

34CrNiMo6 钢的高温流变行为及热加工图

苟春梅, 董 静, 崔丹丹

(新疆交通职业技术学院 汽车工程学院, 新疆 乌鲁木齐 831401)

摘要: 研究了 34CrNiMo6 钢的高温流变特性, 并获得了其最佳热加工工艺窗口。首先, 使用 Gleeble-3500 热模拟实验机对 34CrNiMo6 钢在变形温度为 1173~1473 K、应变速率为 $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 条件下进行等温热压缩实验, 得到了不同应变速率和变形温度下的真实应力-真实应变曲线, 并用 Arrhenius 模型对材料本构关系进行多元非线性回归, 结果表明其回归精度较高。其次, 使用流变数据构建了 34CrNiMo6 钢的热加工图并进行分析, 考虑到所有应变情况, 34CrNiMo6 钢热加工工艺窗口应避免变形温度低于 1300 K、应变速率高于 0.05 s^{-1} 和变形温度高于 1400 K、应变速率高于 0.14 s^{-1} 的区域。最后, 金相分析表明: 34CrNiMo6 钢在应变速率敏感系数、能量耗散率及失稳判据较小的区域具有晶粒不均匀、晶界不规则的特点, 这是由于此时动态再结晶不完全; 而在应变速率敏感系数、能量耗散率及失稳判据较大的区域发生完全动态回复和动态再结晶, 组织比较均匀。

关键词: 34CrNiMo6 钢; 高温流变行为; Arrhenius 模型; 热加工图; 动态再结晶

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.030

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 02-0233-08

High temperature rheological behavior and thermal processing diagram for 34CrNiMo6 steel

Gou Chunmei, Dong Jing, Cui Dandan

(Institute of Automotive Engineering, Xinjiang Vocational and Technical College of Communications, Urumqi 831401, China)

Abstract: The high temperature rheological properties of 34CrNiMo6 steel was studied and the best thermal processing window was obtained. Firstly, the isothermal thermal compression test of 34CrNiMo6 steel was carried out by Gleeble-3500 thermal simulated test machine under the deformation temperature of 1173–1473 K and the strain rate of $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$, and the true stress-true strain curves under different strain rates and deformation temperatures were obtained. Then, the Arrhenius model was used to conduct multiple nonlinear regression on the constitutive relationship of the material, and the results show that the regression accuracy is high. Secondly, the thermal processing diagram of 34CrNiMo6 steel was constructed and analyzed by using the rheological data, and considering all strain conditions, the thermal processing window of 34CrNiMo6 steel should avoid the regions where the deformation temperature is lower than 1300 K and the strain rate is higher than 0.05 s^{-1} , and the deformation temperature is higher than 1400 K and the strain rate is higher than 0.14 s^{-1} . Finally, the metallographic analysis shows that 34CrNiMo6 steel has the characteristics of inhomogeneous grains and irregular grain boundaries in the region where the strain rate sensitivity coefficient, energy dissipation rate and instability criterion are small, which is due to incomplete dynamic recrystallization. However, complete dynamic recovery and dynamic recrystallization occur in the region where the strain rate sensitivity coefficient, energy dissipation rate and instability criterion are relatively large, and the microstructure is relatively uniform.

Key words: 34CrNiMo6 steel; high temperature rheological behavior; Arrhenius model; thermal processing diagram; dynamic recrystallization

34CrNiMo6 钢具有高强度、高硬度和高疲劳性能等特点, 被广泛应用于发动机曲轴、连杆和凸轮轴等承载部件^[1]。然而, 在室温下该材料的塑性较低、加工性差, 是一种典型的难加工材料^[2]。郭浩

等^[3]研究了热处理温度对 34CrNiMo6 钢组织性能和力学性能的影响, 研究表明: 经过 780 °C 油淬+450 °C 回火处理, 34CrNiMo6 钢具有最佳的强韧性组合。方琴等^[4]研究了淬火温度对 34CrNiMo6 钢微观组织、硬度及韧性的影响, 结果表明: 淬火温度低于 800 °C 时, 随着淬火温度的升高, 硬度逐渐升高; 当淬火温度高于 800 °C 时, 随着淬火温度的升高, 硬度略微降低。郑福胜^[5]分析了普通调质工艺和两相淬火调质工艺对 34CrNiMo6 钢微观组织和力学性

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-06-17

基金项目: 全国交通运输职业教育科研项目 (2019B57)

作者简介: 苟春梅 (1985-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: gcm8507@163.com

能的影响, 研究结果表明: 34CrNiMo6 钢的最佳正火温度为 870 ℃, 调质热处理后钢的微观组织为回火索氏体和弥散分布的细小碳化物。蔡红等^[6]研究了 34CrNiMo6 钢的热处理工艺, 研究表明: 34CrNiMo6 钢的较佳淬火工艺为 850 ℃油淬+680 ℃回火。张赞凯等^[7]通过等温热压缩实验获得了 34CrNiMo6 钢的高温流变曲线, 并使用流变曲线构建了该材料的热加工图, 金相分析表明, 平均晶粒尺寸随着温度的升高而逐渐变大, 随着应变速率的增大而降低, 但应变速率对平均晶粒尺的影响不显著。

