

基于响应面法的 Ti₂AlNb 基合金变形工艺参数优化研究

刘杰, 王克鲁, 鲁世强, 李鑫, 黄文杰, 曾权, 周潼, 汪增强

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 Ti₂AlNb 基合金进行了变形温度为 650~850 °C、应变速率 0.001~1 s⁻¹ 的压缩实验, 研究其热变形行为, 基于响应面法分析, 获得 Ti₂AlNb 基合金最优变形工艺参数范围。首先分析 Ti₂AlNb 基合金的流变应力曲线, 并计算热变形激活能 Q 、 $\ln Z$ 和功率耗散因子 η , 从而建立不同变形工艺参数下热变形激活能 Q 、 $\ln Z$ 和功率耗散因子 η 的二阶响应面模型, 再通过多目标可视化优化得出 Ti₂AlNb 基合金优化后的最佳变形工艺参数区域, 并结合微观组织验证。结果表明, Ti₂AlNb 基合金随变形温度升高和应变速率减小流变应力随之减少; 建立的响应面模型具有较高精度, 可以用于工艺参数的优化与分析; 多目标可视化优化结果得出 Ti₂AlNb 基合金优化后的最佳变形工艺参数区域是变形温度 750~850 °C、应变速率 0.005~0.03 s⁻¹。

关键词: Ti₂AlNb 基合金; 响应面法; 变形工艺参数优化; 流变应力

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)10-3581-09

钛及钛合金是理想的航空航天材料, 但钛合金高温性能差, 这个缺点限制了钛合金用作航空发动机, 而钛铝合金具有较高强度、优异的高温抗氧化性和抗蠕变性能, 是提高航空发动机服役温度的关键所在^[1-2]。Ti₂AlNb 基合金是新一代航空发动机关键部位的材料之一, 具有密度低、比强度高、抗蠕变和抗氧化等优异性能, 拥有良好前景, 使其成为航空发动机很有前途的轻质高温结构材料, 可以用于制造压气机盘、整体叶盘和航空发动机等^[3-5]。国内外的学者对 Ti₂AlNb 基合金进行了较多研究^[6-9]。Zhang 等^[6]研究了 Ti₂AlNb 基合金在高温下的变形行为和机理, 并发现当温度在 750~950 °C、应变速率为 0.001 s⁻¹ 时, Ti₂AlNb 基合金总伸长率提高, 并且该材料塑性成形能力得到显著提高, 许多韧窝的尺寸和深度也随之增加。王国栋等^[7]研究发现, 经过单时效或固溶加时效处理后的 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材均为脆性断裂, 且固溶加时效处理可以提高合金的延伸率, 但强度略低于单时效处理的。薛克敏等^[8]研究了 Ti₂AlNb 基合金锻造工艺, 结果表明多向锻造变形后可细化等轴组织。王力等^[9]研究了 Ti₂AlNb 基合金在不同温度下的高温氧化行为, 并发现温度越高时, 氧化行为越明显, 产生杂质越多。

然而 Ti₂AlNb 基合金加工性能差, 成本高, 材料零件生产效率低, 影响其生产应用。而通过响应面模型用一个简单的函数关系来代替真实的复杂模拟, 可分析、计算、优化设计出 Ti₂AlNb 基合金最优加工参数, 可以大大减少成本以及提高生产效率^[10-11]。近几年, 已经有学者开始将响应面法用在材料科学中, 并且得到初步应用。李奇涵等^[12]基于响应面法对 22MnB5 高强钢试样开裂时的成形极限及其效果进行优化, 获得了成形时的最佳参数组合, 成功使热冲压后面积增大。赵继全等^[13]通过响应面法对 55NiCrMoV7 模具钢的热处理工艺方案进行优化, 得出了最优热处理温度范围, 其综合质量得到提高并且力学性能也得到改善。李萍等^[14]基于响应面法量化 TA15 合金工艺参数和显微组织特征参数, 获得了最佳工艺参数范围。肖瑞等^[15]使用响应面法对高强铝合金固溶工艺进行优化, 获得了优化的固溶工艺参数, 使得该种高强铝合金综合力学性能得到大幅提升。

目前, 关于基于响应面法研究优化 Ti₂AlNb 基合金工艺参数的文章还未见报道。因此, 促进使用响应面法优化 Ti₂AlNb 基合金加工工艺的研究, 研究其最优组织参数, 了解温度、应变速率和应变对流动应力的影响, 建立响应面模型, 这对于 Ti₂AlNb 基合金制

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 江西省自然科学基金 (20202ACBL204001)

作者简介: 刘杰, 男, 1997年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: 971230897@qq.com

备技术和应用研究有重要意义。本实验从热压缩实验得到 Ti₂AlNb 基合金流变应力曲线，并分析其曲线特征；使用响应面法，根据应变速率、变形温度及应变建立了以 Z 参数、热变形激活能 Q、功率耗散系数 η 为目标的响应面模型；随后分析了不同变形温度、应变速率、应变对材料相关参数的影响，并根据以上信息采用了多目标可视化方法获得 Ti₂AlNb 基合金的最优性能组织范围；最终用显微组织照片进行验证。研究结果可为合理制定和优化 Ti₂AlNb 基合金的实际锻造工艺参数提供理论依据。

