

图1 典型接触熔化类型示意图
Fig. 1 Diagram of typical contact melting

在原子技术中,核废料的自埋以及核反应堆堆芯的熔毁都是利用了接触熔化。在材料加工领域,接触熔化主要体现为移动热源周围的熔化。地质勘探中,受外力作用的热钻头周围的熔化也可看成是接触熔化的一种。此外地质构造的研究、能量储存以及制冰工业中,都有接触熔化的应用。

国外学者从20世纪80年代开始系统地研究接触熔化的现象与规律。近年来,国内学者^[8]对接触熔化也进行了比较系统的研究。但将接触熔化理论用于摩擦焊过程分析尚未见到公开的报道。接触熔化现象研究的主要内容是建立对象几何参数、外部载荷等的物理模型及其与液层厚度、熔化速度等参数之间函数关系。将接触熔化理论用于摩擦堆焊过程分析的关键是要建立类液层厚度与工艺参数之间的关系。

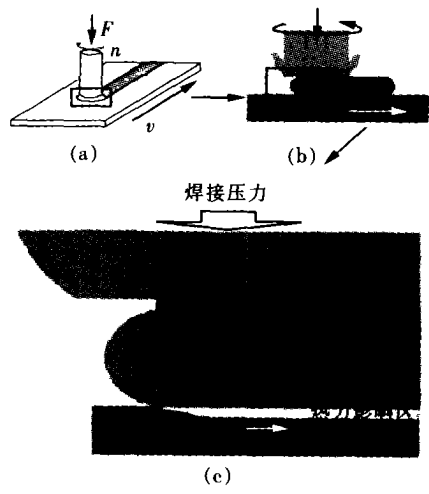


图2 摩擦堆焊示意图
Fig. 2 Diagram of consumable-rod friction surfacing

2 摩擦堆焊接触熔化物理模型

在摩擦堆焊中,将真实接触面处视为热源,温度最高(见图2),这里不断有类液层产生并转移形成堆焊层,欲熔化的材料不断与热源保持接触,从而有高的熔化率,可以视为一种特殊的接触熔化。

以接触熔化理论中固体与平板间滑动接触熔化(图1c)模型为基础,在柱坐标系中引入耗材的旋转,可建立摩擦堆焊接触熔化物理模型。通过数值计算可对耗材摩擦接触区的热场进行分析。

2.1 物理模型

简化的摩擦堆焊几何模型如图3所示。假设类液层厚度 δ 极小,惯性量可以忽略,而且为层流运动。在柱坐标中,耗材在 r, θ, z 三个方向上的速度分别为 v_r, v_θ, v_z 。

母材横向移动的摩擦能量远低于耗材高速旋转产生的摩擦热,因此可忽略不计。摩擦堆焊可视为

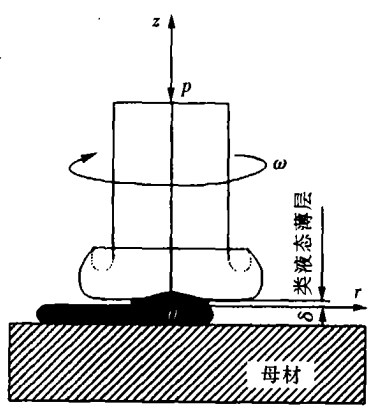


图3 摩擦堆焊模型简图
Fig. 3 Physical model of consumable-rod friction surfacing

瞬时轴对称,各参量对 θ 的偏微分均等于零。根据连续介质守恒定律,可建立摩擦堆焊摩擦界面处类

液层的平衡方程。

2.1.1 能(热)量平衡方程

忽略对流项,能量在流体摩擦产热以及垂直扩散之间保持平衡,得到简化的能(热)量平衡方程为

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{\mu}{\rho c} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2, \quad (1)$$

式中: a 为热扩散系数; μ 为动力粘度; ρ 为密度; c 为比热; T 为温度。

2.1.2 流体质量平衡方程

柱坐标系下不可压缩流体的连续性方程在这里简化为

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

2.1.3 动量平衡方程

r, θ, z 三个方向上的动量平衡方程分别简化为

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

式中: p 为压强。

边界条件为

$$z=0 \text{ 时}, v_r=0, v_\theta=0, T=T_{\text{sub}}; \quad (6)$$

$$z=\delta \text{ 时}, v_r=0, v_\theta=r\omega, T=T_m, \quad (7)$$

式中: T_m 和 T_{sub} 分别为耗材的熔点和原始温度; δ 为类液层的厚度。

同时引入 z 方向的力学平衡方程为

$$p_0(\pi r_0^2) = \int_0^{\delta} p(r, \delta) 2\pi r dr, \quad (8)$$

式中: r_0 为真实接触面半径; p_0 为平均压强; $p(r, \delta)$ 为半径 r 、厚度 δ 处的压强。

摩擦界面处修正的熔化方程为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\delta} = \rho h'_{sf} v_m f, \quad (9)$$

