

·学科进展·

材料最优轨迹和锻件组织最优化

罗子健 丰建朋 刘东

(西北工业大学,西安 710072)

[摘要] 根据应用耗散结构理论和人工神经网络确定的热力参数稳定区以及晶粒度演化的状态空间模型,应用最优控制理论确定保证获得要求组织的 GH4169 合金的最优轨迹,即热力参数随时间的变化规律,以便获得晶粒细小的 GH4169 合金锻件。通过变分法根据有限元数值模拟结果和材料最优轨迹优化等温锻造用液压机滑块速度随行程变化曲线,使工件内热力参数变化接近材料最优轨迹,以获得优质的 GH4169 合金锻件。计算结果表明,本文提供的方法可有效控制等温锻造过程中工件内热力参数的变化,从而优化锻件的显微组织。

[关键词] 材料最优轨迹,组织最优化,最优控制,变分法,有限元方法,GH4169 合金

引言

先进材料的优质锻件,不仅几何形状和尺寸要达到一定的要求,而且要具有一定的显微组织,以达到要求的性能指标。至今,优质锻件生产方法的研究工作,大都是关于如何获得一定形状和尺寸的锻件,而实现锻件组织最优化方面的报道并不多见。

研究表明,锻造过程中锻件显微组织演化主要取决于锻件内热力参数,即变形温度 T ,等效应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和等效应变 $\bar{\epsilon}$ 随时间的变化规律。保证材料具有要求显微组织的热力参数随时间的变化规律,称为材料最优轨迹。

由于坯料的预成形、锻造温度和工具移动速度等锻造工艺参数决定了锻造过程中锻件内热力参数随时间的变化规律。因此,可以通过控制锻造工艺参数,使锻件内热力参数按材料最优轨迹变化,以优化锻件组织。

Malas 等人应用状态空间模型和最优控制理论确定材料最优轨迹^[1]。Grandhi 等人将状态空间模型与最优控制理论相结合,对锻造工艺参数进行最优控制,以控制锻件内某些部位的热力参数的变化规律^[2]。Chung 和 Hwang 将有限元方法和最优化方法相结合,通过坯料预成形来控制锻件内热力参数的变化规律^[3]。Berg 等人通过变分法将求泛函极值

问题转化为非线性方程求根问题,以确定等温锻造用液压机滑块移动速度的变化规律,使锻件内热力参数按材料最优轨迹变化^[4]。

1 材料最优轨迹

GH4169 合金是 Ni-Fe 基时效强化合金,其基体为合金化奥氏体,主要强化相为体心四方的 γ'' 相。因此,奥氏体晶粒度(以后简称晶粒度)是这种合金的锻件的重要性能指标之一。由于以上所述,本文所讨论的材料最优轨迹,是保证获得细晶组织的 GH4169 合金锻件的热力参数变化规律。

根据等温恒应变速率压缩试验结果和应用耗散结构理论建立的热力参数稳定区的判据,以 BP 网络表征的本构关系为动力学方程,可以确定保证 GH4169 合金锻件的组织性能稳定一致的热力参数稳定区(图 1)^[5]。

根据等温恒应变速率压缩试验结果,可得 GH4169 合金的动态再结晶晶粒尺寸 $D(\mu\text{m})$ 与热力参数的关系如下:

$$D = \exp[0.0019(\ln Z)^{1.1185} - 1.2080(\bar{\epsilon})^{0.5954} + 2.3949] \quad (1)$$

式中 $Z = \bar{\epsilon} \exp(Q/RT)$, 为 Zener-Hollom 参数; $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 为气体常数; $Q(\text{kJ})$ 为激活能,可按式确定:

