

摩擦焊产热基础问题探讨*

Discussion of Heat Generation in Friction Welding

西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室 李京龙 李 洵 张 昊
中航工业北京航空制造工程研究所 栾国红 张田仓 郭德伦



李京龙

西北工业大学材料学院教授、博士生导师,摩擦焊接陕西省重点实验室主任,主要从事摩擦焊、扩散焊、钎焊及热喷涂领域的研究工作。

摩擦焊接结构完整性的获得,离不开焊接工艺理论的支撑,其中摩擦焊产热机理与规律的解析,不仅仅是科学问题,更是焊接规范调节和接头组织、缺陷控制的重要依据,所以有必要回归到摩擦焊过程的本质——摩擦焊产热。

摩擦焊产热,最初是基于“摩擦生热”的直观、朴素理解,即界面摩擦剪切力做功,耗散为热。早期 Vill、Crossland 等产热模型正是基于这一理论建立的。但是,用已有金属摩擦副的摩擦系数范围,无法获得摩

为解决摩擦焊中的产热问题,引入了摩擦阻抗的概念,并将其中的摩擦阻抗划分为滑动摩擦阻抗和粘着摩擦阻抗。结合旋转摩擦焊、搅拌摩擦焊相关研究,从塑性环(或塑化区)的萌生、生长,以及搅拌摩擦焊的周期性现象切入,给出了两种摩擦焊过程中不同的摩擦阻抗演变机制,努力回答了摩擦产热与变形产热作用时空及贡献大小等长时间困扰学术界的问题。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.20.042

擦焊高的产热热强(即产热功率)。于是,为与试验结果对应,需要一个比已有认识大许多的所谓“摩擦系数”,比如 0.577 或更高,来重新回归模型^[1-2]。目前摩擦焊数值模拟方法大多继续沿用了这一技术手段^[3-4]。

事实上,摩擦焊界面经历了从低温到高温的“摩擦”过程,这个高温范围处于再结晶温度和熔点温度之间,这说明摩擦焊过程中产热的热强发生了巨大变化,这已是基于已有摩擦学的“摩擦生热”的概念所不能理解的,其间必然发生了产热机制的转变,继续采用“摩擦系数”这一表征量的有效性就值得怀疑。于是,“变形产热”的概念被提了出来,即产热是“摩擦产热”和“变形产热”共同作用的结果,但一直困扰于二者的作用时空和贡献大小。

本文提出了“摩擦阻抗”的概念,将摩擦焊的产热问题直接归结到界

面阻抗做功,即摩擦扭矩做功,或剪切力做功。根据对摩擦焊研究前沿的总结^[5],将阻抗从机制上进一步划分为“滑动”摩擦阻抗(slide)和“粘着”摩擦阻抗(stick)2种形式。于是,上述的“摩擦产热”对应于“滑动”阻抗做功,而“变形产热”则对应于“粘着”阻抗做功。阻抗概念明确,因物理机制的不同,将需要不同物理模型进行表征。本文还将进一步阐述在不同的摩擦焊方法中,滑动阻抗与粘着阻抗作用的时空、产热贡献的问题。

摩擦焊做功产热的物理本质

在摩擦焊中,摩擦界面输入的机械能用于克服界面阻抗做功,然后以热能形式耗散,形成摩擦焊界面的产热效应。因此,摩擦焊的产热问题,其本质是阻抗做功问题。

1 机械能用于克服界面阻抗做功

摩擦做功,是作用力(等于摩擦

* 国家自然科学基金项目(51475376)资助。

力)与作用位移的点积,即

$$Q=F \cdot S, \quad (1)$$

将上式微分化(图1)在单位摩擦面积、单位时间内,产热微元为:

$$q=\tau v, \quad (2)$$

式中, τ 是摩擦剪切应力 (N/m^2 , 或 Pa), v 是摩擦线速度 (m/s)。这里只取其剪应力与线速度方向相同的情况讨论,故直接取其值相乘,取消点积符号。这里的摩擦剪切应力(简称剪切力),就是摩擦阻抗。

