2025 年 第 45 卷 航 空 材 料 学 报 2025, Vol. 45
第 4 期 第 85 – 96 页 JOURNAL OF AERONAUTICAL MATERIALS No.4 pp.85 – 96

**引用格式:** 王攀智, 卢熠, 龚忠兴, 等. 基于响应面法的 GH738 高温合金热变形工艺参数优化[J]. 航空材料学报, 2025, 45(4): 85-96.

WANG Panzhi, LU Yi, GONG Zhongxing, et al. Optimization of hot deformation processing parameters of GH738 superalloy based on response surface methodology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(4): 85-96.

# 基于响应面法的 GH738 高温合金热变形工艺参数优化

王攀智[1,2*], 卢 熠[1], 龚忠兴[1], 吴永安[1], 张 华[1], 王 涛[3]

(1. 贵州航宇科技发展股份有限公司, 贵阳 550081; 2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 3. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 基于 GH738 高温合金变形温度和应变速率分别在 980～1100 ℃ 和 0.001～0.1 $s^{-1}$ 范围的热压缩实验, 计算变形激活能 $Q$、温度补偿应变因子 ln$Z$、功率耗散效率 $\eta$ 和失稳因子$\xi(\dot{\varepsilon})$, 建立以热变形工艺参数为输入变量, $Q$、ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$为输出目标的响应面模型, 实现合金热变形工艺参数优化。结果表明: 合金流动应力对热变形工艺参数非常敏感, 热变形工艺参数对 $Q$、ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$影响较大, 建立的响应面模型具有较高预测精度, 其平均绝对相对误差分别为 0.494%、0.564%、0.919% 和 13.484%。基于低 $Q$ 和 ln$Z$ 以及高 $\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$的多目标优化, 获得的最佳变形工艺参数窗口为变形温度和应变速率分别在 1092～1100 ℃ 和 0.001～0.0056 $s^{-1}$, 通过微观组织观察证实该多目标优化结果的正确性。

**关键词:** GH738 高温合金; 热变形行为; 响应面法; 工艺参数优化

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000188

**中图分类号:** V252.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-5053(2025)04-0085-12

# Optimization of hot deformation processing parameters of GH738 superalloy based on response surface methodology

WANG Panzhi[1,2*], LU Yi[1], GONG Zhongxing[1], WU Yong'an[1], ZHANG Hua[1], WANG Tao[3]

(1. Gui Zhou Aviation Technology Development Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Based on hot compression tests of GH738 superalloy, encompassing deformation temperatures ranging from 980 ℃ to 1100 ℃ and strain rates of 0.001-0.1 $s^{-1}$, deformation activation energy($Q$), temperature-compensated strain factor(ln$Z$), power dissipation efficiency($\eta$) and instability factor($\xi(\dot{\varepsilon})$) are calculated. Subsequently, a response surface model is established, utilizing hot deformation processing parameters as input variables and targeting $Q$, ln$Z$, $\eta$ and $\xi(\dot{\varepsilon})$ as output metrics. This model facilitates the optimization of the superalloy's heat deformation processing parameters. The results show that the superalloy's flow stress exhibits considerable sensitivity to variations in these parameters, which significantly impact $Q$, ln$Z$, $\eta$ and $\xi(\dot{\varepsilon})$. Notably, the established response surface model demonstrates exceptional prediction accuracy, with average absolute relative errors of 0.494%, 0.564%, 0.919% and 13.484% for $Q$, ln$Z$, $\eta$ and $\xi(\dot{\varepsilon})$, respectively. Employing multi-objective optimization—aiming for low $Q$ and ln$Z$ coupled with high $\eta$ and $\xi(\dot{\varepsilon})$—the optimal deformation processing parameters are determined to within the range of 1092-1100 ℃ deformation temperatures and 0.001-0.0056 $s^{-1}$ strain rates. Microstructural analysis conducted under these optimized parameters further validates the accuracy of the multi-objective optimized results.

**Key words:** GH738 superalloy; hot deformation behavior; response surface methodology; processing parameters optimization

GH738 高温合金具有优异的耐高温、耐腐蚀、抗疲劳性能等，广泛应用于发动机涡轮盘、叶片等部件[1-3]。但该合金热塑性较差、热加工温度范围较小，组织性能对变形工艺参数非常敏感，成形过程中易出现塑性流动失稳（如开裂、绝热剪切、局部流动等）；工艺参数不当还容易产生粗晶或混晶组织，这些组织对性能影响较大，影响程度往往是判断构件质量是否合格的重要标准[4-5]。因此，GH738 高温合金热变形工艺制度制定和优化是实际生产控制的重点和难点。目前，国内外学者对 GH738 高温合金的热变形行为进行了大量研究。Amiri 等[6] 发现当变形温度为 1050～1150 ℃、变形速率为 0.01～10 $s^{-1}$ 及真应变为 0.8 时，GH738 高温合金变形后主要为等轴动态再结晶组织。Guimaraes 等[7] 研究发现，变形温度低于 950 ℃ 时，GH738 高温合金变形时仅发生动态回复；当变形温度为 1000～1220 ℃、应变速率为 $5.0\times10^{-4}$～$9.3\times10^{-2}$ $s^{-1}$ 且真应变大于 0.4 时，合金变形发生动态再结晶。Shen 等[8] 构建 GH738 高温合金热变形微观组织演化模型，采用数值模拟获得微观组织演变规律，并结合实际生产结果验证了模型可靠性。可以看出，虽然 GH738 合金热变形取得较多研究成果，但是目前关于合金变形工艺制度优化的研究却鲜见报道，实际生产缺乏理论支撑。

考虑受随机误差影响的响应面法（response surface methodology, RSM）在材料科学中已获得初步应用，对实际生产有指导作用[9-10]。Khdair 等[11] 采用 RSM 研究 AZ31B 镁合金激光切割工艺参数对切缝附近温度和切割质量的影响规律，结果表明，喷嘴间距和激光功率对切缝附近温度有明显影响，切割速度对切口质量影响较小。Guo 等[12] 采用 RSM 揭示 Inconel 625 合金大型厚壁管材挤压工艺参数对升温和峰值温度的耦合影响，获得适宜的挤压工艺窗口。Kaya 等[13] 采用 RSM 确定选区激光熔融 Ti6Al4V-ELI 合金的最佳工艺参数，得到性能合格的构件，节约粉末消耗，节省打印时间。Shen 等[14] 分别采用 RSM、Kriging 法和反向传播（back propagation, BP）神经网络构建 TC6 钛合金的本构关系模型，结果表明，RSM 可在较少训练样本条件下达到更高预测精度，对减少建模所需实验次数和计算时间具有意义。

目前，采用 RSM 对 GH738 高温合金变形工艺参数进行多目标优化的研究鲜见报道。为了优化 GH738 合金热变形工艺参数，本工作以等温恒应变速率压缩实验为基础，以变形温度、应变速率和真应变为输入变量，以变形激活能 $Q$、温度补偿应变因子 ln$Z$、功率耗散效率 $\eta$ 和失稳因子 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 为目标，建立响应面模型，确定 GH738 高温合金的最佳变形工艺参数范围，研究结果为 GH738 高温合金构件的实际生产提供理论和技术指导。

