

# 连续驱动摩擦焊接头热力耦合过程三维数值模拟研究

## 3D Numerical Simulation of Coupled Thermo-Mechanical Process of Continuous Drive Friction Welded Joint

西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室 李文亚 余敏 高大路 李京龙

**[摘要]** 采用 ABAQUS 软件,以连续驱动摩擦焊为研究对象,以碳钢为代表性材料,对摩擦焊接头的热力耦合过程进行了三维模拟。所采用材料模型为同时考虑应变、应变率、温度影响的 Johnson-Cook 弹(粘)塑性材料模型,并同时考虑材料热物性与摩擦系数随温度变化。结果表明,显式计算方法可行,计算结果与试验结果吻合较好。

**关键词:** 连续驱动摩擦焊 热力耦合 数值模拟 显式有限元方法

**[ABSTRACT]** The coupled thermo-mechanical process of continuous drive friction welded carbon steel joint is simulated of three-dimension with the ABAQUS software. The strain, strain rate and temperature-dependent Johnson-Cook material law is adopted in the 3D finite element-based model. The changes of the thermal properties and friction coefficient with temperature of the material are also considered. The results show that the numerical simulation data correlate well with the experimental data obtained in this research as well as the experimental data from the literature.

**Keywords:** Continuous drive friction welding Coupled thermo-mechanical Numerical simulation Explicit finite element method

摩擦焊接作为一种优质、高效、节能和环保的固相连接技术,在航空航天等领域有着巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。比如在发达国家,惯性摩擦焊已成功用于航空发动机粉末冶金涡轮盘与轴的连接<sup>[1]</sup>,线性摩擦焊已被应用到高推重比航空发动机整体叶盘的关键制造<sup>[2]</sup>,搅拌摩擦焊已用于飞机机舱等大型铝合金构件的制造<sup>[3]</sup>。

尽管国内外已经进行了大量的摩擦焊工艺研究,但仍有一些基础科学问题有待阐明,如热源机制、接头塑性金属流动行为等,这在很大程度上制约了摩擦焊接质量的精确控制。

由于摩擦焊过程中强烈的热力耦合及很短的焊接

时间(数秒以内),以及材料的热物理性能随温度的变化,力学性能随变形温度、应变速率等变形条件的变化等,使形成摩擦焊接头的物理冶金过程变得复杂,理论研究变得困难。

数值模拟技术的发展,为研究摩擦焊提供了新思路,目前数值研究主要涉及接头温度场和应力应变场的数值计算<sup>[4-12]</sup>。对于摩擦焊温度场的数值计算已从一维、非稳态、恒物性发展为二维甚至三维、非稳态、变物性,从单一温度场计算到温度场与应力应变场耦合求解<sup>[4-12]</sup>。对于数值计算方法,绝大部分研究者采用商业有限元软件,如 ANSYS<sup>[4,10]</sup>;而早期的研究者主要借助自行开发的有限元或有限差分程序<sup>[5-9]</sup>。对于热-力耦合求解,大部分研究者采用隐式分析方法,尽管可以分析分步的热-力耦合,但隐式求解方法不适合高应变率、大变形的情况。

针对以上问题,有研究者将高温变形区看作流体来求解<sup>[9]</sup>,以解决高速大变形问题,但将变形区看作纯流体也是对实际过程的较大简化。另一方面,大连理工大学张立文等<sup>[11,12]</sup>采用 MSC.MARC 软件(高级非线性有限元软件)对连续驱动和惯性摩擦焊接过程进行了热力直接耦合求解,计算结果与试验结果较吻合,但其采用刚塑性模型是在忽略弹性变形基础上对模型的较大简化,且热源是采用的从摩擦界面输入的当量热流。目前绝大部分研究者都是采用当量热流密度进行求解的,这就涉及对摩擦焊热源的理解及主观简化问题。除最新研究<sup>[13]</sup>考虑到搅拌摩擦焊过程中塑性变形产热外,目前均将摩擦热视为焊接热源,这样虽然部分计算结果与试验结果相当,但与实际焊接过程的差别较大。