由于 34CrNiMo6 钢在室温下的塑性较差, 其锻造成形工艺大多在高温下进行。然而, 当前国内学者对 34CrNiMo6 钢的研究较少, 且目前的研究重点放在 34CrNiMo6 钢的热处理工艺上, 对 34CrNiMo6 钢的高温性能、高温成形工艺研究较少。为了研究 34CrNiMo6 钢的高温流变特性并获得 34CrNiMo6 钢的最佳热加工工艺窗口, 首先, 使用 Gleeble-3500 热模拟实验机对 34CrNiMo6 钢在不同变形温度和应变速率下进行等温热压缩实验, 得到了真实应力-真实应变曲线, 并使用 Arrhenius 模型对材料本构关系进行逼近; 随后, 使用流变数据构建了 34CrNiMo6 钢的热加工图并分析了最佳热加工工艺参数区间; 最后, 通过金相分析验证了热加工图的合理性。

1 材料及其流变特性

1.1 原材料

34CrNiMo6 钢是一种典型的高强度中碳低合金调质钢, 广泛用于制造结构强度高、形状复杂的承载零部件^[8]。34CrNiMo6 中碳低合金钢的化学成分如表 1 所示, 该材料除 Fe 元素外, 含量最多的为 Cr、Ni、Mn、C、Mo 元素。常温下 34CrNiMo6 钢的抗拉强度为 1300 MPa、屈服强度为 1200 MPa、泊松比为 0.3。

表 1 34CrNiMo6 钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 34CrNiMo6 steel
(%, mass fraction)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
0.35	0.65	0.25	1.54	1.50	0.23	0.015	0.012	余量

1.2 热压缩实验

原材料的供货状态为调质状态, 将材料制备为

Φ8 mm×12 mm 的圆柱试样, 并使用砂纸将试样端面打磨光滑, 并涂抹润滑剂。样品在 Gleeble-3500 热模拟实验机上进行等温热压缩实验。热压缩变形温度 T 取值为: 1173、1223、1273、1323、1373、1423 和 1473 K, 热压缩应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 取值为: 0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹, 等温热压缩实验得到的真实应力-真实应变曲线如图 1 所示。

由图 1 可知, 该材料为应变速率敏感材料, 即当变形温度相同时, 应变速率越大, 变形抗力越大。这是因为: 当应变速率增大时, 变形速度增加, 位错增值和缠结的可能性更大, 位错来不及扩散而造成堆积, 造成材料的硬化效果更显著; 此外, 应变速率越大, 动态回复和动态再结晶的软化效果降低。几乎所有变形温度和应变速率下的真实应力-真实应变曲线均呈现出 3 个阶段: 上升阶段 (加工硬化主导阶段)、下降阶段 (软化主导阶段) 和平稳阶段 (硬化和软化平衡阶段), 这主要是加工硬化和动态回复、再结晶软化机制之间的主导地位变化导致的。

2 本构关系

2.1 Arrhenius 模型

根据相关研究^[9], 金属材料的高温流变关系可以用 Arrhenius 模型来近似, 其模型如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = A\sigma^{\alpha}\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma \leq 0.8 \\ \dot{\varepsilon} = A\exp(\beta\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma \geq 1.2 \\ \dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \text{所有 } \sigma \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 、 α 、 n 、 β 为材料常数, 为真实应变 ε 的函数; Q 为热变形激活能, (J·mol⁻¹), 为真实应变 ε 的函数; R 为气体常数, $R=8.314 \text{ J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$; σ 为材料的真实应力, MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为材料的应变速率, s⁻¹; T 为变形温度, K。

对式 (1) 中的第 3 个方程进行对数变换可得到式 (2)。

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - \frac{Q}{RT} \quad (2)$$

Arrhenius 模型表达了当真实应变一定时, 真实应力 σ 、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和变形温度 T 之间的非线性关系。目前, 文献 [10]~文献 [12] 对式 (1) 的求解大多是经过对数变换后, 使用不同变形温度和应