## 1 实验材料与方法

实验用 GH738 高温合金的化学成分见表 1，原始组织见图 1。从图 1 可以看出，合金平均晶粒尺寸约为 90 μm。采用 Gleeble-3500 型热模拟试验机进行压缩实验，试样尺寸为 $\phi$8 mm×12 mm。变形温度为 980～1100 ℃，应变速率为 0.001～0.1 $s^{-1}$，高度压下率为 60%（即真应变约为 0.92）。升温速度为 10 ℃/s，保温时间为 300 s，压缩后快速冷却至室温。压缩后的试样沿纵向对半剖开，经打磨和抛光，采用 200 mL 盐酸、10 g 氯化亚铜和 200 mL 酒精混合溶液进行腐蚀，最后在 XJP-9A 型金相显微镜下进行组织观察。

表 1 GH738 高温合金化学成分（质量分数/%）
Table 1 Chemical composition of GH738 superalloy (mass fraction/%)

| C | Cr | Co | Mo | Al | Ti | Ni |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.036 | 19.44 | 13.53 | 4.34 | 1.45 | 3.0 | Bal. |

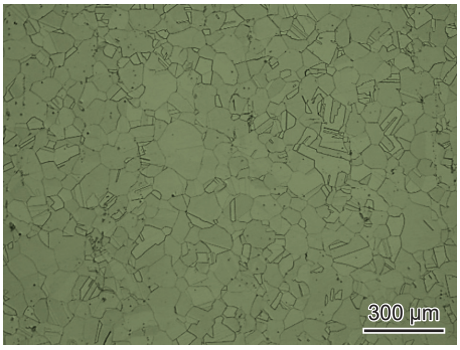


图 1 GH738 高温合金原始组织
Fig. 1 Initial microstructure of GH738 superalloy

## 2 结果与分析

### 2.1 流动行为分析及参数计算

#### 2.1.1 流动行为分析

图 2 为 GH738 高温合金不同变形条件下的流动应力曲线。从图 2 可以看出，在变形初始阶段，流动应力随应变的增加迅速增大，主要因为位错增

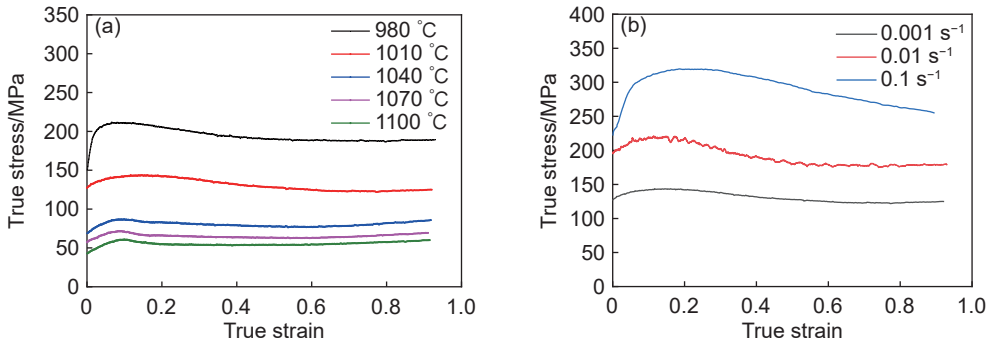


图 2　GH738 高温合金流动应力曲线　(a)应变速率为 0.001 $s^{-1}$, 不同变形温度下流动应力曲线; (b)变形温度为 1010 ℃, 不同应变速率下流动应力曲线

Fig. 2　Flow stress curves of GH738 superalloy　(a) flow stress curves at strain rate of 0.001 $s^{-1}$ and different deformation temperatures; (b) flow stress curves at deformation temperature of 1010 ℃ and different strain rates

殖、缠结和堆积导致的加工硬化占主导地位, 致使位错运动临界切应力增加, 流动应力也迅速增大[15-16]。随着应变继续增大, 位错湮灭和重新排列成低能量阵列, 产生流动软化, 流动软化与加工硬化平衡时, 流动应力达到峰值; 之后随应变的进一步增大, 流动应力缓慢下降, 并最终达到稳态流动[17-18]。

从图 2 还可以看出, 峰值应力随变形温度增加和应变速率降低而降低, 主要因为提高变形温度能够加速动态再结晶晶界移动, 降低应变速率可减小动态再结晶临界位错密度, 诱导动态再结晶[19-20]。实验发现, 应变速率为 0.01 $s^{-1}$ 和 0.1 $s^{-1}$ 时, 不同变形温度的流动应力曲线变化规律与应变速率为 0.001 $s^{-1}$ 情况相似, 因此, 图 2(a)仅以应变速率为 0.001 $s^{-1}$ 的流动应力曲线为例。从图 2(a)可以看出, 流动应力随变形温度的降低而增大, 尤其当变形温度低于 1040 ℃ 时, 增大趋势更为明显。研究发现, 变形温度为 980、1040、1070 ℃ 和 1100 ℃ 时, 不同应变速率的流动应力曲线变化规律与变形温度为 1010 ℃ 情况相似, 因此, 图 2(b)仅以变形温度为 1010 ℃ 的流动应力曲线为例。从图 2(b)可以看出, 随应变速率增加, 流动应力明显增大, 尤其当应变速率较大(0.1 $s^{-1}$) 时, 增大趋势更为显著。这说明 GH738 高温合金的流动应力具有正应变速率和负温度敏感性。

### 2.1.2　热变形激活能和 $Z$ 参数

变形激活能 $Q$ 可用来表征材料高温塑性变形的难易程度[21]。变形温度和应变速率对流动应力的综合影响可采用 $Z$ 参数和 Arrhenius 动力学方程来表征[22]:

$$Z=\dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)=A[\sinh(\alpha\sigma)]^{n} \tag{1}$$

式中: $Z$ 为 Zener-Hollomon 参数; $\dot{\varepsilon}$为应变速率, 单位为 $s^{-1}$; R 为气体常数, 其值为 8.314 J/(mol·K); $T$ 为变形温度, 单位为 K; $\sigma$ 为流动应力, 单位为 MPa; $A$、$\alpha$ 和 $n$ 均为材料常数。当$\alpha\sigma\leqslant0.8$ 时, 式(1)可表示为:

$$Z=\dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)=A_1\sigma^{n_1} \tag{2}$$

式中: $A_1$ 和 $n_1$ 均为材料常数。当$\alpha\sigma\geqslant1.2$ 时, 式(1)可表示为:

$$Z=\dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)=A_2\exp(\beta\sigma) \tag{3}$$

式中: $A_2$ 和 $\beta$ 均为材料常数, 其中$\beta=n_1\alpha$。

为了确定材料常数, 对式(1)～(3)两边取自然对数, 可得:

$$\ln Z=\ln\dot{\varepsilon}+\frac{Q}{RT}=\ln A+n\ln[\sinh(\alpha\sigma)] \tag{4}$$

$$\ln Z=\ln\dot{\varepsilon}+\frac{Q}{RT}=\ln A_1+n_1\ln\sigma \tag{5}$$

$$\ln Z=\ln\dot{\varepsilon}+\frac{Q}{RT}=\ln A_2+\beta\sigma \tag{6}$$

根据式(4)可知:

$$n=\left\{\frac{\partial\ln\dot{\varepsilon}}{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}\right\}_T \tag{7}$$

$$k=\frac{Q}{nR}=\left\{\frac{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)}\right\}_{\dot{\varepsilon}} \tag{8}$$

得到:

$$Q=Rnk=R\left\{\frac{\partial\ln\dot{\varepsilon}}{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}\right\}_T\cdot\left\{\frac{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)}\right\}_{\dot{\varepsilon}} \tag{9}$$

