

钼金属径向精锻工艺的数值模拟

王玉凤¹, 李付国¹, 谢汉芳¹, 刘趁意¹, 付静波²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(2. 金堆城钼业股份有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 通过热压缩试验研究钼金属在应变速率为 $0.01\sim 10\text{ s}^{-1}$, 变形温度为 $900\sim 1450\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的热变形性能, 建立了基于流变应力的钼金属热变形的本构方程。应用有限元分析软件 DEFORM 中的 COGGING 模块对钼金属棒材的径向精锻过程进行模拟, 确定合理的工艺参数, 并对模拟结果进行分析。结果表明: 本研究提出的用于模拟结果分析的锻透性判据合理, 工艺过程和参数的确定方法正确。研究表明: 影响锻透性的主要因素为道次压入量和锤头倾角; 影响锻件表面质量的主要因素为轴向送进速度和旋转角度。

关键词: 钼金属; 热模拟试验; 本构方程; 模拟仿真; 锻透性

中图分类号: TG146.4⁺12; TG302

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)12-2136-05

钼的熔点为 $2620\text{ }^\circ\text{C}$, 由于原子间结合力极强, 所以在常温和高温下强度都很高。钼的膨胀系数小, 导电率大, 导热性能好, 在常温下不与盐酸、氢氟酸及碱溶液反应, 仅溶于硝酸、王水或浓硫酸之中, 对大多数液态金属、非金属熔渣和熔融玻璃亦相当稳定。因此, 钼及其合金在冶金、农业、电气、化工、环保和宇航等重要部门有着广泛的应用和良好的发展前景, 成为国民经济中一种重要的原材料和不可替代的战略物质^[1,2]。

但是纯钼金属本身由于较高的硬度和脆性, 加工比较困难, 也就是说钼的可加工性能不够好^[3,4]。由于钼板、钼带、钼条、钼杆、钼丝等钼制品需求量的日益扩大, 对其质量, 尤其对其可塑性的要求也日益提高。钼棒作为制作这些钼制品的初始型材, 其加工质量直接影响到后续加工件的质量。钼棒在改锻制坯的时候存在心部变形困难、中间难以锻透、且氧化严重、温度难于控制等特点。而且钼棒在锻造过程中容易出现横向宽展, 因此由拉应力导致裂纹产生并引起裂纹扩展。所以通过合理的工艺控制, 获得性能优良的钼棒锻件是工艺研究的关键。

为解决上述问题, 本研究通过热模拟试验, 获得了材料的本构关系模型, 为精锻工艺模拟、精锻工艺设计和精锻件的生产提供材料的热物性参数和力学性能参数; 并采用有限元模拟软件 DEFORM-3D 提供的锻造开坯 (COGGING) 模块对钼棒的精锻过程进行了

模拟。该模块专门用来模拟棒料的精锻过程, 具有针对性强、模拟结果精确等特点。最后分析模拟结果, 通过坯料心部的等效应变状态来判断锻件的锻透性, 并分析研究钼金属精锻过程中的关键技术问题, 以达到指导工业生产的目的。

1 实验

热模拟试样为粉冶烧结钼棒, 尺寸为: $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$, 在 Gleeble-1500 型热模拟试验机上进行等温恒应变速率压缩试验。试验过程中, 对试样采用大电流自阻加热, 压缩后喷气快冷至室温, 热压试验中采用云母片为润滑介质隔离试样与压头, 减少试样端头的摩擦影响。变形温度分别为: $900, 1000, 1100, 1200, 1250, 1300, 1350, 1400$ 和 $1450\text{ }^\circ\text{C}$; 应变速率分别为: $0.01, 0.1, 0.5, 1$ 和 10 s^{-1} ; 变形程度: 65% (真应变 0.5)。

2 建立本构方程

影响热变形过程的因素主要有变形温度、应变速率和变形量, 其中变形温度和应变速率对热变形过程的影响更为显著。为了研究在确定应变下的材料热变形应力与应变速率和变形温度的关系, 选用如下本构方程:

$$Z=A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (1)$$

Z 是 Zener-Hollomon 参数^[5], 广泛用以表示变形温度

收稿日期: 2008-11-12

作者简介: 王玉凤, 女, 1983 年生, 硕士, 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-83070387, E-mail: weiqi.0219@yahoo.com.cn

