

基于响应面法的 TC21 钛合金热变形参数优化

李 鑫 张开铭 王克鲁 鲁世强
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 在热模拟试验机上对 TC21 钛合金进行了等温恒应变速率压缩试验,利用获得的流动应力数据计算了不同变形条件下的 $\ln Z$ 、变形激活能 Q 和功率耗散效率 η ,建立了这些参数对变形温度、应变速率和应变的响应面模型。绘制出 $\ln Z$ 、 Q 和 η 对变形温度、应变速率和应变之间交互作用的响应曲面,分析了 $\ln Z$ 、 Q 和 η 随这些热变形参数之间交互作用的变化规律,通过追求最低的 Q 值和 $\ln Z$ 值以及最高的 η 值对热变形参数进行了多目标可视化优化。结果表明, $\ln Z$ 和 Q 随应变速率的降低而减小, η 随应变速率的降低而增大,三者均随变形温度的增加先增大后减小。所建立的响应面模型具有较高的精度,利用该模型优化的热变形参数范围为 $860\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.001\sim 0.002\text{ s}^{-1}$,最佳变形条件为 $877\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.001 s^{-1} ,在该变形条件附近加工可获得球化分数较高、尺寸较小的等轴组织。

关键词 TC21 钛合金;响应面法;微观组织

中图分类号 TG146.23 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot Deformation Parameter Optimization of TC21 Titanium Alloy Based on Response Surface Methodology

Li Xin, Zhang Kaiming, Wang Kelu, Lu Shiqiang

(School of Aerospace Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The isothermal compression tests for TC21 titanium alloy with lamellar microstructure were carried out at constant strain rates on hot working simulator. The obtained flow stress data was utilized to calculate the $\ln Z$, deformation activation energy Q and power dissipation efficiency η under different deformation conditions, and the response surface models of parameters to deformation temperature, strain rate and strain were established. The response surfaces of $\ln Z$, Q and η to the interaction between deformation temperature, strain rate and strain were plotted, and the variation law of $\ln Z$, Q and η with the interaction between these hot deformation parameters were analyzed. By pursuing the lowest Q and Z values and the highest η value, the hot deformation parameters were optimized by multi-objective visualization. The results indicate that with strain rate decrease, the values of $\ln Z$ and Q are decreased and the value of η is increased, while all parameters are increased firstly and then decreased with deformation temperature increase. The established response surface model possesses high accuracy, and the range of hot deformation parameters optimized by the model is $860\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.001\sim 0.002\text{ s}^{-1}$. The optimal deformation condition is $877\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 0.001 s^{-1} , where the equiaxial microstructure with higher spheroidization fraction and smaller size can be achieved.

Key Words: TC21 Titanium Alloy, Response Surface Methodology, Microstructure

收稿日期:2022-12-19;修改稿收到日期:2023-02-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51864035);江西省自然科学基金资助项目(20202ACBL204001)
第一作者简介:李鑫,男,1975 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail:lixin572@163.com
引用格式:李鑫,张开铭,王克鲁,等. 基于响应面法的 TC21 钛合金热变形参数优化[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 478-1 484.
LI X, ZHANG K M, WANG K L, et al. Hot deformation parameter optimization of TC21 titanium alloy based on response surface methodology[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 478-1 484.

[34] MUHAMMAD A, XU C, WANG X J, et al. High strength aluminum cast alloy: A Sc modification of a standard Al-Si-Mg cast alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A604: 122-126.

[35] PRACH O, TRUDONOSHYN O, RANDELZHOFFER P, et al. Effect of Zr, Cr and Sc on the Al-Mg-Si-Mn high-pressure die casting alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A759: 603-612.

[36] ZHENG Q J, ZHANG L L, JIANG H X, et al. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 47: 142-151.

[37] JIN H N, SUI Y D, YANG Y, et al. Effect of Ce content on the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Al-5Mg-2.2Si-0.6Mn alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 1 798-1 804.

(编辑:张正贺)

钛合金因具有密度小、比强度高、耐高温和抗腐蚀性能好的特点,在航空航天领域获得广泛应用。为了适应航空构件损伤容限设计的要求,先进钛合金材料正逐步向具有高断裂韧度和低裂纹扩展速率的损伤容限型钛合金方向发展,TC21 钛合金正是为了适应这一要求而研制的高强度高韧损伤容限钛合金,目前用于飞机机体及发动机的关键部件^[1-3]。钛合金属于难变形材料,在成形过程中具有变形抗力大、导热性差等特点,加之流动应力和变形组织对变形参数比较敏感,导致变形参数范围窄,且容易产生缺陷^[4-6],给航空钛合金构件,尤其是复杂构件的高性能精确成形制造带来很大挑战。等温锻通过模具施加应力场,同时辅以温度场实现构件成形,能显著降低材料的变形抗力,提高材料塑性,实现复杂形状的精确成形,并且能够改善和提高材料的组织和性能,是成形钛合金复杂构件的重要途径^[7-8]。但等温锻对变形参数的控制要求较高,因此,优化等温锻的变形温度和应变速率显得尤为重要。