1 实验

实验材料为 Ti₂AlNb 基合金，其化学成分如表 1 所示。合金试样是由 Φ8 mm×12 mm 的圆柱体在 Gleeble-3500 热模拟试验机上压缩而成，变形温度分别为 650, 700, 750, 800 和 850 °C；应变速率分别为 0.001, 0.01, 0.1, 1 s⁻¹；最大压下量为 40%，对应真应变约为 0.5，压缩完成后立即水冷至室温。把热压缩件沿压缩轴线对半切开，之后对切开的表面依次进行镶嵌、研磨和抛光，再采用体积比为 2:5:100 的 HF+H₂O₂+H₂O 混合腐蚀液进行腐蚀，腐蚀时间约为 30 s，最后在 XJP-9A 光学显微镜上观察显微组织，并对显微组织分析。

2 结果与分析

2.1 流变应力曲线

图 1 为 Ti₂AlNb 基合金在 0.1 s⁻¹ 和 850 °C 条件下的流变应力曲线。由图 1a 可以观察到，变形温度会影响流变应力，且在相同应变速率时，不同变形温度下应力-应变曲线有着类似特征，即应变开始时流变应力快速上升达到最大值，随后趋于稳定再缓慢下降，呈现动态再结晶特征。这是因为材料变形伴随位错增殖致使位错密度增加，相互交割加剧，阻碍位错运动，从而出现加工硬化，导致应力上升^[16]；随后又因为变形温度较高具有较大激活能，位错运动阻力减少，使得材料发生动态再结晶，软化效应开始起作用，导致材料流变应力随之减少；这种硬化和软化的相互作用导致之后的应力持续下降^[17]；随压缩持续进行，变形量越来越大，位错产生滑移和攀移，软化作用持续增大，慢慢的硬化和软化呈现平衡的状态，曲线出现稳态流变特征^[18-19]；750 °C 下应力-应变曲线上剧烈浮

动就是因为加工硬化和动态再结晶相互作用导致。并且随变形温度升高流变应力减少，这说明 Ti₂AlNb 是负温度敏感型材料。图 1b 显示应变速率会影响流变应力，且在相同温度时，不同应变速率下应力-应变曲线有着类似特征，即应变开始时流变应力快速上升达到最大值，随后缓慢下降趋于平缓，主要呈现动态软化现象。这是因为变形速率上升，材料变形时间减少，位错增殖速度加快，软化来不及进行，位错运动更加困难，从而导致应力上升。并且随应变速率增加流变应力也越大，说明 Ti₂AlNb 是正应变速率敏感型材料。

2.2 功率耗散因子 η

动态材料模型 (dynamic materials modeling, DMM) 最早由 Prasad 和 Gegel 提出^[20]。Prasad 认为金属热压缩过程是不断吸收和释放能量的过程，同时金属吸收的功率 P 可分为塑性变形导致的粘塑性热 G 和变形过程中的功率耗散 J，如式 (1) 所示^[21]：

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (1)$$

当变形温度和应变一定时，流变应力 σ 可表示为式 (2)：

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

式中，K 为应力系数；m 为应变速率敏感指数，如式 (3) 所示：

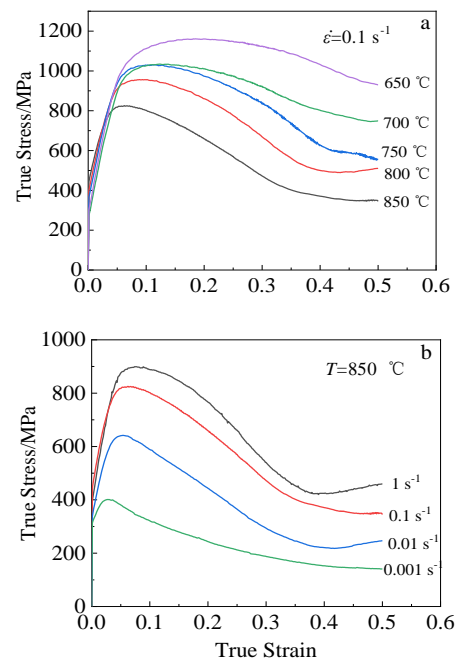


图 1 Ti₂AlNb 基合金在不同变形温度和不同应变速率下的流变应力曲线

Fig.1 Flow stress curves for Ti₂AlNb-based alloy at different temperatures (a) and strain rates (b)

表 1 Ti₂AlNb 基合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti₂AlNb alloy (wt%)

Al	Nb	Mo	Fe	Si	Cu	Ni	Ti
10.6	41.2	0.88	0.047	0.07	<0.01	<0.01	Bal.

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\epsilon}d\sigma}{\sigma d\dot{\epsilon}} = \frac{d \lg \sigma}{d \lg \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

将式 (1) ~ (3) 联立可导出式 (4):

$$J = \int_0^\sigma \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m\sigma\dot{\epsilon}}{m+1} \quad (4)$$

再联立 (1) 和 (2) 可导出式 (5):

$$G = \int_0^\epsilon \sigma d\dot{\epsilon} = \frac{\sigma\dot{\epsilon}}{1+m} \quad (5)$$

功率耗散因子可表示为式 (6):

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (6)$$

式中: J_{\max} 为微观机制转变所需最大能量。

采用功率耗散因子 η 来描述 J 对工件功率耗散能力的影响, 是热加工过程中的一个重要指标, 反映了在一定条件下的变形机理^[22]。 η 值较低的区域通常热加工性能越差, η 也可作为材料加工性能好坏的依据。将 Ti₂AlNb 基合金热压缩实验得出的数据代入式 (6), 计算出功率耗散因子 η 值。不同应变条件下应变达 0.5 时的功率耗散因子 η 如表 2 所示。

