

# 工艺参数对线性摩擦焊接 45# 钢温度场及轴向缩短量影响的数值模拟分析\*

## Numerical Analysis of Different Parameters Effect on Temperature Field and Axial Shortening of Linear Friction Welding 45# Steel Joint

西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室 马彩霞 李文亚 陈亮 马铁军

**[摘要]** 基于 ABAQUS/Explicit 显式有限元分析软件,采用开发的线性摩擦焊接同质接头的二维计算模型,研究了工艺参数对线性摩擦焊接 45# 钢接头温度场和轴向缩短量的影响。结果表明,提高振动频率、振幅、摩擦压力,界面温度能在更短时间内上升至较高温度,且轴向缩短量以较快速率达到更大值,三者对计算结果的影响,统一于热输入功率;当热输入功率超过某一临界值时,缩短量与其呈线性关系。

**关键词:** 线性摩擦焊 数值模拟 Johnson-Cook 模型 热输入

**[ABSTRACT]** A two-dimensional finite element model of linear friction welding (LFW) of similar joints is developed based on the ABAQUS/Explicit software. The effects of processing parameters on the temperature field and axial shortening of LFW 45# steel joints are investigated systematically. The results show that the interface temperature reaches quickly up to a higher temperature in a shorter time and the axial shortening increases to a greater value at a faster rate through increasing oscillation frequency, amplitude and friction pressure. Moreover, the effect of these three factors on the final results could be characterized as the impact of heat input. The axial shortening exhibits a linear relationship with the heat input as which exceeds a critical value.

**Keywords:** Linear friction welding Numerical Simulation Johnson-Cook model Heat input

线性摩擦焊接 (Linear Friction Welding, LFW) 是一种优质、高效、节能与环保的固相焊接方法,在国防工业领域,尤其是在整体叶盘制造中具有非常广阔的应用前

景<sup>[1]</sup>。根据英国焊接研究所(TWI)的介绍及目前的少量文献报道,LFW 不仅可以高质量地焊接钛合金<sup>[2-5]</sup>,还可用于高温合金<sup>[6]</sup>、钢<sup>[7]</sup>等材料的焊接,以及异种材料的连接<sup>[6]</sup>,可解决传统熔焊方法或旋转摩擦焊中难焊或无法焊接的部件。用数值模拟作为辅助手段研究接头温度场与塑性流动情况,能解决传统工艺设计方法中多次试验和分析带来的劳动量大、成本高和通用性差方面的问题。

Vairis 和 Frost 较早对 LFW 接头温度场与变形情况展开研究,在做了较多简化的基础上分析了 TC4 在 LFW 过程中接头的一维瞬态热分析,并研究了飞边反应放热对温度场的影响<sup>[8]</sup>,同时还根据宏观飞边形貌及轴向缩短量估计了接头的应变率情况<sup>[9]</sup>,计算结果与试验有一定的相关性,但是无法对接头变形过程进行计算。Tao 等<sup>[10]</sup>采用 DEFORM 软件的隐式算法对 LFW TC4 进行了热力耦合分析,计算温度与测量结果较吻合,但由于焊接过程接头的高速运动和大变形限制了数值模拟方法在线性焊上的应用。西北工业大学的王世伟等也采用 ANSYS 的隐式分析方法对 LFW 进行了温度场数值计算,模拟结果在一定程度上能定性地说明问题,但很多方面还需要改进<sup>[11]</sup>。

本研究通过 ABAQUS/Explicit 显式有限元分析软件,在以前开发的 LFW 二维数值计算模型的基础上,研究了工艺参数对 45# 钢 LFW 过程的影响。

## 1 显式有限元计算模型的建立

### 1.1 计算模型

计算 LFW 过程中,三维模拟结果与二维结果基本吻合,故用二维模型去拟合线性摩擦焊接过程,可以大大缩短计算时间和研究周期,便于研究多变量对焊接过程中接头物理参量的影响。