以真应变为 0.92 的流动应力为例, 计算 $Q$ 和 $\ln Z$。根据式(5)和式(6)可知, $\ln\sigma$-$\ln\dot{\varepsilon}$和 $\sigma$-$\ln\dot{\varepsilon}$拟合直线斜率分别为 $1/n_1$ 和 $1/\beta$, 进而可求得 $\alpha$。$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$-$\ln\dot{\varepsilon}$拟合直线斜率为 $1/n$; $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$-$1/T$ 拟合直线

斜率为 $k$。将材料参数代入式(4)和式(9),可求出 $Q$ 和 ln$Z$ 值,如表 2 和表 3 所示。

表 2 GH738 高温合金在真应变为 0.92、不同 $T$ 和$\dot{\varepsilon}$下的 $Q$ 值

Table 2 $Q$ of GH738 superalloy at different $T$ and $\dot{\varepsilon}$ with true strain of 0.92

| $T$/℃ | $\dot{\varepsilon}$/s$^{-1}$ | $Q$/(kJ·mol$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 980 | 0.001 | 912.8055 |
| 980 | 0.01 | 817.7117 |
| 980 | 0.1 | 784.5566 |
| 1010 | 0.001 | 719.4193 |
| 1010 | 0.01 | 644.4720 |
| 1010 | 0.1 | 618.3410 |
| 1040 | 0.001 | 756.7171 |
| 1040 | 0.01 | 677.8842 |
| 1040 | 0.1 | 650.3985 |
| 1070 | 0.001 | 703.2758 |
| 1070 | 0.01 | 630.0103 |
| 1070 | 0.1 | 604.4657 |
| 1100 | 0.001 | 717.3099 |
| 1100 | 0.01 | 642.5823 |
| 1100 | 0.1 | 616.5280 |

从表 2 和表 3 可以看出,在研究的变形条件下,$Q$ 值在 604.4657～912.8055 kJ/mol 较大范围内波动,ln$Z$ 值在 51.6809～80.7046 较大范围内波动,说明 GH738 高温合金的 $Q$ 和 ln$Z$ 值对变形工艺参数较为敏感。

2.1.3 功率耗散效率

根据动态材料模型(dynamic material model, DMM)理论,热加工过程中吸收的瞬时总功率 $P$ 可分为两部分[23-24]:

$$P=\sigma\dot{\varepsilon}=\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma \mathrm{d}\dot{\varepsilon}+\int_0^{\sigma}\dot{\varepsilon}\mathrm{d}\sigma=G+J \tag{10}$$

式中:$G$ 为功率耗散量,表示由于塑性变形引起的功率耗散;$J$ 为功率耗散协量,表示由于组织演化消耗的能量[25]。

定义功率耗散效率 $\eta$ 为[26]:

$$\eta=\frac{J}{J_{\max}}=2\left(\frac{P-G}{P}\right)=2\left(1-\frac{1}{\sigma\dot{\varepsilon}}\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma \mathrm{d}\dot{\varepsilon}\right) \tag{11}$$

一般来说,$\eta$ 值越高的变形工艺参数对应越良好的塑性加工性能[27]。根据等温恒应变速率压缩实验数据,采用式(11)可计算出真应变为 0.92、不同 $T$ 和$\dot{\varepsilon}$下的$\eta$值(表 4)。从表 4 可以看出,在研究的变形条件下,$\eta$值在 0.1594～0.4074 较大范围内波动,说明 GH738 高温合金的 $\eta$ 值对变形工艺参数同样较为敏感。

表 3 GH738 高温合金在真应变为 0.92、不同 $T$ 和$\dot{\varepsilon}$下的 ln$Z$ 值

Table 3 ln$Z$ of GH738 superalloy at different $T$ and $\dot{\varepsilon}$ with true strain of 0.92

| $T$/℃ | $\dot{\varepsilon}$/s$^{-1}$ | ln$Z$ |
|---|---|---|
| 980 | 0.001 | 80.7046 |
| 980 | 0.01 | 73.8799 |
| 980 | 0.1 | 73.0002 |
| 1010 | 0.001 | 60.5287 |
| 1010 | 0.01 | 55.8059 |
| 1010 | 0.1 | 71.2396 |
| 1040 | 0.001 | 62.4044 |
| 1040 | 0.01 | 57.4862 |
| 1040 | 0.1 | 57.2712 |
| 1070 | 0.001 | 56.0706 |
| 1070 | 0.01 | 51.8122 |
| 1070 | 0.1 | 51.8273 |
| 1100 | 0.001 | 55.9239 |
| 1100 | 0.01 | 51.6809 |
| 1100 | 0.1 | 51.7013 |

2.1.4 失稳因子

研究结果表明,当应变速率敏感指数随$\dot{\varepsilon}$变化时,Murty 准则更为适用[28-29]。Murty 准则适用于任何类型的流动应力-应变速率曲线,表述为若满足条件[30]:

$$\xi(\dot{\varepsilon})=\frac{2m}{\eta}-1<0 \tag{12}$$

则变形产生塑性失稳。式中:$\xi(\dot{\varepsilon})$为失稳因子;$m$ 为应变速率敏感指数。

根据等温恒应变速率压缩实验数据,按照式(12)可以计算出真应变为 0.92、不同 $T$ 和$\dot{\varepsilon}$下的$\xi(\dot{\varepsilon})$ 值(表 5)。一般来说,$\xi(\dot{\varepsilon})$越大,越不容易发生流动失稳,呈现良好的塑性变形能力。从表 5 可以看出,在研究的变形条件下,$\xi(\dot{\varepsilon})$值在 −0.0055～0.1042 较大范围内波动,说明 GH738 高温合金的塑性变形能力对变形工艺参数敏感。

## 2.2 基于响应面法的变形工艺参数优化

2.2.1 响应面模型构建

RSM 是一种可视化优化算法,它能够很好

表 4　738 高温合金在真应变为 0.92、不同 $T$ 和 $\dot{\varepsilon}$ 下的 $\eta$ 值
Table 4　$\eta$ of GH738 superalloy at different $T$ and $\dot{\varepsilon}$ with true strain of 0.92

| $T$/℃ | $\dot{\varepsilon}$/s$^{-1}$ | $\eta$ |
|---|---|---|
| 980 | 0.001 | 0.2265 |
| 980 | 0.01 | 0.2001 |
| 980 | 0.1 | 0.1594 |
| 1010 | 0.001 | 0.2755 |
| 1010 | 0.01 | 0.2710 |
| 1010 | 0.1 | 0.2651 |
| 1040 | 0.001 | 0.2656 |
| 1040 | 0.01 | 0.2859 |
| 1040 | 0.1 | 0.3163 |
| 1070 | 0.001 | 0.3798 |
| 1070 | 0.01 | 0.3465 |
| 1070 | 0.1 | 0.2959 |
| 1100 | 0.001 | 0.4074 |
| 1100 | 0.01 | 0.3577 |
| 1100 | 0.1 | 0.2806 |

表 5　738 高温合金在真应变为 0.92、不同 $T$ 和 $\dot{\varepsilon}$ 下的 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 值
Table 5　$\xi(\dot{\varepsilon})$ of GH738 superalloy at different $T$ and $\dot{\varepsilon}$ with true strain of 0.92

| $T$/℃ | $\dot{\varepsilon}$/s$^{-1}$ | $\xi(\dot{\varepsilon})$ |
|---|---|---|
| 980 | 0.001 | 0.0289 |
| 980 | 0.01 | 0.0046 |
| 980 | 0.1 | −0.0055 |
| 1010 | 0.001 | 0.0440 |
| 1010 | 0.01 | 0.0403 |
| 1010 | 0.1 | 0.0381 |
| 1040 | 0.001 | 0.0407 |
| 1040 | 0.01 | 0.0633 |
| 1040 | 0.1 | 0.0758 |
| 1070 | 0.001 | 0.0891 |
| 1070 | 0.01 | 0.0485 |
| 1070 | 0.1 | 0.0251 |
| 1100 | 0.001 | 0.1042 |
| 1100 | 0.01 | 0.0410 |
| 1100 | 0.1 | 0.0052 |