国家自然科学基金委员会资助项目。
本文于 2000 年 1 月 24 日收到。

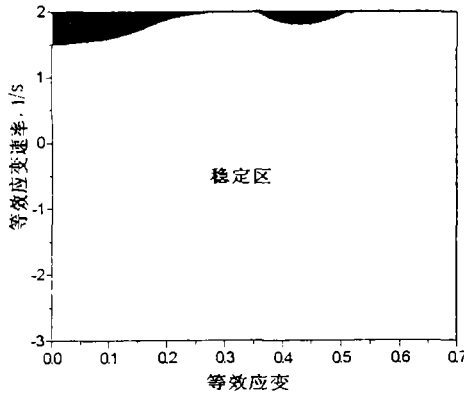


图1 GH4169合金的热力参数稳定区(980°C)

$$Q = -1.5973\exp(-5.5531\bar{\epsilon}) + 406.57 \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可导出 GH4169 合金的晶粒度演化的状态空间模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{D} \\ \dot{\bar{\epsilon}} \\ \dot{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(T, \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}) \\ u \\ \eta \bar{\sigma} \bar{\epsilon} / (\rho C_p) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 D 和 T 分别为晶粒尺寸和温度随时间的变化率; η 为塑性变形功转化为热能的效率; $\bar{\sigma}$ 为材料的流动应力; ρ 为材料的密度; C_p 为材料的比热。需要指出,式(3)中的 $\dot{\bar{\epsilon}} = u$, 为控制变量。

为了确实保证锻件的晶粒细小和热力参数处在稳定区的材料最优轨迹问题转化为最优控制问题,构造下列性能指标:

$$J = \int_0^{t_f} \{ a_1 [D(t) - D_d]^2 + a_2 F(\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}) \} dt \quad (4)$$

式中 t_f 为变形结束时间; a_1, a_2 为加权系数,根据经验选取,本文算例中取 $a_1 = 10, a_2 = 1$; D 为动态再结晶晶粒尺寸,按式(1)确定; D_d 为要求的晶粒尺寸; F 为约束函数,将工件内等效应变速率控制在相应于某一等效应变的热力参数稳定区的等效应变速率上限 $\dot{\bar{\epsilon}}_{max}$ 和下限 $\dot{\bar{\epsilon}}_{min}$ 之内(参见图1)。本文采用下列约束函数:

$$F = 100\exp[9(\ln\bar{\epsilon})^2 + \xi_1(\bar{\epsilon})\ln\bar{\epsilon} + \xi_2(\bar{\epsilon})] + 0.1 \quad (5)$$

其中 ξ_1 和 ξ_2 按下列公式确定:

$$\xi_1 \bar{\epsilon} = \begin{cases} 447.9\bar{\epsilon}^3 - 221.3\bar{\epsilon}^2 + 10.1\bar{\epsilon} + 13.5 & \bar{\epsilon} \leq 0.4 \\ 1200\bar{\epsilon}^3 - 17771.3\bar{\epsilon}^2 + 850.4\bar{\epsilon} - 122.7 & \bar{\epsilon} > 0.4 \end{cases} \quad (6)$$

$$\xi_2 \bar{\epsilon} = \begin{cases} 258.3\bar{\epsilon}^3 - 124.1\bar{\epsilon}^2 + 3.5\bar{\epsilon} + 44.8 & \bar{\epsilon} \leq 0.4 \\ 667.3\bar{\epsilon}^3 - 982.9\bar{\epsilon}^2 + 471.2\bar{\epsilon} - 120.7 & \bar{\epsilon} > 0.4 \end{cases} \quad (7)$$