式中: κ 为热传导率; h'_{sf} 为修正后的熔化潜热, $h'_{sf} = h_{sf} + c(T_m - T_{\text{sub}})$; v_m 为耗材下降速度,即熔化速度; f 是类液层中液态所占的百分比, $f = \text{液}/\text{液} + \text{固}$ 。

2.2 计算结果

对上面的二阶偏微分方程组进行相似变换,定

义类液层厚度 δ 的无量纲量为 $H = \delta\omega/v_m$,半径 r 的无量纲量 $\xi = r/r_0$,引入无量纲量 $M = \mu\omega^2\omega^3/\rho h'_{sf} v_m^2 f$,经过一系列计算后可以得到 H, ξ 以及 M 之间的关系式为

$$\left[\frac{1}{2H} \left(\xi - \frac{1}{\xi} \right) \right]^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{H}{M} + 1 \right). \quad (10)$$

式(10)是关于 H 的三次函数,一旦 M 值确定,就可以计算得到 H 与 ξ 的关系。对于具体情况,为了得到明确的解,还需要有其它的方程。利用类液层中的压力分布关系,整理后可以得到无量纲的类液层厚度及其相关量的约束条件,即

$$\int_0^1 \frac{1}{2H^3} \left(\xi - \frac{1}{\xi} \right) M d\xi = \frac{Po r_0}{6\rho h'_{sf} f}. \quad (11)$$

对于具体情况,上式右边为一常数。图4是无量纲量 H, M 和 ξ 的三维关系图。可见,对于不同的 M 值, H 和 ξ 的关系会稍有所变化,但整个变化趋势是大致相同的。对于同样的 ξ 值,当外界压力增大时, M 值减小,根据图4可以看出,则薄层厚度 H 也会减小;其它条件不变的情况下,薄层中液态所占的百分比增加, M 值减小,薄层厚度 H 也会减小;其它条件不变的情况下,耗材转速增加, M 值增加,薄层厚度 H 也会增加。给定 M 值的条件下, H 随 ξ 的变化趋势如图5所示。在 $r=0$ 处,类液层厚度在理论上趋于无穷大,即类液层厚度在 $r=0$ 处具有奇异

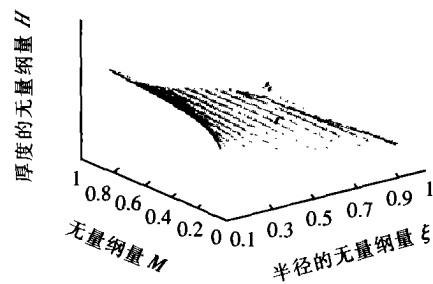


图4 无量纲量 H, M 和 ξ 的三维关系图
Fig. 4 Relationship between H, M and ξ

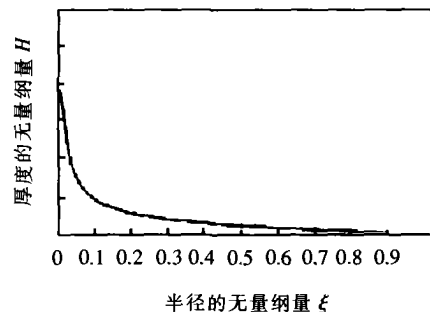


图5 无量纲量 H 与 ξ 的二维关系图
Fig. 5 Relationship between H and ξ

性,表明该处发生了强烈的能量聚集。这一现象对于摩擦堆焊过程分析具有重要意义。

3 摩擦堆焊试验结果分析

试验采用45钢耗材,耗材棒直径为 $\phi 20$ mm,母材采用20钢,长为200 mm、宽为160 mm、厚为10 mm。试验平台是在钻铣床的基础上自行改造而成。母材的移动通过工作台的平移来实现,堆焊压力分别取3 000 N、4 000 N和5 000 N。