地建立输入参数与响应目标对应关系，对响应目标进行预测及优化[31-32]。本工作采用 Box-Behnken 设计并结合多项式函数建立 GH738 高温合金的响应面模型。实验方案及对应的响应值如表 6 所示。

将变形工艺参数 $T$、$\varepsilon$ 和 $\dot{\varepsilon}$ 作为输入变量，分别以 $Q$、lnZ、$\eta$ 和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 作为响应目标进行分析。相关响应面模型如式(13)～(16)所示。

$$Q = 22703.4764 - 42.6527T + 1744.9501\varepsilon + 2268.3640\lg\dot{\varepsilon} - 2.1739T\varepsilon - 4.0625T\lg\dot{\varepsilon} - 75.4045\varepsilon\lg\dot{\varepsilon} + 0.0208T^2 + 365.2978\varepsilon^2 + 37.3869(\lg\dot{\varepsilon})^2 + 0.001962T^2\lg\dot{\varepsilon} \tag{13}$$

$$\ln Z = 2210.0826 - 4.1158T + 166.3092\varepsilon + 205.5888\lg\dot{\varepsilon} - 0.2054T\varepsilon - 0.3653T\lg\dot{\varepsilon} - 6.9067\varepsilon\lg\dot{\varepsilon} + 0.001988T^2 + 33.7489\varepsilon^2 + 3.3971(\lg\dot{\varepsilon})^2 + 0.000177T^2\lg\dot{\varepsilon} \tag{14}$$

$$\eta = -45.5167 + 0.0871T - 0.1704\varepsilon - 17.8289\lg\dot{\varepsilon} + 0.000215T\varepsilon + 0.0342T\lg\dot{\varepsilon} + 0.0244\varepsilon\lg\dot{\varepsilon} - 0.000041T^2 - 0.0866\varepsilon^2 - 0.009308(\lg\dot{\varepsilon})^2 - 0.000016T^2\lg\dot{\varepsilon} \tag{15}$$

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = -37.5975 + 0.0721T + 0.3796\varepsilon - 12.6178\lg\dot{\varepsilon} - 0.000177T\varepsilon + 0.024357T\lg\dot{\varepsilon} + 0.0142\varepsilon\lg\dot{\varepsilon} - 0.000034T^2 - 0.1653\varepsilon^2 + 0.001081(\lg\dot{\varepsilon})^2 - 0.000012T^2\lg\dot{\varepsilon} \tag{16}$$

统计学中，$F$ 和 $p$ 值是用于方差分析(analysis of variance, ANOVA)和回归分析的关键统计量，$F$ 值越大，$p$ 值越小，说明该项对模型的影响越显著。结合文献[33-34]对模型精度的分析可知，若 $p$<0.05，则回归关系显著；若 $p$ < 0.01，则回归关系高度显著。以 $Q$ 响应面模型为例，其方差分析结果如表 7 所示。根据表 7 可知，$Q$ 响应面模型中 $p$<0.0001，远小于 0.01，说明该模型回归关系极为显著。变形温度 $T$、真应变 $\varepsilon$ 和应变速率对数 lg$\dot{\varepsilon}$ 对 $Q$ 的影响均极为显著($p$ 值均远小于 0.01)；通过比较 $F$ 值可知，单因素对 $Q$ 影响大小的排序为 $T^2 > T > (\lg\dot{\varepsilon})^2 > \varepsilon^2 > \varepsilon > \lg\dot{\varepsilon}$。交叉项中，除 $T\lg\dot{\varepsilon}$ 和 $T^2\lg\dot{\varepsilon}$ 项外，其余项的 $p$ 值均小于 0.05；通过比较 $F$ 值可知，交叉项对 $Q$ 影响大小的排序为 $T\varepsilon > \varepsilon\lg\dot{\varepsilon}$，说明 $T$、$\varepsilon$ 和 $\dot{\varepsilon}$ 间的交互作用对 $Q$ 同样有重要影响。

同理，根据 lnZ、$\eta$ 和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 响应面模型的方差分析结果，得到 3 个模型中 $p$<0.0001，说明建立的模型回归关系均极为显著；但变形温度 $T$、真应变 $\varepsilon$、应变速率对数 lg$\dot{\varepsilon}$ 及交叉项对 lnZ、$\eta$ 和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 影响大小的次序与对 $Q$ 影响的大小次序有所不同；单因素及交叉项对 lnZ、$\eta$ 和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 均有较重要的影响，其中单

表 6 实验方案及响应值
Table 6 Design matrix and experimental results

| Number | $T$/℃ | $\varepsilon$ | lg$\dot{\varepsilon}$ | $Q$/(kJ·mol$^{-1}$) | ln$Z$ | $\eta$ | $\xi(\dot{\varepsilon})$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 980 | 0.92 | −2 | 817.7117 | 73.8799 | 0.2001 | 0.0046 |
| 2 | 980 | 0.61 | −1 | 717.1778 | 66.5331 | 0.1927 | −0.0046 |
| 3 | 980 | 0.61 | −3 | 765.1330 | 66.5308 | 0.2772 | 0.0446 |
| 4 | 980 | 0.30 | −2 | 685.5396 | 61.1939 | 0.2614 | 0.0136 |
| 5 | 1040 | 0.92 | −3 | 756.7171 | 62.4044 | 0.2656 | 0.0407 |
| 6 | 1040 | 0.61 | −2 | 608.7107 | 51.1502 | 0.3443 | 0.0856 |
| 7 | 1040 | 0.61 | −2 | 608.7107 | 51.1502 | 0.3443 | 0.0858 |
| 8 | 1040 | 0.61 | −2 | 608.7107 | 51.1502 | 0.3443 | 0.0858 |
| 9 | 1040 | 0.92 | −1 | 650.3985 | 57.2712 | 0.3163 | 0.0758 |
| 10 | 1040 | 0.61 | −2 | 608.7107 | 51.1502 | 0.3443 | 0.0856 |
| 11 | 1040 | 0.30 | −1 | 651.2345 | 57.3478 | 0.3728 | 0.0929 |
| 12 | 1040 | 0.30 | −3 | 664.6547 | 53.9718 | 0.3522 | 0.0753 |
| 13 | 1040 | 0.61 | −2 | 608.7107 | 51.1502 | 0.3443 | 0.0858 |
| 14 | 1100 | 0.61 | −3 | 694.5466 | 53.9300 | 0.4144 | 0.1083 |
| 15 | 1100 | 0.30 | −2 | 671.1061 | 54.1794 | 0.4031 | 0.0631 |
| 16 | 1100 | 0.92 | −2 | 642.5823 | 51.6809 | 0.3577 | 0.0410 |
| 17 | 1100 | 0.61 | −1 | 651.0154 | 54.7221 | 0.3336 | 0.0411 |

