

DOI: 10.3901/JME.2022.16.121

大规格气阀电镦成形晶粒匀细化控制研究*

权国政^{1,2} 张钰清^{1,2} 赵江^{1,2} 余炎泽^{1,2}

(1. 重庆大学材料科学与工程学院 重庆 400044;
2. 重庆大学先进模具智能制造重庆市重点实验室 重庆 400044)

摘要: 提出一套可以控制电镦过程晶粒匀细化的方法, 首先从 Ni80A 镍基超合金热加工图识别出晶粒细化稳健变形参数区间并初步规划电镦工艺参数加载路径; 构建晶粒尺寸和晶粒分布不均匀度双目标控制函数, 建立电镦成形电-热-力多场、变形-晶粒多尺度动态耦合有限元模型; 开展模拟夹持长度、砧子后退速度、镦粗缸速度和加热电流等不同电镦决策变量的加载方案, 构建双目标与电镦决策变量的响应关系; 基于 NSGA-II 遗传算法求解获得四项决策变量对双目标交互作用的最优折中解方案。结果表明, 根据最优折衷解模拟得到的晶粒尺寸及其分布不均匀度分别为 29.95 μm 和 6.52 μm , 双目标值相较于优化前分别减小了 10.86% 和 14.90%。对中等规格气阀进行电镦工艺试验和组织表征, 电镦“蒜头”的晶粒尺寸在轴向、径向和 45°方向的模拟值与试验值之间的平均相对误差分别为 4.41%、1.39% 和 5.68%, 验证了电镦成形晶粒匀细化控制方法的有效性。这套方法将为调控大规格气阀电镦成形晶粒匀细化提供一般方法。

关键词: 电镦; 晶粒尺寸; 不均匀分布; 双目标优化; NSGA-II; 有限元模拟

中图分类号: TK426; TG306

Study at Controlling Grain Refinement and Distribution Uniformity in Electric Upsetting Process of Large-scale Valve

QUAN Guozheng^{1,2} ZHANG Yuqing^{1,2} ZHAO Jiang^{1,2} YU Yanze^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044;
2. Chongqing Key Laboratory of Advanced Mold Intelligent Manufacturing,
Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: A method for controlling grain refinement and uniform distribution in electric upsetting process is proposed. Firstly, the grain refinement domains are identified from the hot processing map of Ni80A superalloy, and then the parameters loading paths in electric upsetting process are preliminarily designed. The double objectives control functions of grain size and inhomogeneous degree of grain distribution are developed, and the electrical-thermal-mechanical multi-field and deformation-grain multi-scale coupling finite element model in the electric upsetting of Ni80A superalloy is established. Additionally, the decision variables loading schemes with different levels of clamping length, anvil astern speed, upsetting cylinder speed and heating current are simulated, and the relationships between grain size, inhomogeneous degree of grain distribution and decision variables are constructed. The optimal compromise solution for the interaction between four decision variables and double objectives is solved based on NSGA-II genetic algorithm. The simulated results of optimal compromise solution show that grain size and inhomogeneous degree of grain distribution are 29.95 μm and 6.52 μm , compared with before optimization, they are decreased 10.86% and 14.90%, respectively. Finally, the trial-produce experiment for the electric upsetting of medium-size valve and microstructure characterization are carried out. The average relative errors of grain size in axial, radial and 45 degree directions between simulated values and experimental ones are 4.41%, 1.39% and 5.68%, respectively. The results also verify the validity of the proposed method. This method will provide a basic

* 国家自然科学基金(52175287)和国家重点实验室开放基金(P2021-001)资助

项目。20211130 收到初稿, 20220313 收到修改稿

approach for controlling grain refinement and uniform distribution in the electric upsetting process of large-scale valves.

Key words: electric upsetting; grain size; inhomogeneous distribution; double objectives optimization; NSGA-II; finite element simulation

0 前言

镍基超合金大规格气阀作为超大型舰船原动机燃烧室排气系统关键部件,具有长杆、局部超大变截面率的形状特点,以及承受热机械疲劳负荷、高腐蚀、高温、高压、高冲刷的恶劣服役特点^[1-3]。此杆盘类制件的形状特点决定了局部精确聚料结合模锻净成形的制备工艺,其中电锻是一种可以实现超大锻粗比的聚料工艺,如图 1 所示。对砧子电极与夹持电极间的杆坯加载电流使其靠自阻加热,顶锻缸加压使局部热坯屈服并使杆料持续送进,同时砧子缸后退为变形体让位,最终实现杆坯局部连续聚料成形^[3-6]。然而,由于电锻变形体承受长时间加热,如世界最大规格气阀的电锻耗时 80 min,变形体晶粒生长粗化作用远超动态再结晶细化,足以使初始超细晶粗化到 1 级。同时,电锻变形体各区域变形程度、温度、应变速率场量的动态分布不均匀致使整体晶粒尺寸分布不均匀。而电锻聚料坯在后续模锻时的自由锻粗流动填充机制无法充分激活动态再结晶,以至无法缓解这种电锻遗存的晶粒粗化及分布不均匀缺陷。这导致气阀服役中晶界裂纹扩展加速而使得强韧性和抗蠕变性能降低,常引发原动机功率下降乃至燃烧室骤然破坏^[2, 7-8]。

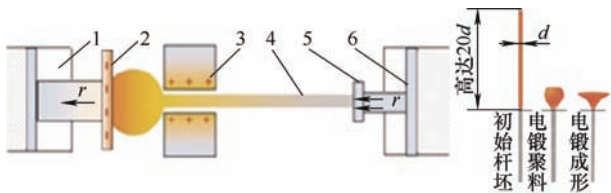


图 1 气阀坯电锻成形原理及气阀件制备过程示意图

1. 砧子缸 2. 砧子电极 3. 夹持电极 4. 杆坯 5. 顶锻缸
6. 顶锻缸

控制实现大规格气阀电锻成形过程中晶粒匀细化是工艺参数调控的最高目标。镍基超合金是奥氏体型低层错能合金,主要晶粒细化机制是动态再结晶,其高合金化使再结晶程度对温度、应变速率、应变三个变形参数相当敏感,这导致可加工参数域狭窄^[9-10]。电锻过程涉及电-热-力多物理场动态耦合,决策变量众多、加载模式复杂且交互作用。这些决定了镍基超合金加工参数域尽管狭窄,但在基于该参数域进行电锻参数加载路径的优化设计时具

有极大盲目性。因而,需要构建一个能够在变形参数混沌域中确定性识别出晶粒匀细化加载路径的方法。SIVAPRASAD 等^[11]提出了基于动态材料模型 (Dynamic materials model, DMM) 的加工图理论,定义出由温度、应变、应变速率三项基本变形参数演绎出的应变速率敏感因子、功率耗散因子、失稳系数三项特殊吸引子,吸引子水平与微观变形机制及变形稳健性发生映射,从而架构出宏微观协同控制的通道。QUAN 等^[12]通过引进变形激活能指标构建出 Ni80A 镍基超合金的增强型加工图,更准确的识别出动态再结晶发生程度高且变形稳健的参数区间。然而,要彻底解除这个参数区间的混沌性还需进一步构建直接基于晶粒匀细化双目标的函数控制方法。王广春等^[13-15]开发动态再结晶模型程序,并设置线性加权因子构建兼顾晶粒细化与晶粒尺寸分布均匀化的双目标控制函数,函数值越小意味着变形体晶粒越细越均匀。该双目标控制函数为在特定参数区间内进一步优化设计参数加载路径提供一般方法。

本文基于 SIVAPRASAD 等^[11]、王广春等^[13-15]的研究工作,结合电锻工艺特点,建立一套可以控制电锻过程晶粒匀细化的方法。首先从前期建立的热加工图识别出晶粒细化稳健变形参数区间并初步规划电锻工艺参数;然后构建晶粒匀细化双目标控制函数并植入到建立的电锻成形电-热-力多场、变形-晶粒多尺度动态耦合有限元分析模型;再者构建电锻多决策变量与双目标的动态响应关系,采用遗传算法求解获得双目标最优折衷方案。最后,开展中等规格气阀电锻工艺试验,验证了这套方法的有效性。这套方法将为调控大规格气阀电锻成形晶粒匀细化提供一般方法,为蓝水战略中大规格原动机气阀的自主制造奠定重要基础。

