如图41所示，根据型号不同，可以焊接1~5mm、3~10mm、3~15mm和3~20mm厚铝合金或镁合金。焊件直径2.2m以下，长度不超过15m，控制方式为3轴数控。C型搅拌摩擦焊接设备一般焊接厚度10mm以下的铝合金或镁合金，焊缝形式为纵向直缝、T形焊缝和环焊缝。龙门式搅拌摩擦焊接设备主要用于大型构件、大厚度材料的焊接，是生产中应用最多的一种。表13是部分搅拌摩擦焊接设备的主要型号与技术参数。

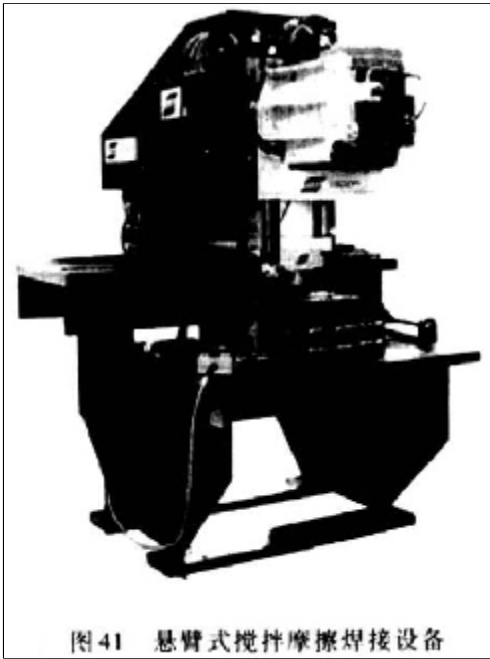


图41 悬臂式搅拌摩擦焊接设备

表13 搅拌摩擦焊接设备的主要型号与参数

型 号	主要技术参数					
	转 速 / r.min ⁻¹	焊 速 /mm.min ⁻¹	下 压 力 /kN	焊接距离 /mm	最大功率 /kW	焊接厚度 /mm
FSW 5UT	—	2000	100	1000	22	35
FSW 5U	—	2000	100	1000	22	35
FSW 6UT	—	2000	25	1000	45	60
FSW 6U	—	2000	150	1000	45	60
P-stir315	2000	10000	50	1000	15	—
DB系列	—	500	—	2200	—	20
C系列	—	1200	—	—	—	15
LM系列	—	800	—	1500	—	20

(2) 数控FSW焊接设备 这种设备不同于传统的三维刚性控制机械，它利用了六脚昆虫原理，由6个支架组成，每个支架都可以改变长度。在负载、刚度和再现性等方面都比传统的搅拌摩擦焊设备有优势。设备的主轴固定在一个框架上，可以使6个支架都能自由移动，用来高速焊接一些航空构件，设备的工作空间为1.2m×1.2m×1.2m。

(3) 搅拌摩擦焊机器人 为了实现三维空间曲线的搅拌摩擦焊接，增加焊接适应性，研制了如图42的搅拌摩擦焊接机器人，可以实现空间焊缝的焊接。

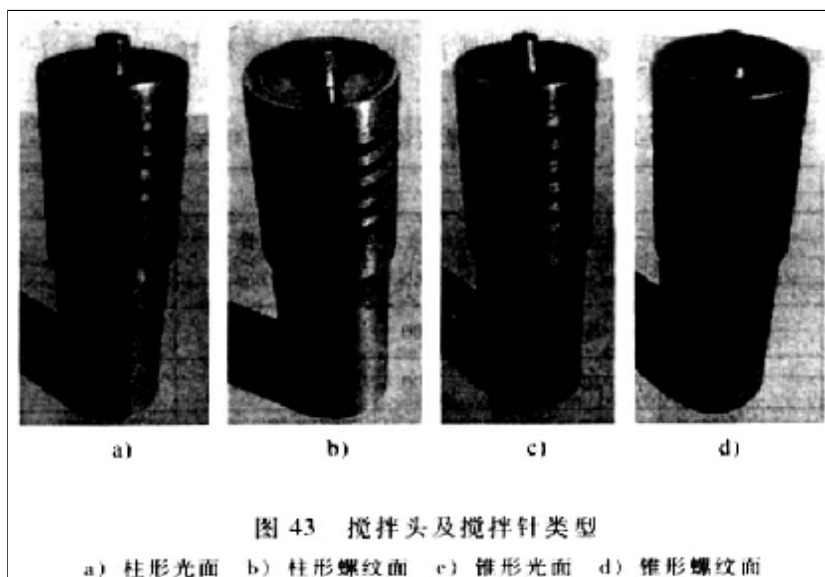


图42 搅拌摩擦焊机器人

2. 搅拌头

搅拌头是搅拌摩擦焊的关键零件，主要由轴肩和搅拌针两部分构成。如图43所示，上部较细的部分为搅拌针（也称搅拌棒），可以具有多种类型，其几何形貌和尺寸不仅决定着焊接过程的热输入方式和焊接质量及效率，还影响焊接过程中搅拌头附近塑性软化材料的流动形