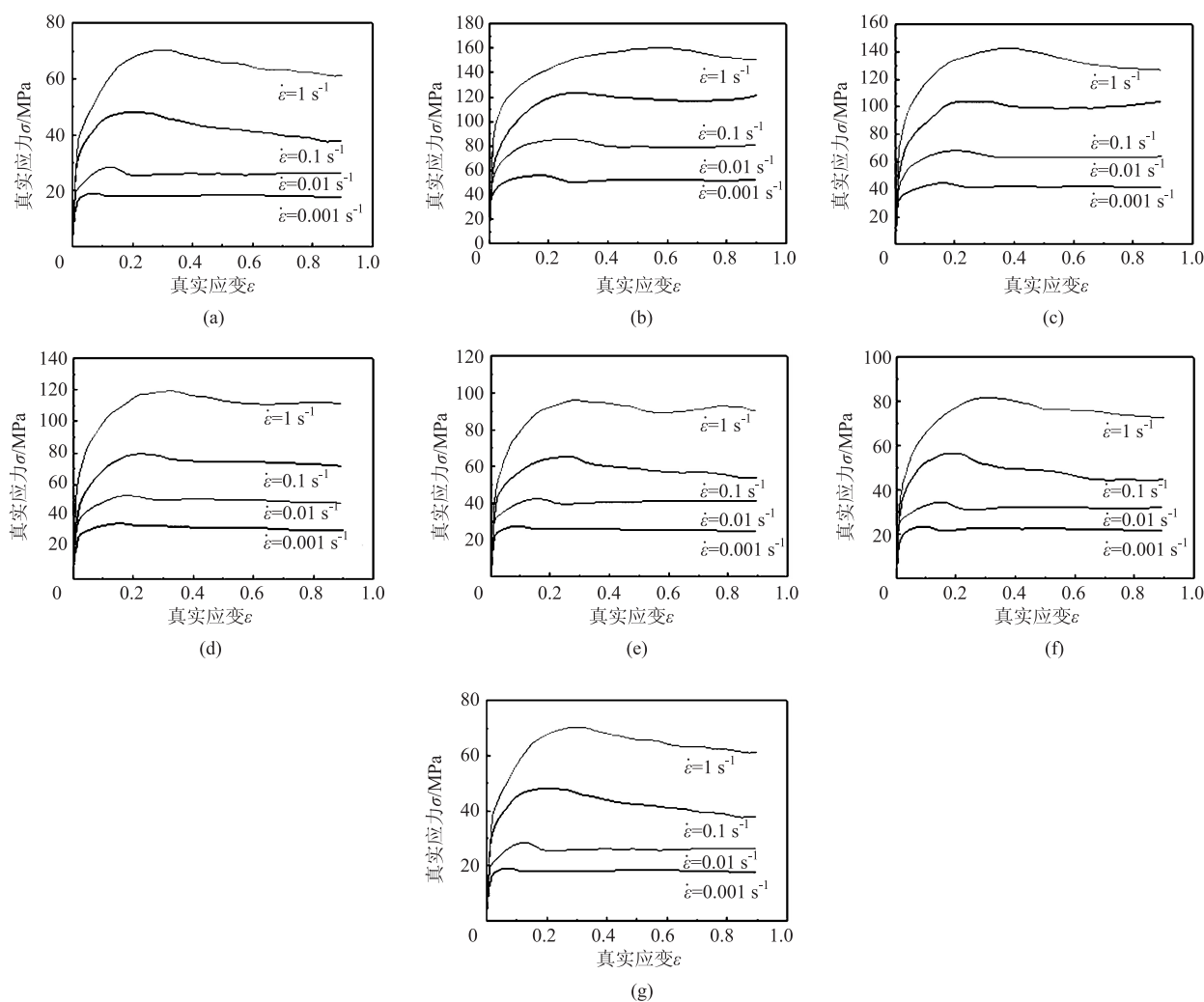


图1 不同变形温度和应变速率下的 34CrNiMo6 钢的真实应力-真实应变曲线

(a) $T=1173\text{ K}$ (b) $T=1223\text{ K}$ (c) $T=1273\text{ K}$ (d) $T=1323\text{ K}$ (e) $T=1373\text{ K}$ (f) $T=1423\text{ K}$ (g) $T=1473\text{ K}$

Fig. 1 True stress-true strain curves of 34CrNiMo6 steel at different deformation temperatures and strain rates

变速率下的峰值真实应力数据进行线性拟合, 并对不同变形温度和应变速率的拟合值求解算术平均值。首先, 这种固定某个量进行拟合后求平均的方法非全局最优方法, 存在一定的误差; 其次, 这样固定某个量进行线性回归的过程十分繁琐。为了简化计算流程, 且获得全局最优的材料参数, 使用基于最小二乘拟合的多元非线性回归算法求解式 (2) 中的各参数。将真实应变从 0.04~0.80 之间等分为 50 份, 计算每一个真实应变对应的变形温度、应变速率和真实应力共计 50 组数据, 其中每组数据对应 28 组子数据 (7 个变形温度和 4 个应变速率)。对于每个真实应变对应的 28 组子数据在 MATLAB 中使用 Nlinfit 函数进行多元非线性拟合, 得到每个真实应变下的 A 、 α 、 n 、 Q 数据。由于真实应变取值点为 50 个, 因此, 可以使用较高次数的多项式拟合材

料参数, 本文使用 11 次多项式分别拟合 A 、 α 、 n 、 Q 与真实应变 ε 的关系, 得到 Arrhenius 模型的表达式。

图 2 为 $\ln A$ 、 α 、 n 、 Q 与 ε 之间的 11 次多项式拟合结果, 其中实线为拟合曲线, 圆点为非线性回归方程式 (2) 得到的数据。可以发现, $\ln A$ 、 n 和 Q 随着 ε 的增加先减小后增加, α 随着 ε 的增加先增加后减小。拟合后各参数与 ε 之间的系数如表 2 所示。

4 个参数与真实应变之间的 11 次多项式拟合系数共计 44 个, 式 (1) 经过简化并导出真实应力的显示表达式, 即可得到如式 (3) 所示的本构方程。

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln(Z + \sqrt{Z^2 + 1}) \quad (3)$$

$$\text{式中: } Z = \left[\frac{1}{A} \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^{\frac{1}{n}}.$$