应用最优控制算法求解式(4)和式(3),即可确定保证锻件的晶粒细小、而且热力参数处在稳定区的 GH4169 合金的最优轨迹(图2)。

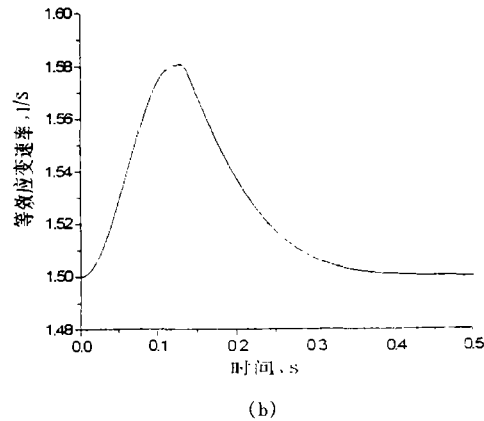
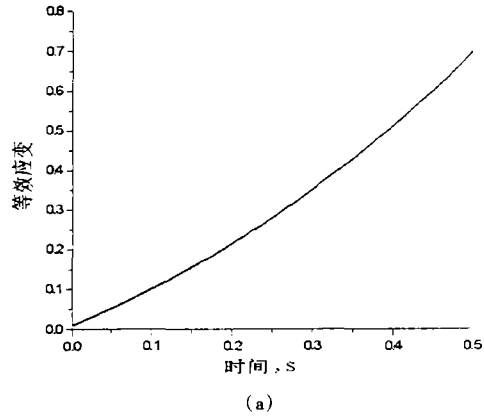


图2 GH4169合金的最优轨迹(980°C)

(a) $\bar{\epsilon} \sim t$; (b) $\dot{\bar{\epsilon}} \sim t$

2 最优滑块速度随行程变化曲线的确定方法^[4]

本节介绍通过变分法利用有限元数值模拟结果和材料最优轨迹确定最佳滑块速度随行程变化曲线的方法。

从图2可以看出,对于等温锻造,材料最优轨迹可以表示为

$$\dot{\bar{\epsilon}} = f(\bar{\epsilon}) \quad (8)$$

跟踪式(8)所示的材料最优轨迹,可转化为下列泛函求极值问题:

$$\min_{v(t)} \int_0^{x_f} \left\{ \int_{\Omega} W [f(\bar{\epsilon}_p) - \dot{\bar{\epsilon}}_p]^2 dV \right\} dt \quad (9)$$

式中 $v(t)$ 为液压机滑块速度; $W = dS/dx$, 为加权系数,考虑变形体各部位对组织转变的相对重要性,其中 S 为锻造过程中坯料内已完成组织转变的材料体积占总体积的份额, x 为液压机滑块行程; f 为表

示材料最优轨迹的函数; Ω 为变形体体积; 下标 p 表示所考虑的变量属于坯料内的某一质点。

如坯料内等效应变分布情况只与滑块行程有关, 式(9)所示泛函可以写成

$$\min_{v(x)} \int_0^{x_f} \left[A(x)v(x) + B(x) + \frac{C(x)}{v(x)} \right] dx \quad (10)$$

式中

$$A(x) = \int_{\Omega} W_p(x) h_p^2(x) dV \quad (11)$$

$$B(x) = -2 \int_{\Omega} W_p(x) f_p(x) h_p(x) dV \quad (12)$$

$$C(x) = \int_{\Omega} W_p(x) f_p^2(x) dV \quad (13)$$

$$W_p = \frac{\partial S}{\partial \bar{\epsilon}} \Big|_{\epsilon_p} \quad h_p(x) = \frac{\partial S}{\partial \bar{\epsilon}} \Big|_{\epsilon_p} v \quad (14)$$

式中 x_f 为变形结束时滑块行程; $h_p(x)$ 是一定存在的某一函数, 但通过变分法利用有限元数值模拟结果和材料最优轨迹确定最佳滑块速度随行程变化曲线时, 并不需要明确这一函数的具体形式。

可以证明, 式(10)所示泛函全域极值的充要条件为:

$$c(x) - A(x)v^2(x) = 0 \quad (15)$$

根据式(10)至式(15), 可得:

$$\int_{\Omega} W(\bar{\epsilon}_p, \bar{\epsilon}_p, v) [f^2(\bar{\epsilon}_p) - \bar{\epsilon}_p^2] dV = 0 \quad (16)$$

将变形体离散后, 式(16)可用求和形式表示如下:

$$\sum_i \{ W(\bar{\epsilon}_i, \bar{\epsilon}_i, v) [f^2(\bar{\epsilon}_i) - \bar{\epsilon}_i^2] V_i \} = 0 \quad (17)$$

