

热力耦合刚粘塑性有限元在铝合金热锻中的应用

吴丽平, 刘建雄, 廖丕博

(昆明理工大学 模具新技术研究所, 云南 昆明 650093)

摘 要: 由于铝合金的锻造温度范围很窄, 金属热锻过程中温度和变形又存在显著的相互影响, 所以必须结合塑性变形流动和热效应来分析铝合金热锻成形过程。运用热力耦合刚粘性有限元对铝合金热锻成形进行数值模拟, 可以优化工艺参数和预测可能出现的缺陷。

关键词: 热力耦合; 塑性有限元; 热锻; 数值模拟

中图分类号: TG 319

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2005)11-0059-02

Coupled Thermo-Mechanical FEM Analysis of Auminum Alloy Frging

WU Li-ping, LIU Jian-xiong, LIAO Pi-bo

(Research Institute of Module New Technology, Kunming University of Scence and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: ue to the limited small range of aluminum alloy's forging temperature, and the large interaction between temperature and deformation during the forging process, we must use the plastic deformation together with heat effection to analyze the forging process for aluminum alloy. Using the rigid visco-plastic Finite Element Method can optimize the technological parameter and forecast the defection.

Key words: coupled thermo-mechanical; plastic FEM; hot forging; numerical simulation

金属体积成形作为一种少切削加工工艺, 由于其高质高效的特点在制造业中得到普遍的应用。随着近年来数值模拟技术的飞速发展和对金属流动规律的认识进一步加深, 数值模拟技术在金属体积成形中发挥越来越重要的作用。利用数值模拟, 辅助设计人员进行参数优化, 以期做到无缺陷设计^[1]。

在金属塑性变形中, 温度对变形有很大的影响。由于塑性加工过程中工件变形不均匀, 变形产生的热在工件各部位分布也不同。不仅工件和模具之间有热传导、工件和环境之间存在热辐射和热对流; 而且塑性变形功以及工件与模具接触面的摩擦功转化为热能, 使温度在工件和模具上分布不均匀。不均匀的温度场会影响产品的质量, 甚至形成缺陷。因此, 有必要把变形流动和热效应结合起来进行耦合分析^[2]。

1 刚粘塑性有限元基本原理

对于大变形金属成形问题, 将变形金属视为刚塑性体, 此时材料应满足下列假设: 不计材料的弹性变形; 体积不可压缩; 材料为各向同性体; 不计体积力与惯性力; 材料流动服从 Levy-Mises 流动法则。

刚塑性材料在发生塑性变形时, 应满足以下塑性力学基本方程及基本条件:

(1) 平衡微分方程: $\sigma_{ij,j} = 0$

(2) 速度 - 应变速率关系: $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})$

(3) 本构方程: $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{\sigma} \epsilon_{ij}$

(4) 屈服准则: $\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = k^2$

(5) 体积不可压缩条件: $\dot{\epsilon}_{kk} = 0$

(6) 边界条件: $\dot{u}_i = \bar{u}_i$ (在 S_u 上)

$\dot{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i$ (在 S_σ 上)

刚塑性有限元的基本理论是 Markov 变分原理, 在满足速度条件、协调方程和体积不可压缩条件的运动许可速度场中, 真实的速度场必然是下列泛函数取得最小值。运用较广的罚函数法, 其泛函可表示为:

$$J = \int_V \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV + \frac{k}{2} \int_V (\dot{\epsilon}_{kk})^2 dV - \int_{S_\sigma} F_i \dot{u}_i dS$$

式中 k 为惩罚因子, 当 $k \rightarrow \infty$ 时可得到真实解。

对上式进行变分和线性化处理, 得到关于速度增量的有限元求解方程组:

$$[S][\Delta u] = \{R\}$$

式中 $[S]$ 为劲度矩阵, $\{R\}$ 为加载矢量和, $[\Delta u]$ 为节点速率的增量矢量。该线性方程是刚塑性有限元法的通用公式, 用 Newton-Raphson 迭代法求解, 可得到各种力学场量。

2 热传导有限元基本方程

变形和热转换的耦合计算常用于计算工件的温度分布, 工件的温度场必须满足热平衡方程^[3]:

收稿日期: 2005-07-19

作者简介: 吴丽平(1981-), 男, 江西东乡人, 在读硕士;

电话: 0871-5186354; E-mail: wlphuying_2004@yahoo.com.cn

$$k\{T_{ij}\} + \{\dot{q}\} = \alpha\{\dot{T}\} \quad (i=1, \dots, n)$$

对上式采用变分法将微分方程的求解问题转化为求泛函极值问题,并在泛函中引入辐射、对流、热传导等具体边界条件。经离散化后处理,最终得到以下方程

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{Q\}$$

3 热力耦合粘塑性有限元关键技术处理

3.1 摩擦条件的选取

运用反正切摩擦模型,摩擦力产生在接触表面上:

$$\vec{\tau} = (2/\pi) m \tau_s \arctan(\vec{v}_s / A)$$

$$\vec{v}_s = \sum_i N_i \vec{v}_{s_i}$$

3.2 边界条件的处理

模具边界描述应该满足下面几个条件: 模具为刚性体,工件的坯料形变受到模具的约束; 对于对称的工件,为了避免复杂的数学计算和节省计算时间,可以对模型进行简化,取其几分之一计算。

