

基于响应面法的TA5钛合金工艺参数优化

王 俊¹, 王克鲁¹, 鲁世强¹, 李 鑫¹, 欧阳德来², 邱 仟¹, 高 鑫¹, 张开铭¹

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

摘 要: 在变形温度为 850~1050 °C、应变速率为 0.001~10 s⁻¹ 和最大下压量为 60% 的条件下, 采用 Gleeble-3800 热模拟试验机对 TA5 钛合金进行等温恒应变速率压缩试验。基于实验数据, 分析 TA5 钛合金的流变应力曲线, 计算出不同工艺参数下的材料参数(变形激活能、Z 参数以及功率耗散系数), 建立了基于响应面法的工艺参数和材料参数的预测模型, 最后对响应面模型进行多目标可视化优化, 得到优化后的工艺参数。结果表明: TA5 钛合金的流变应力具有负温度相关性和正应变速率敏感性。基于响应面法所建立的预测模型具有较高精度, 且优化后的加工参数范围为 850~990 °C/0.004~0.15 s⁻¹。经组织验证, 该区域主要的变形机制为动态回复和动态再结晶。

关键词: TA5 钛合金; 流变应力曲线; 响应面法; 工艺参数优化

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)06-2130-07

TA5 钛合金为 α 钛合金, 拥有良好的力学性能和抗腐蚀性能, 被广泛运用于航空, 航天以及海军装备^[1-3]。但 α 钛合金为密排六方结构, 塑性差, 成形困难^[4]。所以在材料成形过程中难以获得组织性能稳定的产品, 因此有必要在热变形过程中建立工艺参数与材料参数之间的定量关系, 得到优化后的工艺参数, 为实际生产提供理论依据。目前, 相关学者对钛合金的热变形行为展开了研究。周亚利^[5]等研究发现层片状 α 相组织的 TB8 钛合金在变形温度为 650 °C 时, 流变曲线呈动态软化特征, 在变形温度大于 650 °C 时, 流变曲线呈现出不连续屈服现象。高润哲^[6]等对铸态 P91 合金钢的变形激活能进行了研究, 发现变形激活能在 82~814 kJ mol⁻¹ 范围内, 随着温度和应变速率的增大而降低。李玮^[7]等研究了 Z 参数对 AZ61 镁合金热变形行为的影响, 发现随着 Z 参数的逐渐减小, 变形组织逐渐由失稳组织、不完全动态再结晶组织转变为粗化的完全动态再结晶组织, 确定了合理的热成形工艺参数区间对应的 $\ln Z$ 数值范围为 22.17~29.25。一些国内外学者^[8-10]根据动态材料模型, 计算功率耗散系数 η , 来得到合金在热变形过程中稳定区域。李萍^[11]等研究了基于响应面法来预测和优化 TA15 钛合金微观组织, 发现在应变量为 0.4~0.6, 变形温度为 950 °C, 应变速率为 0.063~0.1 s⁻¹ 的情况下, 可以获得三态组织。

本研究通过等温恒应变速率压缩试验, 得到 TA5 钛

合金流变应力曲线, 计算出不同变形条件下的材料参数(热变形激活能、Z 参数、功率耗散系数), 并且基于响应面法(RSM), 建立了工艺参数与材料参数的预测模型, 分析了工艺参数对材料参数影响规律, 最后采用多目标可视化优化方法, 得到最佳加工参数。

1 实 验

试验材料为 TA5 钛合金, 其名义成分 Ti-4.2Al-0.005B, ($\alpha+\beta$)/ β 相变温度为 990 °C。取 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱体试样, 在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行等温恒应变速率压缩试验。变形温度为 850~1050 °C, 应变速率为 0.001~10 s⁻¹; 最大下压量为 60%, 压缩完成后立即水冷至室温; 将试样沿轴向中心切割, 对切开后的表面研磨和抛光后采用体积比为 HF:HNO₃:H₂O=1:4:5 的腐蚀液腐蚀, 最后应用 XJP-6A 光学显微镜观察金相组织。合金的原始组织为等轴组织, 如图 1 所示。