式中下标 i 表示所考虑的变量属于第 i 个单元。将某一步的有限元计算结果代入式(17), 得到一个关于滑块速度 v 的非线性方程。求解这一方程, 即可得到行程为某一数值时的滑块速度。这样, 确定最佳滑块速度随行程变化曲线问题就转化为关于 v 的非线性方程的求根问题。

3 应用实例

下面, 试图应用作者所建立的 GH4169 合金的最优轨迹和第上面所介绍的方法, 确定等温锻造用最佳液压机滑块速度随行程变化曲线, 以显示所用方法的有效性。

(1) 加权系数的计算公式

为简化起见, 认为 GH4169 合金锻件的组织主要取决于动态再结晶过程。根据等温恒应变速率压缩试验结果, GH4169 合金热态变形过程中动态再结晶组织所占体积份额可按下式确定^[6]:

$$S = 1 - \left\{ \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{\bar{\epsilon} - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right)^{1.15} \right] \right\} \quad (18)$$

式中 S 为动态再结晶组织所占体积份额; $\epsilon_{0.5}$ 和 ϵ_c 分别为动态再结晶组织所占体积份额为 50% 时的应变和动态再结晶开始时的临界应变, 可按下列公式计算:

$$\epsilon_{0.5} = 0.0019 Z^{0.126} \quad (19)$$

$$\epsilon_c = \frac{5}{6} \exp \left[4.8465 \times 10^{-3} (\ln Z)^3 - 5.3488 \times 10^{-1} (\ln Z)^2 + 1.9663 \ln Z - 2.4236 \times 10^2 \right] \quad (20)$$

忽略应变速率对 S 的影响, 根据式(14)可得加权系数的计算公式如下:

$$W = \frac{\partial S}{\partial \bar{\epsilon}} \frac{\bar{\epsilon}}{v} = 0.797(1-S) \frac{(\bar{\epsilon} - \epsilon_c)^{0.15}}{\epsilon_{0.5}^{1.15}} \frac{\bar{\epsilon}}{v} \quad (21)$$

(2) 初始条件和物性参数

等温锻造在液压机上进行。变形开始时滑块速度为 120 mm/s。坯料的直径 200 mm, 高度 80 mm。工件、模具和周围环境温度均为 980℃。工件和模具界面上摩擦因子 $m = 0.2$ 。变形开始时坯料和变形结束时锻件的几何形状示于图 3。

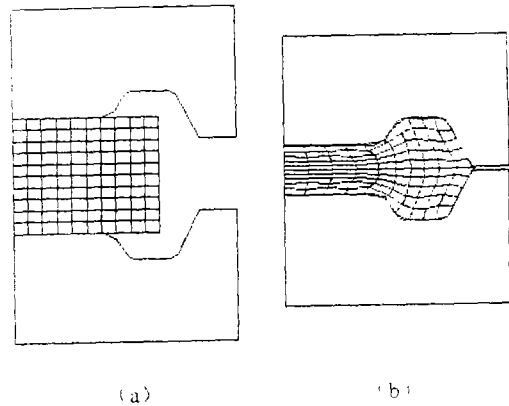


图3 坯料和锻件的几何形状
(a) 坯料; (b) 锻件

GH4169 合金的导热系数 30.34 W/(m·K), 密度 8 420 kg/m³, 比热 435.4 J/(kg·K)。模具材料的导热系数 22.5 W/(m·K), 密度 8 530 kg/m³, 比热 524 J/(kg·K)。工件与周围环境之间的换热系数 17.66 W/(m²·K)。工件与模具接触面上换热系数 1 834 W/(m²·K)。