2.3 热变形激活能与 Z 参数

热变形激活能 Q 是表征材料高温塑性变形能力的重要指标, 还描述了位错运动的能量障碍^[19]。 Z 参数可以表征热变形过程中软化机制的类型, 反映了变形温度以及应变速率对热变形行为的综合影响。通过 Arrhenius 方程计算 Q 值和 $\ln Z$ 值, 如式(7)所示^[23]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = \begin{cases} A_1 \sigma^m (\alpha\sigma < 0.8) \\ A_2 \exp(\beta\sigma) (\alpha\sigma > 1.2) \\ A [\sinh(\alpha\sigma)]^n (\text{For all}) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; A 、 A_1 、 A_2 、 n_1 、 n 、 α 和 β 都是材料常数, 并且 $\alpha = \beta/n_1$; σ 为流变应力, MPa; Q 为热变形激活能, kJ/mol; T 为热力学温度, K; R 为气体常数, 值为 8.314 J/(mol K)。

依次对式 (7) 进行两边取对数处理, 得到式 (8):

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \begin{cases} \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \\ \ln A_2 + \beta\sigma \\ \ln A + n \ln \sinh(\alpha\sigma) \end{cases} \quad (8)$$

表 2 不同变形条件下应变为 0.5 时的功率耗散因子 η

Table 2 Power dissipation factor η under strain of 0.5 and different deformation conditions

Temperature/°C	Strain rate/s ⁻¹			
	0.001	0.01	0.1	1
650	0.062	0.128	0.105	-0.099
700	0.557	0.391	0.160	-0.041
750	0.168	0.196	0.168	0.037
800	0.503	0.432	0.276	0.014
850	0.482	0.366	0.251	0.223

将上述表达式整理可得:

$$\beta = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \quad (9)$$

$$n_1 = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \quad (10)$$

$$n = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sinh(\alpha\sigma)} \right]_T \quad (11)$$

$$k = \left[\frac{\partial \ln \sinh(\alpha\sigma)}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (12)$$

$$Q = R \cdot n \cdot \left[\frac{\partial \ln \sinh(\alpha\sigma)}{\partial (1/T)} \right] = Rnk \quad (13)$$

综上所述, 可求出 β 、 n_1 、 n 、 k 的值, 分别为 $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 、 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 、 $\ln \sinh(\alpha\sigma) - \ln \dot{\epsilon}$ 、 $\ln \sinh(\alpha\sigma) - 1000/T$ 拟合直线的斜率。将得到的 n 、 k 代入式 (13) 和式 (8) 求出应变为 0.5 时的 Q 值和 $\ln Z$ 值, 如表 3 和表 4 所示。

3 建立响应面模型和可视化优化

3.1 响应面模型的建立与评估

响应面模型是一种数理和统计学的综合结果, 它可以模拟并分析所关注的反应受到多个因素的影响情况, 其最终目标是使反应值达到最佳^[24]。在响应面法中, 可以使复杂问题变得容易, 计算精度更高, 并不涉及最优解, 并且响应面法可更简单地将随机模拟与确定性模拟问题相结合, 具有很好的应用前景。选择

表 3 不同应变条件下应变为 0.5 时的热变形激活能 Q

Table 3 Hot deformation activation energy Q under strain of 0.5 and different deformation conditions (kJ/mol)

Temperature/°C	Strain rate/s ⁻¹			
	0.001	0.01	0.1	1
650	850.393	706.126	647.486	445.494
700	560.532	465.439	426.787	293.645
750	724.792	601.833	551.854	379.696
800	421.720	350.176	321.096	220.926
850	413.149	343.059	314.570	216.435

表 4 不同应变条件下应变为 0.5 时的 $\ln Z$ 值

Table 4 $\ln Z$ value under strain of 0.5 and different deformation conditions

Temperature/°C	Strain rate/s ⁻¹			
	0.001	0.01	0.1	1
650	103.910	87.412	82.073	58.054
700	62.383	52.931	50.455	36.299
750	78.310	66.155	62.582	44.643
800	40.365	34.648	33.691	24.765
850	37.343	32.138	31.389	23.181

变形温度、应变速率和应变为变量，将热变形激活能 Q 、 $\ln Z$ 和功率耗散因子 η 作为目标。使用 Box-Behnken 设计来建立响应面模型并进行分析，以此得到 η 的响应面模型，如式 (14)：

$$\eta = -3.289 + 0.006T - 0.627 \dot{\epsilon} + 1.082 \epsilon + 0.001T \dot{\epsilon} + 0.001T\epsilon + 0.206 \dot{\epsilon}\epsilon - 3.441 \times 10^6 T^2 - 0.081 \dot{\epsilon}^2 - 2.241 \epsilon^2 \quad (14)$$

η 的响应面模型方差分析如表 5 所示。结合文献[25-26]对模型分析可知， P 值小于 0.05 为显著的，而功率耗散因子 η 的响应面模型 P 值为 0.0028，远远小于 0.05，表明响应值 η 与自变量 T 、 $\dot{\epsilon}$ 、 ϵ 关系是很显著的，能用于模型的优化与分析；同时自变量 (T 、 ϵ 、 $\dot{\epsilon}^2$ 、 ϵ^2) 的 P 值也均小于 0.05，说明这些自变量均为显著项。图 2 为功率耗散因子 η 预测值和实验值的比较，可以较为直观地表达模型精度。从图 2 中可以看到，预测值和实验值大致处于同一条直线上，说明建立的模型精度较高，可以根据此模型进行 Ti_2AlNb 基合金热变形中功率耗散因子 η 的预测，还可以反映不同变形条件对 η 值的影响规律。