2 结果与分析

2.1 流变应力曲线

图 2 为 TA5 钛合金在不同变形条件下的流变应力-应变曲线。如图 2a、2b 可知, 合金流变应力随着变形温度的降低和应变速率的升高而增大, 说明该合金的流变应力具有负温度相关性和正应变速率敏感性。在图 2a 中, 随

收稿日期: 2021-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(51761029); 南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2020026)

作者简介: 王 俊, 男, 1996 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: 1281154864@qq.com

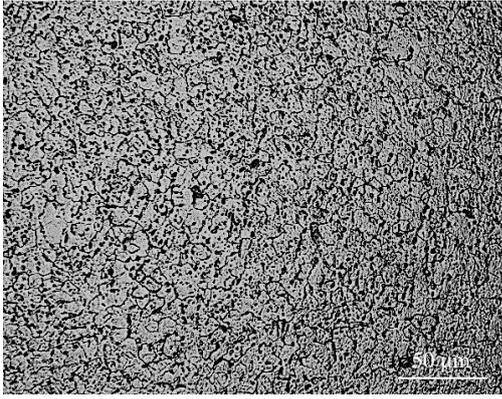


图 1 TA5 钛合金原始组织

Fig.1 Initial microstructure of TA5 titanium alloy

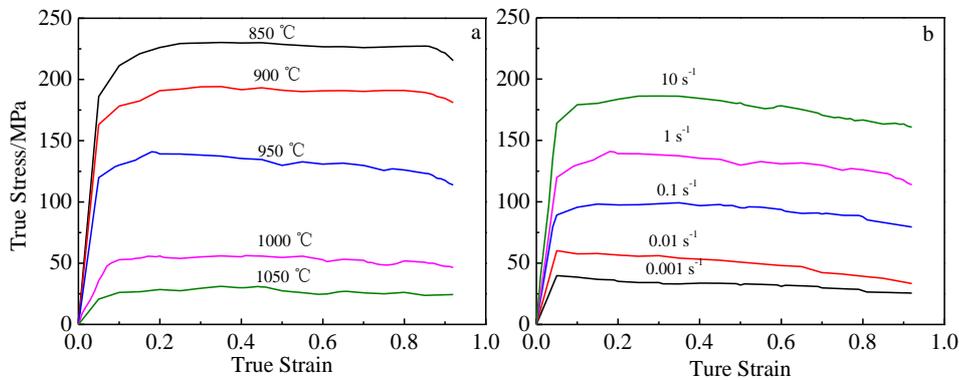


图 2 TA5 钛合金在不同变形条件下流变应力-应变曲线

Fig.2 Flow stress-strain curves of TA5 titanium alloy under different deformation conditions: (a) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ and (b) $T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2 热变形激活能(Q)与 Z 参数

根据实验数据,可以采用 Arrhenius 方程来计算 TA5 钛合金的 Q 值和 Z 值,如式(1)~(3)所示^[15]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = \begin{cases} A_1 \sigma n_1 (\alpha < 0.8) & (1) \\ A_2 \exp(\beta \sigma) (\alpha > 1.2) & (2) \\ A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \text{ (For all)} & (3) \end{cases}$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为真应力, MPa; Q 为热变形激活能, J mol^{-1} ; R 为气体常数, 值为 $8.314 \text{ J (mol K)}^{-1}$; T 为热力学温度, K; A、 A_1 、 A_2 、 n_1 、 β 、 α 和 n 皆为常数。分别对式(1)~(3)取对数,得到式(4)~(6):

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \begin{cases} \ln A_1 + n_1 \ln \sigma & (4) \\ \ln A_2 + \beta \sigma & (5) \\ \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] & (6) \end{cases}$$

以应变 0.9 为例,求解 Q 值和 $\ln Z$ 值。在不同变形温度下,由 $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 的拟合直线的平均斜率可分别求出 β 和 n_1 ; 从而可得出材料常数 $\alpha = \beta/n_1$ 。进一步计算 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$ 的关系曲线的平均斜率得到 n。而变形激活能 Q 需由式(7)可求得:

随着应变的增加,流变应力迅速达到峰值,之后基本保持不变,流变应力曲线呈稳态流动特征^[12]。这是由于,在变形初始阶段,因位错密度急剧增加,位错互相缠结交割产生加工硬化,造成流变应力迅速增大。随着变形的深入进行,位错不断增多,发生攀移和滑移,致使位错湮灭及重排,产生流动软化作用,此时加工硬化大于动态软化作用,流动应力增速降低。当流变应力达到峰值之后,则基本保持不变,是由于位错增殖所引起的加工硬化和异号位错相互抵消的软化达到动态平衡^[13]。在图 2b 中,合金的峰值应力随着应变速率的增加而增大。这是由于应变速率的增加,缩短了材料的变形时间,造成变形过程中位错运动的时间减少,导致软化没有充分进行^[14]。

$$Q = Rnk = Rn \left[\frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right] \quad (7)$$

因此,需先求出 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)] - (10000/T)$ 的拟合函数,得到斜率 k。将 k 值代入式(7)求得应变为 0.9 时的 Q 值,如表 1 所示。通过式: $\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT}$, 可计算出 $\ln Z$ 值,如表 2 所示。

2.3 功率耗散系数 η

根据动态材料模型理论可知,材料在热变形过程中吸收的总能量为 P,而总能量 P 又分为塑性变形时所消耗的能量 G 和组织转变所消耗的能量 J。如式(8)所示^[16]:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (8)$$

当变形温度和应变都确定的情况下,流变应力可用式(9)表示:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (9)$$

联合式(8)及(9)得到:

表 1 应变为 0.9 时的热变形激活能

Table 1 Hot deformation activation energy Q at the strain of 0.9 (kJ/mol)

Strain rate, $\dot{\epsilon}/s^{-1}$	Deformation temperature/ $^{\circ}C$				
	850	900	950	1000	1050
0.001	204.587	222.622	276.418	167.493	192.991
0.01	409.04	445.099	552.655	332.426	383.031
0.1	177.659	193.321	240.036	292.524	337.055
1	448.507	488.045	605.98	554.237	472.418
10	524.06	570.258	708.059	554.237	638.61

表 2 应变为 0.9 时的 $\ln Z$ 值

Table 2 $\ln Z$ value at the strain of 0.9

Strain rate, $\dot{\epsilon}/s^{-1}$	Deformation temperature/ $^{\circ}C$				
	850	900	950	1000	1050
0.001	15.01	15.92	20.28	8.92	10.64
0.01	39.21	41.04	49.75	26.8	30.22
0.1	16.72	17.52	21.3	25.33	28.34
1	48.03	50.04	59.59	52.36	42.94
10	58.42	60.77	71.93	54.66	60.35

$$G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} = \frac{\sigma \dot{\epsilon}}{1+m} \quad (10)$$

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m\sigma \dot{\epsilon}}{m+1} \quad (11)$$

式中, K 为常数, m 为应变速率敏感指数, 即 $\frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\partial(\lg \sigma)}{\partial(\lg \dot{\epsilon})} = m$ 。而 J/J_{\max} 被定义无量纲参数, 被称为

功率耗散因子 η , 可用式(10)表示:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (12)$$

在热变形过程中, 组织发生动态回复、动态再结晶、超塑性等有益的塑性变形时, 对应的 η 值也会相对较高。因此 η 值大小可以作为优化加工参数的依据。

3 响应面法(RSM)建立与可视化优化

3.1 响应面模型的建立与精度评估

响应面法是一种可视化优化算法, 对使用响应面法

建立的响应曲线进行分析, 最终得到响应值随因数的变化规律以及优化参数区域^[17]。本研究选取变形温度(T)、应变速率($\dot{\epsilon}$)、应变(ϵ)为变量因数, 热变形激活能(Q)、 $\ln Z$ 、功率耗散因子(η)为响应目标。以热变形激活能(Q)为例, 使用 Design-Expert 软件, 采用 Box-Behnken 响应面设计实验和分析, 可得到 Q 的二次响应面模型, 如式(13):

$$Q = 236.61 + 74.33A + 217.15B + 5.16C + 89.6AB + 16.95AC + 18.11BC - 7.84A^2 + 212.28B^2 + 30.81C^2 \quad (13)$$