模型采用梯度网格划分,界面处采用缩减积分的热-力耦合四边形单元,远离界面处采用渐变的三角形单元,如图 1<sup>[12]</sup>所示。

\* 国家自然科学基金项目(51005180)、西北工业大学翱翔之星计划、教育部留学回国人员科研启动基金项目(N9YK0003)、教育部新世纪优秀人才计划(nect-08-0463)、教育部博士点基金新教师基金项目(NAYD0005)资助。

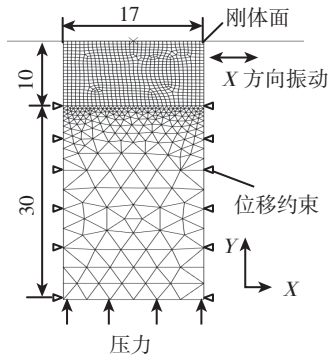


图1 计算模型  
Fig.1 Simulation model

### 1.2 边界条件与计算设置

在轴向载荷的作用下,限制接头仅沿Y方向位移,刚体面沿X方向进行一定振幅与频率的正弦模式运动。刚体面与试件间采用显式面-面接触的有限滑移动力学算法,界面摩擦系数仅取随温度变化,根据资料[13],如图2所示。作为焊接对偶件,设定摩擦热的50%传给试件,另外,基于高应变率条件下塑性变形产热经验,塑性变形的功热转换系数设为0.9。

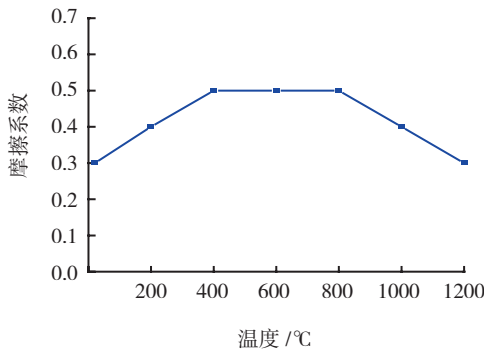


图2 计算所用界面摩擦系数随温度的变化  
Fig.2 Change of interface friction coefficient with temperature used in simulations

本研究采用了ABAQUS中提供的任意拉格朗日欧拉法(Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)自适应网格技术来预防单元畸变,自适应频率为1,即每个增量步长都进行网格适应,且每次扫掠(remeshing sweeps)50次。

试件初始温度为室温25℃,侧面换热系数暂定为100 W/(m<sup>2</sup>·K)。

### 1.3 计算所用材料的性能参数

计算中所用到的材料参数有热物理性能与力学性能参数。45#钢的密度取ρ=7824kg/m<sup>3</sup>,弹性模量E=206GPa,泊松比ν=0.3,导热系数λ与比热容c受温度的影响较大,计算中根据实际随温度变化<sup>[14-15]</sup>。在模拟过程中,采用材料力学模型为综合考虑应变、应变率、

温度影响的Johnson-Cook塑性模型(简称J-C模型)。J-C模型适用于描述金属材料从低应变率到高应变率下的动态行为,即屈服应力σ̄可用下式表示:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - \hat{T}^m), \quad (1)$$

式中,A、B、n、C、m为材料常数;ε̄<sup>pl</sup>是等效塑性应变;ε̇<sup>pl</sup>是等效塑性应变率;ε̇<sub>0</sub>是参考应变率;T̂是无量纲温度,可按式定义,

$$T^* = \begin{cases} 0 & T < T_r \\ (T - T_r)/(T_m - T_r) & T_r \leq T < T_m \\ 1 & T \geq T_m \end{cases}, \quad (2)$$

