[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0578- 04

Ti-15-3 合金反挤成形的热力耦合数值模拟①

李 萍[1,2], 薛克敏[2], 吕 炎[2], 谭建荣[1]
(1. 浙江大学 机械与能源工程学院, 杭州 310027; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘 要] 针对新型亚稳定 β 型钛合金——Ti-15-3 合金, 将物理模拟与数值模拟相结合, 采用 3 维热力耦合刚粘塑性有限元模型与 3 层向后传播的人工神经网络模型相结合的方法, 开发了一个相应的有限元数值模拟系统, 对 Ti-15-3 合金筒形件的热反挤成形过程进行了数值模拟。模拟结果与试验结果吻合较好, 说明本文的热力耦合理论分析、流变应力的神经网络预测模型以及所开发的数值模拟系统是可靠的。该模拟结果为建立 Ti-15-3 合金热反挤成形过程中显微组织预测模型奠定了良好的基础。

[关键词] Ti-15-3 合金; 热反挤; 热力耦合; 数值模拟
[中图分类号] TG 302 [文献标识码] A

Ti-15-3(Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al) 合金是一种新型亚稳定 β 型钛合金, 具有良好的可锻性和冷成形性, 因其在高温下仍具有较高的比强度而被广泛地应用于航空航天工业中。Ti-15-3 的合金元素总量低于多数 β 钛合金, 故简化了冶炼工艺, 促进了 Ti-15-3 合金在航空航天等领域中的应用[1]。在热反挤成形过程中, 工件与模具表面间的摩擦及材料不可逆变形功的热耗散使得工件内部的温度分布出现明显的变化, 由于材料性质的温度相关性, 热成形的变形分析只有和热传导分析耦合进行, 才能尽可能地使理论分析结果与生产实践相吻合[2]。

根据热变形过程中金属的流动、热交换以及变形能和摩擦功转变为热能等热力因素, 作者建立了 3 维热力耦合刚粘塑性有限元模型。考虑变形程度、变形速率和变形温度的影响, 采用人工神经网络方法建立了 Ti-15-3 合金的高温流变应力的数学模型, 并将 3 维热力耦合刚粘塑性有限元模型与 3 层向后传播的人工神经网络模型相结合, 开发了一个相应的有限元数值模拟系统, 对 Ti-15-3 合金筒形件的热反挤成形过程进行了数值模拟。

1 热力耦合有限元理论

该数值模拟是建立在刚-粘塑性有限元基础上的, 采用罚函数法引入体积不可压缩条件。由 Markov 变分原理可知, 问题的真实解为泛函一阶变分为 0 的解, 其一阶变分为

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma}\delta\bar{\varepsilon}\mathrm{d}v + \alpha\int_V \dot{\varepsilon}\delta\varepsilon\mathrm{d}v - \int_{S_F} F_i\delta v_i\mathrm{d}S = 0 \tag{1}$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为等效应力, $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变速率, F_i 为在力面 S_F 上给定的面力, v_i 为在速度面 S_v 上的速度矢量, α 为惩罚因子, $\alpha = 1\times10^5$, $\dot{\varepsilon}$ 为体积应变速率。

式(1)可表示成节点的速度 v 和它的变分 δv 的形式, 由于变分 δv 的任意性, 从而得到下列一组代数方程, 即刚度方程:

$$\frac{\partial\pi}{\partial v_I} = \sum_j\left(\frac{\partial\pi}{\partial v_I}\right)_{(j)} = 0 \tag{2}$$

式中 j 为第 j 个单元, I 为整体编号下的第 I 个节点。

将上述非线性方程线性化, 得

$$\left[\frac{\partial\pi}{\partial v_I}\right]_{v=v_0} + \left[\frac{\partial^2\pi}{\partial v_I\partial v_J}\right]_{v=v_0}\Delta v_J = 0 \tag{3}$$

式中 Δv_J 为假定初始速度场 v_0 的一次修正项。

对于连续的各向同性介质, 其 3 维传热问题的热传导微分方程为

$$\frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right)+\frac{\dot{Q}}{\rho c}-\frac{\partial\theta}{\partial t}=0 \tag{4}$$

式中 θ 为随时间 t 和位置 (x, y, z) 变化的温度, $\dot{Q}$ 为单位体积的热生成率, $\dot{Q} = \beta\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}$, $\beta = 0.90-0.95$, ρ 为介质的密度, c 为介质的比热容, λ 为导热系数。