本文采用 ABAQUS 有限元软件,以连续驱动摩擦焊为研究对象,以碳钢为代表性材料,对摩擦焊接头的热力耦合过程进行了三维模拟。计算所采用材料模型为 Johnson-Cook (JC) 弹(粘)塑性材料模型,并同时考虑材料热物性与摩擦系数随温度的变化,获得了碳钢连续驱动摩擦焊接接头在整个焊接过程中的温度场和应力、应变场,并将部分计算结果与实验结果进行了比较。

## 1 试验方法

本文所涉及的试验在 C25 型连续驱动摩擦焊机上进行,采用的焊接工艺参数为:转速 1200r/min,摩擦时间 3s,摩擦压力约 200MPa,顶锻压力约 400MPa,顶锻时间约 0.1s。针对摩擦焊接头塑性流动研究的困难以及连续驱动摩擦焊接过程中两个同质工件接头变形的对称性,试验中采用  $\phi 20\text{mm} \times 150\text{mm}$  的 20# 钢圆棒作为旋转工件, $\phi 30\text{mm} \times 150\text{mm}$  的 TZM 合金棒作为移动工件。TZM 钼合金具有熔点高、高温强度大等特点。焊后立即掰开两个工件,并空冷至室温。初步结果表明,钼合金没有变形,20# 钢变形良好。通过比较焊接前后试样尺寸,得到 20# 钢轴向缩短量与径向增加量。然后制备金相试样,并利用光学显微镜(Olympus PMG3)对焊接接头微观组织进行了分析。

## 2 计算方法

### 2.1 有限元模型

在本研究中,将 TZM 钼合金视为刚体,20# 钢为可变形体。根据传热学理论<sup>[14]</sup>,半无限大物体非稳态导热时,表面上的热源温度波动可影响的区域(热渗透深度)与时间的关系如下:

$$x = 4\sqrt{at} \quad (1)$$

式中, $x$  为热渗透深度; $a$  为材料热扩散系数; $t$  为时间。

本研究只选取了 17mm 长建立模型,大大减少单元数量、计算量与时间。考虑到计算时间与计算精度协调,界面处厚度 4mm,单元尺寸 0.8mm,采用缩减积分六面体单元(C3D8RT);其他区域为全积分四面体单元(C3D4T),两者均为热-位移耦合单元类型。建立的三

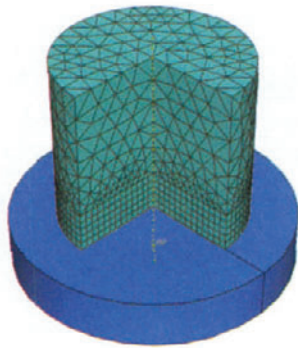


图1 连续驱动摩擦焊三维有限元模型  
Fig.1 3D FE model of continuous drive friction welding process

维模型如图 1 所示。

计算中工件材料模型为同时考虑应变强化、应变率强化与温度软化效应的 JC 弹(粘)塑性材料模型;同时,计算模型考虑了摩擦热与塑性变形热。其材料性能参数如表 1 所示。

### 2.2 计算公式

本计算中温度场计算采用的热传导微分方程(三维、非稳态、变物性)如式(2)所示。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_i \quad (2)$$

式中, $\rho$  为材料密度; $C_p$  为材料比热容; $k_x, k_y, k_z$  分别为  $x, y, z$  方向导热系数; $Q_i$  为内热源强度,简单表述为式(3):

$$Q_i = \beta \cdot \bar{\sigma} \cdot \dot{\bar{\epsilon}} \quad (3)$$

式中, $\beta$  为为塑性变形转化成热的效率或系数,本模型中为 0.9;  $\bar{\sigma}$  为等效应力; $\dot{\bar{\epsilon}}$  为等效应变速率。