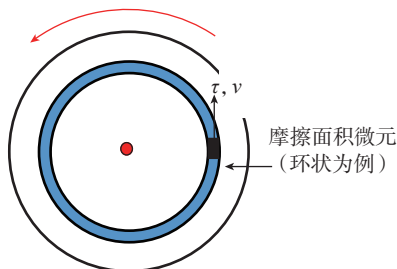


图1 旋转摩擦焊摩擦面积微元示例

2 两种典型的阻抗形式

在摩擦焊界面,存在2种典型的阻抗形式,即滑动摩擦阻抗、粘着摩擦阻抗。通常二者同时存在,并相互转变。

对于滑动摩擦阻抗,即剪切力,可以使用摩擦系数来表征,即阿芒顿定理(Amontons' Law, 1695年提出),从而将剪切力和正压力联系起来,即

$$\tau_1=\mu p, \quad (3)$$

式中, μ 为摩擦系数, p 为摩擦面正压力。

粘着摩擦,是指摩擦面两侧金属在摩擦力作用下,发生局部点咬合的现象。粘着更多地属于局部点的“冷压焊”现象——需要发生界面塑性变形,其机理是金属原子间成键,即焊接(welding)。因此,粘着现象的物理本质是物理界面演变成晶界(同质金属摩擦)或者相界面(异质金属摩擦)。当然,在界面连续相对运动中,焊接(粘着)是动态的,是一个“粘着-剪断”不断发生的过程。

粘着摩擦阻抗受控于材料在当地温度、当地应变速率下的塑性变形

抗力,而和外载本身(如压力)没有直接关系。因此,严格地讲,粘着阻抗不可以继续使用摩擦系数来表征。

对粘着阻抗研究较少,目前尚无成熟的表征。从工程流体力学角度,可以勉强提出一个粘着阻抗的表达式,

$$\tau_2=K\dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

式中, $\dot{\gamma}$ 为应变速率, K 为粘度系数, n 为流性指数。可以通过 Gleeble 热模拟试验,获得材料在不同的温度以及应变速率下的流变应力,进而通过回归分析获得上述系数或指数。

3 阻抗的演变

这2种阻抗形式存在于整个摩擦焊过程中,目前需要解决的问题主要是在某一时间段内谁主导的问题。

在摩擦焊条件下(即摩擦面剪切速度范围),材料发生粘着常需要一个开动温度,如 Maalekian 等^[2]给出碳钢的粘着摩擦开动温度为 720°C ,在此温度以下,界面剪切力为滑动摩擦所主导,在再结晶温度以上 ($0.6T_m$, 碳钢为 860°C),界面为粘着机制主导。笼统地讲,就是冷态对应滑动摩擦,热态对应粘着摩擦。

滑动摩擦阻抗与粘着摩擦阻抗的相对大小在学术界仍存在争议。一般地认为,旋转摩擦焊中,滑动摩擦阻抗小于粘着摩擦阻抗,并主要作用在摩擦初期的环状局部界面,其产热热强低,对界面仅起到预热作用;而对后续摩擦产热起核心贡献的是粘着阻抗。二者是顺序转变,并最终达到连续塑性流动、挤出飞边,这就是旋转摩擦焊的产热机制^[6-8]。对搅拌摩擦焊,二者对产热的贡献则相当,之间的时序关系不是顺序转变,而是周期性演变,从而形成搅拌摩擦焊中温度、力矩的周期性变化机制。

旋转摩擦焊接头的塑性环与热流模式

热流模式^[7](heat pattern)概念源于电阻点焊,后被美国金属学会(ASM)引入到摩擦焊中^[9],即 HAZ

所包络区域的形态。如图2所示,旋转摩擦焊有X型(剪刀型)、I(碟型)2种典型热流模式^[6]。该区域的包络线实际上是一个组织转变或晶粒尺寸发生变化的等温线,因此,热流模式也就暗示了摩擦界面产热热强的分布特征等重要信息,值得深入研究。