响应面法(Response surface methodology)是一种基本的试验设计方法,目的在于通过合理的试验设计得到最优期望值,近几年才被引入到金属塑性加工领域中^[9-11]。GUO L G 等^[9]在研究 Inconel625 合金大型厚壁管挤压时,分别建立了描述温升和峰值温度与关键挤压参数之间的响应面模型,通过绘制挤压速度和初始温度空间峰值温度的等高线图,建立了不同挤压比下挤压加工窗口。马君慧等^[10]在研究异形截面环件轧制时采用响应面模型对槽型深度为 45 mm、槽型角度为 70°的目标截面进行毛坯角度优化,采用优化后的毛坯角度环轧时,缺肉系数减少了 83.4%,较好地消除了缺肉缺陷。杨艳慧等^[11]利用响应面法和有限元数值模拟对航空发动机涡轮盘锻造过程预成形设计的多目标优化问题进行了研究,发现应用响应面法可灵活有效地对难变形材料锻造预成形坯料形状进行多目标优化设计。

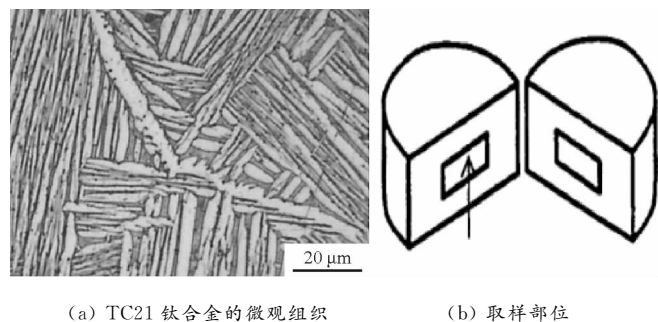
虽然响应面法已应用于塑性加工领域,但对于锻造加工来说,利用响应面法优化热变形参数的研究较少。另外,不直接建立微观组织与热变形参数之间的响应面模型,而以中间过程参量作为响应目标,来建立过程参量与热变形参数之间的响应面模型,进而优化热变形参数的响应面法的应用也鲜见报道。因此,本研究拟通过对 TC21 钛合金进行等温恒应变速率压缩试验,获得不同热变形参数下的流动应力数据,以变形温度、应变速率和应变作为输入变量,材料的过程参量(Z 参数、变形激活能 Q 和功率耗散效率 η)作为响应目标建立响应面模型,采用多目标可视化优化方法,确定该合金较佳的热变形参数范围及最佳变形条件,以期对 TC21 钛合金

的等温锻变形参数的选择提供参考。

1 试验材料及方案

试验材料为 TC21 钛合金,其名义成分为 Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-1Nb-0.1Si,用金相法测得该合金的 β 相变点温度为 955 °C。将原材料加热至 980 °C,保温 1 h 后,随炉冷却。按标准金相试样制备步骤制样,用体积比为 1 : 3 : 6 的 HF+HNO₃+H₂O 的腐蚀液进行腐蚀,利用 XJP-6A 型金相显微镜进行微观组织观察,其微观组织为片层组织。

将材料加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的试样,在 Gleeble-3500 型热模拟试验机上进行等温恒应变速率压缩试验。热压缩时在试样两端覆盖云母片以减小端面摩擦,降低变形的不均匀性。变形温度分别为 840、880 和 920 °C,应变速率分别为 0.001、0.01 和 0.1 s⁻¹,高度压缩率为 60%。试验采用电阻加热,通过焊接在试样中部表面的热电偶测量温度,通过闭环温控系统将误差控制在 1 °C 以内。升温速率为 5 °C/s,加热至规定温度后保温 300 s。试样压缩后立即水冷,以保留其高温变形组织。试验获得的载荷-行程曲线,经配备的数据处理软件进行数据采集并进行摩擦修正,直接输出真应力-真应变数据。变形试样沿平行于压缩轴线方向对半剖开,取其中一半进行微观组织观察。金相试样制备、所用腐蚀液和金相显微镜同上。微观组织观察部位位于试样切面的中心处。利用 Image Pro Plus 6.0 软件测量不同变形条件下的球化分数。TC21 钛合金的微观组织和变形试样的取样部位见图 1。



(a) TC21 钛合金的微观组织 (b) 取样部位

图 1 TC21 钛合金的微观组织和变形试样的取样部位

Fig.1 Microstructure of TC21 titanium alloy and sampling position of deformed specimen