根据 TZM 与 20# 钢的热物性(导温系数  $a$ ) 差别,按公式(4)计算得到约 25% 的摩擦热传给 20# 钢工件。

表 1 20# 钢性能参数

材料性能		数据
密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )		7841
弹性模量 / GPa		202
泊松比		0.3
Johnson-Cook 模型	A / MPa	298
	B / MPa	212
	$n$	0.202
	$C$	0.071
	$m$	0.833
	$T_r / ^\circ\text{C}$	20
	$T_m / ^\circ\text{C}$	1450
$\dot{\epsilon}_0$		0.0001
热导率 / W·(m·K) <sup>-1</sup>		见图 2
比热容 / J·(kg·K) <sup>-1</sup>		见图 2
塑性耗散比		0.95

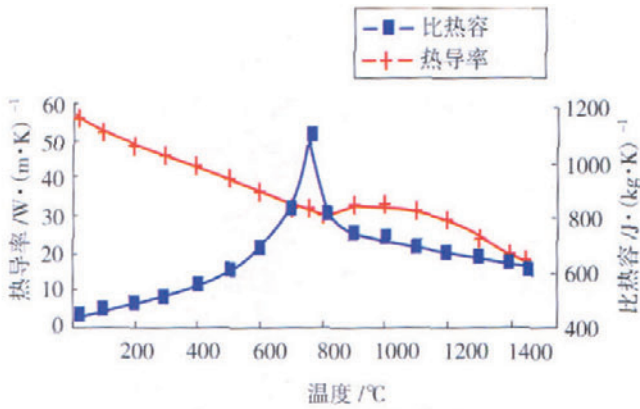


图2 20# 钢热物性参数

Fig.2 Thermal properties of 20# steel

$$\frac{q_1}{q_2} = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} = \sqrt{\frac{\lambda_1 \rho_2 C_{p2}}{\lambda_2 \rho_1 C_{p1}}} \quad (4)$$

2.3 边界条件及载荷

本计算中,在刚体参考点施加集中力和转速,其具体工艺参数与实验中的焊接工艺参数相同。为模拟实际焊接,20# 钢上端面和侧面固定,约束所有位移;给定 20 # 钢计算体初始温场为 20℃,侧面与上端面给定一换热系数 100 (W/m<sup>2</sup>·K);周围环境温度为室温 20℃;刚体与 20# 钢计算体端面接触采用有限滑移的动力接触算法,摩擦系数如图 3 所示。本模型为了防止单元畸变终止计算,采用了 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 自适应重新划分网格技术。

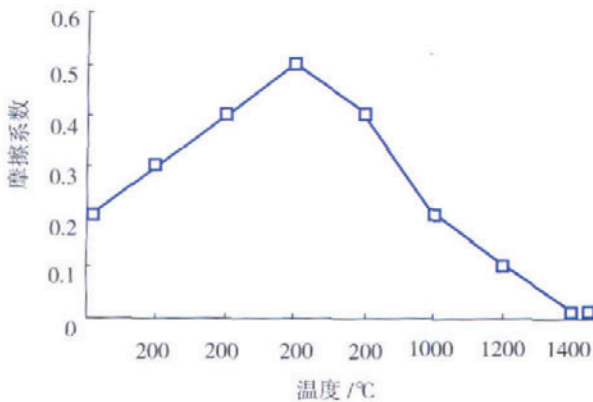


图3 摩擦系数随温度的变化

Fig.3 Change of COF with temperature

3 试验结果

图 4 为本研究焊接参数下 20# 钢接头的宏观形貌,其微观组织如图 5 所示。将 20# 钢接头沿轴向剖开,经

过腐蚀后观察其显微组织,可将接头区域分为 1- 高温区 (HTZ)、2- 热机械影响区 (TMAZ)、3- 飞边区和母材区 (PM)。其中,高温区组织为快冷条件下的正火组织,热机械影响区和母材区均由铁素体和珠光体组成。