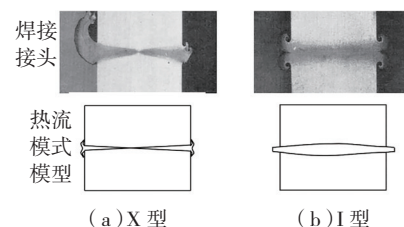


图2 Crossland给出的2种典型热流模式模型

热流模式虽然给出了接头焊后的综合信息,但不能直接体现焊接过程中界面热强的分布与演变。事实上,热流模式有一个萌生、生长的演变过程,这就是塑性环,或者称深塑区^[8]。因此,塑性环的萌生位置、长大模式及其形貌特征,反映了界面产热热强信息。

1 塑性环现象及发生机制

“塑性环”借用了电阻点焊中的概念,点焊中,在界面接触区域外缘,由于此处电流密度高,首先被加热,金属塑化贴合形成一个塑性环,然后熔核在这个封闭塑性环内生长。

如图3所示,旋转摩擦焊塑性环萌生的位置大致在界面 $1/3R \sim 2/3R$ 之间的某一环状区域。在塑性环萌生后,会向里、向外生长,直至长满整个界面而完成冶金结合,从而消除物理界面。这一点与电阻点焊的塑性

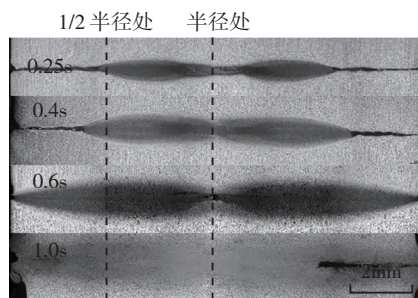


图3 不同时刻旋转摩擦焊塑性环萌生与演变形貌

环形成不同,点焊的塑性环形成后不再变化,随后则是在其内部液化形核并长大,核区是铸造组织。摩擦焊则是塑性环直接长满界面,没有液相生成,核区是锻造细晶组织。

塑性环萌生、生长的过程,暗示了界面产热的不均匀性。图4给出了界面沿径向温度分布曲线及其随时间演变的过程,这一结果进一步印证了前述的塑性环位置、形貌特征等问题,即萌生点总是处在峰值温度下。这一规律可以引发对旋转摩擦焊接头设计的思考,通过改变焊接过程中的热流模式,比如空心设计、倒角设计等,来满足不同的接头结构设计。

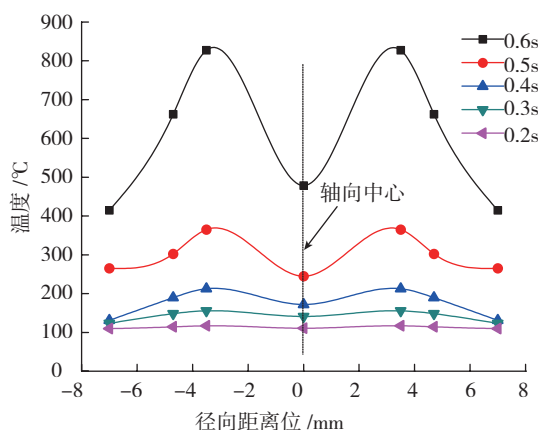


图4 不同时刻旋转摩擦焊界面径向温度分布曲线

2 对界面产热热强分布演变的思考

早期的界面产热模型基于滑动摩擦理论,整个界面从一开始均存在摩擦阻抗,并假设一个界面压力分布,从而导出一个界面产热分布模型。界面压力一般假设成均匀分布或抛物线分布^[10]。最终产热峰值点都落在了界面的外缘,相应的塑性环起始位置也应该在此处。但这一结果和实际观测到的界面温度分布演变特点(见图4),以及塑性环萌生在界面 $1/3R \sim 2/3R$ 处(见图3)的事实不相符合。事实上界面阻抗演变大致遵循以下的变化规律:在界面 $1/3R \sim 2/3R$ 之间的某一环状区域,在摩擦初期和中期(飞边形成之前)才是一直贴合最紧密的地方,因此有机会持续摩擦(滑动摩擦)、升温,然后