求解变形体内的温度场所应满足的初始条件和边界条件如下:

① [收稿日期] 2001- 07- 06; [修订日期] 2001- 09- 30 [作者简介] 李 萍(1973-), 女, 博士研究生.

$$t = 0 \quad \theta(x, y, z) = \theta_0 \tag{5}$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} - q + h(\theta - \theta_f) = 0 \tag{6}$$

式中　q 为由于导热引起的边界上的热量散逸，h 为综合放热系数，θ_f 为周围介质温度，n 为边界外法线方向。

当 q，λ 取不同的值时，式(6)可转化为各种边界条件。

根据加权余量的 Galerkin 法，得到以时间 t 为独立变量，用以确定节点温度的矩阵方程:

$$[K + F]\{\theta\} + [c]\frac{\partial}{\partial t}\{\theta\} = \{P\} \tag{7}$$

式中　$\{\theta\}$ 为节点温度向量，$\{P\}$ 为节点热流向量，$[K]$ 为热传导矩阵，$[F]$ 为对流或辐射边界的贡献，$[c]$ 为比热容矩阵。

采用中心差分公式将式(7)在时间域离散:

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[c] + \frac{1}{2}[K + F]\right)\{\theta\}_{t+\Delta t} = \left(\frac{1}{\Delta t}[c] - \frac{1}{2}[K + F]\right)\{\theta\}_t + \frac{[P]_{t+\Delta t} + [P]_t}{2} \tag{8}$$

分析时，将变形场和温度场作为 2 个子系统分别进行求解。在变形分析中，金属流动应力取为应变、应变速率和温度的函数，在温度分析中，考虑了塑性变形功和摩擦功转化的热量。

2　流变应力模型

在热变形过程中，Ti-15-3 合金的流变应力模型具有高度非线性和复杂性，因此，很难用理论方法来建立。而神经网络是一种智能的信息处理系统，具有自适应学习和处理复杂非线性关系的特点。数学上已经证明，3 层神经网络能以任意精度逼近任何连续函数[3~10]。

将直径为 8 mm，长为 12 mm 的 Ti-15-3 圆柱试样在 Gleeble-1500 型热模拟试验机上进行等温恒应变速率压缩试验，变形量分别为 40% 和 60%，应变速率分别为 0.01，0.1 和 1 s^{-1}，试验温度为 750~900 ℃，间隔为 50 ℃。将通过实验所获得的流变应力曲线，采用 3 层向后传播的神经网络方法建立 Ti-15-3 合金的本构模型，变形温度、变形程度和变形速率作为网络的输入量，流变应力作为网络的输出量，共 185 组样本数据，网络中的隐层含 10 个神经元，学习率为 0.05，动量因子为 0.15。

每一神经元的输出是输入的和的非线性函数，输出函数是 sigmoid 形，其表达式为

$$y_i = f(x_i) = \frac{1}{1 + e^{-x_i}} = \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_j w_{ij}x_j - \lambda_i\right)}} \tag{9}$$

式中　y_i 为神经元 i 的输出，x_i 为神经元 i 的总输入，w_{ij} 为从第 j 个神经元到第 i 个神经元的连接权重，x_j 为第 i 神经元的输入向量的一个分量，λ_i 为第 i 神经元的阈值。

按误差反向传播，逐层按下式来修正权值和阈值:

$$w_{ij}(m+1) = w_{ij}(m) + \eta\delta_i y_j + \alpha[w_{ij}(m) - w_{ij}(m-1)]$$

$$\theta_i(m+1) = \theta_i(m) + \eta\delta_i \tag{10}$$

式中　m 为权迭代次数，η 为学习率常数，α 为动量因子，δ_i 为节点 i 的误差。

图 1 所示为流变应力预测值和实测值的对比。训练后每个样本的输出值与网络输出值的相对误差在 0.1% 之内。可见，神经网络能够比较精确地预测 Ti-15-3 合金的流变应力。