表 7 $Q$ 响应面模型的方差分析结果
Table 7 ANOVA results of response surface model for $Q$

| Source | Sum of squares | Degree of freedom | Mean square value | $F$ | $p$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 61724.01 | 10 | 6172.40 | 100.65 | <0.0001 |
| $T$ | 13309.91 | 1 | 13309.91 | 217.04 | <0.0001 |
| $\varepsilon$ | 4747.02 | 1 | 4747.02 | 77.41 | 0.0001 |
| lg$\dot{\varepsilon}$ | 3584.35 | 1 | 3584.35 | 58.45 | 0.0003 |
| $T\varepsilon$ | 6455.79 | 1 | 6455.79 | 105.27 | <0.0001 |
| $T$lg$\dot{\varepsilon}$ | 4.89 | 1 | 4.89 | 0.0798 | 0.7871 |
| $\varepsilon$lg$\dot{\varepsilon}$ | 2157.53 | 1 | 2157.53 | 35.18 | 0.0010 |
| $T^2$ | 15600.97 | 1 | 15600.97 | 254.40 | <0.0001 |
| $\varepsilon^2$ | 5056.31 | 1 | 5056.31 | 82.45 | 0.0001 |
| (lg$\dot{\varepsilon}$)$^2$ | 5885.38 | 1 | 5885.38 | 95.97 | <0.0001 |
| $T^2$lg$\dot{\varepsilon}$ | 99.78 | 1 | 99.78 | 1.63 | 0.2493 |
| Residual | 367.95 | 6 | 61.33 | | |
| Cor total | 62091.96 | 16 | | | |

因素$T$、$\varepsilon$和lg$\dot{\varepsilon}$的影响更为显著。

为进一步对响应面模型精度进行评估, 采用决定系数$R^2$和平均绝对相对误差(average absolute relative error, AARE)进行分析, 其计算公式分别如

式(17)和式(18)所示[35-36]：

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \tag{17}$$

$$\mathrm{AARE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i-\hat{y}_i}{y_i}\right|\times 100\% \tag{18}$$

式中：$n$ 为数据总数；$\hat{y}_i$为预测值；$y_i$ 为实验值；$\bar{y}$为实验平均值。

图 3 为响应面模型预测值和实验值对比结果。其中，图 3(a)为 $Q$ 预测值与实验值对比，计算得到，$R^2$ 为 0.994，AARE 为 0.494%，表明该响应面模型具有较高预测精度。图 3(b)～(d)分别为 ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$预测值与实验值对比，根据式(17)和式(18)，计算得到 ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$响应面模型的 $R^2$ 分别为 0.996、0.997 和 0.993，AARE 分别为 0.564%、0.919% 和 13.484%，说明 ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$响应面模型均具有较高预测精度。

2.2.2　响应曲面及变形工艺参数的交互作用

图 4 为 GH738 高温合金不同变形工艺参数下的 $Q$ 响应曲面和等值线图，可以看出，变形工艺参数对 $Q$ 的交互影响作用不同。从图 4(a-1)和(b-1)可以看出，$\varepsilon$ 为 0.92 时，$Q$ 随 $T$ 升高和$\dot{\varepsilon}$增加而减小。从图 4(a-2)和(b-2)可以看出，$\dot{\varepsilon}$为 0.1 $s^{-1}$ 且 $\varepsilon$ 较小(0.3)时，随 $T$ 升高，$Q$ 先减小，当 $T$ 超过 1040 ℃，随 $T$ 进一步升高，$Q$ 又增大，但增加幅度相对较小；$\varepsilon$ 较大(0.92)时，随 $T$ 升高，$Q$ 减小。$T$ 较低(980 ℃)时，$Q$ 随 $\varepsilon$ 增加而增大；$T$ 较高(1100 ℃)时，$Q$ 随 $\varepsilon$ 增加反而减小。从图 4(a-3)和(b-3)可以看出，$T$ 为 1040 ℃ 时，$Q$ 随 $\varepsilon$ 增加和$\dot{\varepsilon}$降低总体呈增大趋势。综上可知，$T$、$\varepsilon$ 和$\dot{\varepsilon}$对 $Q$ 均有较为明显的影响。

同理，根据 GH738 高温合金不同变形工艺参数下的 ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$响应曲面和等值线图，分析不同变形工艺参数对 ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$的交互影响规律，发现 $T$、$\varepsilon$ 和$\dot{\varepsilon}$分别对 ln$Z$、$\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$同样有较为明显的影响。

2.2.3　变形工艺参数的多目标优化及结果验证

$Q$ 是热变形过程中需克服的能量阈值，其值越小，热变形越容易进行[37]。$Z$ 参数可表征材料软化机制类型，其值越低越有利于软化机制发生[38]。$\eta$ 反映微观组织的动态变化，其值较高一般具有较好的加工性能[27]。$\xi(\dot{\varepsilon})$作为判断塑性失稳的重要依据，其值较高可避免失稳现象发生[30]。综上所述，为了优化 GH738 高温合金的变形工艺参数，本工作选择低 $Q$ 和 $Z$ 参数，高 $\eta$ 和$\xi(\dot{\varepsilon})$进行多目标优化。图 5 反映采用响应面方法得到的 GH738 高温合金 $\varepsilon$ 为 0.92 时多目标优化结果，图中的斜线阴影区域对应适宜的热变形工艺参数范围，其变形工艺

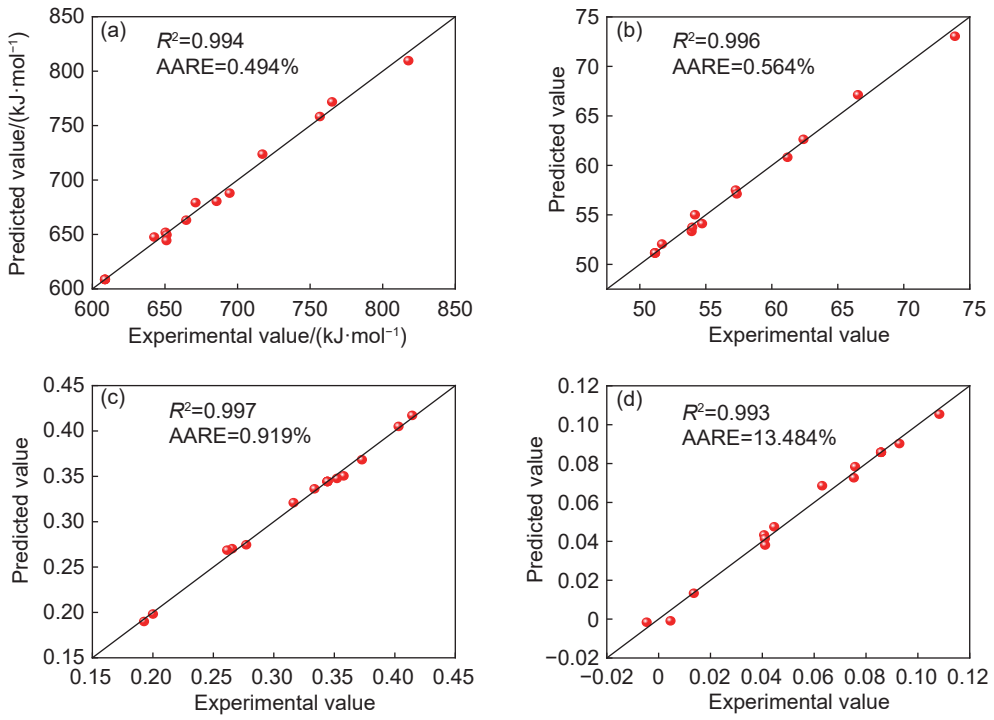


图 3　GH738 高温合金 $Q$(a)、ln$Z$(b)、$\eta$(c)和$\xi(\dot{\varepsilon})$(d)响应面模型预测值和实验值对比

Fig. 3　Comparison of response surface model predicted and experimental values of $Q$(a), ln$Z$(b), $\eta$(c) and $\xi(\dot{\varepsilon})$(d) in GH738 superalloy