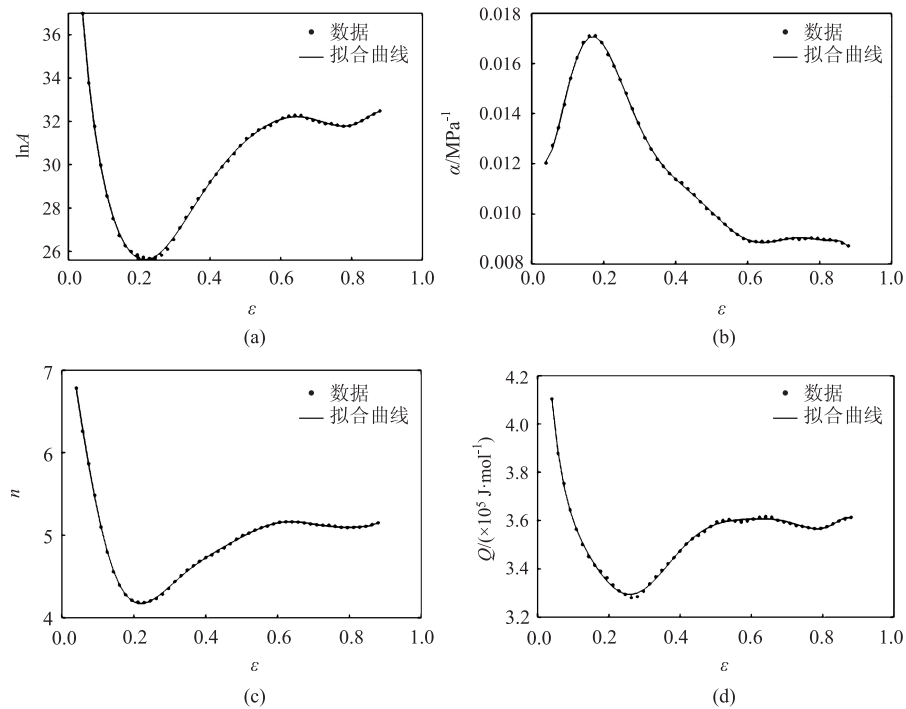


图 2 $\ln A$ 、 α 、 n 、 Q 与 ϵ 之间的关系曲线图
(a) $\ln A$ - ϵ (b) α - ϵ (c) n - ϵ (d) Q - ϵ
Fig. 2 Relationship curve diagrams between $\ln A$, α , n , Q and ϵ

表 2 $\ln A$ 、 α 、 n 、 Q 与 ϵ 之间的 11 次多项式拟合系数
Table 2 Eleven degree polynomial fitting coefficients between $\ln A$, α , n , Q and ϵ

系数	1	ϵ	ϵ^2	ϵ^3	ϵ^4	ϵ^5
$\ln A$	518555.8	-2580118	5530031	-6670794	4960203	-2335210
α	428.175	-2355.51	5583.904	-7440.72	6085.333	-3118.6
n	-38752.7	222941.8	-553211	774133	-669527	368163.7
Q	4.86×10^9	-2.5×10^{10}	5.6×10^{10}	-7×10^{10}	5.37×10^{10}	-2.6×10^{10}
系数	ϵ^6	ϵ^7	ϵ^8	ϵ^9	ϵ^{10}	ϵ^{11}
$\ln A$	683015.8	-112826	6111.719	1378.72	-315.885	47.22097
α	970.7858	-163.016	8.878913	0.818351	-0.05768	0.012831
n	-127167	26193.68	-2990.8	255.235	-40.8085	8.13719
Q	7.49×10^9	-1.2×10^9	38857653	15885335	-2676012	491528

将应变速率、变形温度和真实应变带入式 (3)，得到拟合后的预测值，并与实验曲线对比，如图 3 所示。由图 3 可知，在所有变形温度下，预测值与实验值均比较接近，这说明 Arrhenius 模型对该材料的拟合具有较好的精度。所有变形温度下，应变速率越低，模型的预测精度越高。

2.2 热加工图

由于 34CrNiMo6 钢属于典型的难加工材料，因此，构建其热加工图可以为材料的热加工工艺提供依据，进而达到控制材料组织演变的目的。热加工

图的概念最初由 Prasad Y V R K 等^[13]提出，根据能量守恒定律，金属变形时吸收的总能量 P 等于发生属性变形消耗的能量 G （大部分转化为热能、少部分以晶体缺陷能的形式存储）和微观组织演变消耗的能量 J 的总和，如式 (4) 所示。