式中, A 为变形温度(T), B 为应变速率($\lg \dot{\epsilon}$), C 为应变(ϵ)。

Q 的二次响应面模型的方差分析结果, 如表 3 所示。结合相关 RSM 文献[18,19]对模型的精度分析, 模型项的显著性检验值 $P < 0.05$ 时, 则说明模型关系是显著的, $P < 0.01$ 时, 则说明模型关系高度显著。对表 3 进行方差分析, 结果表明, $P < 0.0001$ 说明响应值 Q 与变形温度(T)、应变速率($\lg \dot{\epsilon}$)和应变(ϵ)之间的回归关系显著, 方程具有统计学意义, 能用于数据模型的参数优化与预测分析^[11]。

表 3 变形激活能 Q 的响应面方程方差分析

Table 3 Response surface equation variance analysis of deformation activation energy Q

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Model	653510	9	72612	112.1	<0.0001
A	44196.6	1	44197	68.2	<0.0001
B	377222	1	377222	582.6	<0.0001
C	212.8	1	212.8	0.33	0.5843
AB	32111.2	1	32111	49.6	0.0002
AC	1149.5	1	1149.5	1.78	0.2244
BC	1312.1	1	1312.0	2.03	0.1976
A ²	258.7	1	258.7	0.4	0.5473
B ²	189729	1	189729	293.1	<0.0001
C ²	3996.2	1	3996.2	6.17	0.0419
Residual	4531.6	7	647.3	-	-
Total	658042	16	-	-	-

图 3 为 Q 值的实验值与预测值的对比图。从图中可以看出，预测值与实验值有较高的一致性，说明方程可以用来预测不同变形条件下 Q 值的大小，可以作为高温变形时微观机制的判断依据^[20]。

3.2 响应面模型的响应曲面分析

图 4 为不同变形参数对 Q 值的影响，在图 4a 中，当应变一定时， Q 值随着变形温度的升高和应变速率的增大而增大。这是由于变形温度的升高会促进合金元素的固溶强化作用，以及应变速率的提高，将导致合金变形时间缩短，使得位错密度增加且位错滑移运动受阻，造成 Q 值增大^[21]。在图 4b 和 4c 中，当温度和应变速率一定时，随着应变的增加， Q 值基本保持不变。这一点从流变应力曲线也可以看出，当软化与加工硬化达到平衡时，此时随着应变的增加，流变应力保持不变。图 5 为不同变形参数对 $\ln Z$ 值的影响，其变化规律与 Q 值基本一致。

图 6 为不同变形参数对 η 值的影响，图 6a 为应变 0.9 时， η 值随变形温度和应变速率的分布，在图中 η 值

较高区域主要集中在应变速率 $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 范围内，且随着变形温度的升高，高 η 值区范围所对应的应变速率范围也有所增大。在图 6b 中，应变对 η 值的影响并不明显，