3.2 响应曲面与等高线图分析

图 3 所示为不同变形条件下 Q 值的响应曲面和等高线图。由图 3a 和 3d 可以看出，当应变一定时，随应

表 5 功率耗散因子 η 的响应面模型方差分析

Table 5 Response surface model variance analysis of power dissipation factor η

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Model	0.1673	9	0.0186	17.76	0.0028
T	0.0740	1	0.0740	70.65	0.0004
$\dot{\epsilon}$	0.0038	1	0.0038	3.64	0.1147
ϵ	0.0250	1	0.0250	23.84	0.0045
$T\dot{\epsilon}$	0.0035	1	0.0035	3.32	0.1281
$T\epsilon$	0.0026	1	0.0026	2.48	0.1764
$\dot{\epsilon}\epsilon$	0.0068	1	0.0068	6.51	0.0512
T^2	0.0044	1	0.0044	4.18	0.0964
$\dot{\epsilon}^2$	0.0240	1	0.0240	22.90	0.0049
ϵ^2	0.0297	1	0.0297	28.33	0.0031
Residual	0.0052	5	0.0010		
Lack of fit	0.0052	3	0.0017		
Pure error	0.0000	2	0.0000		
Cor total	0.1725	14			

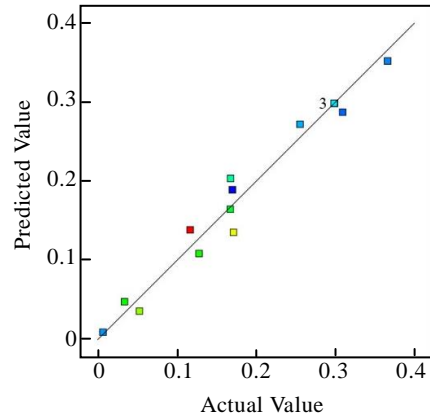


图 2 功率耗散因子 η 实验值与预测值

Fig.2 Experimental and predicted values of power dissipation factor η

变速率的增加， Q 值先下降随后上升；随变形温度升高， Q 值略有下降。这是因为随温度升高激活能升高，促进位错运动， Q 值从而下降。而应变速率较低时变形进行地足够充分，位错密度还较小，动态再结晶是主要的软化机制，位错密度随之降低，位错运动阻力也降低，造成 Q 下降；随后应变速率越来越快，位错密度快速增加，位错运动受到巨大阻碍， Q 从而上升^[27]。由图 3b 和 3e 可以看出，当应变速率一定时，随应变上升 Q 值变化不大；而随变形温度升高， Q 值缓慢下降。这和流变应力曲线特征基本一致，硬化和软化呈现平衡的状态，应变上升流变应力变化不大，变形温度升高流变应力降低。由图 3c 和 3f 可以看出，当变形温度一定时，随应变上升 Q 值渐渐降低且变化幅度很小，也是由于硬化和软化呈现平衡的状态，应变上升流变应力下降幅度不大；而随应变速率上升 Q 值快速下降后又逐步上升，这是因为刚开始应变速率小，剪切应力也较小，同时动态再结晶起一定作用，位错密度也随之降低，位错运动阻力也降低，造成 Q 降低，随后应变速率越来越快位错密度快速增加，位错运动受到巨大阻碍， Q 从而上升^[28]。综上可知，变形温度和应变速率对 Ti_2AlNb 基合金的 Q 影响较大，而应变影响不大。图 4 所示为不同变形条件下 $\ln Z$ 值的响应曲面和等高线图。由图 4a 和 4d 可以看出，当应变一定时，随应变速率增加， $\ln Z$ 值先快速下降后逐渐上升；而随变形温度升高， $\ln Z$ 值却急速下降。由图 4b 和 4e 可以看出，当应变速率一定时，随应变上升 $\ln Z$ 值小幅度上升；而随变形温度升高， $\ln Z$ 值却急速下降。由图 4c 和 4f 可以看出，当变形温度一定时，随应变上升 $\ln Z$ 值缓慢下降；而随应变速率上