式中,T是材料当前温度;T<sub>r</sub>是参考温度或温度影响开始温度;T<sub>m</sub>是材料熔点。

文献[15]通过试验研究与验证,获得了45#钢的J-C模型参量,其中A、B、n、C及m分别为507MPa、320MPa、0.28、0.064及1.06;参考应变率为1;参考温度T<sub>r</sub>根据实际情况取25℃。J-C模型中的材料熔点最早Johnson与Cook等采用的是实际的热力学熔点。基于45#钢在远低于热力学熔点时就基本丧失抵抗变形能力的考虑,本文熔点T<sub>m</sub>采用了焊接领域中应用到的力学熔点概念<sup>[16]</sup>,对于45#钢,根据文献[15]取900℃。

根据以前的试验与所采用设备的焊接能力,计算中采用的工艺参数:频率分别为20Hz、32Hz与40Hz;振幅分别为1.5mm、3mm与4.5mm;摩擦压力分别为80MPa、95MPa与120MPa。

## 2 计算结果与讨论

LFW是一个快速加热与冷却的过程,接头形成过程中伴随强烈的塑性变形与高速率流动,下面研究工艺参数对接头形成的影响。

### 2.1 振动频率对接头温度场及缩短量的影响

选定振幅及摩擦压力分别为3mm和95MPa不变,振动频率分别取20Hz、32Hz与40Hz进行模拟,获得的接头温度场云图分别为如图3(a)、3(b)与3(c)所示;接头界面中心点温度变化曲线见图3(d);接头变形量变化曲线见图3(e)。

与频率32Hz相比,频率为20Hz时,焊接结束时刻(t<sub>f</sub>=3s)接头单个试件缩短量仅约为0.4mm,界面无明显变形,无足量粘塑性金属挤出以形成飞边。尽管界面中心温度在2s就已达到800℃,但接头两端温度较低,接头几乎未发生变形,说明接头摩擦界面没有形成合适的温度场,整个界面温度分布不均匀。在这种情况下,整个焊接界面不会发生较大、且均匀的变形,飞边挤出量少,不能将整个摩擦加热区封闭起来,故焊接界面金

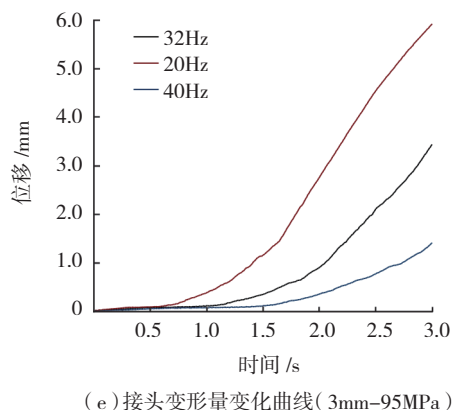
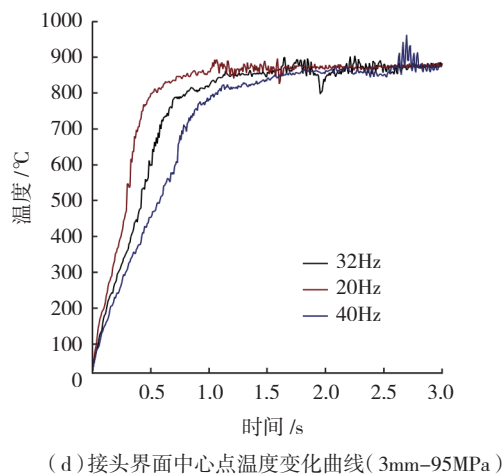
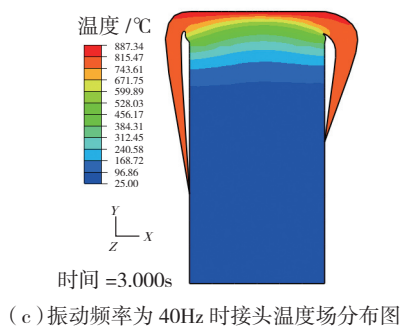
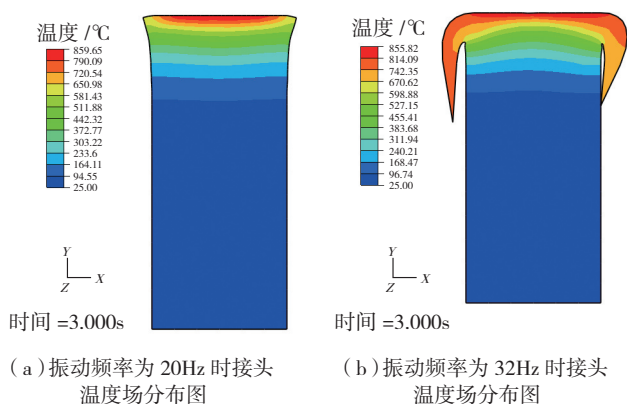