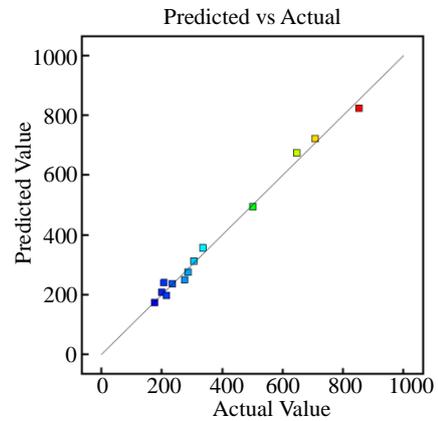


图 3 Q 值预测值与实际值对比图

Fig.3 Comparison of predicted value and actual value of Q value

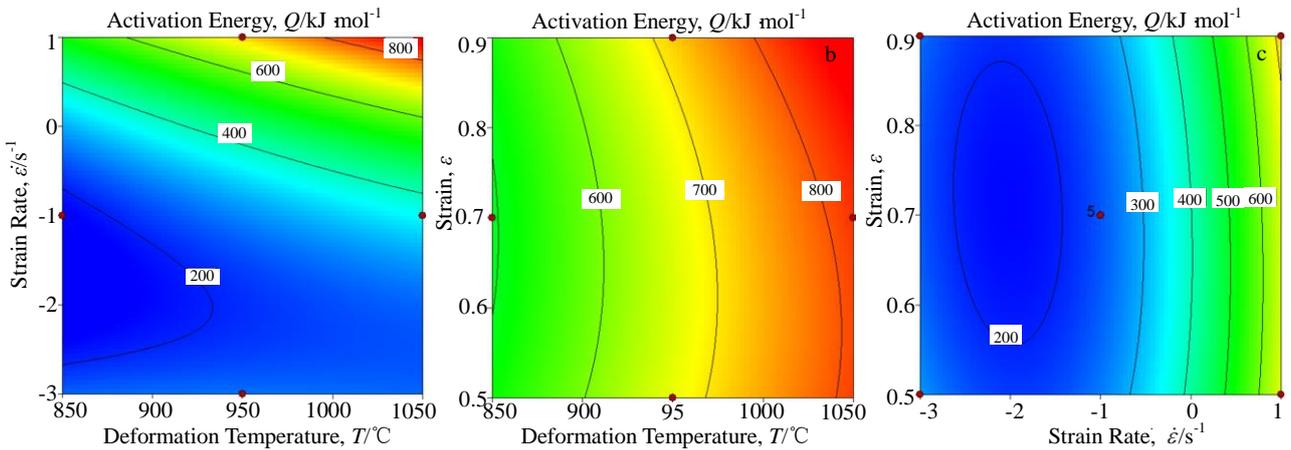


图 4 不同加工参数下 Q 值的等高线图

Fig.4 Contour maps of Q value under different processing parameters: (a) $\dot{\epsilon}$ - T , (b) ϵ - T , and (c) ϵ - $\dot{\epsilon}$

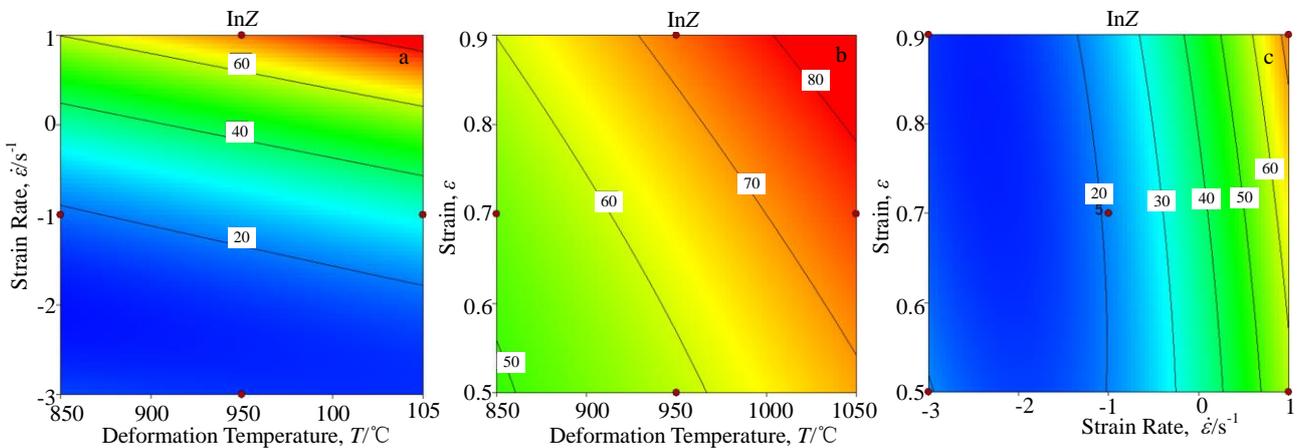


图 5 不同加工参数下 $\ln Z$ 值的等高线图

Fig.5 Contour maps of $\ln Z$ value under different processing parameters: (a) $\dot{\epsilon}$ - T , (b) ϵ - T , and (c) ϵ - $\dot{\epsilon}$