1 电锻过程晶粒匀细化控制方法

电锻过程晶粒匀细化控制方法如图 2 所示。首先从前期建立的 Ni80A 镍基超合金的三维变形机制图识别出细晶粒稳健变形参数区间;根据自主推导公式将识别出的应变速率转换为变形速度,并对锻粗缸速度非线性加载路径进行初步设计,开发自适应电流控温程序,兼顾“控温控形”对加热电流非

线性加载路径进行初步设计。然后构建晶粒尺寸和晶粒分布不均匀度双目标线性加权的控制函数; 开发动态再结晶和晶粒长大演变方程子程序建立电锻成形电-热-力多场、变形-晶粒多尺度动态耦合的有限元模型并植入双目标控制函数。为实现电锻过程

晶粒均匀细化双目标优化, 开展模拟电锻多决策变量的不同加载方案并建立双目标与多决策变量的响应关系, 采用遗传算法 NSGA-II 对双目标控制函数进行优化求解获得 Pareto 解集, 通过满意度评价得到多决策变量对双目标交互作用的最优折衷解。

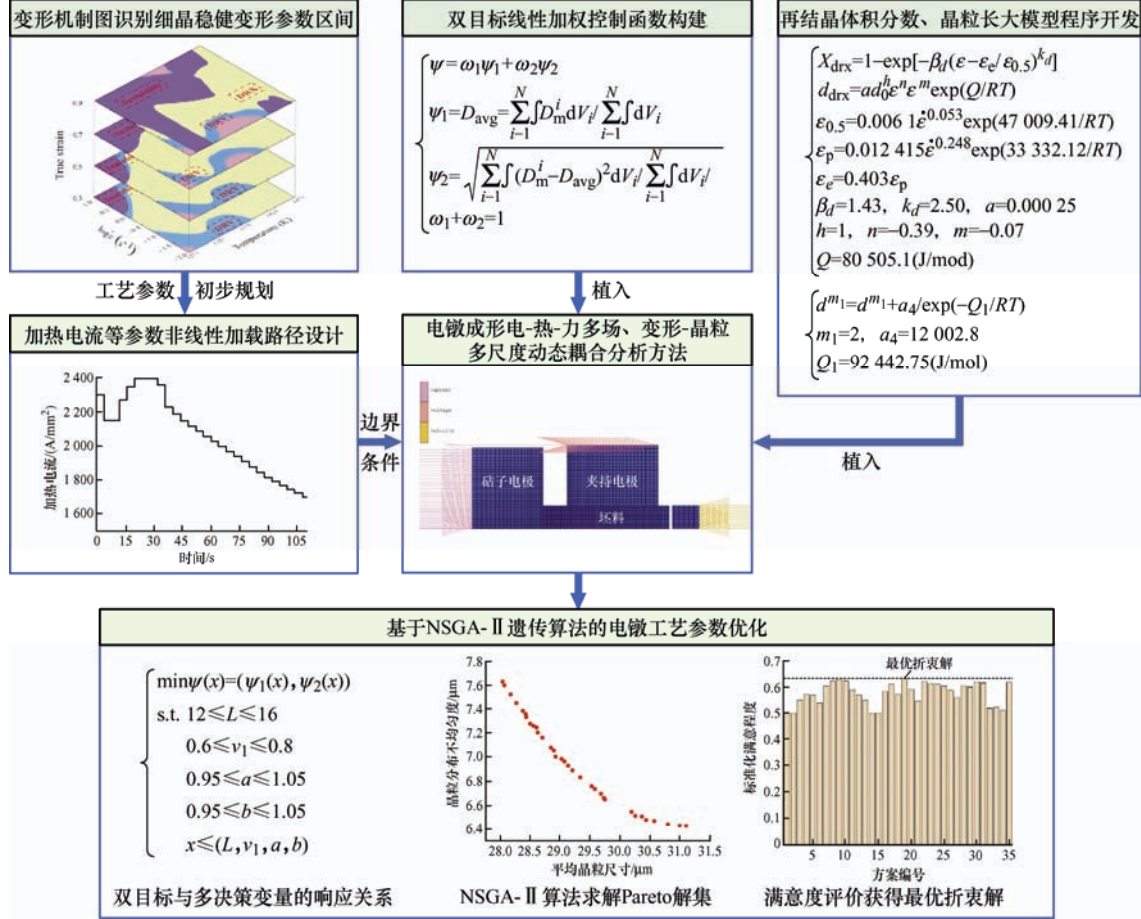


图2 晶粒均匀细化控制方法

1.1 镍基超合金晶粒细化稳健变形参数区间识别

基于 SIVAPRASAD 等提出的 DMM 加工图理论, QUAN 等^[12, 16]构建连续性流变本构方程作为后续计算的底层数据, 根据 DMM 理论求解获得应变速率敏感指数、功率耗散因子、失稳系数三重吸引子的连续性方程, 在 Matlab 软件中构建变量及函数均连续的功率耗散系数和失稳系数三维图。进一步根据三维连续加工图中三重吸引子特征界定出动态再结晶、动态回复型稳健变形机制及失稳变形机制参数区间, 构建了 Ni80A 镍基超合金变形机制与变形参数的三维连续映射图谱, 获得动态再结晶发生程度高且稳健变形参数区间 $1 \, 075 \sim 1 \, 125 \, ^\circ\text{C}$, $0.045 \sim 0.32 \, \text{s}^{-1}$ 。

1.2 电锻工艺参数初步规划

电锻过程是一个连续非线性、非均匀变形过程, 要进行电锻工艺参数设计还需进一步将识别出的内

禀变形参数应变速率及温度转换为外部电锻工艺变量。电锻过程中坯料的变形温度由电流控制, 而应变速率由砧子后退速度和镦粗缸速度共同控制。采用自主推导公式(1)对内禀变形参数与电锻决策变量进行转换^[16], 并初步设计出电锻过程非线性变形速度 v 。根据电锻工艺原理, 坯料的变形速度 v 与砧子后退速度 v_1 和镦粗缸速度 v_2 紧密相关, 即 $v = v_2 - v_1$ 。由于电锻过程中的砧子后退速度 v_1 始终保持不变, 在变形速度 v 与砧子速度 v_1 确定的情况下, 可计算得到非线性镦粗缸速度 v_2 , 最终将电锻过程应变速率控制在识别出的变形参数区间内。

$$v = l_0 \dot{\varepsilon} \exp(-\dot{\varepsilon} t) \quad (1)$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 为真应变速率; v 为变形速度; l_0 为坯料原始长度; t 为时间。

为使得整个电锻成形过程的温度处于晶粒细化

稳健变形参数区间内, 基于 MSC. Marc 软件的“FLUX”子程序接口开发电流自适应控温子程序对加热电流进行初步自适应设计。首先设置初始加热电流, 根据最高温度 T_{\max} 为 1 125 °C 和最低温度 T_{\min} 为 1 075 °C 的温度约束, 提取电钎“蒜头”最高温度, 对电钎过程中的加热电流进行智能调节和迭代反馈, 调控流程如图 3 所示。兼顾“控温控形”, 结合软件自动输出的加热电流与电钎“蒜头”最高温度随时间变化的数据文件, 在温度得到控制的同时, 保证电钎“蒜头”形状平滑无缺陷, 经多次模拟最终获得电钎过程非线性加载电流路径。

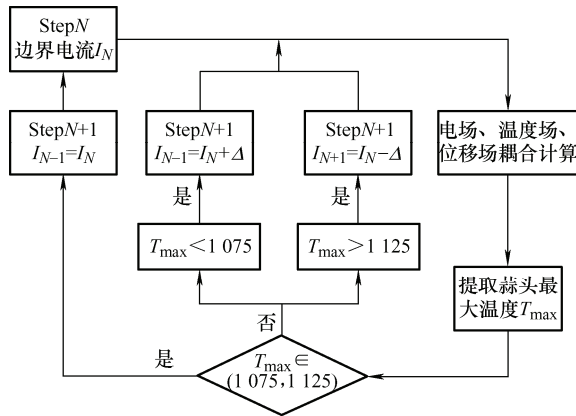


图 3 自适应加热电流调控流程图

1.3 晶粒细化双目标控制函数

考虑动态再结晶及未动态再结晶区域内的晶粒尺寸及动态再结晶体积分数量构建变形体平均晶粒尺寸指标 D_{avg} ；以变形任一时间步中每个网格单元内的实际晶粒尺寸的平均值构建晶粒尺寸子目标函数 ψ_1 ；以变形任一时间步中每个网格单元内晶粒尺寸的标准差构建晶粒分布不均匀度子目标函数 ψ_2 ；采用线性加权和法将 ψ_1 和 ψ_2 双目标问题转化为一个总的单目标问题 ψ ，如式(2)所示。总目标函数 ψ 越小说明变形体的晶粒尺寸越接近预设定的值，且晶粒分布越均匀。

$$\begin{cases} \psi = \omega_1 \psi_1 + \omega_2 \psi_2 \\ \psi_1 = D_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^N \int D_m^i dV_i}{\sum_{i=1}^N \int dV_i} \\ \psi_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \int (D_m^i - D_{\text{avg}})^2 dV_i}{\sum_{i=1}^N \int dV_i}} \\ \omega_1 + \omega_2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, ω_1 和 ω_2 分别为晶粒尺寸和晶粒分布不均匀度的加权因子, 本文均取 0.5; N 为总的单元体数量; D_{avg} 为变形体的平均晶粒尺寸; V_i 为变形体单元体积; D_m^i 为每个单元体的实际晶粒尺寸, 可通过计