和应变速率对热变形过程的综合作用。其定义式为：
式中， Q 为变形激活能 (J/mol)， R 为普适气体常数 ($R=8.3145 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)。

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \cdot \sinh^{-1} \left\{ (\dot{\epsilon} / A)^{1/n} \exp[Q/(nRT)] \right\}$$

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT)$$

为了获得材料精确的本构方程，首先需要确定 4 个参量，即 Q ， α ， A 和 n 的值。其中，参数 n 是材料应变速率敏感性指数 m 的倒数。根据实验数值，可以得到材料在不同应变条件下，不同变形温度时 $\log\sigma$ 与 $\log\dot{\epsilon}$ 的关系规律。随着变形温度的升高，依据 $\log\sigma$ 随 $\log\dot{\epsilon}$ 的变化趋势，对于给定变形温度下的上述关系可以表述为一个三次多项式：

$$\log(\sigma) = a + b\log(\dot{\epsilon}) + c(\log(\dot{\epsilon}))^2 + d(\log(\dot{\epsilon}))^3 \quad (3)$$

则，材料应变速率敏感性指数 m 的计算公式如下：

$$m = f(\dot{\epsilon}, T) = \partial \log \sigma / \partial \log \dot{\epsilon} |_{T, \epsilon}$$

$$m = b + 2c \log \dot{\epsilon} + 3d(\log \dot{\epsilon})^2$$

此外，通过观测还发现，不同温度下的 $\log\dot{\epsilon} - \sigma$ 关系近似为线性，其斜率的平均值可用下式中第二个括号内的表达式代替：

$$\alpha = \left(\frac{2.303}{n} \right) \left(\frac{\partial(\log \dot{\epsilon})}{\partial \sigma} \right)_{T, \epsilon} \quad (4)$$

将得到的 n 值 (m 的倒数) 代入式 (4) 中，通过计算就得到 α 值。

而材料的变形激活能 Q 可由下式给定：

$$Q = nR \left[\frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (5)$$

通过以上计算获得的 Q ， n 和 α 值，经计算得到 A 的平均值。通过分析和参数回归，获得的钼金属高温变形时本构方程的参数值如下：

$$Q = 9.266 \times 10^5 \epsilon^{0.291}$$

$$n = 10.788 \epsilon^{-0.238}$$

$$A = \exp(79.3 \epsilon^{0.383})$$

$$\alpha = 0.0052 \epsilon^{-0.164}$$

由方程 $Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n$ ，得到适用于工艺过程分析的本构方程：

$$\sigma = (1/\alpha) \ln \left\{ (Z/A)^{1/n} + [(Z/A)^{2/n} + 1]^{1/2} \right\} \quad (6)$$

3 精锻过程的数值模拟

3.1 钼棒的旋转锻造工艺

钼棒的拔长采用旋转锻造工艺。旋转锻造是在多锤头对击的精锻机上生产精密轴类锻件的一种专用工艺。锻造时，毛坯旋转送进，达到直径减小、长度增大和成型的目的。每锤击 1 次，毛坯只有一部分变形，

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (2)$$

实行逐段锻打^[6]。旋转锻造兼有脉冲加载和多向锻打两个特点，而且脉冲打击频率高^[7,8]。因此，金属变形流动距离短，摩擦阻力小，变形均匀。采用多锤头从几个方向锻打，使金属处于三向压应力状态下变形，有利于金属塑性的提高。旋转锻造工艺有如下优点：
①锻件质量高；②生产效率高；③自动化程度高^[9]。

3.2 有限元模型的建立

按照设计要求：原始坯料尺寸为 $\phi 85 \text{ mm} \times 880 \text{ mm}$ ；锻后直径为 $\phi 48 \text{ mm}$ ；所选锤头的外形尺寸为 $375 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 111 \text{ mm}$ ；锤头的工作带尺寸为 $70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ；锤头工作型面在坯料的螺旋送进方向带 4° 倾角，在锤头工作型面的前后端沿锤头长度方向分别有 8° ， 12° 和 30° 倾角，沿锤头的整个长度方向从工作带向两侧加工有 45° 的斜面，见图 1 所示。利用 PROE 软件建立模具的几何模型，调入 DEFORM 软件中。几何形状相对简单的坯料和夹头可以直接在 DEFORM 软件中定义。模具采用四节点四面体单元，坯料和夹具采用八节点六面体单元。对坯料、锤头和夹具划分单元网格，有限元模拟的网格模型见图 2。