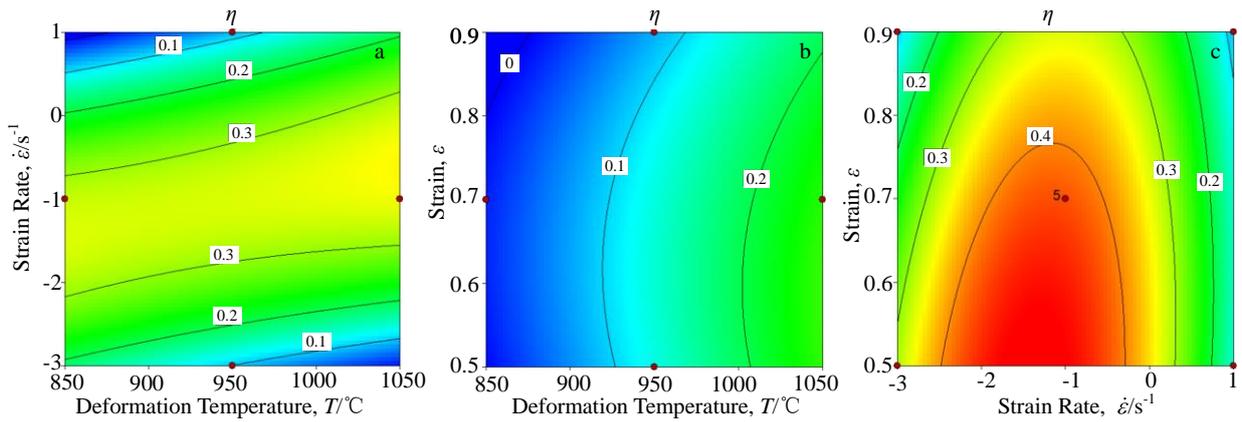


图 6 不同加工参数下 η 值的等高线图

Fig.6 Contour maps of η value under different processing parameters: (a) $\dot{\epsilon}$ - T , (b) ϵ - T , and (c) ϵ - $\dot{\epsilon}$

而在图 6c 中, η 值随着应变的增加而减小, 在应变速率 $0.00316\sim 1\text{ s}^{-1}$ 区域内 η 值较大。

3.3 多目标可视化优化

根据研究可知, 变形激活能(Q)是表征材料在热变形过程中难易程度的一个重要参数, 被作为变形时需要克服能量的最低门槛, Q 值越高则热变形越难进行^[21,22]。Z 参数则可以反映热变形过程中软化机制类型, 较低的 $\ln Z$ 值有利于动态再结晶的发生。相反, 较高的 $\ln Z$ 值会加快位错累积和重排的速度, 从而促进动态回复发生。因此, 软化机制从高 $\ln Z$ 值下的动态回复转换为低 $\ln Z$ 值下的动态再结晶。动态再结晶对热变形过程有利, 因为它可以产生稳定的流变性, 并且经常选择动态再结晶的区域以优化热成型过程并控制微观结构^[22-24]。同时, 较高的功率耗散系数 η , 往往对应着良好的变形机制, 但材料变形过程中可能会出现楔形开裂或冶金变化, 都会耗散能量, 造成 η 值较高, 因此需要结合组织和其它准则来判断和进一步优化。最后, 经上述综合分析可以得出, TA5 钛合金应在低 Q 值、低 $\ln Z$ 值区域以及高 η 值区域进行热变形, 可得到参数优化区域。本研究现采用 Design-Expert 中的优化功能, 对应变为 0.9 时的加工参

数进行优化, 结果如图 7 所示。在图中红色区域可作为经 Q 值、 $\ln Z$ 值以及 η 值优化后区域, 其参数范围为 $(850\sim 990\text{ }^\circ\text{C}/0.004\sim 0.15\text{ s}^{-1})$ 。