算该单元 4 个节点 D_{j1} 、 D_{j2} 、 D_{j3} 和 D_{j4} 的晶粒尺寸平均值得到, 如式(3)所示

$$D_m^i = (D_{j1} + D_{j2} + D_{j3} + D_{j4}) / 4 \quad (3)$$

1.4 电钎成形电-热-力多场、变形-晶粒多尺度动态耦合分析方法

采用 MSC. Marc 软件 Current/Thermal/Structure 分析模式解决电钎过程涉及的电-热-力多物理场耦合问题。根据某气阀锻件得到原始杆坯尺寸为 $\phi 23 \text{ mm} \times 383 \text{ mm}$, 杆坯的未变形长度为 70 mm。有限元建模时, 将夹持电极简化为 $\phi 83 \text{ mm} - \phi 23 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ 的圆环, 砧子电极简化为 $\phi 80 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的圆柱体, 依据杆坯尺寸建立以 X 轴为对称轴的二维电钎有限元模型。将两个电极均设置为刚体, 杆坯设置为塑性体, 选择四节点单元进行网格划分, 夹持电极、砧子电极和杆坯的网格数分别为 700、600 和 10 000。杆坯材料为 Ni80A 镍基超合金, 初始晶粒尺寸为 $34.8 \mu\text{m}$, 夹持电极和砧子电极的材料均为 TZM 高温合金, 根据文献[17]设置导热系数、比热容、电阻率等与温度相关参数。环境与杆坯间的传热系数为 0.02; 杆坯与电极间的传热系数为 20; 杆坯与电极间的摩擦因数为剪切型 0.3。忽略钎粗缸几何模型, 在杆坯的右端单元施加等效的非线性钎粗速度; 在砧子电极的左端单元施加加热电流并将夹持电极上端单元定义为零电势, 与杆坯构成闭合回路以实现坯料自阻加热。经简化后的电钎有限元模型如图 4 所示。

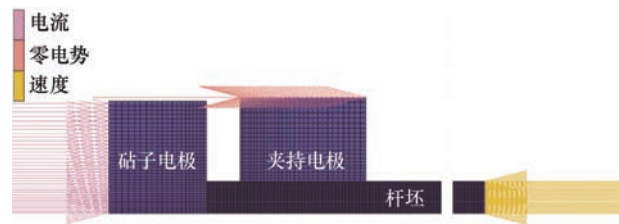


图 4 电钎有限元分析模型

基于实验室研究基础获得 Ni80A 镍基超合金的动态再结晶模型式(4)和晶粒长大模型式(5)^[17], 通过 Ugrain.f 子程序接口开发晶粒尺寸演变方程子程序, 建立电钎成形电-热-力多场、变形-晶粒多尺度动态耦合的有限元模型并植入双目标控制函数。图 5 为多场多尺度耦合分析算法及晶粒尺寸计算流程。在迭代循环开始时, 调用电参数及边界接触条件计算电流场, 进而通过焦耳效应和热参数与热边界计算温度场; 接着调用流变应力以及加载速度等条件并基于电流场和温度场计算结构场。通过判断动态再结晶体积分数量和应变计算晶粒尺寸, 当再结晶体积

分数大于 95% 时, 则根据晶粒长大模型计算晶粒尺寸; 若再结晶体积分小于 95%, 需进一步判断应变, 若应变大于临界应变, 则根据动态再结晶模型计算再结晶体积分和晶粒尺寸, 若否则更新所有数据, 再次进行迭代循环, 直至分析结束。

$$\begin{cases} X_{\text{drx}} = 1 - \exp\left[-\beta_d (\varepsilon - \varepsilon_c / \varepsilon_{0.5})^{k_d}\right] \\ d_{\text{drx}} = ad_0^h \varepsilon^n \exp(Q / RT) \\ \varepsilon_{0.5} = 0.0061 \dot{\varepsilon}^{0.053} \exp(47\,009.41 / RT) \\ \varepsilon_p = 0.012\,415 \dot{\varepsilon}^{0.248} \exp(33\,332.13 / RT) \\ \varepsilon_c = 0.403 \varepsilon_p \\ \beta_d = 1.43, k_d = 2.50, a = 0.000\,25 \\ h = 1, n = -0.39, m = -0.07 \\ Q = 80\,505.1 (\text{J/mol}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, X_{drx} 为动态再结晶体积分; ε_c 为临界应变; ε_p 为峰值应变; $\varepsilon_{0.5}$ 为动态再结晶体积分达到 50% 时的应变; Q 为动态再结晶的变形激活能; d_{drx} 为动态再结晶晶粒尺寸; d_0 为初始晶粒尺寸; R 为阿伏伽德罗常数; T 为温度; a 、 β_d 、 k_d 、 h 、 n 和 m 均为系数。

$$\begin{cases} d^{m_1} = d_0^{m_1} + a_4 t \exp(-Q_1 / RT) \\ m_1 = 2, a_4 = 12\,002.8 \\ Q_1 = 92\,442.75 \text{ J/mol} \end{cases} \quad (5)$$

式中, d 为长大后的晶粒尺寸; m_1 和 a_4 均为系数; t 为时间; Q_1 为晶粒长大的变形激活能。

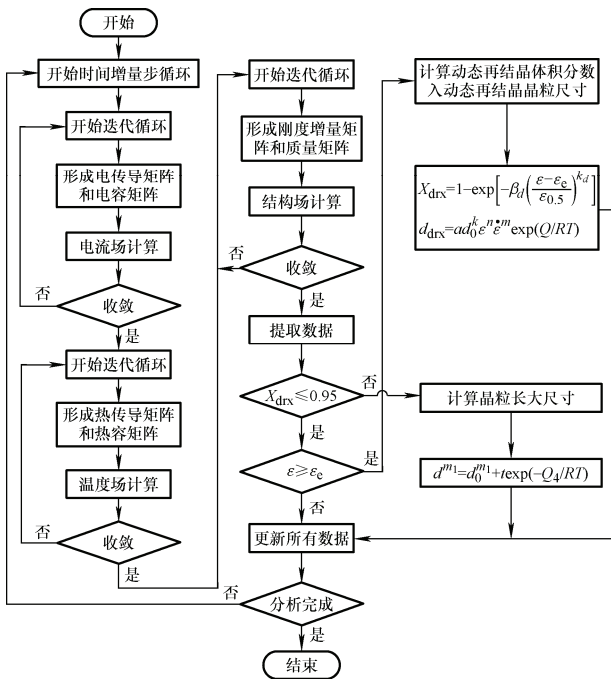


图 5 多场多尺度耦合分析算法及晶粒尺寸计算流程

1.5 基于 NSGA-II 算法的电锻工艺参数优化设计

根据本文选用的某气阀杆坯直径 23 mm, 结合实际电锻工艺参数范围得到: 夹持长度 L : 12~16 mm; 砧子后退速度 v_1 : 0.6~0.8 mm/s; 以镦粗缸速度因子 $a=v/v_2$ 表示镦粗速度范围(0.95~1.05); 以加热电流因子 $b=0.95\sim 1.05$ 表示加热电流范围(0.95I~1.05I)。参照 Box-Behnken 试验方案设计标准, 设计四项电锻决策变量的不同加载方案并进行有限元模拟, 采用 RSM 响应曲面法构建四项决策变量与双目标的响应关系, 研究双目标控制函数与多决策变量之间的协调控制。结合构建的双目标控制函数, 对电锻多决策变量下的晶粒细化双目标进行优化, 该优化问题可描述为式(6)

$$\begin{cases} \min \psi(x) = (\psi_1(x), \psi_2(x)) \\ \text{s.t. } 12 \leq L \leq 16 \\ 0.6 \leq v_1 \leq 0.8 \\ 0.95 \leq a \leq 1.05 \\ 0.95 \leq b \leq 1.05 \\ x = (L, v_1, a, b) \end{cases} \quad (6)$$