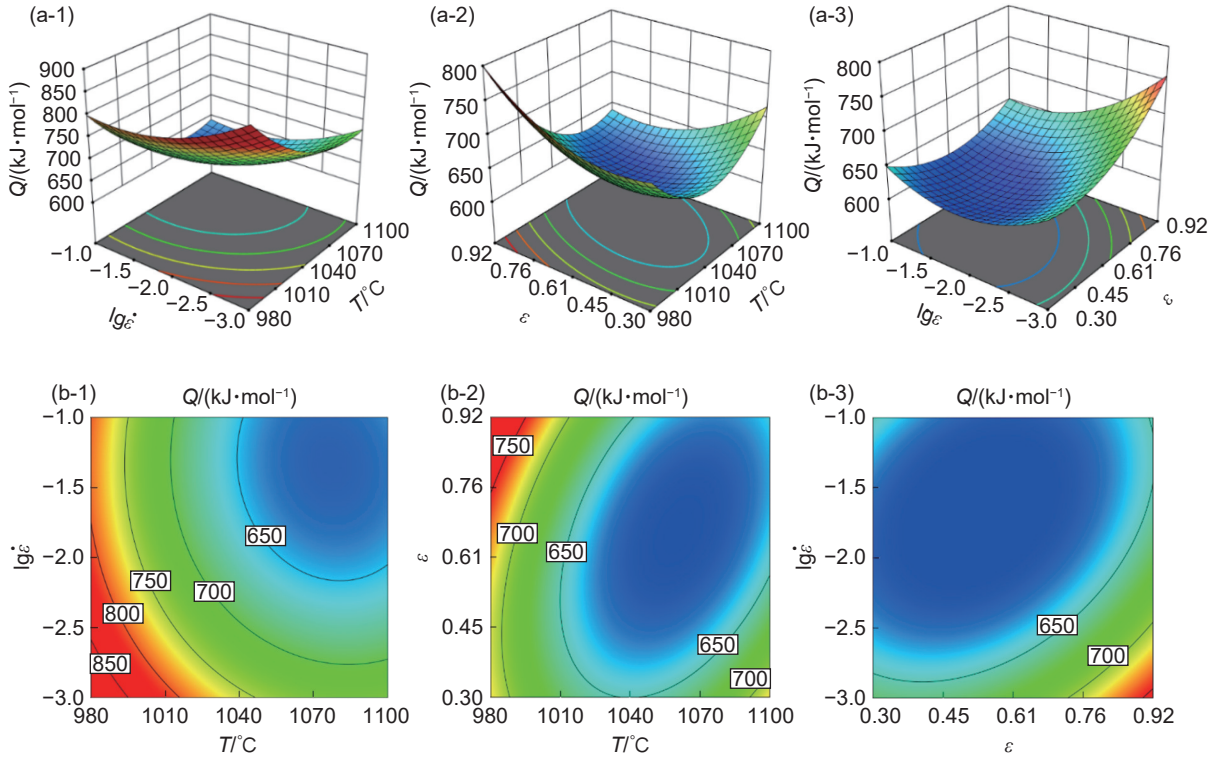


图 4 不同变形工艺参数下 $Q$ 响应曲面和等值线图 (a)响应曲面;(b)等值线图;(1) $\varepsilon$=0.92;(2)$\dot{\varepsilon}$=0.1 $s^{-1}$;(3)$T$=1040 ℃

Fig. 4 Response surfaces and contour plots of $Q$ at different process parameters (a)response surfaces; (b)contour plots; (1) $\varepsilon$=0.92; (2)$\dot{\varepsilon}$=0.1 $s^{-1}$; (3)$T$=1040 ℃

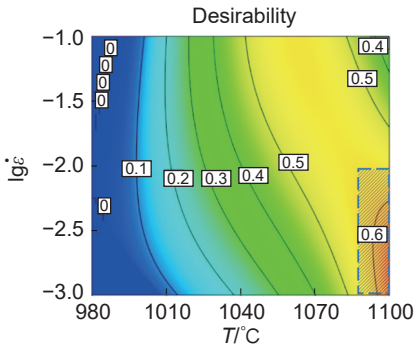


图 5 GH738 高温合金真应变为 0.92 时多目标优化结果

Fig. 5 Multi-objective optimization results of GH738 superalloy with true strain of 0.92

参数窗口条件:$T$ 为 1088～1100 ℃、$\dot{\varepsilon}$为 0.001～0.01 $s^{-1}$,其中最佳变形工艺参数窗口条件在 $T$ 为 1092～1100 ℃、$\dot{\varepsilon}$为 0.001～0.0056 $s^{-1}$ 范围内。

图 6 为 GH738 高温合金在应变速率为 0.001 $s^{-1}$、真应变为 0.92 且不同变形温度条件下的微观组织,其中变形温度为 1100 ℃,位于图 5 中最佳变形工艺参数窗口。从图 6(a)可以看出,变形温度为 980 ℃时,原奥氏体晶粒存在较明显压扁现象,晶界附近出现少量动态再结晶晶粒;变形温度升高到 1040 ℃时,发生较充分的动态再结晶,且动态再结晶晶粒尺寸随变形温度升高而增大,但晶粒大小明显不均匀(图 6(b))。变形温度为 1100 ℃时(图 6(c)),变形微观组织主要由动态再结晶晶粒组成,其塑性变形机制为动态再结晶。这说明,响应面多目标优化结果是可靠的。

图 7 为 GH738 高温合金在变形温度为 980 ℃、真应变为 0.92 且不同应变速率条件下的微观组织,该变形工艺参数条件落位于响应面多目标优化的期望值最小区域(图 5 左边)。从图 7(a)可以看出,应变速率为 0.01 $s^{-1}$ 时,原奥氏体晶粒存在压扁现象,晶界附近仅出现了少量动态再结晶晶粒;对比同样位于图 5 期望值较小区域内应变速率为 0.001 $s^{-1}$ 的微观组织(图 6(a))可知,此时动态再结晶体积分数更小,晶粒尺寸明显不均匀,易导致混晶现象发生。当应变速率较高时(图 7(b)),出现轻微的局部流动现象。局部流动会导致变形不均匀,降低塑性变形能力,引起组织和性能不均匀,不利于塑性加工[39-40]。

根据上述优化结果,进行实际生产验证,采用现有和优化工艺参数的微观组织对比,结果如图 8 所示。现有工艺参数为变形温度 1080 ℃且应变速率略高于 0.001 $s^{-1}$,此工艺参数位于响应面多目标优化的期望值中等区域(图 5),其微观组织如图 8(a)所示。可以看出,原奥氏体晶粒存在