3.3 网格的自动再划分技术

通常,大的形变会导致大的应力产生,从而导致有限元网格发生了严重的畸变。严重的网格畸变使计算不能进行下去,因此必须对网格进行再划分。一个新的网格自动再划分技术能对大变形后的网格进行再划分,再划分模式是从边界到内部一层一层进行下去。

4 热锻成形过程的数值模拟

随着 3D 有限元网格划分技术的发展,有限元数值模拟可以分析复杂的三维材料流动模型。DEFORM3D 软件正是运用热力耦合刚性粘塑性有限元技术,采用 3D 网格划分,在金属体积成形中得到广泛的运用。在 DEFORM3D5.0 中对材料为 6061 铝合金的热锻工件进行数值模拟。

4.1 模型与参数

工件形状如图 1,由于工件的对称性,我们采用其 1/8 进行分析。

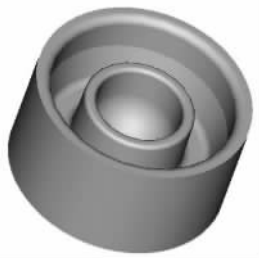


图 1 工件形状

初始条件: 坯料材料为 6061 铝合金,该合金在各种温度下的应力应变曲线如图 2 所示; 坯料采用电阻加热炉加热到始锻温度 480 [4]; 坯料为棒料,尺寸为

φ25 mm × 24 mm; 周围介质温度: 20 。

整个模拟过程包括下面几部分:

(1) 坯料从炉内取出到砧上 此过程坯料没有塑性变形,只有热转换。模拟所需数据: 坯料从炉内取出到砧上所用时间 10 s。

(2) 坯料停留在砧上 此过程同 (1),只有热转换。所需数据: 坯料在砧上停留时间 2 s,砧的温度 300 (把烧红的铁块放在砧上,可以使砧预热),传热系数选用 Free resting(静止不动) = 0.003。

(3) 镦粗 此过程既有塑性变形,又有热转换。所需数据: 上下砧温度 300 ,上砧运动速度 160 mm/s,摩擦系数选用 Hot forging (lubricated) = 3,传热系数选用 Forming = 0.04。

(4) 坯料从砧到模具 此过程同 (1),只有热转换。所需数据: 坯料从砧上取下到模具上所用时间 6 s。

由于模具温度与坯料温度接近,坯料在模具上停留时间较短,可以省略坯料停留在模具上的热转换这一步。

(5) 模锻成形 此过程同 (3),既有塑性变形,又有热转换。所需数据: 模具温度 400 ,其余条件同 (3)。

4.2 结果与分析

4.2.1 温度分布情况

由图 3 可以看出,由于把坯料从炉中取出到镦粗需要一定时间,坯料整体温度下降(从 480 降到 450 左右),而表面与空气接触,使中心温度略高于表面温度。

由图 4 可以看出,由于工件变形较大,产生的摩擦功也较多,致使工件变形大的部位温度升高,达到 470 ~ 480 ;工件的上边沿生长毛刺,其变形激烈,温度也升高很大,达到 500 左右。

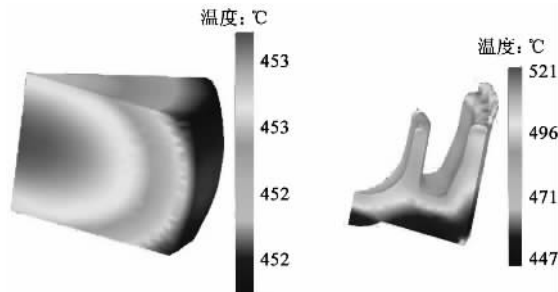


图 3 生粗后温度分布

图 4 模锻成形后温度分布

4.2.2 锻件等效力应变分布

由图 5 可以看出,锻件内部的应变不均匀: 工件底部变形较小,等效应变为 1 左右; 坯料(下转第 64 页)

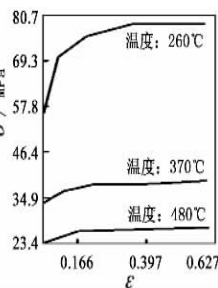


图 2 6061 合金 - 曲线上所用时间 10 s。
(=0.1s⁻¹)

