

刚粘塑性有限元法模拟 TC4 钛合金锻造过程

TG311

河北理工学院

清华大学

宝鸡有色金属加工厂

史廷春

陈森灿

胡宗式

A 摘要 本文通过大量 Gleeble-1500 热模拟实验机上压缩实验, 拟合出 TC4 钛合金的高温本构模型。采用自行构造的函数产生有限元模拟的非均匀初始温度场。对 TC4 钛合金自由锻造过程进行数值模拟, 为科学制订工艺, 提供了重要参考数据。

关键词 钛合金本构模型 有限元法 非均匀初始温度场

锻造 模拟

一、序 言

$s=2\text{mm}$, 凹槽深 $t=0.2\text{mm}$ 。

目前, 我国锻造生产工艺水平总体上还不高, 生产工艺多是凭借经验制订, 因而废品率高, 产品质量不稳定。这种情况, 在一定程度上制约了国民经济的发展。

本研究的目的, 是运用先进的现代科学技术, 如材料科学、现代塑性加工力学、锻造工艺学、计算机数值模拟以及图形科学等多种学科, 开发一种全新的方法来分析、优化设计金属成形过程, 从而实现控制钛合金最终产品组织和性能的目标。

二、TC4 钛合金生产条件下的本构模型

金属材料在生产条件下的本构模型, 是进行金属塑性变形工艺过程模拟的必备条件。为了获得 TC4 钛合金在生产条件下的本构模型, 作者做了一系列的压缩实验。

1. 试样设计

试样形状为圆柱体, 见图 1。其原始高度 $H_0=12\text{mm}$, 直径 $D=8\text{mm}$, 凹槽边宽

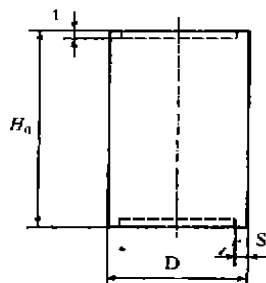


图 1 钛合金压缩试样

2. 实验结果及其分析

Gleeble 热模拟试验机只能记录压力—时间和位移—时间曲线, 压力—位移曲线是经过换算后得到的。

实验曲线表明, TC4 钛合金具有以下特点:

(1) 对应变速率具有较大的敏感性, 应变速率增加, 流动应力明显增加;

(2) 对变形温度同样具有较大的敏感性, 少许温降亦会导致流动应力的较大上升;

(3) 应变软化现象非常明显, 应力峰值过后, 流动应力随应变的增加而急剧下降;

(4) 流动应力的下降在应变达到一定程度时将趋向缓和, 一般是在 $\varepsilon > 0.7$ 以后。

钛合金屈服以后的软化现象, 可以解释为金属塑性变形产生的热量导致温度上升, 使得流动应力下降, 同时变形过程伴随的动态再结晶过程也减小了变形抗力。软化的缓和可以理解为变形过程中的硬化与软化过程达到了动平衡。

3. 本构方程的数据拟合

参考 TC11 的本构模型以及现有实验数据的分布特点, 采用了下列形式的数学模型:

$$\ln \sigma = b_0 + b_1 \ln \varepsilon + b_2 (\ln \varepsilon) T_k + b_3 \ln \dot{\varepsilon} \ln \varepsilon + b_4 T_k \ln \dot{\varepsilon} + b_5 \ln \dot{\varepsilon} + b_6 \ln \dot{\varepsilon} / T_k + b_7 / T_k \quad (1)$$

式中 σ ——流动应力;

ε ——应变;

$\dot{\varepsilon}$ ——应变速率;

T_k ——绝对温度。

采用逐步回归的方法, 得到 TC4 最终的高温本构方程为:

$$\begin{aligned} \ln \sigma = & -3.0445 - 3.0632 \ln \varepsilon + 2.4139 \times \\ & 10^{-3} T_k \ln \varepsilon + 2.6533 \times 10^{-3} \ln \varepsilon \ln \dot{\varepsilon} + 3.0230 \\ & \times 10^{-3} T_k \ln \dot{\varepsilon} - 7.1521 \ln \dot{\varepsilon} + 4417.162 \ln \dot{\varepsilon} / T_k \\ & + 6393.59 / T_k \end{aligned} \quad (2)$$