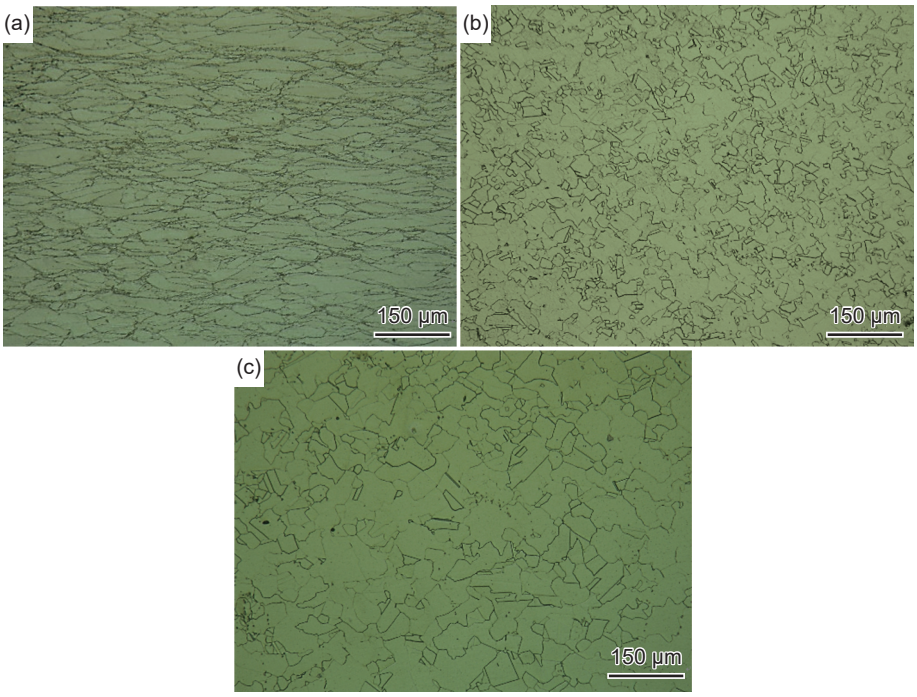


图 6　GH738 高温合金在应变速率为 0.001 $s^{-1}$、真应变为 0.92 且不同变形温度条件下微观组织
(a)980 ℃; (b)1040 ℃; (c)1100 ℃

Fig. 6　Microstructure of GH738 superalloy with strain rate of 0.001 $s^{-1}$, true strain of 0.92 and different deformation temperatures
(a)980 ℃; (b)1040 ℃; (c)1100 ℃

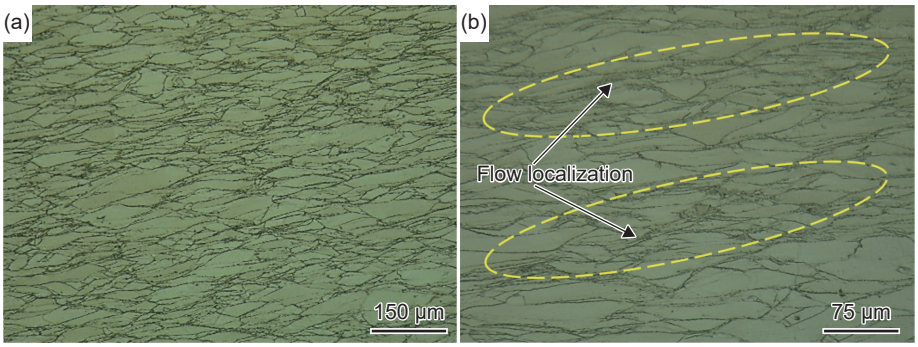


图 7　GH738 高温合金在变形温度为 980 ℃、真应变为 0.92 且不同应变速率条件下微观组织　(a)0.01 $s^{-1}$; (b)0.1 $s^{-1}$

Fig. 7　Microstructure of GH738 superalloy with deformation temperature of 980 ℃, true strain of 0.92 and different strain rates
(a)0.01 $s^{-1}$; (b)0.1 $s^{-1}$

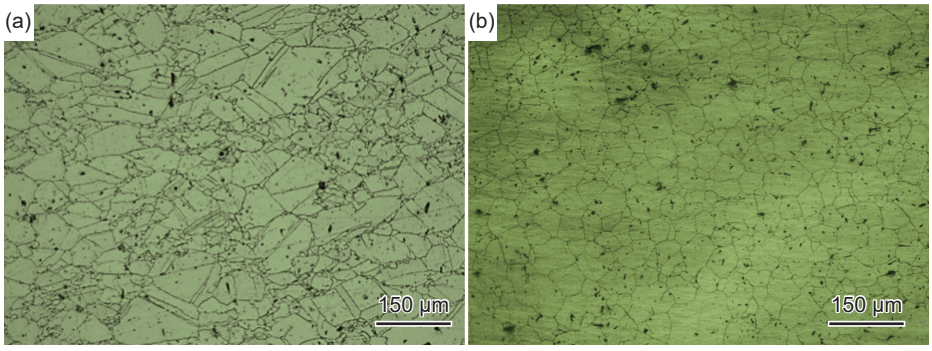


图 8　GH738 高温合金在采用现有(a)和优化(b)工艺参数的微观组织

Fig. 8　Microstructure of GH738 superalloy using existing(a) and optimized(b) processing parameters

压扁现象, 晶界附近出现少量细小动态再结晶晶粒, 未再结晶晶粒平均尺寸约为 108 μm, 再结晶晶粒平均尺寸约为 22 μm, 说明发生明显的混晶现象。优化后工艺参数的微观组织如图 8(b)所示,

可以看出，其微观组织为完全再结晶组织，平均晶粒尺寸约为 35 μm，未发生混晶现象。这一结果表明，响应面多目标优化的工艺参数范围准确可靠。

## 3 结论

（1）在研究的变形工艺参数范围内，GH738 高温合金的热变形激活能 $Q$、温度补偿应变因子 ln$Z$、功率耗散效率 $\eta$ 和失稳因子 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 均随变形温度和应变速率的变化在较大范围内波动，即塑性变形能力对工艺参数变化敏感。

（2）建立的 GH738 高温合金热变形激活能 $Q$、温度补偿应变因子 ln$Z$、功率耗散效率 $\eta$ 和失稳因子 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 的响应面模型 $p<0.0001$，决定系数 $R^2$ 分别为 0.994、0.996、0.997 和 0.993，平均绝对相对误差 AARE 分别为 0.494%、0.564%、0.919% 和 13.484%，说明建立的响应面模型回归关系显著，对 $Q$、ln$Z$、$\eta$ 和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 的预测精度较高。

（3）对 GH738 高温合金热变形激活能 $Q$、温度补偿应变因子 ln$Z$、功率耗散效率 $\eta$ 和失稳因子 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 响应面模型的方差分析可知，变形温度 $T$、真应变 $\varepsilon$、应变速率对数 lg$\dot{\varepsilon}$ 及交叉项对 $Q$、ln$Z$、$\eta$ 和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 影响大小的次序有所不同。总体而言，单因素及交叉项对 ln$Z$、$\eta$ 和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 均有较重要的影响，其中单因素 $T$、$\varepsilon$ 和 lg$\dot{\varepsilon}$ 的影响更为显著。

（4）基于低热变形激活能 $Q$ 和温度补偿应变因子 ln$Z$、高功率耗散效率 $\eta$ 和失稳因子 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 多目标优化，获得 GH738 高温合金适宜的热变形工艺参数，其范围为变形温度 1088～1100 ℃，应变速率 0.001～0.01 $s^{-1}$，其中最佳变形工艺参数在变形温度 1092～1100 ℃、应变速率 0.001～0.0056 $s^{-1}$ 范围，对应的塑性变形机制为动态再结晶，实际生产验证多目标优化结果的准确性。

**参考文献：**


[1] KANG C J, LUO H Y, MA W B, et al. Effect of surface treatment and synergistic effect of O and S elements on hot corrosion behavior of GH738 superalloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 462-476.

[2] 刘辉, 蔡新宇. 热加工参数对 GH738 合金动态再结晶行为的影响[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(3): 46-50.
LIU H, CAI X Y. Effects of hot working parameters on dynamic recrystallization behaviors of GH738 alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(3): 46-50.

[3] 秦仁耀, 曲致奇, 陈冰清, 等. 航空发动机单晶高温合金涡轮转子叶片增材修复技术研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(12): 1-14.
QIN R Y, QU Z Q, CHEN B Q, et al. Research progress in additive manufacturing for repair technology of single crystal superalloy turbine rotor blades for aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(12): 1-14.