在保证种群多样性和非劣解集均匀性情况下, 采用带精英策略的非支配集排序遗传算法 NSGA-II 对式(6)中双目标控制函数进行优化求解获得四项决策变量对双目标交互作用的最优折衷解方案。由于 ψ_1 和 ψ_2 不能同时满足最优, 引入标准化满意程度(式(7))对双目标函数优化得到的 Pareto 解集进行评价以获得双目标综合最优的多决策变量优化, 选择满意程度 η 值最大的一组作为最优折衷解。

$$\eta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{f_{i\max} - f_i}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad (7)$$

式中, M 为优化目标个数; $f_{i\max}$ 和 $f_{i\min}$ 分别为第 i 个目标的最大值和最小值。

2 电锻工艺参数初步规划结果及讨论

2.1 镦粗缸速度非线性加载路径设计

在基于 DMM 热加工图识别出的稳健变形参数区间 1 075~1 125 °C、0.045~0.32 s⁻¹ 内进行电锻工艺参数初步设计。利用自主推导公式(1)将识别出的应变速率区间转换为变形速度, 得到该应变速率区间下的变形速度 v 为 0.71~5.06 mm/s。为保证电锻初期时坯料变形稳定, 变形速度设置为 0.1 mm/s; 当坯料温度达到合金变形温度范围时, 基于计算出的变形速度范围得到电锻过程不同时刻下的变形速度如表 1 所示。由于砧子后退速度 v_1 始终保持不变

为 0.6 mm/s, 进而根据电锻工艺原理得到不同时刻下的镦粗缸速度 v_2 如表 1 所示。

表 1 电锻成形不同时刻下的变形速度和镦粗缸速度

时间/s	变形速度 $v/(mm/s)$	镦粗缸速度 $v_2/(mm/s)$
0	0.10	0.70
4	0.10	0.70
6	2.46	3.06
30	2.92	3.52
50	3.30	3.90
70	3.68	4.28
90	4.06	4.66
110	4.44	5.04

2.2 加热电流非线性加载路径设计

设置初始加热电流为 $2\ 300\ A/mm^2$, 根据开发的自适应电流设计子程序, 兼顾“控温控形”, 多次模拟得到加热电流的非线性加载路径如图 6 所示。

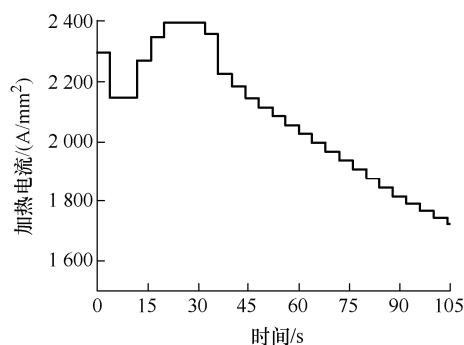


图 6 加热电流非线性加载路径

2.3 初步设计方案的模拟分析结果

根据初步规划的电锻工艺参数进行有限元模拟, 通过分析不同时刻下的温度、再结晶体积分数和晶粒尺寸变化溯源电锻过程中的晶粒尺寸分布不均匀问题。图 7 和图 8 分别展示了不同电锻时刻下坯料的温度场分布, 以及电锻过程中坯料的最高温度随时间的变化情况。可以发现, 整个电锻过程中坯料的最高温度均处于识别出的晶粒细化稳健变形温度范围内, 随着电锻进行, 坯料的最高温度总体呈先增加后降低趋势。从图 7 不同时刻下的电锻成形形状来看, 电锻成形过程可分为三个阶段。“蒜头”形成阶段: 坯料通过与砧子电极和夹持电极之间的接触电阻以及自身电阻产生的焦耳热作用下实现加热; 此时坯料温度随加热电流的增加而增加, 当达到变形温度后, 坯料在镦粗缸的作用下逐渐发生塑性变形并呈现“蒜头”形状。“蒜头”直径增大阶段: 由于“蒜头”脖颈处的温度最高, 坯料首先在脖颈处发生变形, 并在镦粗缸速度增大的情况下逐渐聚料使得“蒜头”直径增大。稳定成形阶段:

随着镦粗缸速度持续增加, 更多的材料被送进砧子电极与夹持电极区间内, 但由于后期电流降低, 坯料温度下降, 坯料变形相对缓慢, 导致“蒜头”直径不再增加, 而是保持稳定变形直至电锻结束。

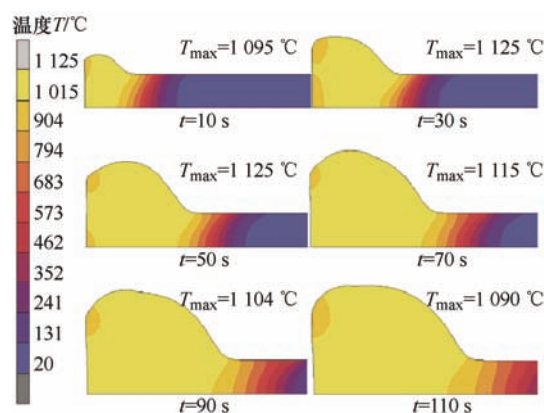


图 7 不同时刻下的温度场分布

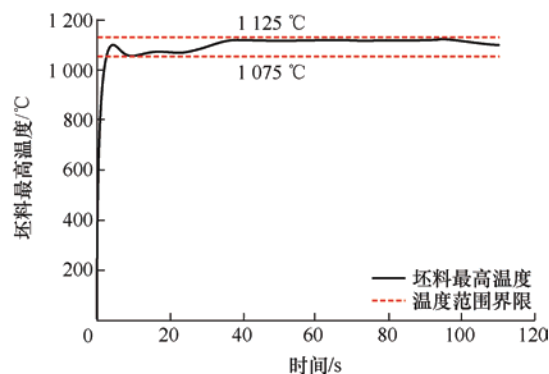


图 8 电锻成形过程中坯料最高温度随时间的变化

图 9 和图 10 分别为不同时刻下坯料的晶粒尺寸分布和再结晶体积分数分布情况。可以看到, 不同时刻下“蒜头”均发生了动态再结晶且体积分数在 95% 以上, 脖颈处再结晶体积分数呈明显不均匀分布; “蒜头”的晶粒尺寸呈不均匀分布, 靠近砧子电极端的晶粒尺寸较小, “蒜头”中心偏左区域的晶粒尺寸较大, 脖颈处的晶粒尺寸最小。结合图 7, 这是因为“蒜头”中心处的材料已发生变形并再结晶完全, 长期的高温环境将导致晶粒显著长大。而靠近砧子电极端材料由于与砧子电极接触并传热使得温度较低, 晶粒长大不明显, 晶粒尺寸相对较低。“蒜头”中心右端到脖颈处, 坯料始终处于变形状态, 当应变大于临界应变时, 将持续发生动态再结晶, 导致晶粒尺寸很小。综上, “蒜头”的晶粒尺寸呈不均匀分布。然而在大规格气阀的电锻成形过程这种晶粒尺寸不均匀分布问题还会更显著, 如世界最大规格气阀, “蒜头”中心将持续高温时间长达 80 min 以上, 足以使初始超细晶粒粗化至 1 级, 且无法通