形成粘着。这时,界面摩擦由滑动逐渐转为粘着机制。随后,粘着点在该区域生长连续后,形成塑性流动,在压力作用下向里、向外流动传热传质,从而使贴合区域向里、向外扩展,于是扩展后的界面形成新的粘着摩擦阻抗,变成新的产热区域,直到粘着区域长满界面,使整个界面获得冶金结合,之后飞边就出现了。

图5给出了一组旋转摩擦焊中,扭矩、轴向缩短量以及接头表面温度随时间的演变过程。扭矩所呈现的宏观信息以及表面温度的变化可以印证上述假说,扭矩对应于界面总的摩擦阻抗(界面求积)。在加热阶段,

可以看到扭矩的特征是:在经历初期平台后,迅速上升到峰值,之后衰减到一个较高的平台而进入塑性流动阶段(准稳态阶段)。与之伴随产生的温度演变特征是:在第一个较低的扭矩平台上,对应一个较低的表面温度平台(约 160°C);在扭矩迅速上升阶段,温度也随之迅速上升,之后回落到一个准稳态温度。

在摩擦初期较低的扭矩平台上,温度上升梯度小或出现平台,说明阻抗的类型与性质没有变化,摩擦面积(集中在界面 $1/3R \sim 2/3R$ 之间的某一环状区域)也没有明显变化,在该区域内产生干摩擦,即滑动摩擦,此时热量开始积累。因摩擦面积小、产热低,且热强变化不大,而使产热与耗热最终在某个温度下达到平衡,界面

阻抗保持了滑动摩擦主导的特征。

在扭矩平台结束转为快速上升时,界面塑性环形成,即在该区域已产生塑化金属层,标志着界面从滑动摩擦过渡到粘着摩擦。随后塑性环开始向里、向外扩展,摩擦面积增大。于是在较高的粘着阻抗和不断增大的摩擦面积双重作用下,扭矩、温度迅速上升。当塑性环长满整个界面时,扭矩达到峰值。随后界面塑性层增厚,并挤出飞边。

以上分析表明,滑动摩擦对产热的贡献是在摩擦初期,且局限于 $1/3R \sim 2/3R$ 的某个环状区域内,而对接头形成起主导作用的是粘着摩擦。通过对扭矩曲线的分段积分,可大致计算出粘着贡献大约占80%或更高,如果将随后的准稳态阶段也计算在内,则会达到90%。Vill根据试验实例,计算出粘着贡献达到87%^[8]。

塑性环萌生、长大机制,可能也适用于线性摩擦焊过程。但在线性摩擦焊过程中,塑性层可能萌生于摩擦面的中心,之后沿界面的2个方向生长,而搅拌摩擦焊的阻抗演变机制则又有所不同。

搅拌摩擦焊中“滑动-粘着”阻抗周期性演变机制

1 两种机制演变的学说

搅拌摩擦焊中周期的概念,在时间上对应于搅拌头的旋转周期;在空间上对应于前进步长,也对应于表面弧纹的宽度。

在搅拌摩擦焊中,滑动摩擦、粘着摩擦2种阻抗同时存在。周期性波动主要受前进侧“滑动-粘着”周期性转换机制影响,在前进侧以外的摩擦面区域,粘着摩擦一直起作用。图6给出了搅拌摩擦焊过程中周期性特征形成示意图,在一个周期内,搅拌头前进侧首先面对冷态壁面,产生滑动摩擦并升温,当温度达到一定值后进入粘着摩擦、萌生塑性层(对应于旋转摩擦焊的塑性环),随后塑