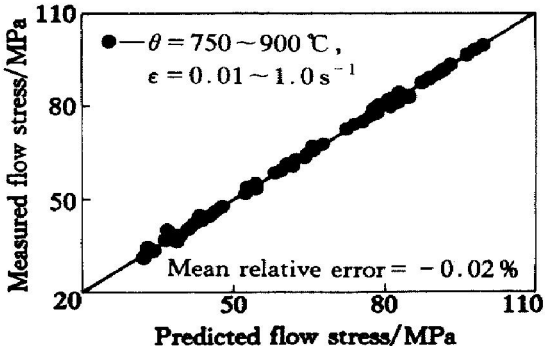

图 1　流变应力预测值与实测值比较

Fig. 1　Comparison between predicted and measured flow stresses

3　数值模拟结果与分析

采用将 3 维热力耦合刚粘塑性有限元模型与 3 层向后传播的人工神经网络模型相结合的方法，开发了一个相应的数值模拟系统，对 Ti-15-3 合金的热反挤成形过程进行了模拟。将计算空间域离散成 870 个八节点六面体单元，1 177 个节点，根据对称性，取其中的 1/4 作为模拟对象，建立 3 维分析模型。

材料初始温度为 900 ℃，模具初始温度为 850 ℃。在变形速率为 2 mm/s 的条件下，变形结束时(压下量为 35 mm)，有限元模拟所获得的热力耦合分析结果如图 2~4 所示。

由模拟结果可以看出，热反挤变形是不均匀的，变形主要集中在材料在冲头圆角处的局部区域及侧壁上。在冲头圆角附近，等效应变、等效应变速率较大且温度均较高；在筒件的侧壁，内侧的应变大于外侧的应变；而在底部，中心处的应变大于

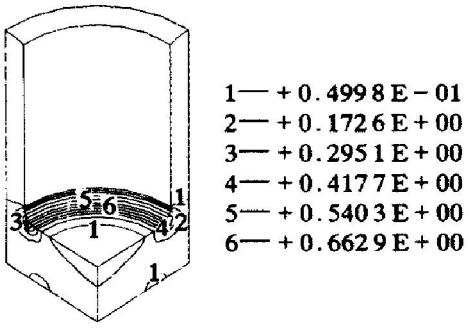

图 2 等效应变速率分布

Fig. 2 Distribution of equivalent strain rate

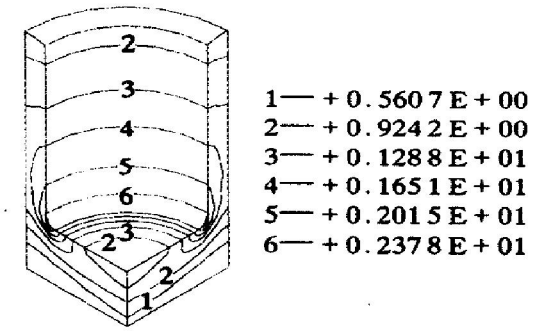

图 3 等效应变分布

Fig. 3 Distribution of equivalent strain

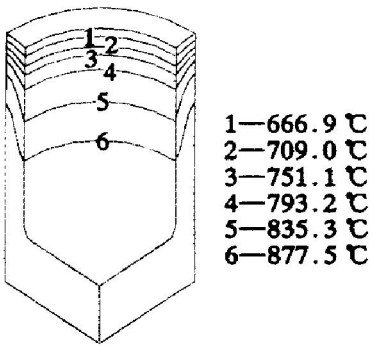

图 4 温度分布

Fig. 4 Distribution of temperature

与模具接触的上下两端面附近的应变。另外，应变速率在冲头下坯料的表面和心部、在冲头圆角处和侧壁上有明显的差异，因此，在不同部位将导致材料产生不同程度的硬化。

从图 4 可知，由于模具预热温度与坯料初始成形温度接近，变形体与模具的热交换相对较少，成形过程中变形体的温度升高主要来自于塑性变形热和摩擦生热。而侧壁处由于与模具逐渐脱离，和周围大气环境进行热量交换，热量损失较多，温度下降较快，温度梯度很大。