3.4 组织验证

图 8 为优化后的工艺参数下的组织, 在图 8a 中, 显

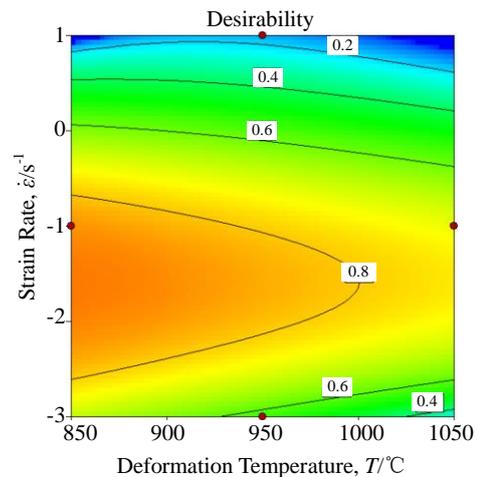


图 7 应变 0.9 时多目标可视化优化结果

Fig.7 Visualization of multi-objective optimization results at strain of 0.9

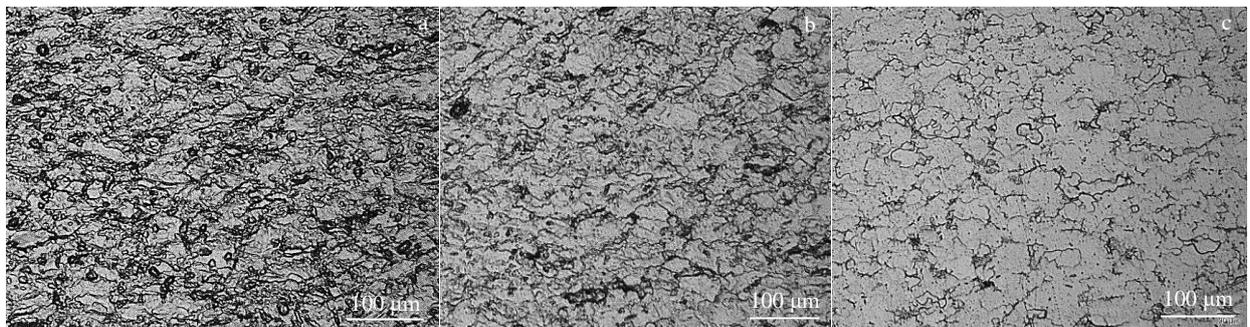


图 8 应变速率为 0.01 s^{-1} 时优化参数区显微组织

Fig.8 Microstructures of optimized process parameters area at a strain rate of 0.01 s^{-1} and different temperatures: (a) $850\text{ }^\circ\text{C}$, (b) $900\text{ }^\circ\text{C}$, and (c) $950\text{ }^\circ\text{C}$

微组织主要由等轴晶粒和部分细长晶粒组成,此时变形机制为动态回复。在图 8b 中,可以看出晶粒长大且等轴度增加,组织均匀性较高,此时已完全发生动态回复。在图 8c 中,随着温度进一步升高,显微组织由均匀且等轴的晶粒所组成,根据文献[25]这种组织拥有良好的力学性能和可加工性,此时的变形机制为动态再结晶。这样的可能原因:随着变形温度的升高,使得原子运动越剧烈,析出相重新固溶于基体,晶界析出物减少,促进位错运动以及晶界迁移,为晶粒的形核和长大提供动力^[26,27]。

通过对微观组织的观察,该变形区域组织状态良好,说明基于响应面法得到优化工艺参数的方法,可以运用于实际生产过程当中。

4 结 论

1) TA5 钛合金的流变应力具有负温度相关性和正应变速率敏感性,峰值应变随应变速率的增大而增大,流变曲线呈动态回复特征。

2) 通过响应面法,建立了工艺参数与 Q 、 $\ln Z$ 、 η 值之间的响应面函数,具有较高的预测精度,可用于预测和工艺参数优化分析。

3) 采用响应面法的多目标可视优化,得到优化后的工艺参数范围为 $850\sim 990\text{ }^{\circ}\text{C}/0.004\sim 0.15\text{ s}^{-1}$,其显微组织主要为等轴组织,组织均匀性较高,主要的变形机制为动态回复和动态再结晶。