摩擦堆焊过程最初阶段耗材端部与母材之间发生极强的干摩擦过程,材料之间互相咬合,系统处于不稳定状态。待耗材端部温度达到一定数值后,端部材料进入粘性状态,并从耗材向母材转移形成堆焊层。此时摩擦过程由开始的干摩擦转变为带有“润滑”的摩擦,摩擦扭矩迅速降低,系统进入稳定状态,表明在耗材端部与堆焊层之间形成了类液层。此时母材开始平移,耗材端部材料以逐层“熔化”的方式向母材连续过渡并与母材发生固相连接,最终形成平整的堆焊层。

文中所提到的“类液层”,是性质介于纯固态和纯液态之间的一种粘性流变体。从金相上看,堆焊层主要表现为发生了动态再结晶之后得以细化的组织。耗材与堆焊层的金相组织照片见图6。可以看出,45钢耗材由块状铁素体和珠光体组成,45钢堆焊层组织发生了明显变化,由退火状态的粒状珠光体变为纤细的片状珠光体组织。这是由于堆焊过程中发生的动态再结晶和随后的快速冷却共同作用的结果。

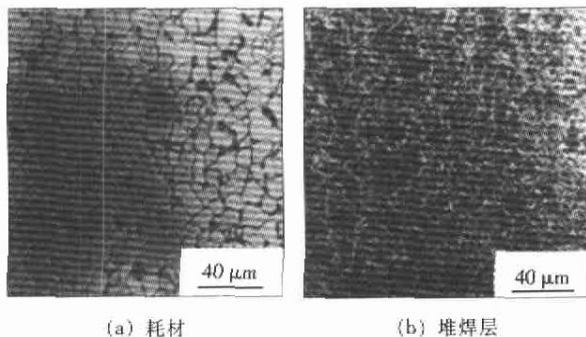


图6 45钢耗材及堆焊层的金相组织

Fig. 6 Microstructure of 45 steel consumable-rod and surfacing layer

实际中,对类液层进行直接测量较为困难,通过对耗材端面和沿中心线的剖面进行观察,可间接获得类液层形成的特点。图7为摩擦堆焊过程突然中

断后耗材端部瞬时形态,可以看出堆焊后的耗材端面并非平面,而是一个凹面, $r=0$ 处凹陷最大,出现了一个球缺形凹坑,随着半径的增大,逐渐变得平缓。整个耗材端部纹理清晰,无干摩擦粘着痕迹,表明其摩擦是发生在固体与粘性流体之间,证实了类液层的存在。在耗材端部中心区出现的凹陷表明该处为能量集中区,这是耗材端部摩擦热量产生与散失之间平衡的结果,是其固有的本质。但是,按照常规的分析方法, $r=0$ 处的速度为零,产热最小,无法解释耗材端部中心区的凹陷现象。而这一现象与前节的耗材摩擦接触熔化理论计算结果却完全吻合,接触熔化理论分析的结果是 $r=0$ 处,类液层厚度具有奇异性。但在实际过程中,因为耗材需要导热,所以中间点的薄层厚度不可能无限大,而是一个有限的厚度。因此导致耗材端部中心区出现一定深度的凹陷。根据摩擦堆焊试验观察,可以看出,其它条件不变的情况下,堆焊压力增加,凹坑中同样半径比率处的深度变浅,即类液层厚度减小;耗材转速增加,凹坑中同样半径比率处的深度变大,即类液层厚度增加。试验结果与计算结果相符,说明采用接触熔化理论研究摩擦堆焊热过程是可行的,对于其它类型的摩擦焊也是适用的。

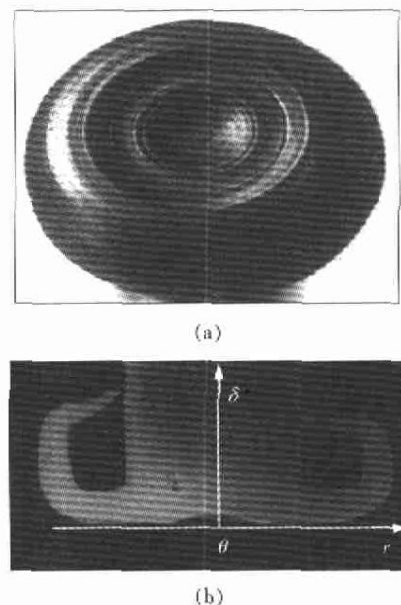


图7 耗材端面及剖面示意图

Fig. 7 Diagram of underside and section of consumable-rod

摩擦堆焊过程中,摩擦界面上发生着高速摩擦。根据摩擦学理论,在高速摩擦的过程中,接触表面产生大量的摩擦热,而又因滑动速度高,接触点的持续接触时间短,瞬间产生大量摩擦热来不及向内部