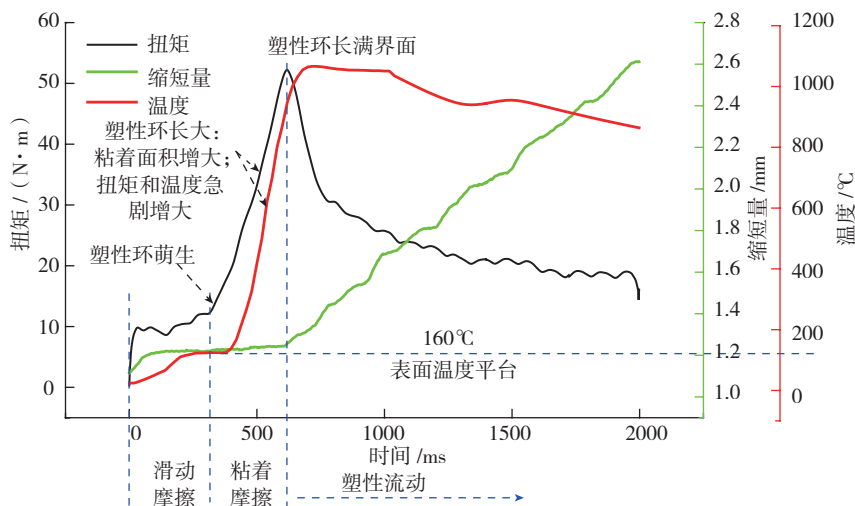


图5 旋转摩擦焊接过程中扭矩、温度、轴向缩短量随时间的演变规律

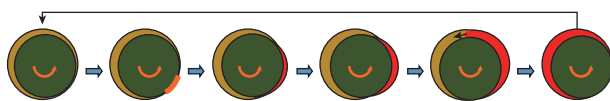


图6 搅拌摩擦焊过程中周期性特征形成示意图

性层长大到后退侧,使摩擦面增大,同时粘着摩擦起主导作用,温度继续升高。不断塑化的金属流动、填入后方,并部分填回前进侧完成一个周期。在热态塑化金属从前进侧迁移走后(受搅拌头的顶锻挤压),搅拌头重新面对冷态壁面,于是进入下一个周期。

2 机制演变学说的周期性现象支撑

空间周期性现象已获得接头组织周期性的大量验证,如表面弧纹、纵断面带状结构、焊缝横断面的洋葱环结构^[11-12]等,其周期性和前进步长相一致^[13]。这种组织的周期性说明了塑性金属流动的周期性,而不是通常理解的稳态、连续流动。同时,从焊接行进中也发现了位移波动性,其波动周期与前进步长一致:对应于搅拌头面对冷壁面干摩擦的迟滞性,以及塑化金属迁移后的快速移动。

图7显示了搅拌头温度场也具有周期性变化特征,对应于前进侧金属从滑动摩擦(冷态),到粘着—塑化,以及塑化金属层长大、流动(温度最高)的周期性过程。

扭矩的周期性波动特征如图8所示,其波峰对应于前进侧的滑动摩擦时间段,因为面对硬的冷态壁面,在大的前进挤压力作用下,需要较高的剪切力来产生摩擦运动;其波谷对应于粘着摩擦和塑化金属长大填满过程,此时由于高温塑化金属的自润滑效应,其摩擦剪切阻抗变小。但是,尽管粘着阻抗小于滑动阻抗,但对产热的贡献还和摩擦面积有关。因此,二者的贡献其实相差不远。

3 周期性现象的影响规律初探

在扭矩、压力、温度的周期性波动现象中,以扭矩的波动敏感性最强,并且扭矩的解析也更好地说明了摩擦阻抗在一个周期中的演变。为便于参量的采集,试验在摩擦焊物理

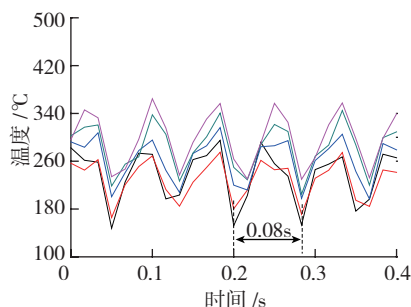


图7 搅拌摩擦焊温度场周期性波动特征

模拟机上进行,母材为 AA1100 铝合金。获得规律见图9,经理论建模、拟合参数后,得到具有 Arrhenius 形式的扭矩波动强度表达式^[14]:

$$\Gamma^* = A \exp\left(-\frac{B}{\omega^2/v}\right), \quad (5)$$

式中, A 为指前因子, B 相当于周期性波动的激活能。二者都是与摩擦副材料相关的系数,对本试验中使用的材料 $A=90.42$ 、 $B=6562$ 。扭矩波动强度实际上是扭矩波动量的无量纲表达式,即扭矩振幅除以平均扭矩:

$$\Gamma^* = \frac{\Gamma_0}{\Gamma_1}. \quad (6)$$

ω^2/v 相当于热输入(线能量),其中 w 是搅拌头的旋转速度, v 是前进速度。这一结果表明,随着热输入的增大,周期性波动强度增大,且趋于80%。这说明波动性在高热输入参数下容易发生,采用低热输入参数焊接,将使波动变得不明显。

4 两种阻抗的产热分配

基于获得无缺陷焊缝的焊接参数的研究总结与试验工作,结合扭矩的波动解析式,可以获得滑动摩擦产热比例模型:

$$\delta = 1 - A \exp\left(-\left(\frac{Q}{RT}\right)^\beta\right), \quad (7)$$

式中, A 和 β 是试验常数, Q 为变形激活能, R 是气体常数, T 是焊核区温度。根据该式可以获得滑动摩擦对产热贡献的影响规律(图10)^[15]。这个规律说明,滑动摩擦与粘着摩擦这两种阻抗同时对搅拌摩擦焊的持续产热作出贡献,且贡献在伯仲之间,更多的参数点落在了大于50%的区间,说明通常条件下,滑动摩擦的贡献要略大一些。热输入越小(线能量越小)滑动摩擦的贡献越大。