(3) 计算结果分析

通过式(17)根据有限元数值模拟结果和 GH4169 合金的最优轨迹确定的液压机滑块速度随行程变化曲线示于图 4(图中曲线 1)。图中曲线 2

表示公式(17)中的情况下计算所得液压机滑块速度随行程变化曲线,曲线 3 和 4 分别表示液压机滑块速度随行程线性变化和恒定的情况。

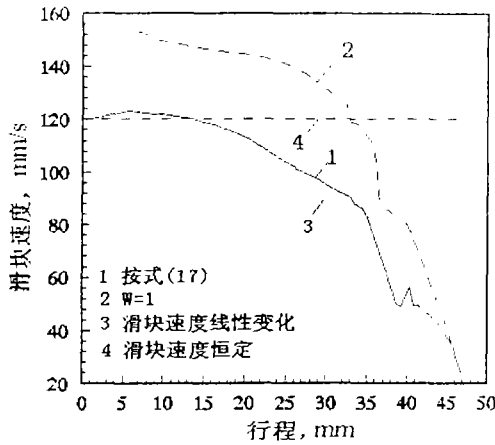


图 4 滑块速度随行程变化曲线

在图 4 所示 4 种情况下,锻造过程中工件内平均等效应变速率随行程变化情况示于图 5。可以看出,当液压机滑块速度按图 4 中曲线 1 变化时,锻造过程中工件内平均等效应变速率可维持在 $1.5s^{-1}$ 水平,最接近 GH4169 合金的最优轨迹(参见图 2(b))。当液压机滑块速度随行程线性变化以及恒定情况下,锻造过程中工件内等效应变速率波动很大,在行程终点可高达 $3s^{-1}$ 以上,远远偏离 GH4169 合金的最优轨迹。以上所述表明,通过式(17)根据有限元数值模拟结果和材料最优轨迹可以确定最佳液压机滑块速度随行程变化曲线。