3.3 工艺参数的确定

结合现有文献资料，并根据四锤头旋转锻造的工艺特点，从工程应用角度出发，给出了以下工艺参数的计算方法^[9]：

①道次压下量 Δh

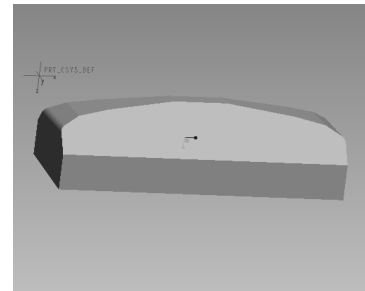


图 1 锤头的几何模型

Fig.1 Geometric model of hammer

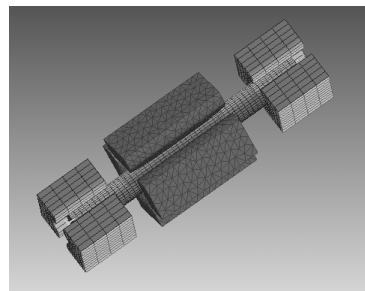


图 2 有限元模拟模型

Fig.2 Simulation model for FEM

指锤头每次打击的名义压下量。棒料的实际变形量除与锤头的名义压下量有关外，还与相对转角以及相对送进量有关。压下量依据锻透性、表面质量，并参照设备的力能参数确定。

②相对转角 φ

指锤头每打击一次毛坯的实际旋转角度。相对转角与夹头的每分钟转数 n 及锤头的每分钟打击次数 N

$$\text{有关: } \varphi = \frac{2n\pi}{N}$$

③相对送进量 S

指锤头每打击一次毛坯送进变形区的长度。相对送进量 S 与毛坯的轴向送进速度 V 和锤头的每分钟打

$$\text{击次数 } N \text{ 有关: } S = \frac{V}{N}$$

④坯料加热温度

根据热模拟试验分析，始锻温度为 1350 °C，终锻温度为 900 °C 左右；采用两火锻造，在第 2 个道次或第 3 道次后加一火，共锻打 4~5 道次。加热规范和锻打道次依据终锻温度、设备吨位及最大单边下锤量决定。