过后续模锻工艺矫正这种缺陷。因此需要进一步以晶粒均匀化为双目标对电锻工艺参数进行优化设计。

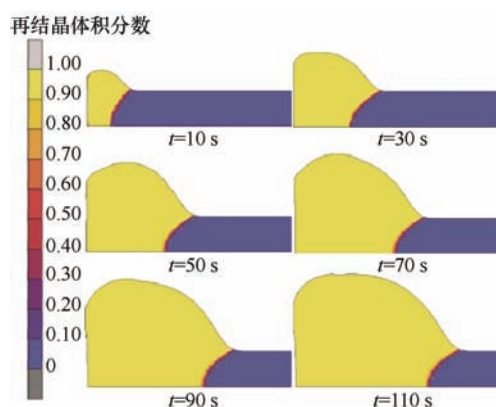


图9 不同时刻再结晶体积分数分布

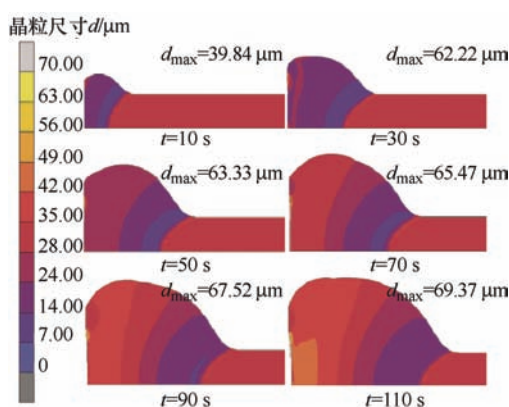


图10 不同时刻晶粒尺寸分布云图

3 电锻工艺参数优化设计

3.1 双目标与电锻多决策变量的响应关系

表2为设计出的夹持长度、砧子后退速度、镦粗缸速度因子和加热电流因子等四项电锻决策变量在低中高三水平的加载方案, 根据方案参数进行模拟, 得到不同方案对应的晶粒尺寸 ψ_1 和晶粒分布不均匀度 ψ_2 如表2所示。

根据表2结果, 基于RSM响应曲面法建立双目标 ψ_1 和 ψ_2 与决策变量 L 、 v_1 、 a 、 b 的响应模型, 并使用Design-Expert软件对所建响应模型进行方差分析和拟合优度检验。根据 F 检验中的 P 值评判决策变量对目标值的显著性, 剔除 P 值大于0.05的项并重新拟合, 最终得到双目标 ψ_1 和 ψ_2 的响应模型如式(8)和式(9)所示

$$\psi_1 = 175.483 + 0.788 \times L - 235.363 \times v_1 - 37.199 \times a - 132.926 \times b + 261.401 \times v_1 \times b$$

(8)

$$\begin{aligned} \psi_2 = & -26.395 - 2.991 \times L - 99.757 \times v_1 + 48.635 \times a + 102.116 \times b + 3.929 \times L \times v_1 - 6.299 \times L \times a + 4.689 \times L \times b - 106.033 \times v_1 \times a + 168.932 \times v_1 \times b - 252.962 \times a \times b + 0.085 \times L^2 + 172.531 \times a^2 \end{aligned}$$

(9)

表2 试验设计方案及目标函数值

试验编号	自变量			响应变量		
	夹持长度 L/mm	砧子后退速度 $v_1/(\text{mm/s})$	镦粗缸速度因子 a	加热电流因子 b	晶粒尺寸 $\psi_1/\mu\text{m}$	晶粒分布不均匀度 $\psi_2/\mu\text{m}$
1	12	0.6	1	1	30.93	7.14
2	16	0.7	1.05	1	34.06	9.01
3	14	0.8	0.95	1	39.61	12.75
4	14	0.8	1	1.05	40.59	13.15
5	16	0.7	1	1.05	38.60	12.68
6	14	0.6	1.05	1	30.25	6.70
7	12	0.7	0.95	1	35.25	9.19
8	12	0.7	1	1.05	35.05	9.41
9	12	0.8	1	1	35.54	9.00
10	14	0.7	0.95	1.05	39.46	12.90
11	14	0.7	1	1	34.80	8.47
12	16	0.7	1	0.95	34.69	8.26
13	12	0.7	1.05	1	32.58	8.30
14	16	0.8	1	1	39.06	12.66
15	14	0.7	1.05	1.05	34.67	9.20
16	12	0.7	1	0.95	29.72	6.87
17	14	0.6	1	0.95	30.32	6.67
18	16	0.7	0.95	1	38.99	12.41
19	14	0.7	0.95	0.95	34.05	8.36
20	14	0.8	1	0.95	31.99	8.30
21	16	0.6	1	1	32.60	7.66
22	14	0.7	1.05	0.95	31.24	7.18
23	14	0.6	0.95	1	32.77	7.55
24	14	0.6	1	1.05	33.68	8.13
25	14	0.8	1.05	1	35.00	9.77

表3和表4分别为晶粒尺寸 ψ_1 和晶粒分布不均匀度 ψ_2 的方差分析结果。其中, ψ_1 和 ψ_2 对应的 P 值均小于0.05, F 值较大, 说明置信区间合理, 模型显著。采用相关系数 R^2 评价试验结果与响应模型

的拟合程度, ψ_1 和 ψ_2 的相关系数 R^2 分别为 0.95 和 0.98, 说明模型可靠。图 11 为 ψ_1 和 ψ_2 对应的残差图, 可以发现数据点均在直线周围分布, 表明所构建的响应模型能真实反映双目标控制函数与电钎参数之间的关系且显著性较好。

表 3 ψ_1 响应值方差分析结果

源数据	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	234.7	5	46.94	73.47	<0.000 1
A-L	29.84	1	29.84	46.7	<0.000 1
B- v_1	81.35	1	81.35	127.34	<0.000 1
C- a	41.51	1	41.51	64.98	<0.000 1
D- b	75.16	1	75.16	117.65	<0.000 1
BD	6.83	1	6.83	10.7	0.004
残差	12.14	19	0.64	—	—

表 4 ψ_2 响应值方差分析结果

源数据	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	111.85	12	9.32	98.06	<0.000 1
A-L	13.61	1	13.61	143.16	<0.000 1
B- v_1	39.5	1	39.5	415.57	<0.000 1
C- a	14.09	1	14.09	148.18	<0.000 1
D- b	32.77	1	32.77	344.78	<0.000 1
AB	2.47	1	2.47	25.98	0.000 3
AC	1.59	1	1.59	16.69	0.001 5
AD	0.88	1	0.88	9.25	0.010 2
BC	1.12	1	1.12	11.83	0.004 9
BD	2.85	1	2.85	30.02	0.000 1
CD	1.6	1	1.6	16.83	0.001 5
A ²	0.67	1	0.67	7	0.021 3
C ²	1.07	1	1.07	11.24	0.005 8
残差	1.14	12	0.095	—	—

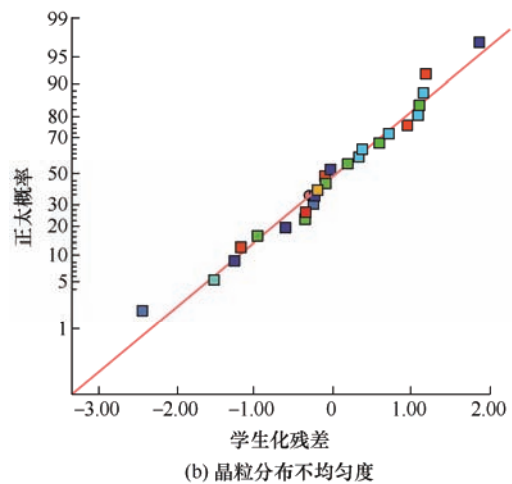
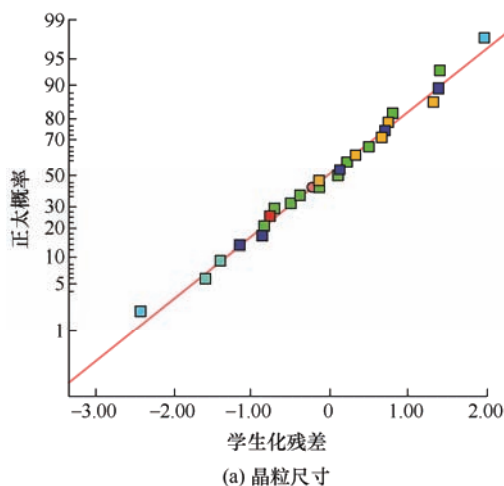


图 11 双目标值的响应模型的残差正态概率图

进一步评估所建响应模型的泛化能力, 随机设计三组不在表 2 试验范围内的方案进行模拟和响应模型预测。方案参数如表 5 所示, 对应的模拟结果和模型预测结果如表 6 所示, 可以发现 ψ_1 和 ψ_2 对应的响应模型预测结果与模拟结果的最大相对误差分别为 1.75% 和 7.42%, 在工程实际允许误差范围内, 表明所构建的响应模型具有较强的泛化能力, 可用于电钎晶粒匀细化参数优化设计。

表 5 方案参数

方案编号	夹持长度 L/mm	砧子后退速度 $v_1/(\text{mm/s})$	钎粗缸 速度因子 a	加热电流 因子 b
1	14	0.6	0.95	1.05
2	16	0.7	1	1
3	12	0.8	1	1.05