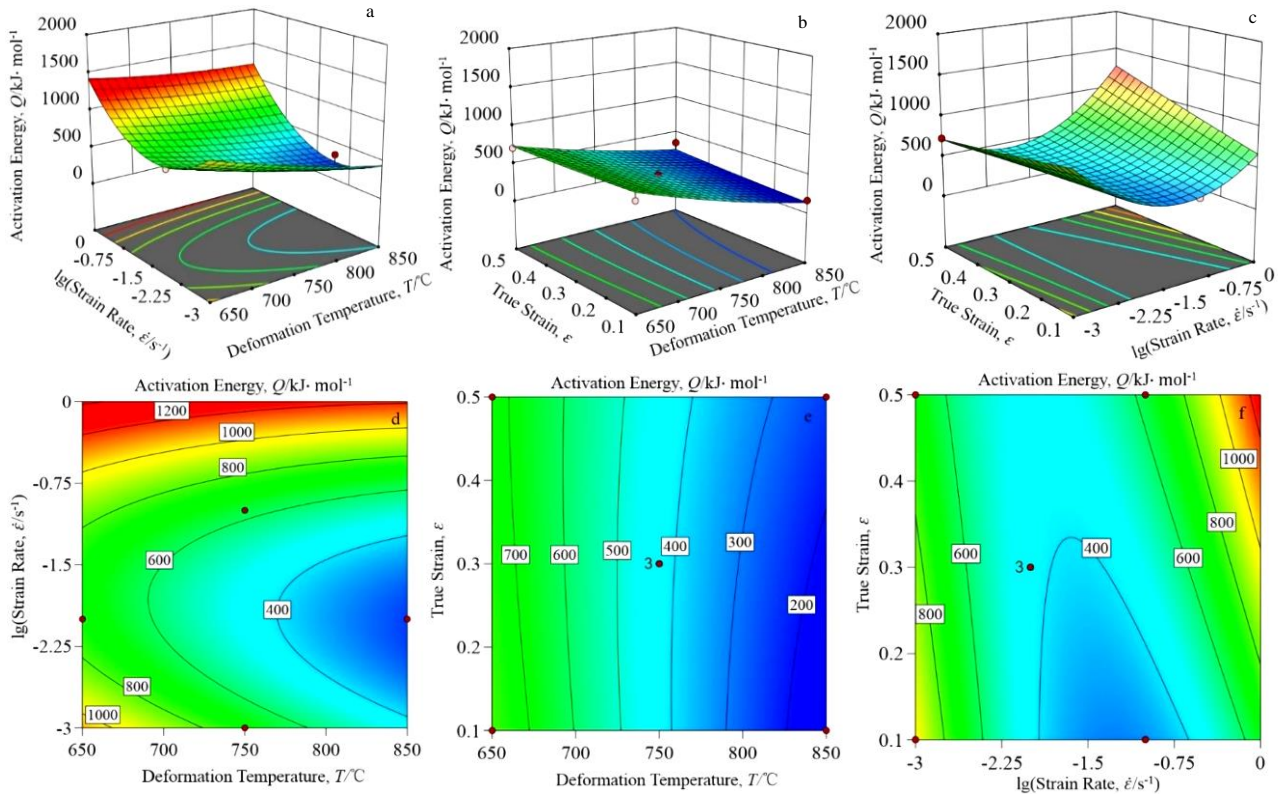


图 3 不同变形条件下 Q 值的响应曲面和等高线图

Fig.3 Response surfaces (a-c) and contour maps (d-f) of Q value under different deformation conditions: (a, d) T - $\lg \dot{\epsilon}$, (b, e) T - ϵ , and (c, f) $\lg \dot{\epsilon}$ - ϵ

升, $\ln Z$ 值快速下降后趋于平缓。不同变形条件下 $\ln Z$ 值变化规律与 Q 的基本一致, 同样, 变形温度和应变速率对 Ti₂AlNb 基合金的 $\ln Z$ 影响较大。

图 5 所示为不同变形条件下 η 值的响应曲面和等高线图。由图 5a 和 5d 可以看出, 当应变一定时, 随变形温度升高 η 快速升高; 而随应变速率上升, η 值先升后降。这可能是因为动态再结晶和动态回复的相互转换, 如从低应变速率开始, 软化机制以动态再结晶为主, 造成 η 值逐步升高; 而较高的应变速率促进位错增殖和攀移, 位错密度增加, 软化进行地不充分, 从而抑制了动态再结晶, 导致 η 值降低; 随温度升高动态再结晶形核需要的驱动能量越来越多, 以及变形热造成的温升效应导致 η 值上升, 但并不显著^[29]。由图 5b 和 5e 可以看出, 当应变速率一定时, 随应变上升, η 值先升后降。这可能是因为随应变加大, 由动态回复和动态再结晶引起的微观结构演变所消耗的能量上升而导致 η 值上升; 应变持续加大动态回复起主导作用, 材料的动态再结晶晶粒分数降低, 导致 η 值下降^[30]。由图 5c 和 5f 可以看出, 当变形温度一定时, 随应变上升 η 值先升后降, 但幅度不大; 同样, 随应变速率上升 η 也是先升后降。且 η 最大的区域位

于右上角区域 (800~850 °C、0.001~0.01 s⁻¹)。综上所述, 变形温度、应变速率和应变都对 η 值有着明显的作用。

3.3 多目标可视化优化

合金热变形过程的难易程度可用热变形激活能 Q 反映, 也就意味着 Q 值的大小会影响热变形过程, Q 值越大, 热变形过程就越困难^[31]。 Z 参数描述了应变速率和变形温度对 Ti₂AlNb 基合金热变形行为的作用大小, 而 Ti₂AlNb 基合金热变形过程中主要软化行为是动态再结晶, 意味着较低的 $\ln Z$ 值可以促进动态再结晶^[32]。并且, 较高的功率耗散系数 η 一般来说有着较好的热加工性能, 但是也需要通过微观组织和失稳准则来进一步判断。综上所述, Ti₂AlNb 基合金在 Q 值和 $\ln Z$ 值较低、 η 值较高的区域进行热变形过程较好。

对应变为 0.5 时的 Ti₂AlNb 基合金相关变形参数进行优化。首先将 Q 和 $\ln Z$ 值设置为最小值, 再将 η 设置为最大值, 最后的优化结果如图 6 所示。图 6 中等高线大于 0.8 的红色区域就是优化后的最佳区域, 其参数范围为变形温度 750~850 °C、应变速率 0.005~0.03 s⁻¹。