结论

本文提出了摩擦阻抗的概念,介绍了滑动、粘着两种阻抗形式,通过对塑性环、热流模式、周期性等和摩擦焊过程紧密相关概念的阐述,对摩擦焊产热问题进行了总结。

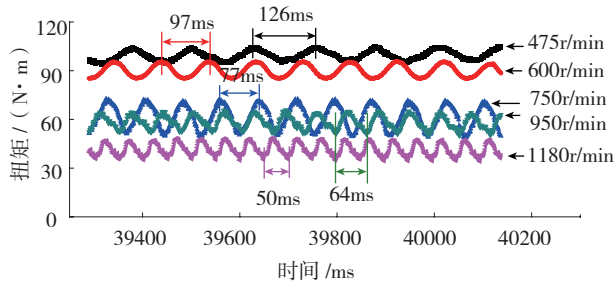


图8 搅拌摩擦焊扭矩的周期性波动特征

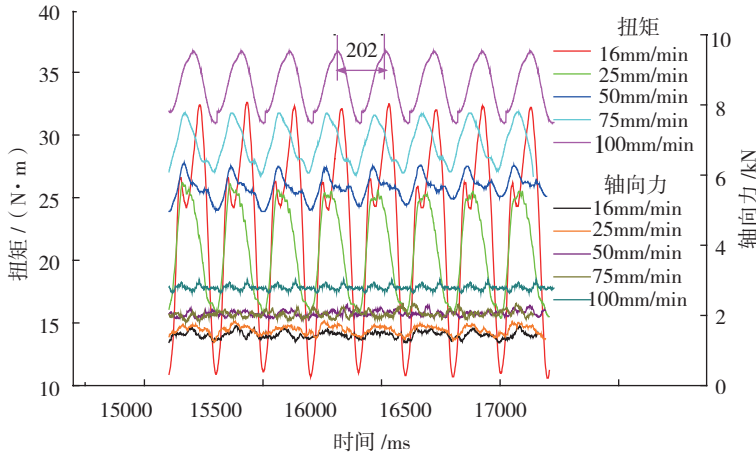


图9 压力、扭矩周期性表征

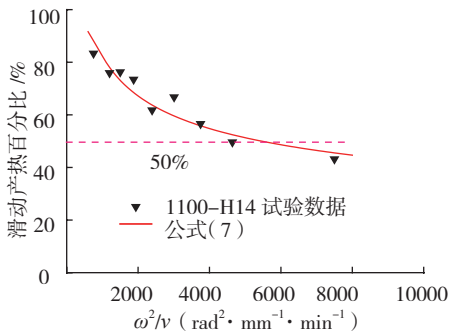


图10 滑动摩擦对产热贡献的百分数随 ω^2/v 的变化规律

(1) 阻抗的演变。

旋转摩擦焊中的摩擦阻抗由滑动摩擦向粘着摩擦顺序演变。摩擦初期以 $1/3R \sim 2/3R$ 之间的某个环状区域的滑动摩擦为主导,当该处热量积累使温度上升到一定程度后,进入粘着摩擦阶段,形成塑化金属层,即塑性环。随后塑性环向里、向外生长,界面为粘着摩擦所主导,扭矩(代表界面总的阻抗)、温度(代表总的产热热强与热耗散的差值)急剧上升。当塑性环长满整个界面,飞边挤出时,标志着整个界面焊接机理的实现。

搅拌摩擦焊是“滑动-粘着”周

期性波动演变的过程,没有发生一个替代另一个的转变过程,这一特征表现在扭矩、压力、温度、组织、步长等时空周期性波动上。在一个周期内,搅拌头前进侧面对冷态固壁面产生滑动摩擦,随后温度升高形成塑化金属层(相当于旋转摩擦焊的塑性环),塑化层向后退侧长大,并继续排向搅拌头后方。当塑化层在搅拌头的锻造压力下排出前进侧后,搅拌头继续面对新的冷态壁面开始滑动摩擦,于是下一个周期就开始了。

(2) 对产热的贡献。

旋转摩擦焊中,滑动摩擦阻抗对界面起预热作用;而粘着阻抗对产热的贡献超过 80%。搅拌摩擦焊中,滑动摩擦阻抗与粘着摩擦阻抗共同对界面持续产热作出贡献,其贡献在伯仲之间。采用较小的热输入时滑动摩擦的贡献略大一些,即对应于较高的行进速度和较低的旋转速度。

参考文献

[1] VAIRIS A, FROST M. Modelling

the linear friction welding of titanium blocks. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 292(1): 8-17.

[2] MAALEKIAN M, KOZESCHNIK E, BRANTNER H P, et al. Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars. *Acta Materialia*, 2008, 56(12): 2843-2855.

[3] 姬书得, 刘伟, 张利国, 等. FGH96 合金惯性摩擦焊过程材料流动行为的数值模拟. *材料科学与工艺*, 2013, 21(1): 109-112.

[4] LI W, WANG F. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(18): 5921-5926.

[5] MAALEKIAN M. Friction welding - critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2007, 12(8): 738-759.

[6] CROSSLAND B. Friction welding. *Contemporary Physics*, 1971, 12(6): 559-574.

[7] 赵熹华, 冯吉才. 压焊方法及设备. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[8] 宁斐章, 才荫先. 摩擦焊. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[9] ASM International. *ASM handbook - welding, brazing and soldering*. Materials Park, OH, 1993.

[10] VILL V I. *Friction welding of metals*. New York: American Welding Society, 1962.

[11] TOLEPHIH M H, MASHLOOSH K M, WAHEED Z. Comparative study of the mechanical properties of (FS) and MIG welded joint in (AA7020-T6) aluminum alloy. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 2011, 7(2): 22-35.

[12] SCHNEIDER J A, NUNES J A C. Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, 35(4): 777-783.

[13] CHEN S T, LUI T S, CHEN L H. Effect of revolutionary pitch on the microhardness drop and tensile properties of friction stir processed 1050 aluminum alloy. *Materials Transactions*, 2009, 50(8): 1941-1948.

[14] XIONG J T, ZHANG X C, LI J L, et al. Characterization of the periodic variation in friction stir welding torque using a simulation device. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(4): 350-354.

[15] QIAN J W, LI J L, XIONG J T, et al. Periodic variation of torque and its relations to interfacial sticking and slipping during friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(4): 338-341.

(责编 早春)