表 6 数值模拟结果与响应模型预测结果对比

方案编号	ψ_1			ψ_2		
	预测值 $/\mu\text{m}$	模拟值 $/\mu\text{m}$	相对 误差(%)	预测值 $/\mu\text{m}$	模拟值 $/\mu\text{m}$	相对 误差(%)
1	35.07	34.98	0.26	9.51	9.15	3.79
2	36.19	36.20	0.03	10.30	10.30	0
3	38.78	39.46	1.75	12.13	11.23	7.42

3.2 多决策变量优化及双目标综合最优解分析

采用遗传算法 NSGA-II 对电钎多决策变量进行优化求解。在 Matlab 软件中调用 gamultiobj 函数时, 种群初始规模设置为 150, 选择、交叉和变异的参数均用默认参数, 最大遗传代数设置为 200。最终搜索到 35 个 Pareto 解, 如图 12 所示, 部分优化求解得到的非劣解集展示在表 7。

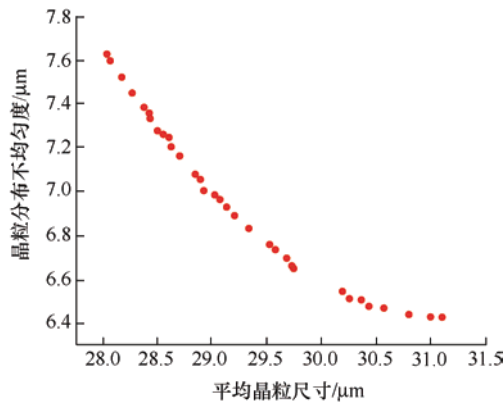


图 12 优化求解得到的 Pareto 解集

根据式(7)分别计算这 35 个 Pareto 解对应的标准化满意程度,如图 13 所示。选择满意程度 η 值最大的一组作为最优折衷解,即第 19 组方案为最优折衷解方案。

表 7 部分非劣解集

方案编号	自变量			响应变量		
	夹持长度 L/mm	砧子后退速度 $v_1/(\text{mm/s})$	镦粗缸速度因子 a	加热电流因子 b	晶粒尺寸 $\psi_1/\mu\text{m}$	晶粒分布不均匀度 $\psi_2/\mu\text{m}$
1	12.03	0.61	1.04	0.96	28.04	7.63
2	15.01	0.60	1.02	0.96	31.11	6.43
3	12.21	0.60	1.03	0.96	28.42	7.36
4	12.59	0.60	1.04	0.96	28.50	7.28
5	12.67	0.61	1.04	0.96	28.56	7.26
6	12.29	0.60	1.04	0.96	28.26	7.45
7	13.03	0.61	1.04	0.96	28.89	7.05
8	13.15	0.60	1.03	0.96	29.34	6.83
9	14.04	0.60	1.04	0.96	29.73	6.66
10	13.39	0.60	1.03	0.96	29.68	6.70
11	14.77	0.60	1.03	0.96	30.44	6.48
12	12.66	0.61	1.04	0.96	28.60	7.25

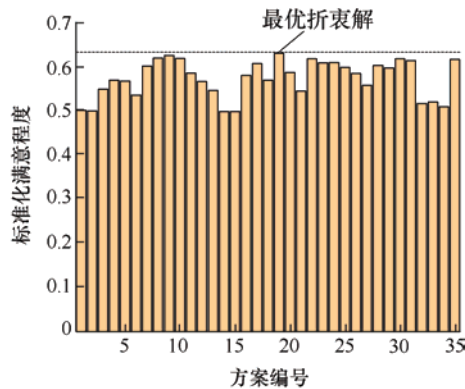


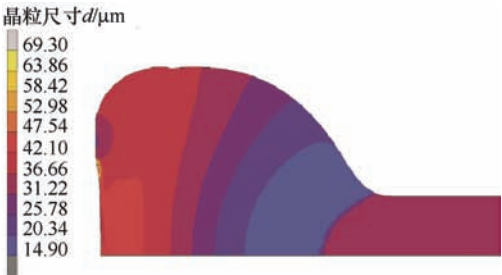
图 13 Pareto 解集对应的标准化满意程度

表 8 展示了优化前方案、 ψ_1 最优解和 ψ_2 最优解以及最优折衷解方案的具体参数和响应模型预测结果,可以发现最优折衷解方案的双目标值均处于 ψ_1

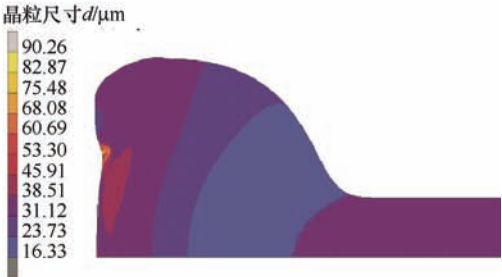
和 ψ_2 各极端解的范围内,表明该折衷解均衡双目标函数的效果较好。根据表 8 方案进行电锻模拟,得到这四组方案下的晶粒尺寸模拟结果如图 14a~14d

表 8 优化前、 ψ_1 最优解、 ψ_2 最优解和最优折衷解的晶粒尺寸和晶粒分布不均匀度预测值

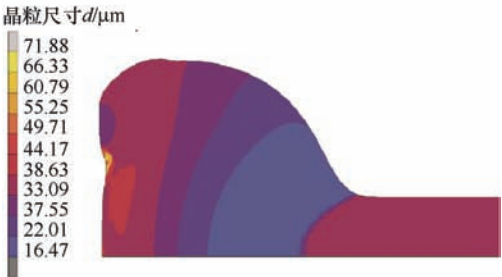
方案	夹持长度 L/mm	砧子后退速度 $v_1/(\text{mm/s})$	镦粗缸速度因子 a	加热电流因子 b	晶粒尺寸 $\psi_1/\mu\text{m}$	晶粒分布不均匀度 $\psi_2/\mu\text{m}$
优化前	16	0.6	1	1	33.59	7.70
ψ_1 最优解	12.03	0.61	1.04	0.96	28.04	7.63
ψ_2 最优解	15.01	0.60	1.02	0.96	31.11	6.43
最优折衷解	14.17	0.60	1.04	0.96	29.74	6.65



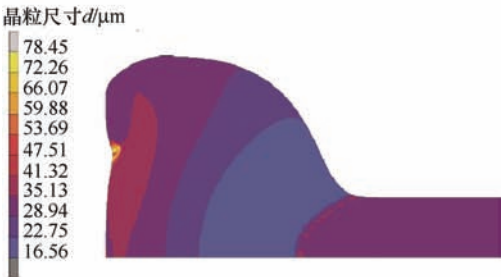
(a) 优化前



(b) ψ_1 最优解



(c) ψ_2 最优解



(d) 最优折衷解

图 14 不同模拟方案下的晶粒尺寸分布云图

所示。可以发现这四组方案下的晶粒尺寸分布大致相似,“蒜头”中心的晶粒尺寸最大,而“蒜头”脖颈处的最小,这是因为“蒜头”中心区域的材料先变形并长期处于高温导致晶粒长大,而脖颈处的材料持续变形并发生动态再结晶导致晶粒细化。统计该四组方案模拟后“蒜头”的晶粒尺寸分布结果如图15所示,相较于优化前方案, ψ_1 最优解和 ψ_2 最优解以及最优折衷解对应的晶粒尺寸分布更加集中,且晶粒尺寸更小。

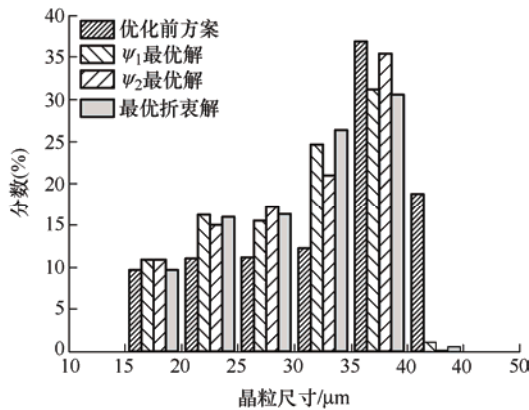
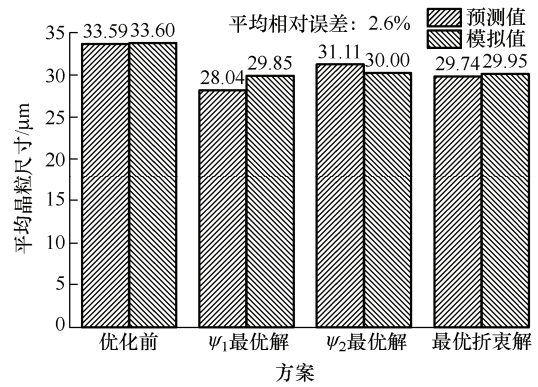