3.4 工艺过程的确定

通过以上有限元模型的建立、工艺参数设计、对材料性能及工艺性能分析，得出针对研究问题和指定设备的精锻铝棒的质量控制参数（5 道次、两火加热工艺）如下：

①坯料加热 1350 °C

②第 1 道次（从左向右）：相对转角为 40°~45°；相对送进量为 50~60 mm；名义压下量为 12 mm。

③第 2 道次（从右向左）：相对转角为 40°~45°；相对送进量为 50~60 mm；名义压下量为 10 mm。

④第 3 道次（从左向右）：相对转角为 40°~45°；相对送进量为 40~50 mm；名义压下量为 6 mm。

⑤坯料加热 1350 °C

⑥第 4 道次（从左向右）：相对转角为 40°~45°；相对送进量为 40~50 mm；名义压下量为 6 mm。

⑦第 5 道次（从左向右）：相对转角为 40°~45°；相对送进量为 40~50 mm；名义压下量为 4 mm。

⑧其他参数：夹具温度为 200 °C；模具温度为 200 °C；环境温度为 25 °C；锤头速度为 60 mm/s。

4 模拟结果与分析

图 3 给出了精锻第 5 个道次后锻件的最终形状以及各面积测量点，并给出终锻道次变形坯料的截面积变化情况。

锻透性是指在坯料的整个半径上锻造时所能达到

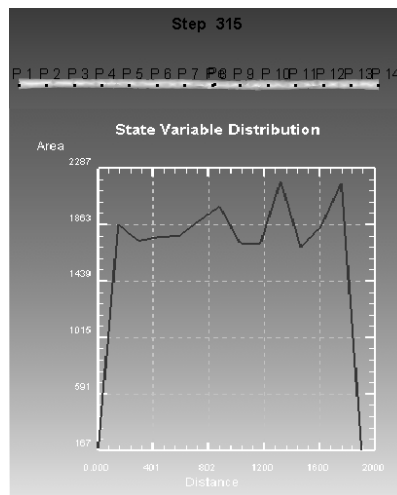


图 3 锻件的终锻图形及横截面积

Fig.3 Forging piece and its cross sectional area after final forging

的塑性变形深度^[10]。铝金属棒料锻透的目的是为了使粉冶组织更加密实，使整个断面都实现再结晶，从而改善材料性能。根据热加工模拟实验结果，给出锻透性判据如下：当心部的等效应变值大于 0.32（再结晶临界应变值）时，认为坯料被锻透，即此时的锻透性（FPE）为 100%。

图 4 为精锻第 1 个道次后坯料变形区断面的等效应变等值线图。此时心部的等效应变值为 0.345，大于 0.32，即认为按照本工艺第 1 个道次后坯料就能够锻透。所以精锻机锻打铝金属棒料 $\phi 85 \text{ mm}$ 至 $\phi 48 \text{ mm}$ 是可以锻透的。但为了提高铝棒的表面质量、尺寸精度和组织均匀性，必须采用多道次旋转锻造。

由图 4 可知，在靠近棒料变形区表面的区域首先变形，然后才逐步深入棒料的中心，并形成变形梯度。由于表面变形大、中心变形小，故在精锻机“滚圆”时会在锻件的头部形成很深的内陷凹坑。图 4 中棒料

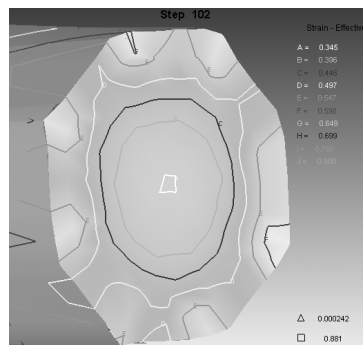


图 4 第 1 道次等效应变等值线

Fig.4 Contour chart of equivalent strain for 1st pass

端头部位的截面积急剧变小, 就是产生了内陷凹坑的结果。

因此, 在旋转精密锻造加工过程中, 表层金属变形大、流动快, 内层金属变形小、流动慢, 中心金属变形最差。由于金属内外层变形程度的不同和流动速度的差异, 会造成锻件横向组织的不均匀性, 从而可能导致棒材横向性能的差异。精密锻造棒材组织的均匀程度主要与锻透深度及坯料的组织特性有关。在一般情况下, 锻透深度的影响较大。锻透深度越大, 内外层金属的变形程度的差异就越小, 横向组织的一致性就越高。

锻透深度的大小, 主要取决于道次压入量和锤头倾角。在特定的设备条件下, 锤头倾角是一个不变量, 所以锻透深度主要由道次压入量决定。但道次压入量过大, 又容易造成横截面出现扭曲的条状组织与周向折叠, 导致横向变形等缺陷。所以在精密锻造过程中, 应根据材料的性质和锻造温度的高低, 在设备允许和保证锻件质量的条件下, 适当增大道次压入量, 从而实现受锻金属横向变形的均匀性, 达到改善产品组织的目的。

棒料的表面质量主要由轴向送进速度和旋转角度来控制。轴向送进速度快, 则生产率高, 变形均匀。但速度太快, 则锻件受到的轴向精整次数就减少, 去楞效果差, 从而降低了锻件的表面质量。

图 5 所示为部分表面质量有问题的锻件。图 5a 由于轴向送进速度过大, 使坯料表面粗糙, 产生直的

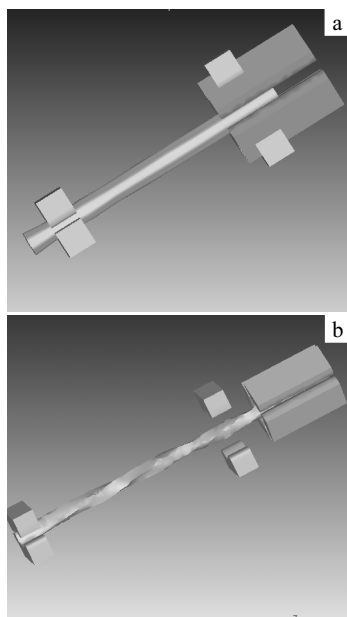


图 5 表面有缺陷的锻件

Fig.5 The forging with defects on the surface: (a) straight edge line, and (b) spiral edge line