图3 振动频率对接头温度场及缩短量的影响

Fig.3 Effects of different on temperature field and axial shortening of welding joints

属存在严重的氧化现象,接头质量低劣。反之,较振动频率 32Hz 而言,频率为 40Hz 时,界面温度在 0.5s 时就达到 800℃,焊接结束时刻接头单个试件缩短量高达 5.7mm,摩擦界面被挤出大量的塑性金属。接头变形量变化曲线上升速度很快(见图 3(e)),将整个摩擦界面封闭起来,使得随后的摩擦过程在一个封闭环境下进行,故可得到高质量的焊接接头。但大变形速度很难准确控制接头的轴向变形量精度,此外,由于焊接设备的局限性,当焊接频率高于 40Hz 时会引起焊机的明显振动,影响焊接接头质量,降低焊机使用寿命。

## 2.2 振幅对接头温度场及缩短量的影响

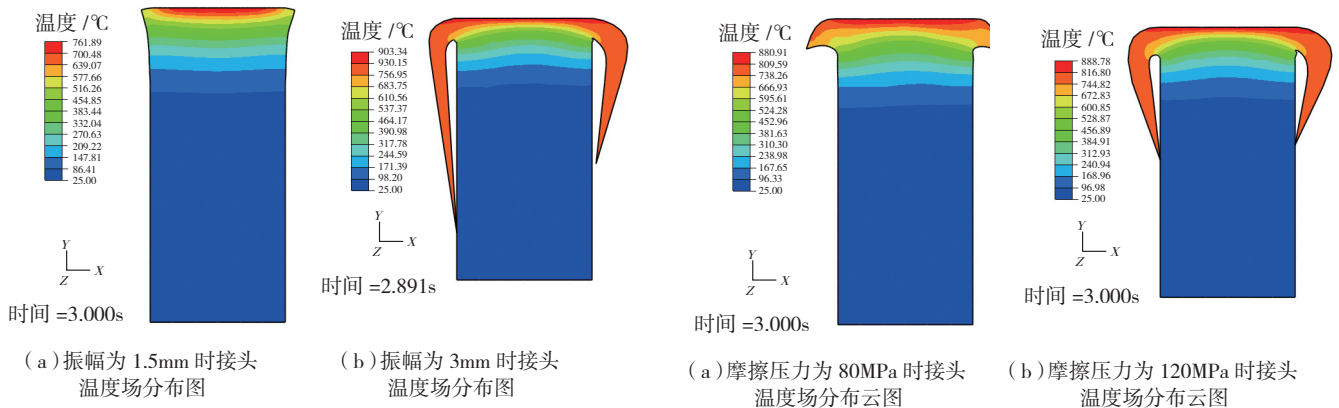
振动频率及摩擦压力分别为 32Hz 和 95MPa 不变,振幅为 1.5mm、3mm 与 4.5mm 时进行模拟,获得的接头温度场演变云图分别为图 4(a)、图 3(b)、图 4(b);接头界面中心温度的变化曲线为图 4(c);接头变形量的变化曲线为图 4(d)。