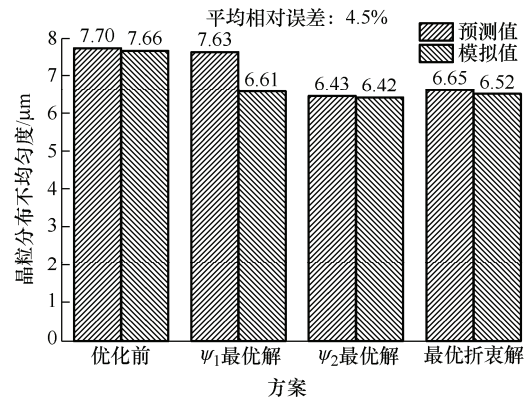
图15 优化方案与原始方案晶粒尺寸统计分布

图16a和16b为最优折衷解、优化前方案、 ψ_1 最优解和 ψ_2 最优解这四组方案对应 ψ_1 和 ψ_2 双目标的模拟结果和响应模型预测结果的对比。从图16对比结果可知,相较于优化前方案,模拟得到的 ψ_1 最优解、 ψ_2 最优解和最优折衷解的晶粒尺寸均减小,分别从33.60 μm减小至29.85 μm、30.0 μm和29.95 μm;同时, ψ_1 最优解、 ψ_2 最优解和最优折衷解的晶粒分布不均匀度分别从7.66 μm减小至6.61 μm、6.42 μm和6.52 μm。最优折衷解对应的晶粒尺寸和晶粒分布不均匀度处于 ψ_1 和 ψ_2 两个极端解对应的范围内,表明在优化过程中晶粒匀细化双目标能协调均衡;相较于优化前方案,双目标值分别减小了10.86%和14.90%,表明所建立的电镦晶粒匀细化控制方法优化效果显著。此外,对比这四组方案对应双目标的模拟值与预测值,得到晶粒尺寸 ψ_1 和晶粒分布不均匀度 ψ_2 的平均相对误差分别为2.6%和4.5%,验证了所建立的晶粒匀细化双目标控制方法的准确性和可靠性,可用于实际电镦过程的工艺参数优化及设计。

综上,得到晶粒匀细化双目标对应的最优电镦参数为:夹持长度 L 为14 mm;砧子后退速度 v_1 为0.6 mm/s;镦粗缸速度因子为1.04;加热电流因子为0.96。



(a) 晶粒尺寸

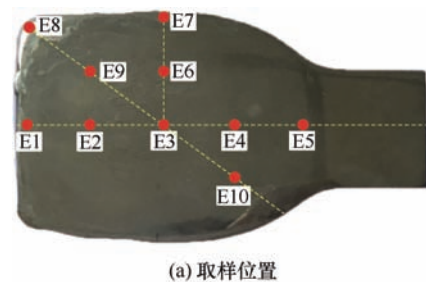


(b) 晶粒分布不均匀度

图16 优化前、 ψ_1 最优解、 ψ_2 最优解和最优折衷解的预测值与模拟值比较结果

4 电镦晶粒匀细化控制方法的验证

根据最优电镦参数进行中等规格气阀电镦工艺试验,并对电镦“蒜头”各区域组织进行EBSD组织表征,验证电镦晶粒匀细化控制方法的有效性。图17为电镦件剖面及“蒜头”各区



(a) 取样位置



(b) 取样后的电镦件剖面

图17 电镦件剖面及取样位置

域取样位置图。对这 10 个试样进行研磨, 在配比为高氯酸: 乙酸=15:150 的电解液中进行电解抛光, 抛光时间为 23s, 电压为 20 V, 电流 0.1~0.15 A。采用 JSM-7800F 场发射扫描电子显微镜对试样进行表征, 扫描工作电压为 25 kV, 扫描步长为 2~3 μm 。采用 Channel 5 软件分析 EBSD 数据, 晶界的临界判断标准角度 15° , 晶粒尺寸只统计完全被大角度晶界包围的区域。图 18 为不同取样位置对应的 EBSD 组织及相应的晶粒尺寸分布结果。从图 18 可以发现, 电锻后“蒜头”各区域的晶粒组织基本上均为等轴的动态再结晶晶粒且分布均匀。

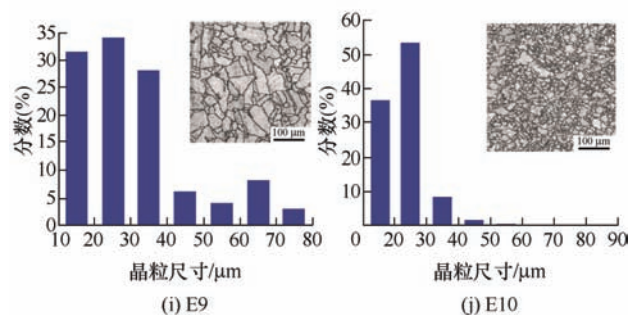
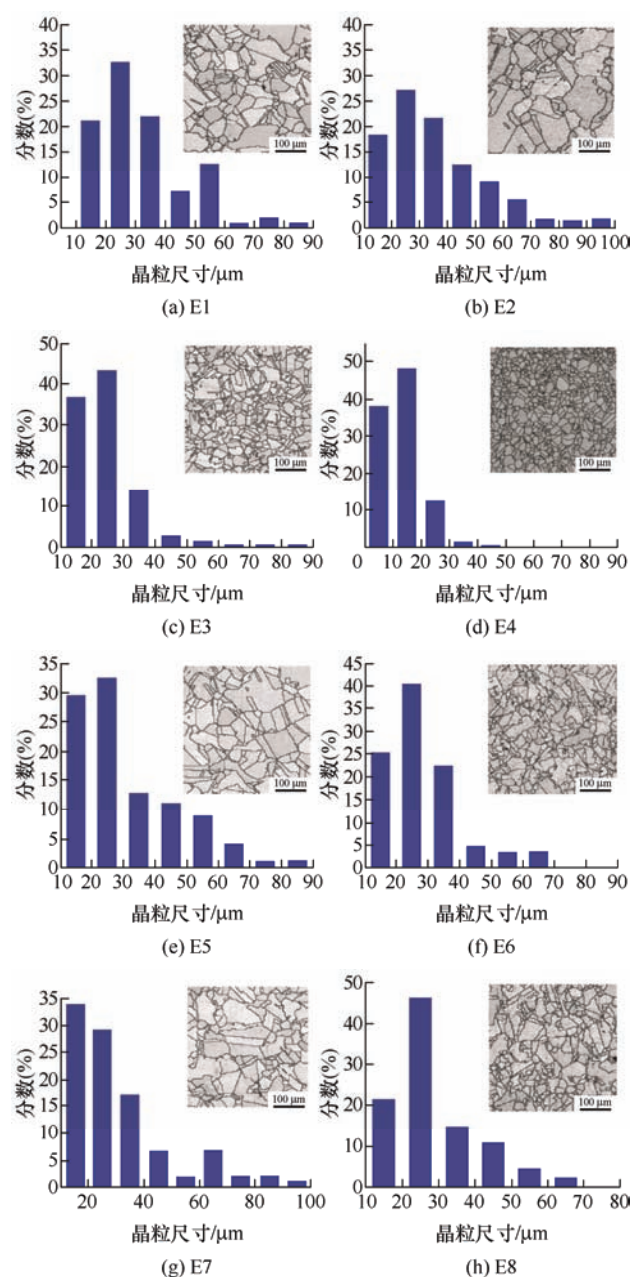