2 试验结果和分析

2.1 流动应力曲线

图 2 为 TC21 钛合金在不同变形条件下的流动应力曲线。从图 2a 可以看出,当应变速率固定时,流动应

力随变形温度的升高而减小。这是因为随着变形温度升高,材料的热激活作用增强,原子的平均动能增大,晶体发生滑移的临界分切应力将会减少,且随着变形温度的升高,容易发生动态回复和动态再结晶,从而使位错密度下降,导致流动应力减小。从图 2b 可以看出,当温度不变时,流动应力随应变速率的增加而增大,这是因为应变速率的增加意味着变形时间缩短,位错之间相互交割和缠结,且没有足够的时间进行动态回复和动态再结晶,导致流动应力增大。

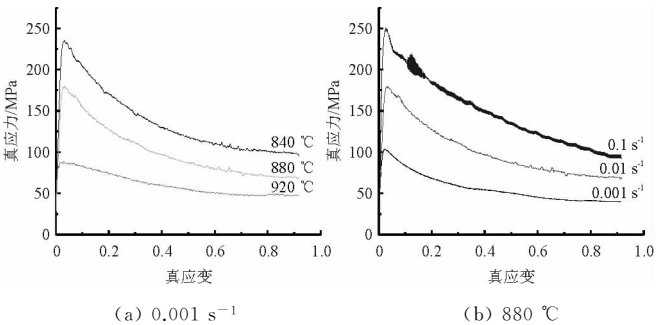


图 2 TC21 钛合金在不同变形条件下的流动应力曲线
Fig.2 Flow stress curves of TC21 titanium alloy under different deformation conditions

此外,流动应力曲线总体上呈软化型,在固定的应变速率或变形温度下,流动应力先在较小的应变下达到峰值,随着应变的增加开始持续下降,最后在某一应变趋于稳定,且温度越高或应变速率越低,达到稳态应力所需的应变越小。当应力趋于稳定时,动态回复、动态再结晶等位错湮灭、重新排列的软化过程和位错增值、交割等硬化过程达到平衡,而之前的持续软化则与变形热效应、微观组织演变以及位错穿过 α/β 片层界面导致的 Hall-Petch 强化的丧失有关^[12-14]。

2.2 变形激活能 Q 和 Z 参数

金属及其合金的高温变形与蠕变过程相似,也是热力学参数所支配的热激活过程。在此过程中,变形激活能 Q 提供了速率控制机制中原子重排难易程度的有关信息,其大小反映了热变形过程中位错开动、回复及再结晶进行的难易程度^[15-16]。由于金属的高温变形过程受热激活控制,温度和应变速率对流动应力的综合影响通常采用 Z 参数和受热激活控制的 Arrhenius 型动力学方程来分析^[17]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = \begin{cases} A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n & (\text{通用}) \\ A_2 \sigma^{n_1} & (\alpha\sigma < 0.8) \\ A_3 \exp(\beta\sigma) & (\alpha\sigma > 1.2) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为流动应力, MPa; Q 为变形激活能, kJ/mol; T 为变形温度, K; R 为气体常数,

kJ/(mol · K); A_1 、 A_2 、 A_3 、 n 、 n_1 和 β 为和材料有关的常数,且 $\alpha = \beta/n_1$; Z 为 Zener-Hollomon 参数。

对式(1)两边取自然对数,可得:

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \begin{cases} \ln A_1 + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \\ \ln A_2 + n_1 \ln \sigma \\ \ln A_3 + \beta \sigma \end{cases} \quad (2)$$

由于双曲正弦形式对不同应力条件均具有较好的适用性,因此

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_\epsilon \quad (3)$$

在固定的应变下,分别以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 σ 为坐标作图,这两个图的斜率的平均值分别为 n_1 和 β ,从而可求出 α 。然后根据式(2)和式(3)可以求出该应变下的 $\ln Z$ 值和 Q 值。应变为 0.6 时的 $\ln Z$ 值和 Q 值分别见表 1 和表 2。

表 1 不同温度下应变为 0.6 时的 $\ln Z$ 值

Tab.1 Value of $\ln Z$ at the strain of 0.6 and different temperatures			
应变速率/ s^{-1}	$\ln Z$		
	840 °C	880 °C	920 °C
0.001	38.354 2	41.295 8	35.437 4
0.01	47.284 1	50.656 4	43.940 1
0.1	50.848 2	54.302 5	47.422 9

表 2 不同温度下应变为 0.6 时的变形激活能 Q 值

Tab.2 Value of deformation activation energy Q at the strain of 0.6 and different temperatures			
应变速率/ s^{-1}	Q		
	840 °C	880 °C	920 °C
0.001	418.831 1	462.081 5	420.004 3
0.01	480.156 5	529.739 7	481.501 5
0.1	491.829 7	542.618 4	493.207 4

2.3 功率耗散效率 η

根据动态材料模型理论,热变形过程中的材料可看作一个封闭系统,其吸收外部的机械功率(P)可以通过转变为粘塑性热和用于微观组织演变而耗散,对应于这两部分的功率分别称为功率耗散量(G)和功率耗散协量(J),即^[18]:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (4)$$