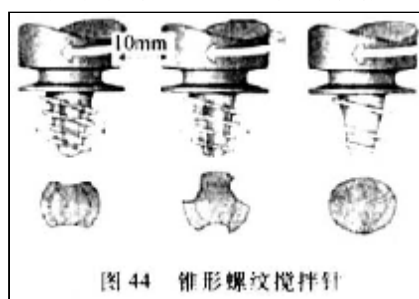
式。



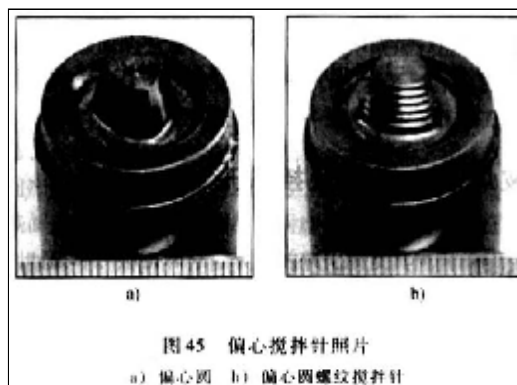
(1) 轴肩 轴肩在焊接过程中通过与焊件表面间的摩擦提供焊接热源，并形成一個封闭的焊接环境，以阻止高塑性软化材料从轴肩溢出。常见的轴肩形式是在搅拌针与轴肩的交界处中间凹入。在焊接过程中，这种设计形式可保证轴肩端部下方的软化材料受到向内的作用力，从而有利于将轴肩端部下方的软化材料收集到轴肩端面的中心，以填充搅拌针后方所形成的空腔，同时可减少焊接过程中搅拌头内部的应力集中。

(2) 搅拌针 搅拌针主要有锥形螺纹搅拌针、三槽锥形螺纹搅拌针、偏心圆搅拌针、偏心圆螺纹搅拌针、非对称搅拌针、柱形光头和柱形螺纹搅拌针、可伸缩搅拌针等多种形式。

锥形螺纹搅拌针 (Whorl™) 和三槽锥形螺纹搅拌针 (MX-Tri flute™) 是英国焊接研究所淘汰柱形针后设计出的两种搅拌针形貌。它们的共同之处是呈平截头体状 (或玻璃杯状)，而且都带有螺纹。根据计算，锥形螺纹搅拌针所切削的材料只有柱形搅拌针的60%，而三槽锥形螺纹搅拌针所切削的材料只有柱形的70%。另外，搅拌针上的螺纹能促进搅拌头附近的塑性软化材料具有向上运动的趋势。为了改善软化材料的流动路径，增强其行为，还在搅拌针上设计出平台或沟槽，如图44所示。对于三槽锥形螺纹搅拌针，锥面上开有三个螺旋形的槽，以减小搅拌针的体积，增加软化材料的流动性，可以焊接较厚的材料，同时破坏并分散附着于工件表面上的氧化物。





偏心圆搅拌针 (Trivex™) 和偏心圆螺纹搅拌针 (MX-Trivex™) 的外形是根据搅拌摩擦焊的动态模拟得出的 (图45)。计算结果表明，当搅拌针最小的纵截面与搅拌针旋转起来扫过的纵截面面积比在70%~80%之间时，焊接方向的压力最小。偏心圆螺纹搅拌针与偏心圆搅拌针相比，由于包含螺纹，从而更有利于粉碎工件表面上的氧化膜，有利于获得高强度的接头。



非对称搅拌针 (Skew-stir™) 与传统搅拌针差异较大，搅拌针中心轴与设备的中心轴之间存在一个偏角。采用非对称搅拌针焊接可提高搅拌针周围塑性软化区的范围，同时这种搅拌针的搅拌动作可以提高搅拌针的动态与静态体积比。

可伸缩式搅拌针可分为手动和自动伸缩式搅拌针。手动式收缩搅拌针可以通过调节针长来焊接不同厚度的材料和实现变厚度板材间的连接。自动收缩式搅拌针不仅具有手动收缩搅拌针的功能，还可在焊接即将结束时将搅拌针逐渐缩回到轴肩内，从而避免形成匙孔缺陷。

 打印本页 |  关闭窗口

把中国焊接网作为我的首页

把中国焊接网放入收藏

和中国焊接网联系

地址: 中国-大连甘井子区东纬路472-2号
电话: 0411-86851981 86851956 86851863
传真: 0411-86851835 技术支持: 中易互联
辽ICP备05012178号