与振幅 3mm 相比,振幅为 1.5mm 时,尽管界面中心温度在焊接结束 3s 时高达 750℃,但高温区域局限在中心部分,接头两端温度不足 450℃。因此接头变形非常小,仅 0.3mm。振幅偏低时,接头界面摩擦热输入不足,整个接头区域难以形成合适的温度场,同时中心区域无法挤出足量粘塑性金属形成飞边,焊接面无法粘合成封闭区域,故可能导致接头焊缝在高温下的氧化,使得接头质量低劣;相反,与振幅 3mm 相比,振幅为 4.5mm 时,焊接结束时刻接头整体缩短量接近 7.5 mm,从图 4(c) 看出界面中心温度不到 0.75s,已超过 800℃,高温产生大量粘塑性金属,在轴向压力作用下使得界面金属被迅速挤出形成较长飞边,变形量也迅速增加。由于变形量过大,网格畸变严重,计算程序在 2.89s 异常终止。当选择较高的振幅值时,试件变形速度很快,变形量大,但是电机在高的输入功率下,不利于实现对接头变形量的精确控制,而且会带来如下焊接工艺问题:(1) 振幅越大,焊接时接头两端暴露在空气中的时间越长,范围越大,端部焊缝的氧化程度越严重;(2) 在大振幅情况下挤出的飞边不容易使接头封闭,也容易造成端部焊缝的氧化;(3) 振幅过大,接头两端与中部参与摩擦的时间差距过大,导致焊后接头组织不均匀而影响接头质量。

## 2.3 摩擦压力对接头温度场及缩短量的影响

振动频率与振幅分别选定 32Hz 和 3mm 不变,摩擦压力分别为 80MPa、95MPa 及 120MPa 时进行模拟,获得的接头温度场演变云图分别为图 5(a)、图 3(b) 及图 5(b);接头界面中心温度的变化曲线为图 5(c);接头变形量的变化曲线为图 5(d)。