对于理想的线性耗散来说, J 具有最大值 $J_{\max} = P/2$ 。定义功率耗散效率 η 为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = 2 \left(\frac{P - G}{P} \right) = 2 \left(1 - \frac{1}{\sigma \dot{\epsilon}} \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \right) \quad (5)$$

η 是一个无量纲参数,随热变形参数而变化,其大小反映了用于微观组织演变耗散功率的多少,一般说来 η 越大的区域对应于越好的加工性能区^[19]。应变量为 0.6 时的 η 值见表 3。

表 3 不同温度下应变为 0.6 时的功率耗散效率 η 值
Tab.3 Value of power dissipation efficiency η at the strain of 0.6 and different temperatures

应变速率/ s^{-1}	η		
	840 $^{\circ}C$	880 $^{\circ}C$	920 $^{\circ}C$
0.001	0.396 5	0.424 9	0.384 9
0.01	0.347 9	0.365 1	0.381 8
0.1	0.284 4	0.285 5	0.377 8

3 响应面模型的建立和多目标可视化优化

3.1 响应面模型的建立和精度评估

选取变形温度、应变速率和应变作为输入变量,将受以上因素影响的 Z 参数、变形激活能 Q 以及功率耗散效率 η 作为响应目标,采用 Box-Behnken 设计来建立响应面模型。所建立的 Z 参数的响应面模型如下:

$$\ln Z = -2\,046.17 + 4.75T - 843.94\lg\dot{\epsilon} - 4\,628.27\epsilon + 1.87T \cdot \lg\dot{\epsilon} + 10.41T \cdot \epsilon + 11.66\lg\dot{\epsilon} \cdot \epsilon - 0.002\,7T^2 + 1.94(\lg\dot{\epsilon})^2 - 10.49\epsilon^2 - 0.001T^2 \cdot \lg\dot{\epsilon} - 0.005\,8T^2 \cdot \epsilon \tag{6}$$

式中, ϵ 为真应变。

Z 参数的响应面模型方差分析结果见表 4。根据与文献[20-21]比较可知,方差分析中的显著性检验值 P 主要用于反映响应目标与输入变量之间的回归关系。当 $P < 0.05$ 时,表明回归关系是显著的,且 P 值越小,回归关系越显著。从表 4 可以看出,模型项的显著性检验值 $P < 0.01$,说明所建立的响应面模型极为显著。另外, $\lg\dot{\epsilon}$ 、 ϵ 、 $T\lg\dot{\epsilon}$ 、 $T\epsilon$ 、 $\epsilon\lg\dot{\epsilon}$ 、 T^2 对 $\ln Z$ 的影响也是显著的,说明变形参数及其之间的交互作用对 $\ln Z$ 有重要影响。

图 3 为 $\ln Z$ 的试验值与响应面模型预测值的比较。可以看出,模型预测值与试验值分布在同一直线上,且 $R^2 = 0.996\,5$,说明模型的拟合精度较高,可以采用该模型进行预测和优化。同理,变形激活能 Q 和功率耗散效率 η 对变形温度、应变速率和应变的响应面模型也可以建立,方差分析表明所建立模型的 P 值均小于 0.01,

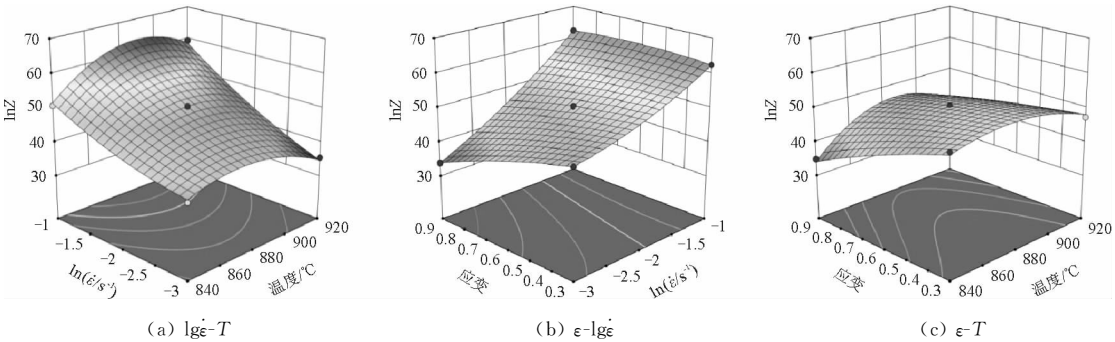


图 4 $\ln Z$ 对不同热变形参数交互作用的响应曲面
Fig.4 Response surface of $\ln Z$ to the interaction under different hot deformation parameters

说明这些响应面模型的回归关系均极为显著。

表 4 $\ln Z$ 的响应面模型方差分析
Tab.4 Variance analysis of response surface model for $\ln Z$