扩散。因此,摩擦热集中在表面很薄的区间,使表面温度高,温度梯度大而容易发生胶合。高速摩擦的表面温度可达到材料的熔点,有时在接触区产生很薄的熔化层。熔化金属液形成液体润滑膜^[9]。

摩擦堆焊中,摩擦界面附近应变速率极高,在变形过程中,主要依靠晶界滑移实现较高的应变速率,同时,晶界滑移会在晶界三角区等处产生应力集中,使滑移受阻,如果材料的变形继续,在相界或晶界处就会产生微裂纹,进一步变形中裂纹扩展,数量增加,使材料塑性降低。在高应变速率条件下,当变形时间很短,扩散流动和位错运动没有足够的时间释放应力时,这就需要一个新的机制及时地释放过高的应力集中,协调晶界滑移,这就只能依靠液相辅助。由于晶界滑移所产生的应力集中不能及时地通过扩散流动或位错运动等协调,在相界面处产生空洞。而界面处的液相则可以有效地消除应力集中,阻止内部微裂纹的形成,使材料获得较高的伸长率^[10]。

近年来,表面熔化(Surface melting)的理论也得到了迅速的发展。表面熔化理论认为在接近材料熔点时,晶体表面发生连续、可逆的有序—无序转变,原子移出点阵位置,表面区域形成一层类液层,类液层的结构、动力学和输送性质介于固体和纯液体之间^[11]。按照这一理论,在金属温度达到某一值(接近但还未到达熔点温度)时,金属表面首先形成性质类似于有缺陷的固体或具有残留有序的液体的一转变层,超过此温度值(仍不到熔点),金属表面会形成一层液态薄层。这也是摩擦界面出现类液层的根据。

以上分析表明,基于接触熔化理论的摩擦堆焊热过程分析对于认识该工艺的物理本质具有重要意义,同时也为其它类型的摩擦焊接理论分析提供了参考。

4 结 论

(1) 摩擦堆焊过程中,能量沉积主要发生在耗材端部,导致端部表层材料的微结构改变,形成粘性

类液层,类液层连续过渡并与母材结合形成堆焊层。

(2) 摩擦堆焊接触熔化理论分析表明,类液层厚度在耗材端部中心具有奇异性,理论厚度趋于无穷大。中心以外区域的类液层厚度随着半径的增大而逐渐减小,至最大半径处趋近于零。

(3) 摩擦堆焊试验发现,耗材端部中心区出现凹陷,与接触熔化理论分析结果一致。证实了摩擦堆焊过程中类液层的存在,同时说明采用接触熔化的研究方法研究摩擦堆焊热过程是可行的。

参考文献:

- [1] Dawes C J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloys[J]. *Welding Journal*, 1996, 75(3): 41-45.
- [2] Barrett T S, Stachowiak G W, Batchelor A W. Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultrahigh molecular weight polyethylene[J]. *Wear*, 1992, 153: 331-350.
- [3] 姚君山. 耗材摩擦焊工艺物理过程研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2001.
- [4] 陈文振, 孙丰瑞, 杨强生. 接触熔化的研究进展[J]. *物理学进展*, 2001, 22(3): 373-384.
- [5] Marcel Lacroix. Contact melting of a phase change material inside a heated parallelepipedic capsule[J]. *Energy Conversion & Management*, 2001, 42: 35-47.
- [6] Nicholas D, Bayazitoglu Y. Heat transfer and melting front within a horizontal cylinder[J]. *J. Sol. Energy Eng.*, 1980, 102: 229-232.
- [7] Bejan A. The fundamentals of sliding contact melting and friction[J]. *J. Heat Transfer*, 1989, 111(1): 13-20.
- [8] 陈文振. 相变材料接触熔化的研究[D]. 武汉:华中理工大学, 1994.
- [9] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [10] 祝汉良, 辛志峰, 李志强, 等. 高应变速率超塑性研究的新进展[J]. *航空制造技术*, 2000, (5): 13-16.
- [11] 王凤平, 李晨曦, 陆坤权. 表面熔化[J]. *物理*, 1999, 28(5): 1-8.

作者简介: 刘雪梅,女,1976年12月出生,博士研究生。现从事先进摩擦焊技术的研究,发表论文9篇。

Email: xuemei_19@163.com