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

将 G 和 J 的比值定义为应变速率敏感系数 m ，如式 (5) 所示。

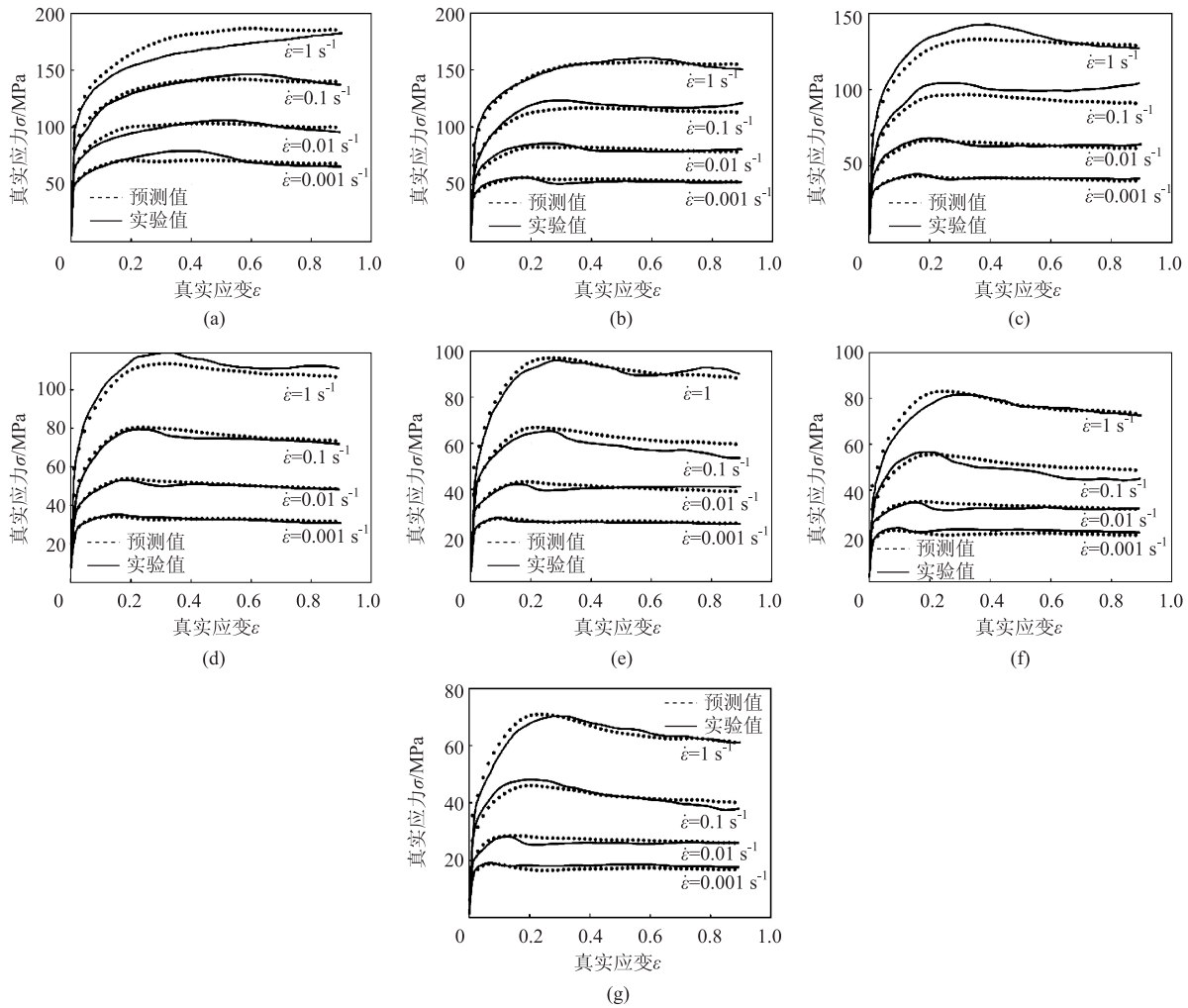


图3 Arrhenius模型预测值与实验值对比

(a) $T=1173\text{ K}$ (b) $T=1223\text{ K}$ (c) $T=1273\text{ K}$ (d) $T=1323\text{ K}$ (e) $T=1373\text{ K}$ (f) $T=1423\text{ K}$ (g) $T=1473\text{ K}$

Fig. 3 Comparison between predicted values of Arrhenius model and experimental values

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\epsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\epsilon}} = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} \quad (5)$$

金属处于非线性能量耗散时, 可以引入能量耗散率 η 来表征组织演变消耗能量的比例。通常能量耗散率越大, 组织演变耗能量越大, 组织形态变化越大, 热加工性能越好。根据文献 [14] 可知, η 定义为:

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

根据文献 [15] 可知, 金属材料热加工时是否发生失稳可以用失稳判据 ξ 来表征, 其定义如式 (7) 所示。

$$\xi = \frac{\partial \ln \left(\frac{m}{m+1} \right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m \quad (7)$$

为了得到 34CrNiMo6 钢的 m 、 η 、 ξ 二维云图,

首先需要将真实应变固定, 计算每个变形温度对应的 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 数据, 并用 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 离散数据的差商替代微商, 进而得到变形温度、应变速率和 m 之间的关系。在得到 m 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 之间的离散数据后, 很容易构建 $\ln \left(\frac{m}{m+1} \right)$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 之间的离散数据, 相似的用差商代替微商即可得到 ξ 的数据。上述参量, 除了使用离散数据计算外, 还可以使用 Arrhenius 模型计算。

如图 4 所示, 真实应变相同时, 材料的应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 具有相似的分佈规律, 说明这 3 个参数均能从一定程度上反应材料变形时微观组织演变能量与转化为热量的比值, 即反应材料热加工时的稳定性。当真实应变小于 0.1 时, 在变形温度高于 1400 K、应变速率高于 0.14 s^{-1} 和变形温度低于 1250 K、应变速率高于 0.05 s^{-1} 的区域, 材料发生失稳的风险均较大;