由模拟结果可知,摩擦压力 80MPa 较 95MPa 而言,界面中心温度在 1.2s 时达到 800℃,焊接结束时刻( $t_f$

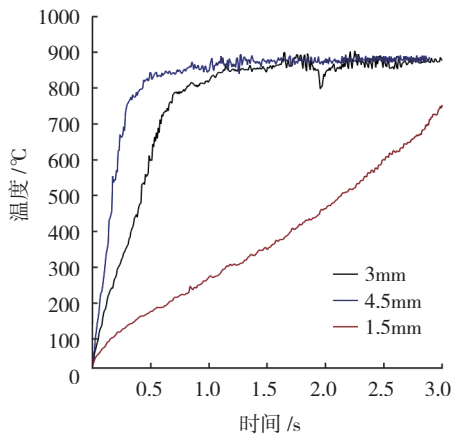


(a) 振幅为 1.5mm 时接头温度场分布图

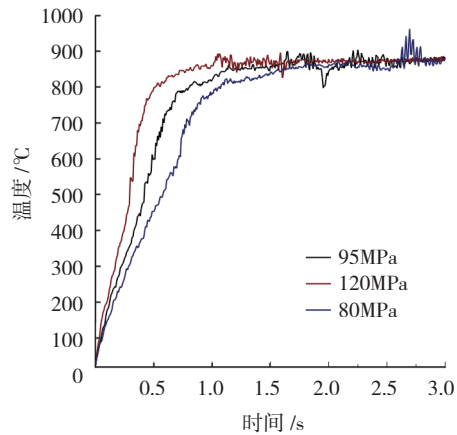
(b) 振幅为 3mm 时接头温度场分布图

(a) 摩擦压力为 80MPa 时接头温度场分布图

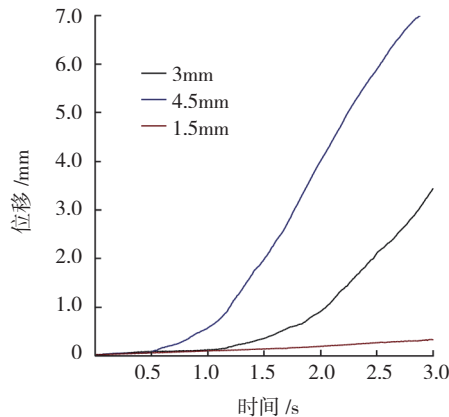
(b) 摩擦压力为 120MPa 时接头温度场分布图



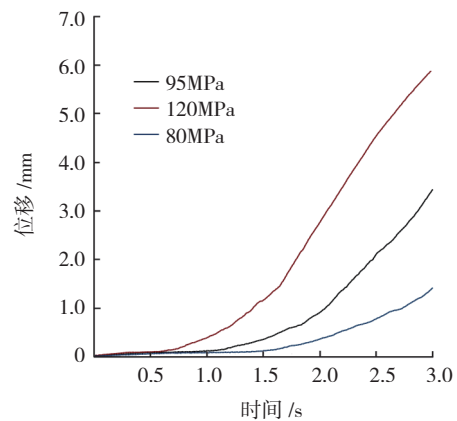
(c) 接头界面中心点温度变化曲线(32Hz-95MPa)



(c) 接头界面中心点温度变化曲线(32Hz-3mm)



(d) 接头变形量变化曲线(32Hz-95MPa)



(d) 接头变形量变化曲线(32Hz-3mm)

图4 振幅对接头温度场及缩短量的影响

Fig.4 Effects of different amplitudes on joint temperature field and axial shortening

图5 摩擦压力对接头温度场及缩短量的影响

Fig.5 Effects of different friction pressure on joint temperature field and axial shortening

=3s) 接头界面温度也达到 880℃,且界面温度均匀,并产生一定飞边,但飞边量少,单个试件缩短量约 1.4mm,相对较少。由于低的摩擦压力使加热速度变慢,接头变形不够,使得焊接区域无法形成合适的温度场及足够的变形量,以致焊接接头质量不高;反之,摩擦压力 120MPa 较 95MPa 而言,在焊接 0.5s 时,界面中心温度已达到 800℃,在 3s 时,接头单边变形量达 5.9mm,且变

形速率快。但接头在高温及大变形情况下,很难精确控制试件轴向变形量。另外,大的摩擦压力会使焊接过程中焊机机械系统处于较高的受力状态,易引起焊机及夹具较大的弹性变形,影响接头的对中精度及摩擦过程的平稳性,对接头质量产生不利影响。

#### 2.4 摩擦功率的影响

上述 3 个主要参数的影响并不是独立的,而是相互

关联的。摩擦焊机的功率可以表述为<sup>[11]</sup>：

$$HI = 4\mu fAP, \quad (3)$$

式中， $\mu$  为平均的摩擦系数， $f$  和  $A$  为振动频率与振幅，可以看出，摩擦热功率与振幅、频率及压力均成正比，频率愈高，振幅愈大，压力越大，所做摩擦功愈大，相同时间内产生的热量就愈多，从而使接头界面温度迅速升高，形成足量粘塑性金属形成飞边，轴向缩短量因粘塑性金属的挤出而增加。通常取  $\mu$  为 0.5<sup>[13]</sup>，根据前述不同工艺下的平均热功率与轴向缩短量绘制图 6。经计算，在超过一定临界功率后，缩短量与平均功率几乎以线性关系单调递增。根据 Vairis 等<sup>[4]</sup> 的早期报道，LFW TC4 钛合金也存在一定的临界热功率，超过  $1.5 \times 10^7 \text{W/m}^2$  才可能形成良好接头，根据试验选取材料不同，这一临界功率稍有不同。