这一本构模型成功地应用于有限元数值模拟, 较好地再现了 TC4 钛合金的实验数据特征。图 2 所示为部分真应力—真应变曲线。

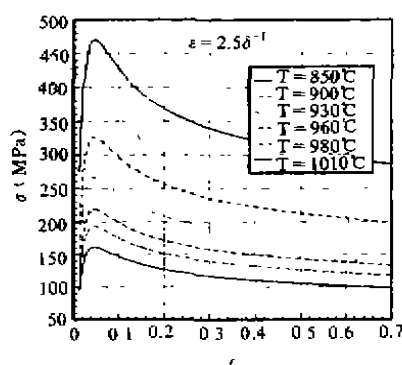


图 2 部分真应力—真应变曲线

三、刚粘塑性材料的广义变分原理

金属塑性加工的数值模拟, 可以建立在广义变分原理的基础之上, 假定刚塑性体体积为 V , 表面积为 S , 在力面 S_F 上给定 F_i , 在速度面 S_v 上给定 V_i 。那么, 在满足几何方程式、体积不变条件和位移边界条件的一切容许速度场 V_i 中, 真实速度场使泛函

$$\phi = \int_V E(\dot{\varepsilon}_{ij}) dV - \int_{S_F} F_i V_i dS \quad (3)$$

取最小值。

刚塑性有限元利用 Markov 变分原理对变形体求解极值问题。由于要找到既满足速度边界条件又满足体积不变条件的速度场非常困难, 而仅满足速度边界条件的速度场则很容易找到。因此, 在实际求解过程中, 一般采用 Lagrange 乘子法将体积不可压缩条件引入式 3, 建立新的泛函。从而使原来的求解泛函条件极值问题转化为对新泛函求解无条件的驻值问题。

利用 Lagrange 乘子将体积不变条件引入式 3 后, 新泛函如下:

$$\begin{aligned} \phi = & \int_V E(\dot{\varepsilon}_{ij}) dV - \int_{S_F} F_i V_i dS \\ & + \int_V \lambda \dot{\varepsilon}_{ij} \delta_{ij} dV \end{aligned} \quad (4)$$

式中, λ 为 Lagrange 乘子。

四、求解过程与主要公式

泛函经离散化处理, 得到迭代要求解的方程组为

$$[S]\{\Delta u\}_n = \{R\} \quad (5)$$

经过每次迭代以后, 新的速度场修正为

$$\{u\}_{n+1} = \{u\}_n + c\{\Delta u\}_n \quad (6)$$

五、初始温度场的生成

为了使钛合金的初始温度场更接近真实, 本文采用非线性方法拟合温度场。生成了一个关于初始温度、工作尺寸和内外温差的函数:

$$T_{w(i)} = F\{[r(i)]^m, [h(i)]^n, \Delta T\} \quad (7)$$

式中, $T_{w(i)}$ 为工件各个结点上的温度值,

$r(i)$ 、 $h(i)$ 为工件第 i 结点的半径和高度值。 m 、 n 为与材料有关的常数。经过试算,得到的不均匀初始温度场较好地吻合了工件的真实温度,见图 3。

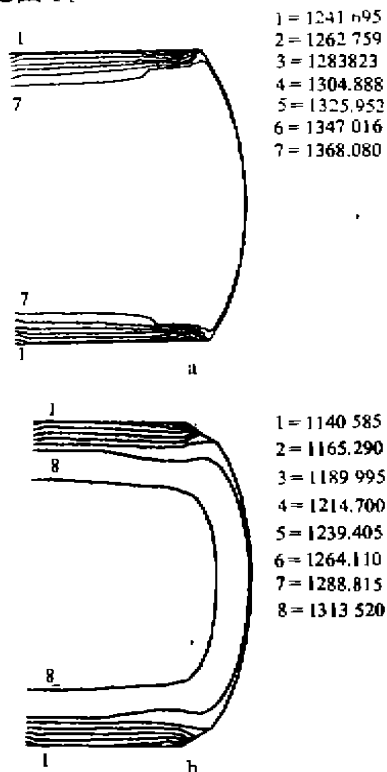


图 3 均匀初始温度场与非均匀初始温度场模拟结果的对比
a. 均匀初始温度场模拟结果
b. 非均匀初始温度场模拟结果

六、TC4 钛合金锻造过程的数值模拟

为了弄清 TC4 钛合金锻造成形过程中变形热力参数的变化规律。本文对钛合金锻造过程中的变形温度、变形量、变形速度以及摩擦因子等因素进行了模拟研究。

1. 变形速度

变形速度不仅影响锻造时合金的热塑性,而且对于锻造钛合金时出现的流变局部化的程度也起着决定性的作用。

数值模拟结果显示,变形速度较大时,工

件心部温升也较大。应变速率场中,变形速度小的,产生了应变速率岛,见图 4。产生这一现象的原因可以是:

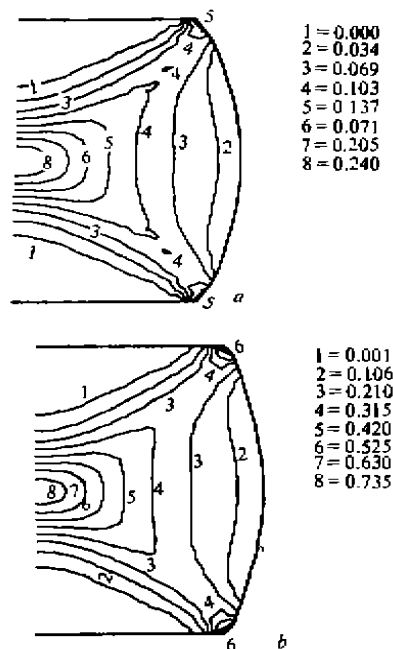


图 4 变形量为 30% 应变速率场模拟结果
a. 模具速度为 200mm/s
b. 模具速度为 60mm/s

金属变形时间越长,温降越大,金属的热塑性越差,金属变形越不均匀。变形速度较快时,金属内部产生的热量来不及扩散,使得金属内部的温度有所上升,有时上升的幅度还相当可观。从热学角度来看,可以认为低应变速率下变形产生的热不足以补偿散失的热量,同时,低应变速率下的蠕变脆性以及低应变速率下,出现流变局部化、剪切破裂等缺陷的可能性要比高应变速率下明显得多,所以低应变速率下钛合金的热塑性比较低,易于产生这种“小岛”现象。

钛合金导热性差,与上下砧的接触区域存在较大的冷却,而心部则没有明显的温降,导致心部与表面的温差。加工时间越长,这种温

差越大,加之摩擦因素的影响,使在剪切带靠近端面处,变形比较剧烈。

较低的变形速度下,容易在 30%~50% 的变形量时产生不利均匀变形的小岛。然而,当始锻温度较低时,过高的应变速率会使金属发生强烈的应变硬化,使端面近外圆的圆周摩擦加剧,从动力学再结晶的角度看,要进行充分的再结晶需要足够的再结晶驱动力和发生再结晶的时间。在低应变速率下,由于位错密度不够,再结晶过程将因缺乏驱动力而难于发生。而过高应变速率使驱动力足够了,但发生再结晶的时间却显得不够充足,所有这些都意味着在理论上存在一个最优的应变速率区间,使得材料的热加工塑性处于最佳状态。

2. 变形温度

所有金属与合金的变形抗力都有随变形温度升高而降低的趋势。虽然有些金属和合金的变形抗力在温度升高的过程中有起伏现象,但总的趋势是随温度升高而降低的。

从算得的温度场来看,在工、模接触部位,热量交换比较明显,表现出一定的温降,然而,在工件的心部,温升现象则是相当普遍的。当变形量达到 70%时,温升近 40℃。不同的始锻温度对应变的程度及应变的分布都是有影响的。摩擦因子相同的条件下,应变程度可以相差 5%~7%,始锻温度低的,最大等效应变值反而高,可以相差 35%。

摩擦因子为 0.8,始锻温度为 1203K 和摩擦因子为 0.4 始锻温度为 1233K 时,都出现了“小岛”现象。这一现象出现的主要原因是变形的不均匀性。在所谓“锻造十字架”区域,由于内外摩擦及死区的存在,使这一区域产生剧烈的剪切变形,导致局部应变速率升高,接近了心部的应变速率。

3. 摩擦因子

对于各种塑性成形工艺来讲,在相对运动的模具和坯料之间,均有摩擦存在。对于镦粗变形而言,外摩擦作用在接触表面上,使接触表面的材料变形受阻碍,形成难变形区乃至死

区,使得变形体变形不均匀而产生内应力,降低了金属的塑性。从运算结果可以明显看出,由于摩擦的存在而使网格产生了严重的畸变。两端的网格基本保持原样,靠近“锻造十字架”区域的网格拉长扭曲接近菱形,而圆周方向的网格则较为均匀地变小了。不变形区、小变形区和大变形区一目了然。

七、结束语

TC4 钛合金是一种对变形温度、变形速度以及摩擦条件都十分敏感的材料,热加工时的热塑性与始锻温度和变形速度密切相关。热量传递较多的是在变形时工件与模具之间,所以缓慢的变形速度会使金属的温度下降,产生的变形热量少,不足以补偿散失的热量,从而降低金属的塑性。所以,适当提高变形速度,不仅可以加大金属的允许变形量,提高变形效率,而且可以避免小岛的产生和显微组织的恶化。

外摩擦是产生剪切带和死区的主要原因。所以,建议采取适当的润滑措施,可以减少这种现象的发生。

对模具进行预热,可以减少工件与模具之间的热交换,达到均匀变形,优化显微组织的目的。

~~~~~

(上接 7 页)

## 参考文献

- [1] Tomoo Takeguchi Advanced Systems for Forging Technology in the Future SME Paper MF87-741 1987.
- [2] 王磊等 一种建立空气锤模型的新方法 锻压技术 1992 No.6 P32-35
- [3] 林治平 锻压变形力的工程计算 机械工业出版社 1986
- [4] 吴卓 锻造加工过程中的人机系统建模及仿真的研究(硕士学位论文) 西安交通大学 1991
- [5] 王学慧等 微机模糊控制理论及其应用 电子工业出版社 1987