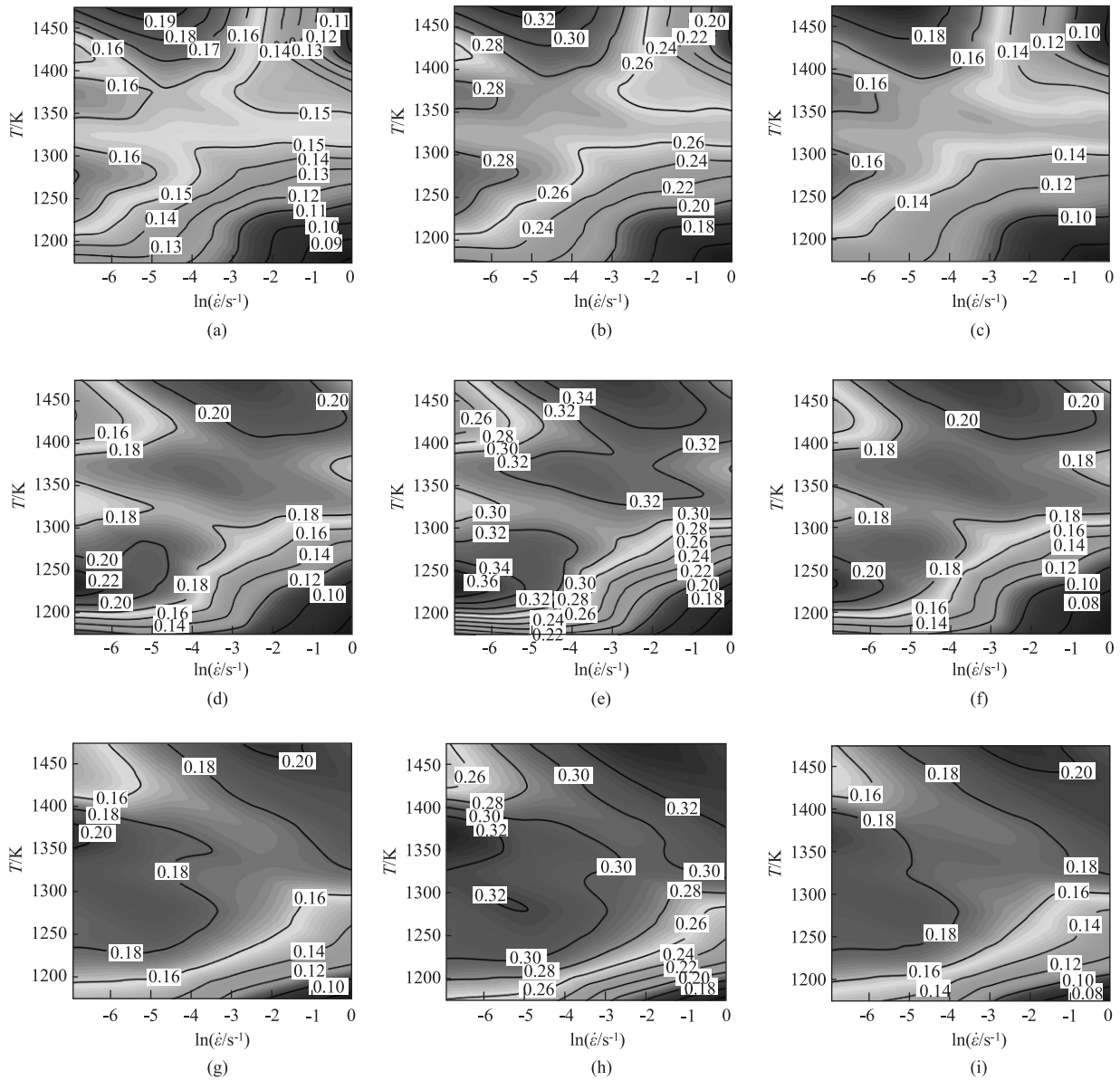


图 4 不同真实应变下的应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 图

(a) $\varepsilon=0.1$, m (b) $\varepsilon=0.1$, η (c) $\varepsilon=0.1$, ξ (d) $\varepsilon=0.3$, m
(e) $\varepsilon=0.3$, η (f) $\varepsilon=0.3$, ξ (g) $\varepsilon=0.5$, m (h) $\varepsilon=0.5$, η (i) $\varepsilon=0.5$, ξ

Fig. 4 Strain rate sensitivity coefficient m , energy dissipation rate η and instability criterion ξ diagrams at different true strains

当真实应变大于 0.3 时, 在变形温度低于 1200 K、应变速率高于 0.05 s^{-1} 的区域, 材料发生失稳的风险较大。总体而言, 真实应变对应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 的影响较小。

在实际锻造工艺中, 金属的真实应变、变形温度和应变速率随着时间的变化而变化, 因此, 为了确定任意真实应变下均安全的热加工区域, 需要将不同真实应变对应的能量耗散率 η 大于 0.2 的区域进行叠加, 进而确定材料在不同真实应变情况下均安全加工的区域。如图 5 所示, 考虑到所有真实应

变情况, 34CrNiMo6 钢热加工工艺窗口应避免变形温度低于 1300 K、应变速率高于 0.05 s^{-1} 和变形温度高于 1400 K、应变速率高于 0.14 s^{-1} 的区域 (白色区域), 即可以保证在不同的真实应变下, 材料均可以安全稳定的加工。