图 5 为采用坐标网格法实测结果与有限元数值模拟结果的比较。可以看出，二者吻合较好，由此

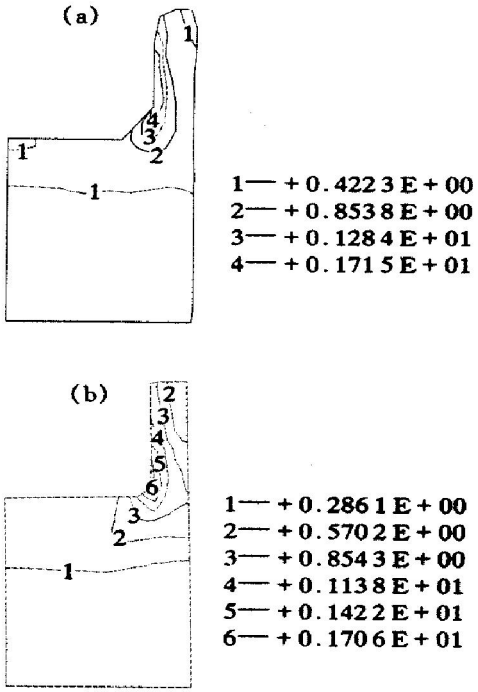

图 5 等效应变实测结果与模拟结果的对比

Fig. 5 Comparison of measured equivalent strain with simulated results

(a) —Measured results; (b) —Simulated results

证实了所开发的 3 维热力耦合刚粘塑性有限元数值模拟软件是可靠的，并且能够较准确地描述热反挤成形过程中金属的变形行为。

4 结论

采用 3 维热力耦合刚粘塑性有限元与人工神经网络相结合的方法对 Ti-15-3 合金筒形件的热反挤成形过程进行了数值模拟，得到了 Ti-15-3 合金在热反挤成形过程中的变形场与温度场。模拟结果与实测结果吻合较好，说明作者的热力耦合理论分析、流变应力的神经网络预测模型以及采用有限元与人工神经网络相结合的方法开发的数值模拟系统是可靠的，能够真实地描述 Ti-15-3 合金的热反挤工艺过程。该计算结果不仅对于制定工艺规程、指导生产具有实际意义，而且，为建立 Ti-15-3 合金热反挤成形过程中显微组织预测模型奠定了基础。

[REFERENCES]

[1] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability—a review [J]. J Mater Process Technol, 1997, 68: 262- 274.

[2] Fernandes J L M, Rodrigues J M C. Combined finite element-boundary element thermo-mechanical analysis of

metal forming process [J]. J Mater Process Technol, 1999, 87: 247- 257.

[3] Takuda H, Fujimoto H. Modeling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperature [J]. J Mater Process Technol, 1998, 80- 81: 513- 516.

[4] Rao K P, Prasad X K D Y. Neural network approach to flow stress evaluation in hot deformation [J]. J Mater Process Technol, 1995, 53: 552- 566.

[5] Larkiola J, Myllykoski P. The role of neural networks in the optimization of rolling processes [J]. J Mater Process Technol, 1998, 80- 81: 16- 23.

[6] Korczak P, Dyja H. Using neural network models for predicting mechanical properties after hot plate rolling processes [J]. J Mater Process Technol, 1998, 80: 481- 486.

[7] 齐乐华, 侯俊杰, 杨　方, 等. 金属液体凝固中直接挤压工艺的神经网络 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 586- 589.
QI Le-hua, HOU Jun-jie, YANG Fang, et al. Application of artificial neural network in process of direct extrusion during solidification of liquid metal [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 586- 589.

[8] 张兴全, 彭颖红, 阮雪榆. Ti-17 合金本构关系的人工神经网络模型 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 590- 594.
ZHANG Xing-quan, PENG Ying-hong, RUAN Xue-yu. A constitutive relationship model of Ti-17 alloy based on artificial neural network [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 590- 594.

[9] WANG Xue-ye, QIU Guan-zhou. Molten salt phase diagrams calculation using artificial neural network or pattern recognition bond parameters [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(1): 142- 148.

[10] FENG Xia-ting, Webber S, Ozboy M U, et al. Neural network assessment of rockburst risks for deep gold mines in South Africa [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(2): 335- 341.

Numerical simulation of coupled thermo-mechanical behavior of Ti-15-3 alloy during back-extrusion

LI Ping[1, 2], XUE Ke-min[2], LÜ Yan[2], TAN Jian-rong[1]

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[Abstract] Ti-15-3 alloy is a new meta-stable β-type titanium alloy. Combining physical simulation with numerical simulation, a FE numerical simulation system was developed to simulate the hot back-extrusion process of Ti-15-3 alloy cylinder billet by introducing three layers BP neural network models into 3D thermal-mechanical coupled rigid-viscoplastic finite element model. The results of simulation agree well with the experimental ones. It is shown that the thermo-mechanical analysis, and the neural network models of flow stress as well as the numerical simulation system are reliable. The simulated results lay a good foundation for building a predicting model of microstructure of Ti-15-3 alloy during hot back-extrusion.

[Key words] Ti-15-3 alloy; hot back-extrusion; thermo-mechanical coupling; numerical simulation

(编辑　陈爱华)