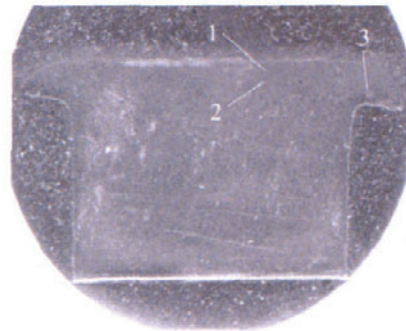


图4 20# 钢接头宏观形貌

Fig.4 Macrograph of 20# steel joint



图5 20# 钢接头接触面(左)至母材(右)的显微组织

Fig.5 Micrograph of 20# steel from joint interface (left) to base metal (right)

4 数值模拟结果

图 6 为本文有限元分析结果。由图 6 (a) 的温度分布云图得到 20# 钢旋转摩擦焊界面处局部最高温度达到了 1302℃,其温度分布特点与文献 [11] 类似。文献 [15] 中指出摩擦加热功率最大的部分是距离圆心 1/2~2/3 半径处,该处最先加热,变形层和高温区形成一个环状加热带。图 6 (a) 温度分布图反映了此试验规律。对比图 5、图 6 (a) 温度分布和图 6 (c) 应力分布得到: HTZ 区为距离端面约 0~0.51mm 的区域,其温度范围约为 1176~1302℃,应力范围约为 62~107MPa; TMAZ 区为距离端面约 0.51~1.44mm 的区域,其温度范围约为 1051~1176℃,应力范围约为 107~197MPa。图 6 (b) 的等效应变分布表明,在距离圆心约 2/3 半径处还具有较大等效塑性应变。图 6 (d) 为 20# 钢连续驱动摩擦焊接过程能量随时间变化图。其中 ALLFD 为摩擦耗散能, ALLIE 为内能, ALLPD 为塑性耗散能, ALLAE 为伪能。内能(ALLIE)为塑性能(ALLPD)和伪能(ALLAE)之和,