3 微观组织分析

为了分析不同条件下热压缩 64% 时得到的微观组织的差异, 选取不同的应变速率和变形温度组合

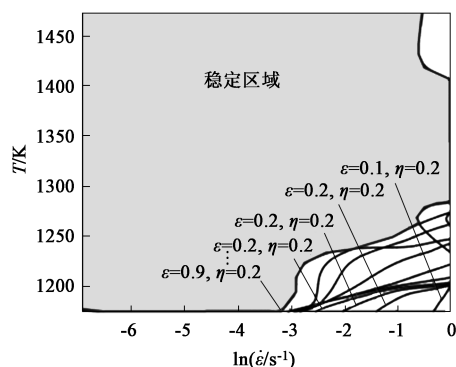


图5 不同真实应变下叠加的稳定加工区域

Fig. 5 Stable processing region superimposed under different true strains

进行等温热压缩, 压缩完成后放入水中冷却, 以保留热压缩时的组织。不同的压缩试样的微观组织如图6所示。

图6a、图6b和图6c的实验参数位于应变速率

敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 较大的区域, 图6d、图6e和图6f的实验参数位于应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 较小的区域。图6d、图6e和图6f的金相呈现出晶粒不均匀、晶界不规则的特点, 这是由于处于这些区域的金属的微观组织转变的能量比例小, 材料首先在易于形核的晶界区域部分形核和长大, 而大晶粒几乎不发生变化, 动态再结晶不完全, 进而变形结束后微观组织不均匀。图6a、图6b和图6c的金相组织相对比较均匀, 这是由于这些区域的材料发生动态回复和动态再结晶能量比例大, 发生动态回复和动态再结晶完全, 进而导致晶粒比较均匀。对比图6a、图6b和图6c, 当变形温度为1373 K时, $\dot{\epsilon}$ 越大, η 越小, 其晶粒平均尺寸越小, 这是由于这些区域的动态再结晶更完全, 晶粒不断被再结晶细化。一般来说, 处于 η 较大区域的材料表现出更好的热加工性能。

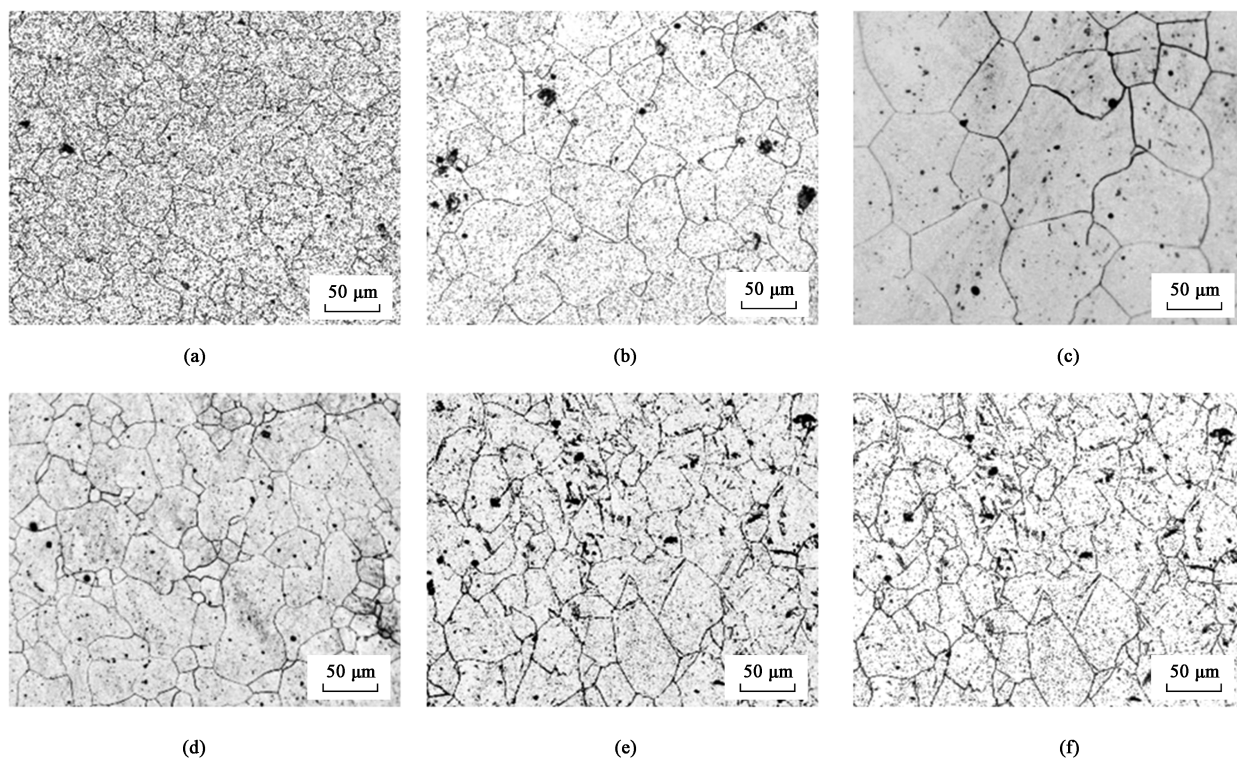


图6 不同热压缩条件下的微观组织

(a) $T=1373\text{ K}, \dot{\epsilon}=0.001\text{ s}^{-1}$ (b) $T=1373\text{ K}, \dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ (c) $T=1373\text{ K}, \dot{\epsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$ (d) $T=1173\text{ K}, \dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$
(e) $T=1173\text{ K}, \dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ (f) $T=1223\text{ K}, \dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$

Fig. 6 Microstructures under different thermal compression conditions

4 结论

(1) 使用 Gleeble-3500 热模拟实验机对 34CrNiMo6 钢在变形温度为 1173~1473 K、应变速

率为 $0.001\sim 1\text{ s}^{-1}$ 条件下进行等温压缩实验, 得到了不同应变速率和变形温度下的真实应力-真实应变曲线。使用 Arrhenius 模型对该材料本构关系进行多元非线性拟合, 并构建了 $\ln A$ 、 α 、 n 、 Q 与 ϵ 之