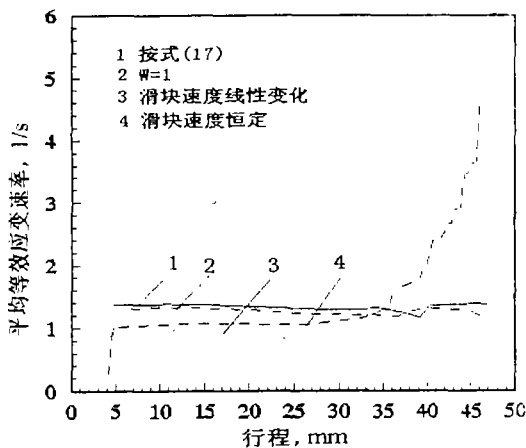


图 5 平均等效应变速率随行程变化曲线

根据图 5 所示结果和式(1),可得所考虑几种情况下工件内晶粒度演化规律(图 6)。从图 6 可以看出,等温锻造用液压机滑块速度按图 4 中曲线 1 变

化,GH4169 合金锻件的晶粒尺寸最为细小,约为 $5.5 \mu m$ 。

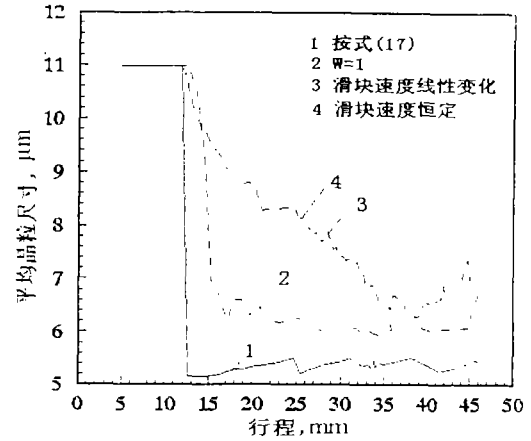


图 6 平均晶粒尺寸随行程变化曲线

4 结 论

(1)将耗散结构理论、人工神经网络和最优控制理论相结合,可以确保获得要求组织的热力参数变化规律,即材料最优轨迹。

(2)通过变分法可根据有限元数值模拟结果和材料最优轨迹优化等温锻造用液压机滑块速度随行程变化曲线,使工件内热力参数按材料最优轨迹变化,从而使锻件组织最优化。

(3)将本文所提供的方法进一步推广到非等温锻造,可为难变形材料锻造过程开环最优控制奠定理论基础。

参 考 文 献

- [1] Malas J C, Frazier W G, Vanugopal S et al. Optimization of Microstructural Development during Hot Working Using Control Theory. Metallurgical and Materials Trans., A, 1997, 28A(9): 1 921—1 930.
- [2] Grandhi R V, Kumar A, Chaudhary A et al. State-Space Representation and Optimal Control of Non-Linear Material Deformation Using the Finite Element Method. Int. J. Numer. Methods Eng., 1993, 36(12): 1 967—1 986.
- [3] Chung S H, Hwang S M. Optimal Process Design in Non-Isothermal, Non-Steady Metal Forming by the Finite Element Method. Int. J. Numer. Methods Eng., 1998, 42(8): 1 343—1 390.
- [4] Berg J M, Frazier W G, Chaudhary A et al. Optimal Open-Loop Ram Velocity Profiles for Isothermal Forging: A Variational Approach. J. of Manufacturing Science and Engineering, 1998, 120(4): 774—780.
- [5] 丰建朋,刘东,罗子健等.将人工神经网络和耗散结构理论相结合以确定变形高温合金的锻造热力参数.中国机械工程, 1998, 9(5): 60—62.

MATERIAL OPTIMAL TRAJECTORY AND OPTIMIZATION OF MICROSTRUCTURES FOR FORGINGS

Luo Zijian Feng Jianpeng Liu Dong

(Northwestern Polytechnical University, Xian 710072)

Abstract The law of variation of thermomechanical parameters with time for the desired microstructures is called material optimal trajectory. In order to obtain the fine grain size of GH4169 alloy was first defined by using optimal control theory based on the stable region established by dissipative structure theory and artificial neural network and the state-space model for evolution of grain size. Then, the optimal curve of ram velocity versus stroke was determined for optimizing the microstructures of forgings through variational approach according to the results of FEM numerical simulation and material optimal trajectory. The results of present study indicate that the proposed method can effectively control the thermomechanical parameters within workpiece during forging processes to attain the goal for optimizing the microstructures of forgings.

Key words material optimal trajectory, optimization for microstructures of forgings, optimal control, variational approach, finite element method, GH4169 alloy

·资料·信息·

全国基础研究工作会议在京召开

由科学技术部、教育部、中国科学院、中国工程院和国家自然科学基金委员会共同组织的“全国基础研究工作会议”于2000年3月27—29日在北京召开。

这次会议的主题是：学习和贯彻党中央、国务院关于加强基础研究工作的一系列重要指示，总结交流10年来我国基础研究工作的成绩和经验，分析我国基础研究发展面临的新形势、新特点和新问题。研究部署新时期全国基础研究工作，促进我国基础研究新的大发展。会议讨论了《关于加强基础研究工作的若干意见》和《全国基础研究发展纲要》，部署新时期全国基础研究工作。

科技部部长朱丽兰、副部长李学勇、教育部副部长韦钰、中国科学院副院长白春礼、中国工程院副院长侯云德、国家自然科学基金委员会主任陈佳洱、国防科工委副主任张维民、总装备部科技委副主任郭

桂蓉等分别在大会上发表了讲话。

会议对10年来我国基础研究工作进行了回顾与总结，分析了我国基础研究面临的新形势，对下一步我国基础研究工作的发展目标和主要任务提出了意见。

会议认为，当前及今后一段时期，我国基础研究要着重抓好以下工作：抓紧制定好全国基础研究发展“十五”计划和2010年远景规划；围绕国家目标和重大需求，安排和部署好重点基础研究项目；瞄准世界科学前沿，发挥我国优势，加强学科建设，优化学科布局；进一步深化改革，完善和建设我国重点基础研究基地；以优秀人才为中心，建设一支高效精干的基础研究队伍；加强基础研究管理，努力形成充分发挥科学家的积极性和创造性的政策和法制环境；适应全球化的趋势，大力加强重大国际合作研究。