方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值
模型	1 293.32	11	117.57	74.19	0.002 3
T	3.42	1	3.42	2.16	0.238 2
$\lg\dot{\epsilon}$	463.66	1	463.66	292.59	0.000 4
ϵ	50.39	1	50.39	31.80	0.011 0
$T\lg\dot{\epsilon}$	33.25	1	33.25	20.98	0.019 5
$T\epsilon$	16.11	1	16.11	10.16	0.049 8
$\epsilon\lg\dot{\epsilon}$	48.97	1	48.97	30.90	0.011 5
T^2	159.54	1	159.54	100.68	0.002 1
$(\lg\dot{\epsilon})^2$	13.94	1	13.94	8.79	0.059 3
ϵ^2	3.29	1	3.29	2.08	0.245 2
$T^2\lg\dot{\epsilon}$	5.36	1	5.36	3.38	0.163 3
$T^2\epsilon$	15.60	1	15.60	9.84	0.051
残差	4.75	3	1.58	—	—
失拟	4.75	1	4.75	—	—
纯差	—	2	+	—	—
合计	1 298.08	14	—	—	—

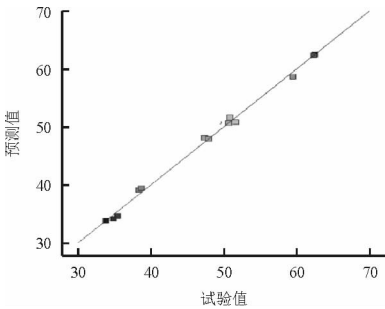


图 3 $\ln Z$ 的试验值与响应面模型预测值的比较
Fig.3 Comparison between the experimental value of $\ln Z$ and predicted value of response surface model

3.2 响应面模型的响应曲面分析

图 4 为 $\ln Z$ 对不同热变形参数之间交互作用的响应曲面,底部热变形参数平面上的投影线为等高线。从图 4a 可以看出,在固定的应变下, $\ln Z$ 对应变速率的响应比较敏感,随应变速率的降低由快而慢地减小,但随温度的升高先增加后减小,且变化幅度较小。应变速率和变形温度交互作用的结果,使得 $\ln Z$ 的最大值出现在 880 $^{\circ}C$ 、0.1 s^{-1} 附近,而在应变速率为 0.001 s^{-1} 的

所有变形温度下, $\ln Z$ 值均较低。从图 4b 可以看出, 在固定温度下, $\ln Z$ 随应力速率的降低而持续减小。当应变较高时, $\ln Z$ 基本上不随应变的增加而变化, 但在应变较低时, 随应变的增加而减小。应变速率和应变交互作用的结果, 使得 $\ln Z$ 在高应变速率区普遍较大, 而 $\ln Z$ 的最小值出现在应变速率为 0.001 s^{-1} 和应变 0.9。从图 4c 可以看出, 在固定的应变速率下, $\ln Z$ 随温度的升高先增加再减小, 随应变的增加而减小。变形温度和应变交互作用的结果, 使得 $\ln Z$ 的最大值出现在 $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和应变为 0.3 附近, 而最小值出现在 $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和应变为 0.9 时。图 5 为变形激活能 Q 对不同热变形参数之间交互

作用的响应曲面, 底部热变形参数平面上的投影线为等高线。可以看出, 变形激活能 Q 在不同热变形参数交互作用下的变化规律与 $\ln Z$ 基本一致。

图 6 为功率耗散效率 η 对不同热变形参数之间交互作用的响应曲面, 底部热变形参数平面上的投影线为等高线。综合分析图 6 可知, 应变对 η 的影响不明显, 而固定的应变下, 应变速率和变形温度对 η 的影响比较复杂。在高应变速率下, η 随温度的升高先减小后增加, 而在低应变速率, 情况相反, η 随温度的升高先增加后减小。变形温度和应变速率交互作用的结果, 使得 η 最大值出现 $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.001 s^{-1} 附近, 最小值出现在 880

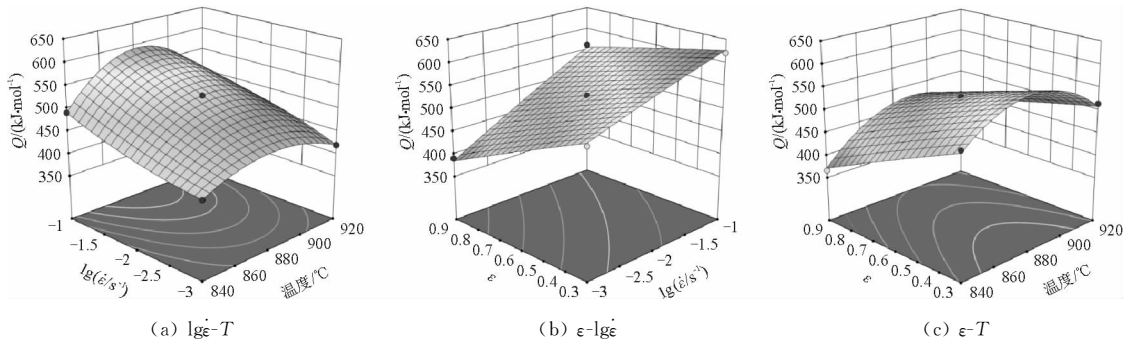


图 5 变形激活能 Q 对不同热变形参数交互作用的响应曲面

Fig.5 Response surface of deformation activation energy Q to the interaction under different hot deformation parameters