[4] SU R, LI J X, WU D Y, et al. Microstructural evolution and hot-compressive behavior of Waspaloy forged bolts: experimental and finite element simulation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3194-3210.

[5] 邰清安, 李晓光, 国振兴, 等. 锻造工艺及热处理参数对 GH738 合金环形锻件组织均匀性的影响[J]. 精密成形工程, 2013, 5(6): 7-10.
TAI Q A, LI X G, GUO Z X, et al. Effects of forging technology and parameters of heating treatment on the microstructure uniformity of GH738 ring part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(6): 7-10.

[6] AMIRI A, BRUSCHI S, SADEGHI M H, et al. Investigation on hot deformation behavior of Waspaloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 562: 77-82.

[7] GUIMARAES A A, JONAS J J. Recrystallization and aging effects associated with the high temperature deformation of Waspaloy and Inconel 718[J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12: 1655-1666.

[8] SHEN G, SEMIATIN S L, SHIVPURI R. Modeling microstructural development during the forging of Waspaloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995, 26: 1795-1803.

[9] CHAMANFAR A, JAHAZI M, GHOLIPOUR J, et al. Evolution of flow stress and microstructure during isothermal compression of Waspaloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 615: 497-510.

[10] VEZA I, SPRAGGON M, FATTAH I M R, et al. Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: review of RSM for sustainability energy transition[J]. Results in Engineering, 2023, 18: 101213.

[11] KHDAIR A I, MELAIBARI A A. Experimental evaluation of cut quality and temperature field in fiber laser cutting of AZ31B magnesium alloy using response surface methodology[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 77: 103290.

[12] GUO L G, DANG L, YANG H, et al. Identification of processing window for extrusion of large thick-walled Inconel 625 alloy pipes using response surface methodology[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1902-1911.

[13] KAYA G, YILDIZ F, KORKMAZ İ H, et al. Effects of process parameters on selective laser melting of Ti6Al4V-

ELI alloy and parameter optimization *via* response surface method[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 885: 145581.

[14] SHEN Z N, WU R D, YUAN C L, et al. Comparative study of metamodeling methods for modeling the constitutive relationships of the TC6 titanium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 188-204.

[15] MCQUEEN H J, IMBERT C A C. Dynamic recrystallization: plasticity enhancing structural development[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 378(1/2): 35-43.

[16] LING M, LIANG Y L. Quasi-*in-situ* observation and analysis of grain boundary evolution of GH4169 nickel-based superalloy during the micro-strain stage of thermal deformation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 7516-7533.

[17] DOHERTY R D, HUGHES D A, HUMPHREYS F J, et al. Current issues in recrystallization: a review[J]. Materials Today, 1998, 1(2): 14-15.

[18] 王法, 江河, 董建新. 基于热加工图的均匀化态 GH4151 合金热变形行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 245-252.
WANG F, JIANG H, DONG J X. Research on hot deformation behavior of homogenized GH4151 alloy based on hot processing map[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(1): 245-252.

[19] YANG J L, CUI J Y, CHENG J Y, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of a novel nickel-based powder metallurgy superalloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 7347-7363.

[20] WANG L, YANG G, LEI T, et al. Hot deformation behavior of GH738 for A-USC turbine blades[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(11): 1043-1048.

[21] NAYAN N, SINGH G, MURTY S V S N, et al. Hot deformation behaviour and microstructure control in AlCrCuNiFeCo high entropy alloy[J]. Intermetallics, 2014, 55: 145-153.

[22] LU C Y, WANG J, ZHANG P Z. Flow behavior analysis and flow stress modeling of Ti17 alloy in β forging process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(10): 7668-7681.

[23] ZHAO Q Y, CHEN Y N, XU Y K, et al. Hot deformation behavior and mechanism of as-cast Ti-5553 alloy with coarse grains[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(11): 3653-3661.

[24] TANG J G, YI Y P, HE H L, et al. Hot deformation behavior and microstructural evolution of the Al-Cu-Li alloy: a study with processing map[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 934: 167755.

[25] PRASAD Y, GEGEL H L, DORAIVELU S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242[J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(10): 1883-1892.

[26] NARAYANA M S V S, NAGESWARA R B, KASHYAP B P. Instability criteria for hot deformation of materials[J]. International Materials Reviews, 2000, 45(1): 15-26.

[27] 柳木桐, 钟平, 刘大博, 等. 超高强度不锈钢热变形行为及加工图[J]. 航空材料学报, 2022, 42(4): 49-56.
LIU M T, ZHONG P, LIU D B, et al. Hot deformation behavior and processing map of ultra-high strength stainless steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(4): 49-56.

[28] MURTY S V S N, RAO B N, KASHYAP B P. Identification of flow instabilities in the processing maps of AISI 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(2): 268-278.

[29] LI X, LU S Q, WANG K L, et al. Analysis and comparison of the instability regimes in the processing maps generated using different instability criteria for Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 576: 259-266.

[30] MURTY S V S N, RAO B N. On the development of instability criteria during hotworking with reference to IN 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 254(1/2): 76-82.

[31] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions[M]. New York: Springer New York, 1992.

[32] DONG Z, FENG L T, LONG H Y, et al. A multi-objective optimization of laser cladding processing parameters of $AlCoCrFeNi_{2.1}$ eutectic high-entropy alloy coating[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110302.

[33] WANG J M, LAN S, LI W K. Numerical simulation and process optimization of an aluminum holding furnace based on response surface methodology and uniform design[J]. Energy, 2014, 72: 521-535.

[34] ZHANG Y, BAI P K, LI Z H, et al. Multi-objective optimization of laser cladding process parameters for Q345B steel[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108679.

[35] LU C Y, SHI J. Simultaneous consideration of relative density, energy consumption, and build time for selective laser melting of Inconel 718: a multi-objective optimization study on process parameter selection[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 369: 133284.

[36] LU C Y, SHI J, WANG J. Physically based constitutive

modeling for Ti17 alloy with original basketweave microstructure in β forging: a comparison of three approaches[J]. Materials Characterization, 2021, 181: 111455.

[37] SHI C J, MAO W M, CHEN X G. Evolution of activation energy during hot deformation of AA7150 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 571: 83-91.

[38] OPĚLA P, SCHINDLER I, KAWULOK P, et al. Correlation among the power dissipation efficiency, flow stress course, and activation energy evolution in Cr-Mo low-alloyed steel[J]. Materials, 2020, 13(16): 3480.

[39] ROWE R A, HOLTHAM N, ALLISON P, et al. A comparison of high strain rate response and adiabatic shear band formation in additively and traditionally manufactured Inconel 718[J]. Materials Characterization, 2024, 207: 113506.

[40] 陈伟, 章环, 牟娟, 等. 显微组织和应变速率对 TC4 合金动态力学性能和绝热剪切带的影响[J]. 金属学报, 2022, 58(10): 1271-1280.
CHEN W, ZHANG H, MU J, et al. Effects of microstructure and strain rate on dynamic mechanical properties and adiabatic shear band of TC4 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(10): 1271-1280.

收稿日期: 2024-12-10; 录用日期: 2025-05-21
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3700405)
通讯作者: 王攀智(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高温合金和钛合金热变形行为研究, 联系地址: 贵州省贵阳市观山湖区上坝山路 5 号贵州航宇科技发展股份有限公司技术中心(550081), E-mail: wangpanzhi@gzhykj.net

(本文责编: 陈 卉)