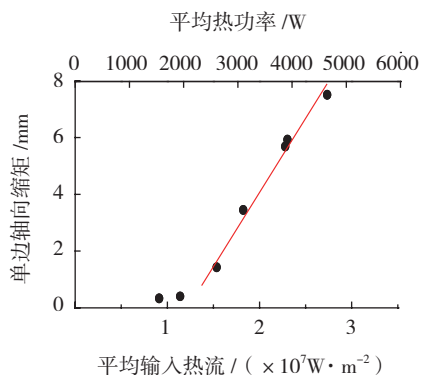


图6 平均热功率与轴向缩短量的关系

Fig.6 Relationship between average heat input and axial shortening

另一方面，获得一定功率可以有多种参数组合，但较佳工艺参数的获得应结合实际焊接过程，即振动频率、振幅与摩擦压力均应控制在合适的范围内。

## 2.5 试验验证

以淬火 45# 钢作为研究对象，在工艺参数为 32Hz、3mm、95MPa 条件下对试验结果与数值模拟结果进行对比验证，见图 7<sup>[12]</sup> 所示。

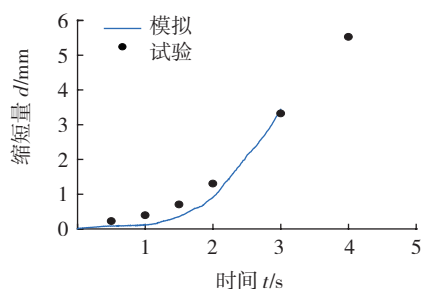


图7 轴向缩短量计算值与试验值对比

Fig.7 Comparison of simulation value and experimental value of axial shortening

## 3 结论

(1) 随着振动频率的增加，热输入增加，接头界面温度与轴向缩短量也以较快的速率增加；振幅与摩擦压力对接头界面温度及轴向缩短量的影响也表现出类似的规律。

(2) 频率、振幅、摩擦压力对焊接过程的影响不是独立的，3 者统一于接头的热输入功率，当热输入功率达到一临界值时，轴向缩短量与热输入功率的增加呈线性关系。

## 参考文献

- [1] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2004(11): 56-58.
- [2] 马铁军, 杨思乾, 张勇, 等. TC4 线性摩擦焊接头的力学性能及组织变化特点. 焊接学报, 2007, 28(10): 17-20.
- [3] 孙成彬, 张田仓, 李晶, 等. 高温钛合金 Ti60 线性摩擦焊接头形貌特征及接头性能分析. 电焊机, 2008, 38(11): 1-5, 31.
- [4] Vairis A, Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy. Wear, 1998, 217: 117-131.
- [5] Wanjara P, Jahazi M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships. Metall. Mater. Trans. A, 2005, 36: 2149-2164.
- [6] Karadge M, Preuss M, Withers P J, et al. Importance of crystal orientation in linear friction joining of single crystal to polycrystalline nickel-based superalloys. Materials Science and Engineering A, 2008, 491: 446-453.
- [7] Li W Y, Ma T J, Xu Q Z, et al. Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel. Mater. Lett, 2008, 62: 293-296.
- [8] Vairis A, Frost M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks. Mater. Sci. Eng. A, 2000, 292: 8-17.
- [9] Vairis A, Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V. Mater. Sci. Eng. A, 1999, 271: 477-484.
- [10] Tao J, Zhang T C, Liu P, et al. Numerical computation of a linear friction welding process. Materials Science Forum, 2008, 575-578: 811-815.
- [11] 王世伟, 马铁军, 张勇, 等. 45 钢线性摩擦焊接头温度场数值模拟与试验验证. 热加工工艺, 2008, 37(17): 18-21.
- [12] 陈亮, 李文亚, 马铁军, 等. 45# 钢线性摩擦焊接过程的数值分析. 焊接学报, 2010, 31(2): 91-94.
- [13] Nandan R, Roy G G, Lienert T J, et al. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. Acta Mater, 2007, 55: 883-895.
- [14] 谭真, 郭广文. 工程合金热物性. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [15] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45 钢动态塑性本构参量与验证. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 451-456.
- [16] 林德超, 史耀武, 蔡洪能. 强度和线膨胀系数匹配对焊接残余应力的影响规律. 压力容器, 1996, 13(6): 27-31.

(责编 小城)