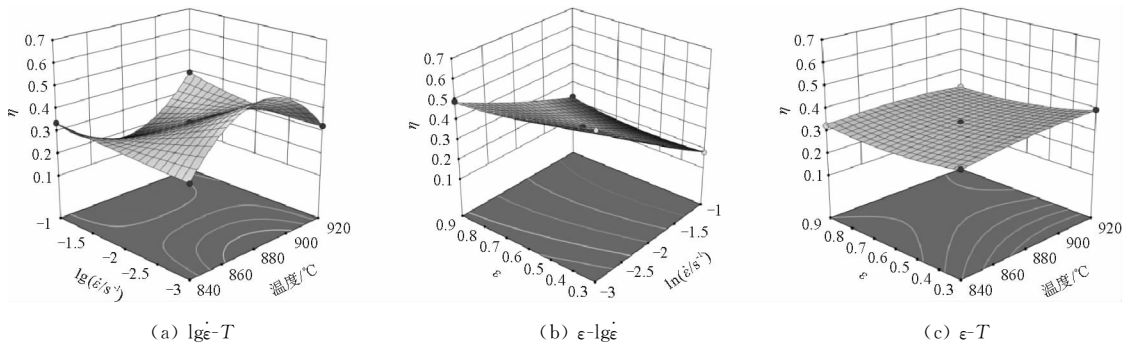


图 6 功率耗散效率 η 对不同热变形参数交互作用的响应曲面

Fig.6 Response surface of power dissipation efficiency η to the interaction under different hot deformation parameters

$^{\circ}\text{C}$ 、 0.1 s^{-1} 附近。

3.3 多目标可视化优化

变形激活能 Q 可描述位错运动的能量障碍和材料的变形阻力^[22-23], 通常较低的变形激活能有利于提高材料的加工性能^[24], 因此可以用来指导热变形参数优化。变形温度和应变速率对流动应力的联合影响可以用 Z 参数来表示, Z 参数越小, 动态再结晶越容易发生, 而在 Z 参数较高的变形参数范围, 容易出现加工硬化或失稳变形^[25]。对于功率耗散效率 η 来讲, η 值越高, 用于微观组织演变的功率越多, 加工性能越好。因此, 本研究采用 Design-Expert 软件的优化功能通过追求最低的 Q 值和 Z 值以及最高的 η 值对应变为 0.9 的热变形参

数进行优化, 结果见图 7。图 7 中等高线表示多目标优化结果的期望值, 期望值大于 0.8 的区域即为优化的热

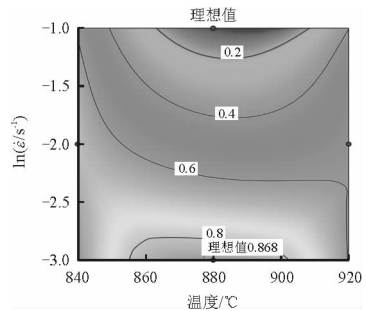


图 7 TC21 钛合金在应变为 0.9 时多目标可视化优化结果
Fig.7 Multi-objective visual optimization result for TC21 titanium alloy at the strain of 0.9

变形参数区域,其范围为 860~900 ℃、0.001~0.002 s⁻¹,最佳参数为 877 ℃、0.001 s⁻¹。

3.4 组织验证

图 8 为 TC21 钛合金在不同变形条件下的微观组织。可以看出,在 840 ℃、0.001 s⁻¹,880 ℃、0.001 s⁻¹,920 ℃、0.001 s⁻¹和 880 ℃、0.01 s⁻¹变形条件下,均有片层 α 相球化的发生,球化分数分别约为 46%、67%、75%和 27%。片层 α 相的球化机理比较复杂,涉及片层 α 相内亚界面的形成、β 相沿着 α 相亚界面的渗入、动态再结晶等^[26-28],低的应变速率为这些过程提供了较为充足的时间,因此,应变速率越低,球化分数越高。另外,β 相沿着片层 α 相亚界面的渗入实质上是由合金中