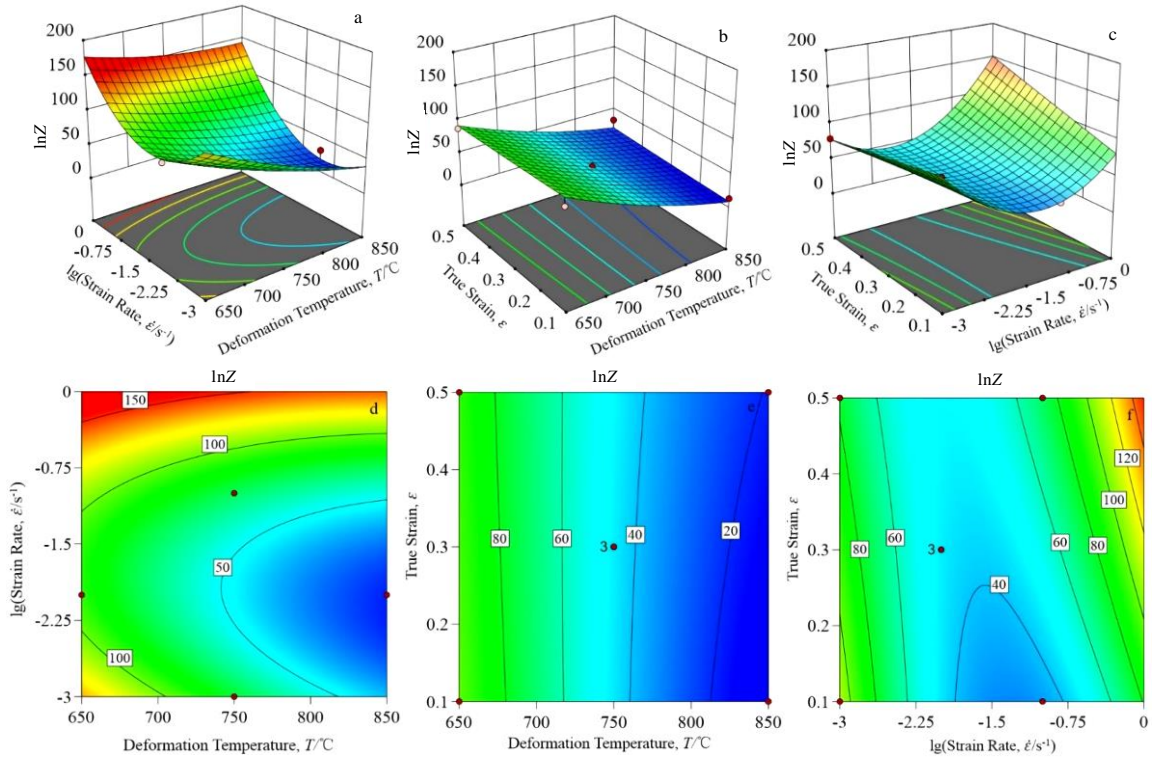


图 4 不同变形条件下 $\ln Z$ 值的响应曲面和等高线图

Fig.4 Response surfaces (a-c) and contour maps (d-f) of $\ln Z$ value under different deformation conditions: (a, d) T - $\lg \dot{\epsilon}$, (b, e) T - ϵ , and (c, f) $\lg \dot{\epsilon}$ - ϵ

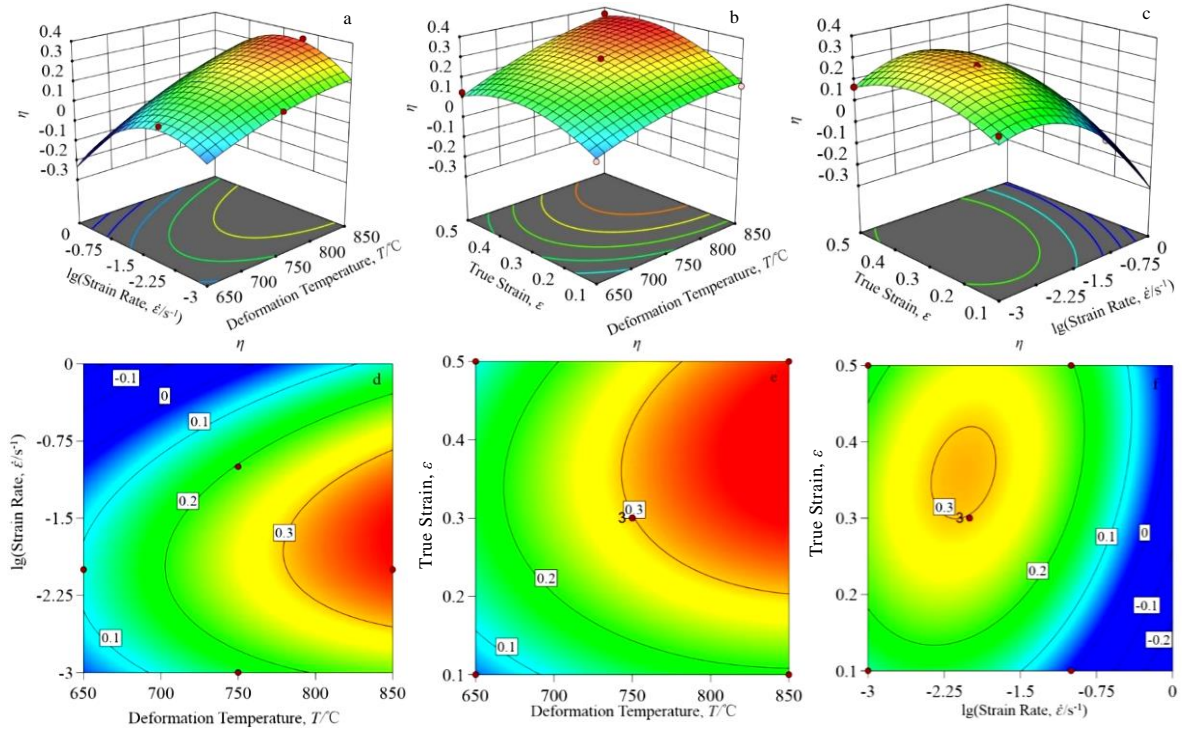


图 5 不同变形条件下 η 值的响应曲面和等高线图

Fig.5 Response surfaces (a-c) and contour maps (d-f) of η value under different deformation conditions: (a, d) T - $\lg \dot{\epsilon}$, (b, e) T - ϵ , and (c, f) $\lg \dot{\epsilon}$ - ϵ