间的 11 次多项式。多元非线性回归结果表明, 该模型对 34CrNiMo6 钢的本构关系逼近精度较高。

(2) 构建了 34CrNiMo6 钢在不同真实应变下的热加工图。结果表明: 在真实应变较低的情况下, 该材料在高温高应变速率区域和低温高应变速率区域时, 发生失稳的风险较大; 在真实应变较高的情况下, 该材料最有可能发生失稳的区域位于低温、高应变速率区域, 且易发生失稳的区域面积较小。总体而言, 真实应变对应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 的影响较小。

(3) 金相分析表明, 变形温度和应变速率位于应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 较小区域的金相呈现出晶粒不均匀、晶界不规则的特点, 这是由于处于这些区域的金属的微观组织转变的能量比例小, 材料首先在易于形核的晶界区域部分形核和长大, 而大晶粒几乎不发生变化, 动态再结晶不完全, 进而变形结束后金相组织不均匀。变形温度和应变速率位于应变速率敏感系数 m 、能量耗散率 η 及失稳判据 ξ 较大的区域时, 金相组织相对比较均匀, 这是由于这些区域的材料发生动态回复和动态再结晶能量比例大, 发生动态回复和动态再结晶完全, 进而导致晶粒比较均匀。

参考文献:

- [1] 侯政良, 王柱飞, 张雪冬, 等. 热处理工艺对 34CrNiMo6 钢性能的影响研究 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (6): 38-42.
Hou Z L, Wang Z F, Zhang X D, et al. Effects of heat treatment on performance of 34CrNiMo6 steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (6): 38-42.
- [2] 康凤, 杨鄂川, 林军, 等. 曲轴用 34CrNiMo6 高强结构钢的热变形行为研究 [J]. 材料导报, 2013, 27 (4): 49-51, 55.
Kang F, Yang E C, Lin J, et al. Study on hot deformation behavior of high strength construction steel 34CrNiMo6 for crankshafts [J]. Materials Review, 2013, 27 (4): 49-51, 55.
- [3] 郭浩, 尚勇, 魏金. 热处理温度对 34CrNiMo6 钢组织与力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (24): 170-173.
Guo H, Shang Y, Wei J. Effects of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of 34CrNiMo6 steel [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (24): 170-173.
- [4] 方琴, 陈庚, 吴永波, 等. 热处理对 34CrNiMo6 钢组织和力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (8): 1866-1867, 1871.
Fang Q, Chen G, Wu Y B, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 34CrNiMo6 steel [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (8): 1866-1867, 1871.
- [5] 郑福胜. 热处理工艺对 34CrNiMo6 组织性能的影响 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
Zheng F S. Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of 34CrNiMo6 [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [6] 蔡红, 叶俭, 王丽莲, 等. 高铁车轴用 34CrNiMo6 钢的热处理工艺 [J]. 金属热处理, 2012, 37 (4): 95-98.
Cai H, Ye J, Wang L L, et al. Heat treatment process of 34CrNiMo6 steel for high-speed railway axle [J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37 (4): 95-98.
- [7] 张赞凯, 杜诗文. 34CrNiMo6 钢的热变形行为及热加工图研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56 (3): 97-105.
Zhang Y K, Du S W. Research on the hot deformation behavior and hot working map of 34CrNiMo6 steel [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56 (3): 97-105.
- [8] 胡丰泽, 张波, 马茂, 等. 舰船柴油机用 34CrNiMo6 钢工艺性能的研究 [J]. 机械管理开发, 2011, (3): 12-13, 15.
Hu F Z, Zhang B, Ma M, et al. Research on 34CrNiMo6 processing property used for naval vessel engines [J]. Mechanical Management and Development, 2011, (3): 12-13, 15.
- [9] 尹小燕, 刘兴凯, 丁宏翔, 等. HN55-7-4-2 合金高温本构模型修正及变形激活能演化规律 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 221-228.
Yin X Y, Liu X K, Ding H X, et al. High temperature constitutive model modification and evolution law of deformation activation energy for HN55-7-4-2 alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 221-228.
- [10] 陈园园, 李永堂, 庞晓龙, 等. 考虑应变补偿的铸态 42CrMo 钢本构模型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 246-252.
Chen Y Y, Li Y T, Pang X L, et al. Constitutive model of as-cast 42CrMo steel based on strain compensation [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 246-252.
- [11] 王天祥, 鲁世强, 王克鲁, 等. Ti60 合金的流动应力行为及本构关系 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 271-279.
Wang T X, Lu S Q, Wang K L, et al. Flow stress behavior and constitutive relationship of Ti60 alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 271-279.
- [12] 张龙, 王东城, 马晓宝, 等. 30Cr2Ni2Mo 合金钢高温流变应力模型 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (4): 144-149, 172.
Zhang L, Wang D C, Ma X B, et al. Flow stress model of alloy steel 30Cr2Ni2Mo at high temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (4): 144-149, 172.
- [13] Prasad Y V R K, 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.
- [14] 权国政, 温海荣, 梁建婷, 等. TB6 钛合金热变形行为及加工图 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36 (4): 25-33.
Quan G Z, Wen H R, Liang J T, et al. Hot deformation behavior and processing maps of TB6 titanium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36 (4): 25-33.
- [15] Narayana M S V S, Nageswara R B, 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.