的元素如 Al、Mo 等的扩散造成的^[27],而高温有利于扩散过程的进行。因此,温度越高,越有利于球化过程的进行,球化分数越高^[28]。虽然温度升高,有利于球化过程进行,但扩散作用的增强也会导致球化 α 相的合并长大。由图 8 可以看出,在 880 ℃时,温度相对较低,球化 α 相合并长大不明显,其尺寸与 840 ℃时相差不大,但在 920 ℃时,温度较高,靠近 β 相变点,扩散作用较为强烈,球化的 α 相合并长大较为明显。由此可知,在 880 ℃、0.001 s⁻¹下进行变形,可以获得球化分数较高、尺寸较小的等轴组织。这种等轴组织具有较高的塑性和强度。因此,利用响应面法来优化 TC21 钛合金热变形参数是可行的,可以应用于实际生产过程中,尤其对于等

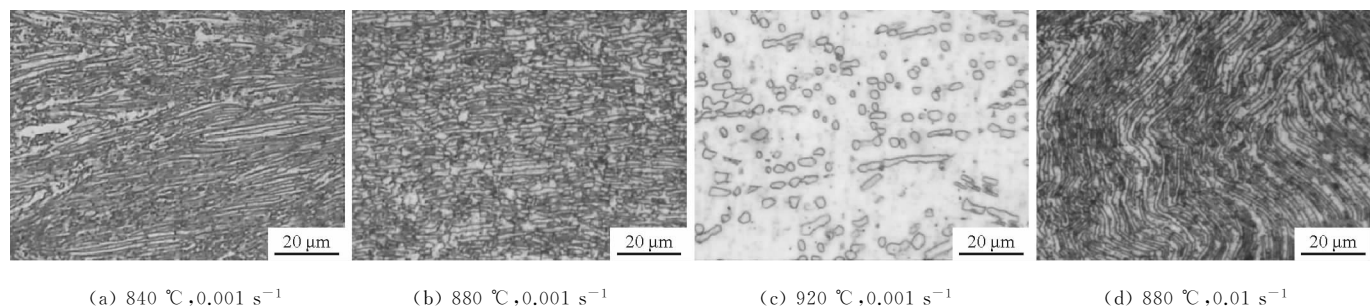


图 8 TC21 钛合金在不同变形条件下的微观组织

Fig.8 Microstructures of TC21 titanium alloy under different deformation conditions

温锻,可以精确地确定热变形参数。

4 结 论

(1) TC21 钛合金的流动应力随应变速率的降低和温度的升高而减小,在不同温度和应变速率条件下,流动应力随应变的增加呈现流动软化,最后趋于稳态流动。

(2) 利用试验获得的流动应力数据,计算出不同热变形参数下的 $\ln Z$ 、变形激活能 Q 和功率耗散效率 η 值,并建立了三者对变形温度、应变速率和应变的响应面模型。模型项的显著性检验值 $P < 0.01$,表明所建模型的拟合精度较高,可以采用该模型进行预测和优化。

(3) 绘制出 $\ln Z$ 、 Q 和 η 对变形温度、应变速率和应变之间交互作用的响应曲面,分析了 $\ln Z$ 、 Q 和 η 随热变形参数之间交互作用的变化,获得了三者最大值和最小值出现的热变形参数条件。

(4) 采用 Design-Expert 软件的优化功能通过追求最低的 Q 值和 Z 值以及最高的 η 值对 TC21 钛合金进行多目标可视化优化,优化出的热变形参数范围为 860~900 ℃、0.001~0.002 s⁻¹,最佳参数为 877 ℃、0.001 s⁻¹,在该变形条件附近锻造可以获得球化分数较高、尺寸较小的等轴组织。

参 考 文 献

- [1] 赵永庆,曲恒磊,冯亮,等. 高强高韧损伤容限钛合金 TC21 研制[J]. 钛工业进展, 2004, 21(1): 22-24.
- [2] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- [3] ZHAO Q Y, SUN Q Y, XIN S W, et al. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A845: 143 260.
- [4] SESHACHARYUL U T, MEDEIROS S C, FRAZIER W G, et al. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A325: 112-125.
- [5] SEMIATIN S L, SEETHARAMAN V, WEISS I. Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys-An overview[J]. Materials Science and Engineering, 1998, A243: 1-24.
- [6] SINGH G, SOUZA P M. Hot deformation behavior of a novel alpha+beta titanium alloy TIMETAL407[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 935: 167 970.
- [7] 王晓晨,郭鸿镇,石志峰,等. 损伤容限型钛合金的等温锻造温度研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(1): 20-23.
- [8] 高鹏飞,于超,雷珍妮,等. 钛合金复杂构件等温锻造微观成形规律与调控研究进展[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(7): 21-32.
- [9] 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 Nonfer-