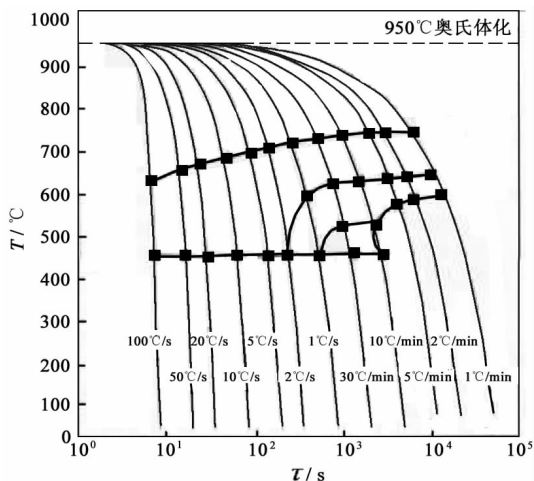


图 1 新型压力容器用钢 CCT 曲线

度下相应的金相组织。冷却速度为 30 /min 时得到的组织为 F+P+B+M_(少量), 见图 2(a);随着冷却速度的增大, 珠光体和贝氏体的数量有所减少, 当冷却速度达到 20 /s 时, 得到的组织主要为 F+M, 见图 2(b);随着冷却速度的进一步增大, 得到细化的铁素体和马氏体, 见图 2(c)。

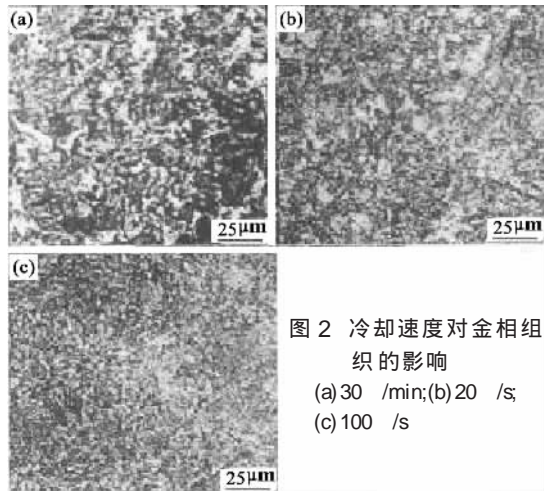


图 2 冷却速度对金相组织的影响
(a) 30 /min;(b) 20 /s
(c) 100 /s

3 结论

利用 Formastor-F 热膨胀仪测得的该新型压力容器用钢的 CCT 曲线表明: 该钢的冷却速度为 1 /min ~ 10 /min 时, 可获得 F+P; 10 /min ~ 1 /s 时, 可获得 F+P+B+M_(少量); 1 /s ~ 2 /s 时, 可获得 F+P+M; 2 /s ~ 50 /s 时, 可获得 F+M。

(责编/责校:张 洁)

(上接第 60 页)在成形时, 上部被反挤形成两个圆环, 故工件上部变形较大, 其等效应变为 2 左右; 外边缘产生毛刺部位变形激烈, 其等效变形达到 2.91。从等效应力分布的情况来看, 其值分布较为均匀, 大多在 40 到 60 MPa 之间, 在产生毛刺的部位应力较大, 为 95 MPa 以上。

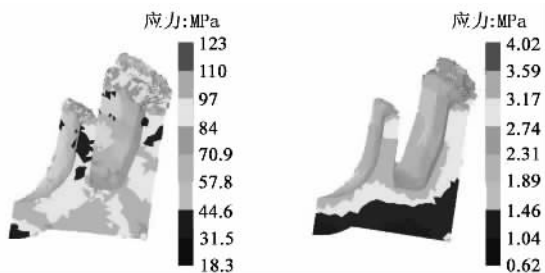


图 5 等效应力应变分布图

4.2.3 成形压力预测

由图 6 可以预测出该工件墩粗和模锻成形所需的

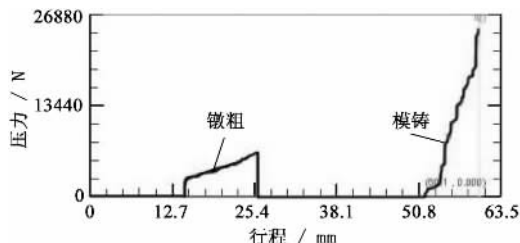


图 6 成形压力图

压力, 前面一个波峰为工件墩粗所需的成形压力, 约为 6500 N, 但由于采用的是 1/8 模型分析, 所以要乘以 8, 约为 52 000 N。同理得出模锻成形压力为 208 000N。

5 结论

通过运用热力耦合刚粘塑性有限元对该铝合金产品进行全过程数值模拟, 充分考虑到其变形与温度的关系, 得到该工件成形后的温度、等效应力应变等分布情况, 以及其载荷和位移的关系, 预测出成形压力, 对实际生产和模具设计有一定的指导意义。

运用热力耦合刚粘塑性有限元对工件成形进行精确模拟, 可以提前预测出折叠、充不满等缺陷, 减少模具报废和试模次数, 缩短产品开发周期, 降低成本。

参考文献:

- [1] 应富强, 张更超, 潘孝勇, 等. 金属塑性成形中的三维有限元模拟技术探讨[J]. 锻压技术, 2004, (2): 1-4.
- [2] 曾 伟, 邓子玉, 张立平, 等. 热力耦合刚粘塑性有限元模拟技术的研究[J]. 沈阳工业学院学报, 2003, (9): 69-71.
- [3] 汪凌云, 杨文敏, 黄光杰, 等. 1420 铝锂合金特深模锻件反挤成形过程的热力耦合有限元分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, (5): 326- 329.
- [4] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册, 第二版[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.

(责编/责校:姜鸿恩)