图 18 不同取样位置对应的 EBSD 组织及晶粒尺寸分布

按照轴向、径向和 45° 方向分别对电锻“蒜头”各区域的晶粒尺寸进行分析, 图 19 为这三个方向对

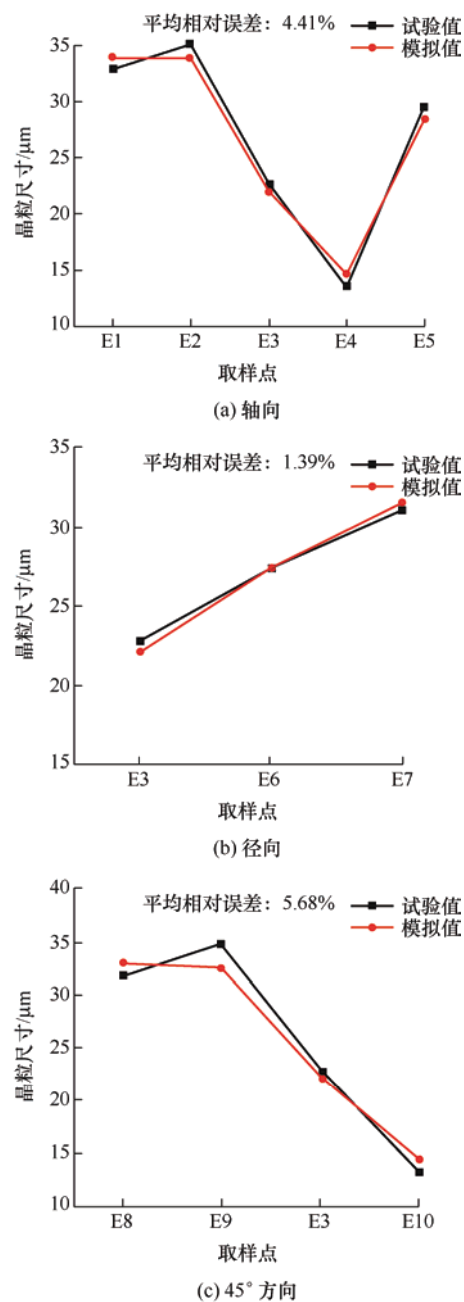


图 19 不同方向对应晶粒尺寸的模拟值与试验值比较

应取样点的模拟值和试验值比较结果。可以发现电锻“蒜头”的实际晶粒尺寸分布和模拟结果相似,横向方向,晶粒尺寸先增加再降低,“蒜头”中心对应的晶粒尺寸最大;径向方向,晶粒尺寸由“蒜头”中心向外逐渐减小;45°方向,晶粒尺寸先增加再降低。此外,模拟值与试验值在轴向、径向和 45°方向的平均相对误差分别为 4.41%、1.39%和 5.68%,说明所建立的电锻多场多尺度有限元模型以及晶粒匀细化双目标控制方法具有较高的精度,验证了电锻晶粒匀细化控制方法的可靠性,可用于实际电锻工艺指导。

5 结论

(1) 建立了一套电锻过程晶粒匀细化控制方法。基于 Ni80A 镍基超合金热加工图识别出的晶粒细化稳健变形参数区间初步设计电锻工艺参数;构建晶粒尺寸与晶粒分布不均匀度双目标控制函数,开发动态再结晶体积分数和晶粒尺寸演变方程子程序,构建电锻成形电-热-力多场、变形-晶粒多尺度动态耦合的有限元分析模型并植入双目标控制函数。建立双目标对夹持长度、砧子后退速度、锻粗缸速度及加热电流等四项决策变量的响应关系;采用 NSGA-II 遗传算法求解获得四项决策变量对双目标交互作用的最优折衷解方案。

(2) 根据最优折衷解模拟得到的晶粒尺寸与晶粒分布不均匀度分别为 29.95 μm 和 6.52 μm ,相较于优化前分别减小了 10.86%和 14.90%。

(3) 开展中等规格气阀电锻工艺试验和 EBSD 组织分析验证了晶粒匀细化控制方法的有效性,结果表明电锻“蒜头”的实际晶粒尺寸分布和模拟结果相似,轴向、径向和 45°方向的模拟值与试验值之间的平均相对误差分别为 4.41%、1.39%和 5.68%。这套方法将为调控大规格气阀电锻成形晶粒匀细化提供一般方法。

参 考 文 献

- [1] 赵新. 内燃机气门的失效原因探析[J]. 内燃机与动力装置, 2006(3): 54-56.
ZHAO Xin. Discuss of invalidation of internal combustion engine valve[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2006(3): 54-56.
- [2] 权国政, 潘佳. 大规格电锻技术研究方法及研究目标的新突破及进展[J]. 精密成形工程, 2014, 6(5): 18-24.
QUAN Guozheng, PAN Jia. New breakthrough and

progress of research methods and objectives about large size electric upsetting technology [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(5): 18-24.

- [3] 赵磊. 电锻成形多场耦合数值模拟及工艺参数优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
ZHAO Lei. Multi-field coupling numerical simulation and process parameters optimization of electric upsetting [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [4] JEONG H, CHO J, LEE N, et al. Simulation of electric upsetting and forging process for large marine diesel engine exhaust valves[J]. Materials Science Forum, 2006, 510-511: 142-145.
- [5] QUAN Guozheng, ZHANG Le, AN Chao, et al. Multi-variable and bi-objective optimization of electric upsetting process for grain refinement and its uniform distribution[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(6): 859-872.
- [6] 汪国顺, 夏巨谔, 胡国安, 等. 气门电热锻粗工艺的数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(1): 57-60.
WANG Guoshun, XIA Juchen, HU Guoan, et al. Numerical simulation of electrical upsetting process for valve[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(1): 57-60.
- [7] EVANS N, MAZIASZ P, WALKER L. Microstructure and micro-analysis of Ni-based superalloy exhaust valves [J]. Microscopy and Microanalysis, 2004, 10(S02): 654-655.
- [8] 邹震宇. 基于晶粒匀细化双目标的耐热合金电锻工艺参数优化设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZOU Zhenyu. Optimization design of processing parameters for electric upsetting process of heat-resistant alloy to attain the homogenized and fine grain[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [9] QUAN Guozheng, PAN Jia, WANG Xuan, et al. Correspondence between grain refinements and flow softening behaviors at Nimonic 80A superalloy under different strain rates, temperatures and strains [J]. Materials Science & Engineering, 2018, A679: 358-371.
- [10] QUAN Guozheng, ZHANG Yuqing, ZHANG Pu, et al. Correspondence between low-energy twin boundary density and thermal-plastic deformation parameters in nickel-based superalloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 438-455.
- [11] SIVAPRASAD P, VENUGOPAL S, VENUGOPAL S, et al. Validation of processing maps for a 15Cr-15Ni-2.2Mo-0.3Ti austenitic stainless steel using hot

- forging and rolling tests[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1-3): 262-268.
- [12] QUAN Guozheng, LIU Qiao, ZHAO Jiang, et al. Determination of dynamic recrystallization parameter domains of Ni80A superalloy by enhanced processing maps[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(7): 1449-1464.
- [13] 王广春, 赵国群, 赵新海, 等. 基于变形均匀性的锻造过程微观组织优化方法及其应用[J]. 数字制造科学, 2005(2): 1-20.
WANG Guangchun, ZHAO Guoqun, ZHAO Xinhai, et al. A study of microstructure optimization methods of forging processes based on deformation uniformity and its applications[J]. Digital Manufacture Science, 2005(2): 1-20.
- [14] 王广春. 基于微观组织优化的锻造工艺预成形及毛坯形状优化设计[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(2): 69-72.
WANG Guangchun. Shape optimization design of the preform and billet of the forging process based on the microstructure optimization[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(2): 69-72.
- [15] 王广春, 管婧, 赵国群. 锻造成形微观组织优化建模及应用[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(5): 49-53.
WANG Guangchun, GUAN Jing, ZHAO Guoqun. Modeling and application of microstructure optimization in forging process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(5): 49-53.
- [16] QUAN Guozheng, YU Yanze, SHENG Xue, et al. An innovative approach of parameter loading path design for grain refinement and its application in Ni80a superalloy[J]. Materials, 2021, 14(21): 6703-6721.
- [17] 张乐. 镍基超合金电-热-力耦合变形低 Σ CSL 晶界密度有限元分析建模及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
ZHANG Le. Finite modeling and applying of low Σ CSL grain boundary proportion based on Ni-based superalloy electric-thermal-mechanical coupling simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

作者简介: 权国政(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂/恶劣工况大型模具/构件增材制造及再制造技术与装备, 极复杂成形工艺多场多尺度动态耦合模拟技术(塑性、焊接、粉末、增材), 成形工艺智能规划系统、场景虚拟现实, 极端工况下装备服役动态过程模拟及健康评价。

E-mail: quangz3000@sina.com