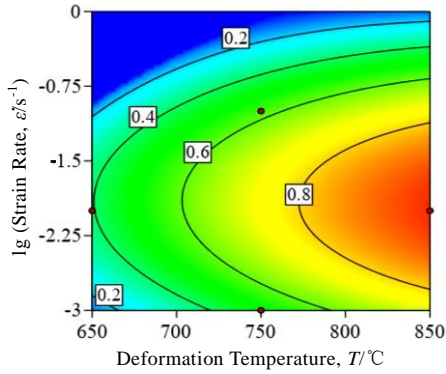


图 6 Ti₂AlNb 基合金应变为 0.5 时多目标可视化优化结果
Fig.6 Visualization multi-objective optimization result for Ti₂AlNb-based alloy at strain of 0.5

3.4 验证微观组织

图 7 为 Ti₂AlNb 基合金在应变速率 0.01 s⁻¹、变形温度分别为 800 和 850 °C 时应变达 0.5 时的微观组织，此变形条件位于多目标可视化优化结果中的最佳区域内。从图 7 中可以看出晶粒为等轴状且均匀分布，晶界清晰可见，并且发生了动态再结晶行为，这与流变

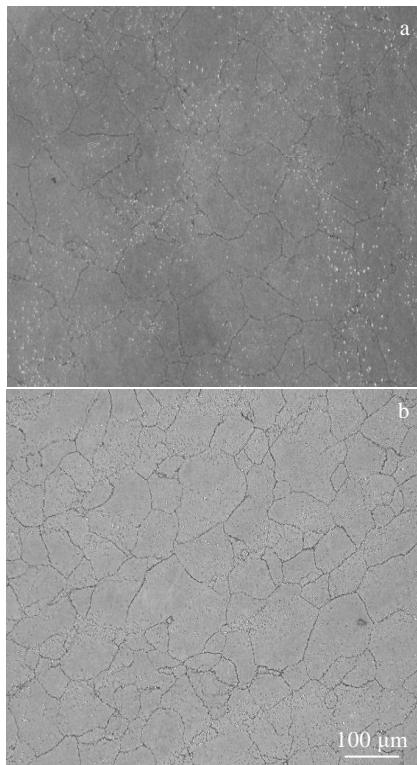


图 7 在应变速率 0.01 s⁻¹，变形温度为 800 和 850 °C 下 Ti₂AlNb 基合金应变达 0.5 时的微观组织
Fig.7 Microstructures of Ti₂AlNb-based alloys at strain of 0.5 under 800 °C (a) and 850 °C (b) and a strain rate of 0.01 s⁻¹

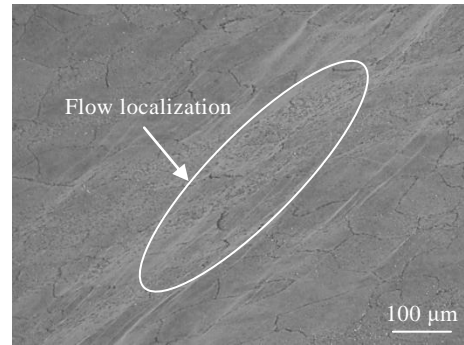


图 8 在应变速率 0.01 s⁻¹、变形温度为 650 °C 条件下 Ti₂AlNb 基合金应变达 0.5 时的微观组织
Fig.8 Microstructure of Ti₂AlNb-based alloy at strain of 0.5 under 650 °C and a strain rate of 0.01 s⁻¹

应力曲线特征相同，晶界自然弯曲且持续，随温度升高晶粒大小变化不大。Ti₂AlNb 基合金在优化后的最佳变形参数区域内变形机制主要为动态再结晶，具有良好的可加工性。图 8 为 Ti₂AlNb 基合金在应变速率 0.01 s⁻¹、650 °C 变形温度应变达 0.5 时的微观组织，变形参数在非优化区域，可以看到显微组织沿变形方向被拉长，分布也不均匀，并且还出现了明显的局部塑性流动，非常容易影响材料的性能。通过对显微组织的观察，充分验证了多目标可视化优化可以用来先一步判断热加工性能的好坏，所以根据响应面法得到的最优变形参数区域可以指导 Ti₂AlNb 基合金的实际生产和工艺优化。

4 结 论

- 1) Ti₂AlNb 基合金是负温度敏感型材料和正应变速率敏感型材料，该材料的流变应力随变形温度的降低和应变速率的加快而增大。
- 2) 通过响应面法建立了 Ti₂AlNb 基合金变形温度、应变速率及应变与热变形激活能 Q 、 $\ln Z$ 和功率耗散因子 η 之间的响应面模型，精度较高，可以用于工艺参数的优化与分析。
- 3) 从多目标可视化优化结果得出 Ti₂AlNb 基合金优化后的最佳变形参数区域是变形温度 750~850 °C、应变速率 0.005~0.03 s⁻¹。