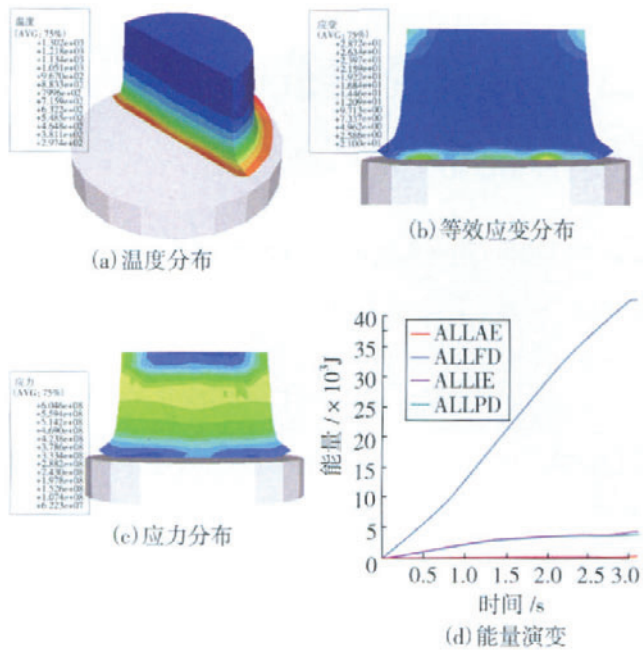


图6 数值模拟结果  
Fig.6 Simulation results

伪能的产生是因为本计算模型为避免网格畸变运用了沙漏控制。研究表明,伪能控制在内能的5%之内为可接受范围,随着网格密度的增加,伪能降低<sup>[16]</sup>,因此在某些模型中,如果其伪能在不能被接受的范围内,可采用细化网格达到降低伪能的目的。本模型中的伪能较小,这说明本计算模型网格划分较合理。通过比较图6(d) ALLFD和ALLPD曲线,还可看到初始阶段,几乎所有的能量都来自于摩擦产热,随着过程的继续,变形产热稳定增加,随后达到稳态时基本保持平衡。在计算时间为3s时,20#钢接头塑性产热约为20#钢接头实际摩擦热的1/2。因此本研究中,塑性变形产热在摩擦焊中对热量具有较大的贡献。另外,表2给出了轴向缩短量和径向增加量的试验结果、计算结果和相对误差。可以看出试验结果和试验结果吻合较好。

表2 试验和计算结果比较

试样尺寸变化	试验结果	计算结果	相对误差
轴向缩短量	2.60	2.75	5.8%
径向增加量	7.28	7.71	5.9%

## 5 结论

本文建立的三维有限元模型较好地模拟了20#钢

连续驱动摩擦焊接过程,试验结果表明20#钢接头HTZ区为距离端面约0~0.51mm的区域,其温度范围约为1176~1302℃;TMAZ区为距离端面约0.51~1.44mm的区域,其温度范围约为1051~1176℃。计算温度区域分布与试验结果基本一致,轴向缩短量、径向增加量的数值模拟结果与试验结果吻合较好。

## 参考文献

- [1] 王敬和,曲伸,祝文卉.现代摩擦焊技术在航空制造业中的应用和发展.航空制造技术,2006,(5):14-15.
- [2] 黄春峰.现代航空发动机整体叶盘及其制造技术.航空制造技术,2006,(4):94-100.
- [3] 栾国红,关桥.搅拌摩擦焊——革命性的宇航制造新技术.航天制造技术,2003,4:16-23.
- [4] 傅莉,杜随更.摩擦焊接过程数值模拟技术研究进展[J].焊接学报,2001,22(5):87-92.
- [5] HEALY J J, MCMULLANLAN D J, BAHRANI A S. Analysis of frictional phenomena in friction welding of mild steel. Wear, 1976, 37(2):265-278.
- [6] FRANCIS A, CRAINE R E. On a model for frictioning stage in friction welding of thin tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1985, 28(9):1747-1755.
- [7] SLUZALEC A. Thermal effects in friction welding. International Journal of Mechanical Sciences, 1990, 32(6):467-478.
- [8] MIDLING O T, GRONG Φ. A process model for friction welding of Al-Mg-Si alloys and Al-SiC metal matrix composites — I. HAZ temperature and strain rate distribution. Acta Metall. Mater, 1994, 42(5):1595-1609.
- [9] BENDZSAK G J, NORTH T H, LI Z. Numerical model for steady-state flow in friction welding. Acta Materialia, 1997, 45:3735-1745.
- [10] 王锴,刘金合,郭德伦,等.GH4169高温合金惯性摩擦焊的有限元模拟.热加工工艺,2006,35(23):85-86.
- [11] 张全忠,张立文,方亮,等.GH4169合金连续驱动摩擦焊接过程三维数值模拟.塑性工程学报,2005,12(6):109-113.
- [12] 张全忠,张立文,刘伟伟,等.环形件惯性摩擦焊接过程塑性区演化的数值模拟研究.塑性工程学报,2007,14(6):200-204.
- [13] SCHMIDT H B, HATTEL J H. Thermal modelling of friction stir welding. Scripta Materialia, 2008, 58, 332-337.
- [14] 杨世铭,陶文铨.传热学(第三版).高等教育出版社,1998:93-97.
- [15] 才荫先,孙松涛,朱桂枝,等.摩擦焊加热过程中变形层和高温区的扩展过程.焊接学报,1984,5(2):61-67.
- [16] MANDAL S, RICE J, ELMUSTAFA A A. Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding. Journal of Material Processing Technology 2008,203:411-419.

(责编 侧卫)