参考文献 References

- [1] Xu Mingfang(许明方), Chen Yuhua(陈玉华), Chen Wei(陈 伟) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2020, 12(2): 93
- [2] Cao Y, Di H, Misra R D K et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 593(21): 111
- [3] He Shulin(何书林), Feng Yongqi(冯永琦), Wang Yongqiang(王永强) et al. *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2002, 38(S1): 204
- [4] Liu Xiaojun(刘小军), Chen Wei(陈 伟), Huang Zhijiang(黄志江) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2019, 11(3): 66
- [5] Zhou Yali(周亚利), Yang Qiuyue(杨秋月), Zhang Wenwei(张文玮) et al. *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2021, 49(1): 75
- [6] Gao Runzhe(高润哲), Lei Bufang(雷步芳), Zhang Xiangyu(张翔宇) et al. *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程)*[J], 2021, 28(4): 181
- [7] Li Wei(李 玮), Dai Haohao(戴浩浩), Yan Zewen(阎泽文) et al. *Journal of Yanshan University(燕山大学学报)*[J], 2021, 45(4): 328
- [8] Adarsh S H, Vedamanickam S. *Advanced Materials Research*[J], 2020, 4629: 1
- [9] Zygula K, Wojtaszek M, Lypchanskyi O et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2019, 50(11): 5314
- [10] Sun H M, Qi Y L, Liu W et al. *Materials Science Forum*[J], 2019, 944: 135
- [11] Li Ping, Ding Yonggen, Yao Pengpeng et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(5): 1019
- [12] Luo Jiao, Li Miaoquan, Li Hong et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2008, 18(8): 1395
- [13] Zhang Siyuan(张思远), Mao Xiaonan(毛小南), Qi Yunlian(戚运莲) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(4): 973
- [14] Wang Wei(王 伟), Gong Penghui(宫鹏辉), Zhang Haoze(张浩泽) et al. *Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报)*[J], 2020, 34(9): 665
- [15] Krauss G. *Deformation Processing and Structure*[M]. Ohio: ASM, 1984
- [16] Li Hongying, Liu Yang, Hu Xudong et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(2): 365
- [17] Yang Yanhui(杨艳慧), Liu Dong(刘 东), He Ziyang(贺子延) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2009, 38(6): 1019
- [18] Hamad A R, Abboud J H, Shuaeib F M et al. *Advances in Engineering Software*[J], 2010, 41: 674
- [19] Altarazi S, Hijazi L, Kaiser E. *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* [C]. Tehran, Iran: IEEE, 2016: 1041
- [20] Shimizu I. *Journal of Structural Geology*[J], 2008, 30(7): 899
- [21] Ren Shujie(任书杰). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018
- [22] Xiao Z B, Wang Q, Huang Y C et al. *Metals*[J], 2021, 11(2): 360
- [23] Opela P, Schindler I, Kawulok P et al. *Materials*[J], 2020, 13(16): 3480
- [24] Wang Z H, Fu W T, Wang B Z et al. *Materials Characterization*[J], 2009, 61(1): 25
- [25] Zhang Qi(张 琦), Li Liejun(李烈军), Li Songjun(李松军) et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2020, 41 (6): 160
- [26] Zhang Wei(张 伟), Yan Zhijie(闫志杰), Wang Rui(王 睿) et al. *Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2020, 56(12): 116
- [27] Li Shaoqiang(李少强), Gong Zhanpeng(弓站朋), Li Hui(李 辉) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)* [J], 2020, 49(9): 3045

Optimization of Process Parameters of TA5 Titanium Alloy Based on Response Surface Methodology

Wang Jun¹, Wang Kelu¹, Lu Shiqiang¹, Li Xin¹, Ouyang Deilai², Qiu Qian¹, Gao Xin¹, Zhang Kaiming¹

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Isothermal constant strain rate compression test of TA5 titanium alloy was carried out by Gleeble-3800 thermal simulator at temperature of 850~1050 °C, strain rate of 0.001~10 s⁻¹ and maximum deformation of 60%. According to the experimental data, the flow stress curve of TA5 titanium alloy was analyzed, and the material parameters (deformation activation energy, Z parameter and power dissipation coefficient) were calculated under different process parameters. In addition, the prediction model of process parameters and material parameters was established by response surface method. Finally, the optimized process parameters were obtained by multi-objective visualization optimization. The results show that the flow stress of TA5 titanium alloy has negative temperature correlation and positive strain rate sensitivity. The prediction model based on the response surface methodology has high accuracy, and the optimized machining parameters range is 850~990 °C/0.004~0.15 s⁻¹. The main deformation mechanisms of this region are dynamic recovery and dynamic recrystallization.

Key words: TA5 titanium alloy; flow stress curve; response surface methodology; process parameter optimization

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