参考文献 References

[1] Liu Xiaoyan(刘晓燕), Zhang Qi(张 琪), Yang Yanhui(杨艳慧) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(1): 149
[2] Qiang Fengming(强凤鸣), Kou Hongchao(寇宏超), Jia

- Mengyu(贾梦宇) *et al.* *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2022, 14(1): 11
- [3] Wu Z H, Kou H C, Chen N N *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 20: 469
- [4] Xiang J Y, Xie F Q, Wu X Q *et al.* *Intermetallics*[J], 2021, 132: 107 151
- [5] Wu Yong(武永), Zhou Xianjun(周贤军), Wu Dipeng(吴迪鹏) *et al.* *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2022, 14(4): 102
- [6] Zhang Q C, Chen M H, Wang H *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(3): 722
- [7] Wang Guodong(王国栋), Wang Dan(王丹), Xue Shaobo(薛少博) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2023, 40(1): 16
- [8] Xue Kemin(薛克敏), Hu Yong(胡勇), Shi Yingbin(时迎宾) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(8): 2556
- [9] Wang Li(王力), Liang Wenping(梁文萍), Miu Qiang(缪强) *et al.* *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2015, 40(3): 52
- [10] Chen Liwen(陈利文), Hou Hua(侯华), Jin Yuchun(靳玉春) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(4): 1174
- [11] Guo L G, Dang L, Yang H *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(7): 1902
- [12] Li Qihan(李奇涵), Jing Shufan(景淑帆), Gao Song(高嵩) *et al.* *Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2020, 45(6): 93
- [13] Zhao Jiquan(赵继全), Qu Zhoude(曲周德), Wu Chuan(武川) *et al.* *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2022, 14(2): 74
- [14] Li Ping(李萍), Ding Yonggen(丁永根), Yao Pengpeng(姚彭彭) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(5): 1019
- [15] Xiao Rui(肖瑞), Yang Ming(杨明), Huang Chaowen(黄朝文). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2019, 43(10): 1040
- [16] Ding Kailun(丁凯伦), Yang Xirong(杨西荣), Liu Xiaoyan(刘晓燕) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(9): 3107
- [17] Peng Jiahao(彭嘉豪), Sun Qianjiang(孙前江), Zhou Jianwei(周建伟) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2022, 32(4): 994
- [18] Yin Baoqin(尹宝琴), Xu Shuai(徐帅), Xiao Namin(肖纳敏) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2022, 29(8): 193
- [19] Zhang Bing(张兵), Liu Pengru(刘鹏茹), Chen Hanfeng(陈韩锋) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2022, 32(2): 466
- [20] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M *et al.* *Metallurgical Transactions A*[J], 1984, 15(10): 1883
- [21] Wen D X, Lin Y C, Li H B *et al.* *Materials Science and Engineer A*[J], 2014, 591: 183
- [22] Xin J J, Zhang L Q, Ge G W *et al.* *Materials & Design*[J], 2016, 107(5): 406
- [23] Li Hongjiang(李鸿江), Yu Yang(于洋), Song Xiaoyun(宋晓云) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2020, 44(5): 462
- [24] Ga S B, Chung Y G. *Molecular Systems Design & Engineering*[J], 2022, 7: 686
- [25] Wang P, Li S, Geng X *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 843: 156 084
- [26] Fuse K, Dalsaniya A, Modi D *et al.* *Materials*[J], 2021, 14(23): 7408
- [27] Li C M, Huang L, Zhao M J *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 924: 166 481
- [28] Ding Haochen(丁浩晨), Zhao Yanjun(赵艳君), Wei Zongfan(韦宗繁) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(7): 2608
- [29] Li C M, Huang L, Zhao M J *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 797: 139 925
- [30] Sun Y, Feng X Y, Hu L X *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 753: 256
- [31] Chen Guiqing(陈贵清), Fu Gaosheng(傅高升), Yan Wenduan(颜文焮) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2011, 18(4): 28
- [32] Huang Zhengqin(黄钰钦), Wang Yan(王岩), Liu Minxue(刘敏学) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2021, 31(7): 1842

Optimization of Deformation Process Parameters of Ti₂AlNb-Based Alloys Based on Response Surface Methodology

Liu Jie, Wang Kelu, Lu Shiqiang, Li Xin, Huang Wenjie, Zeng Quan, Zhou Tong, Wang Zengqiang
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In this paper, the hot deformation behavior of Ti₂AlNb-based alloy was studied by Gleeble-3500 thermal simulation experiment machine under deformation temperatures of 650-850 °C and strain rates of 0.001-1 s⁻¹, and the optimal deformation process parameters range of Ti₂AlNb-based alloy was obtained by response surface method. First, the flow stress curves of Ti₂AlNb-based alloy under different deformation conditions were analyzed, and the hot deformation activation energy Q , $\ln Z$ and power dissipation factor η were calculated, so as to establish the second order response surface model for the thermal deformation activation energy Q , $\ln Z$ and power dissipation factor η , and the optimal process parameters region optimization was obtained through multi-objective visual optimization, which was verified by the microstructure. The results show that the flow stress of Ti₂AlNb-based alloy decreases with the increasing in deformation temperature and the decreasing in strain rate. The established response surface models have high accuracy, which can be used for optimization and analysis of process parameters. The result of multi-objective visual optimization show that the optimal process parameters region for Ti₂AlNb-based alloy is 750-850 °C and the strain rate of 0.005-0.03 s⁻¹.

Key words: Ti₂AlNb-based alloy; response surface method; optimization of deformation process parameters; flow stress

Corresponding author: Wang Kelu, Associate Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: wangkelu@126.com