- rous Metals Society of China, 2016, 26: 1 902-1 911.
- [10] 马君慧,吴运新,龚海,等. 基于响应面法的异形截面环件轧制宏观成形缺陷的分析与优化[J]. 锻压技术, 2022, 47(9): 135-144.
- [11] 杨艳慧,刘东,贺子延,等. 基于响应面法(RSM)的锻造预成形多目标优化设计[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 1 019-1 024.
- [12] KIM S M, KIM J, SHIN D H, et al. Microstructure development and segment formation during ECA pressing of Ti-6Al-4V alloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 50: 927-930.
- [13] XU J W, ZENG W D, ZHOU D D, et al. Analysis of flow softening during hot deformation of Ti-17 alloy with the lamellar structure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 285-292.
- [14] GUO B Q, JONAS J J. Dynamic transformation during the high temperature deformation of titanium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 884: 161 179.
- [15] REZAEI M, HANZAKI A Z, GHAMBARI M, et al. Flow characterization of a duplex near a Ti6242 alloy through interrelation of microstructural evolution, 3D activation energy map, and processing map[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 6(18): 1 075-1 085.
- [16] MOHAMADIZADEH A, HANZAKI A Z, ABEDI H R. Modified constitutive analysis and activation energy evolution of a low-density steel considering the effects of deformation parameters[J]. Mechanics of Materials, 2016, 95: 60-70.
- [17] WANJARA P, JAHAZI M, MONAJATI H, et al. Hot working behavior of near-alloy IMI834[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A396: 50-60.
- [18] 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, 2013, A576: 259-266.
- [19] ROBI P S, DIXIT U S. Application of neural networks in generating processing map for hot Working[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 289-294.
- [20] CAO Y F, CHEN S Y, ZHANG H Q, et al. Optimization of magnetization and mechanical properties of Fe-Ni-based alloys by response surface methodology[J]. Materials Today Communications, 2022, 30: 103 203.
- [21] WEI K, ZHAN M, FAN X G, et al. Unequal-thickness billet optimization in transitional region during isothermal local loading forming of Ti-alloy rib-web component using response surface method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(4): 845-859.
- [22] LONG J C, XIA Q X, XIAO G F, et al. Flow characterization of magnesium alloy ZK61 during hot deformation with improved constitutive equations and using activation energy maps[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 191: 106 069.
- [23] SUN Y, WAN Z P, HU L X, et al. Characterization of hot processing parameters of powder metallurgy TiAl-based alloy based on the activation energy map and processing map[J]. Materials and Design, 2015, 86: 922-932.
- [24] WANG S, HOU L G, LUO J R, et al. Characterization of hot workability in AA 7050 aluminum alloy using activation energy and 3D processing map[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 110-121.
- [25] ZHANG J Q, DI H S, WANG H T, et al. Hot deformation behavior of Ti-15-3 titanium alloy: A study using processing maps, activation energy map, and Zener-Hollomon parameter map[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47: 4 000-4 011.
- [26] LI X, DENG S Y, WANG S W, et al. Dynamic globularization mechanism during hot working of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy with lamellar microstructure[J]. Materials Characterization, 2021, 171: 110 749.
- [27] DONG X J, LU S Q, ZHENG H Z. Dynamic spheroidization kinetics behavior of Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V alloy with lamellar microstructure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26: 1 301-1 309.
- [28] 邹刘峰,鲁世强,董显娟,等. TC4 ELI 钛合金的热变形行为及本构关系研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1 134-1 138.

(编辑:刘晨辉)

美国公司开发维修航空发动机压气机的自动化工作单元

航空发动机叶片工作条件极为苛刻,不仅温度高,还要承受高压与高速气流冲刷。在此工况下,航空发动机叶片极易损坏,特别是叶片尖端,因此维修工作量大。为了减轻维护工作量与延长叶片工作时间,美国奥普托麦克公司(Optomec)和艾克姆机器人系统公司(Acme)约用 2 年时间共同开发出了维修航空发动机钛合金压气机叶片的自动化工作单元,是世界首创。该维修系统设计制造初衷主要用于修复在发动机使用过程中被磨损的钛合金压气机叶片尖部,同时也可以修复镍基合金叶片尖部和叶片前缘的损伤。该自动化工作单元由 3 个工位组成,可以进行叶片尖端研磨、3D 打印激光熔覆和其后处理,含 1 个自动托盘装载和卸载站、1 个托盘翻转站和 1 个机器人物料处理系统,还可以配备其他功能,如自动坐标测量机和清洁站。

奥普托麦克公司表示,与传统的修复钛合金叶片工艺如数控机床加工和钨极惰性气焊接(TIG)相比,该自动化工作单元具有一系列优点:完成叶片精加工的速度比数控机床精加工或手工精加工的快 3~4 倍;与手工工艺相比,维修的质量更加稳定;成本降低 70% 以上,不用手工焊接和人手精加工,维修质量大幅提高。奥普托麦克公司表示,利用高效和可重复的机器人精加工技术,能够使发动机维修中心的工作质量大为改善,维修成本也有所下降。该自动化机器人系统每年能修复 8.5 万块钛合金压气机叶片,已得到多个国家的民航监管机构认证,长期的商业化应用表明,该系统完全安全可靠。

(摘自中国有色网)