棱线。图 5b 由于相对转角过小, 导致坯料表面质量极差, 产生螺旋状棱线。所以对于不同道次, 应根据锻透性和表面质量的综合要求选择合适的轴向送进速度。尤其是在棒料的最后成型阶段, 进给速度应小些。

通过热模拟试验所建立的本构方程以及由此发现的材料成型规律, 同样适用于其他工艺过程。

5 结 论

1) GFM 精锻机锻打钼金属棒料从 $\phi 85$ mm 至 $\phi 48$ mm 时, 第 1 个道次心部等效应变值为 0.345, 已经锻透。在精锻过程中, 容易出现组织不均匀, 应适当加大锻透深度。

2) 棒料的表面质量主要由轴向送进速度和旋转角度来控制。夹头轴向送进速度越大, 棒料表面越粗糙; 旋转角度过小, 会导致产生螺旋凸起。

3) 本模拟采用的加工工艺在理论上可以生产出满足锻透性要求、表面良好、尺寸精确及质量稳定的钼合金棒材, 并已提交工程验证。

参考文献 References

- [1] Luo Zhenzhong(罗振中). *China Molybdenum Industry* (中国钼业)[J], 2003, 27(2): 7
- [2] Zhong Peiquan(钟培全). *China Molybdenum Industry*(中国钼业)[J], 2000, 24(5): 15
- [3] Huang Jinchang(黄金昌).. *China Molybdenum Industry*(中国钼业)[J], 1994, 18(6): 22
- [4] Wang Donghui(王东辉), Yuan Xiaobo(袁晓波), Li Zhongkui(李中奎) et al. *Rare Metals*(稀有金属)[J], 2006, 25(12): 1
- [5] Kocks U F, Mecking H A. *Mechanism for Static and Dynamic Recovery Strength of Metals and Alloys*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1985: 345
- [6] Choi S K, Chun M S, Van Tyne C J et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 172: 88
- [7] Lin Fayu(林法禹). *Special Forging Technology*(特种锻压工艺)[M]. Beijing: China Machine Press, 1991: 150
- [8] Peng Zhihui(彭志辉). *Processing Technology of Rare Earth Metals*(稀土金属材料加工工艺学)[M]. Changsha: Central South University Press, 2003: 273
- [9] Li Chenggong(李成功), Liu Jianyu(刘建宇), Zhang Zhiwen(张志文) et al. *Forging and Stamping Technology Handwork* (锻造和冲压工艺) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989: 1326
- [10] Dong Jiegong(董节功), Zhou Xudong(周旭东), Zhu Jinhong(朱锦洪). *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2007, 31(3): 76

Numerical Simulation of Radial Precision Forging Technology for Metal Molybdenum

Wang Yufeng¹, Li Fuguo¹, Xie Hanfang¹, Liu Chenyi¹, Fu Jingbo²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Jinduicheng Molybdenum CO., LTD, Xi'an 710068, China)

Abstract: Hot workability of metal molybdenum was investigated by means of hot compression tests carried out in the temperature range of 900~1450 °C and strain rate range of 0.01~10 s⁻¹. A constitutive equation of molybdenum for the flow stress was presented. The radial precision forging process of the molybdenum bar was simulated by COGGING modular of FEM software DEFORM. Reasonable process parameters were determined, and the forging penetration efficiency was explored from the strain-effective state. The results show that the forging penetration efficiency criterion put forward for the simulation result analysis is reasonable. Determination methods of the process and parameters are correct. Research shows that the main factors influencing forging penetration efficiency are reduction in pass and the dip angle of the hammer, and the main factors influencing forged piece surface quality are axle feeding speed and rotation angle.

Key words: molybdenum; thermal simulation experiment; constitutive equation; simulation; forging penetration efficiency

Biography: Wang Yufeng, Master, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-83070387, E-mail: weiqi.0219@yahoo.com.cn