

装备防护

合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型

曾梓熙^{1a,1b}, 李卫国^{1a,1b*}, 麻建坐²

(1.重庆大学 a.航空航天学院 b.煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2.重庆工业职业技术学院 机械工程学院, 重庆 401120)

摘要: 目的 合金钢通常具有高强度和高硬度, 可应用于防护材料。以高强度钢等合金钢为研究对象, 定量表征其在宽温域下的动态再结晶稳态应力。方法 基于 Li 能量等效原理, 从位错的增值与湮灭角度出发, 通过考虑位错能与热能对材料达到稳态流动阶段贡献等效的角度建立无拟合参数的合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型。结果 模型预测结果与获取的 5 组动态再结晶稳态应力实验结果具有良好的一致性, 与实验结果最大误差为 1.9%, 实现了对合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力的合理预测。通过分析弹性模量和屈服强度对动态再结晶稳态应力的定量影响及其随温度的演化, 发现在一定温域内, 提高屈服强度和弹性模量均会提升合金钢的稳态应力。结论 该工作为定量评价合金钢在宽温域下的动态再结晶稳态应力提供一种有效的方法, 为建立宽温域力热耦合本构关系提供理论基础。

关键词: 动态再结晶; 稳态应力; 温度相关性; 合金钢; Li 能量等效原理

中图分类号: TB484.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2025)09-0260-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.030

Theoretical Characterization Model of Temperature-dependent Steady-state Stress for Dynamic Recrystallization in Alloy Steel

ZENG Zixi^{1a,1b}, LI Weiguo^{1a,1b*}, MA Jianzuo²

(1.a. College of Aerospace Engineering, b. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

ABSTRACT: Alloy steel usually has high strength and hardness and can be used as protective materials. The work aims to quantitatively study the dynamic recrystallization stress of alloy steel such as high-strength steel in a wide temperature range. Based on the Li's principle of energy equivalence, a theoretical characterization model for the temperature-dependent dynamic recrystallization of alloy steel without fitting parameters was established by considering the equivalent contribution of dislocation energy and thermal energy to the steady-state flow of the material from the perspective of growth and annihilation of dislocation. The results predicted by the model were in good agreement with the experimental results obtained from 5 groups of dynamic recrystallization steady-state stress, and the maximum error was 1.9%, which realized the reasonable prediction of the dynamic recrystallization steady-state stress of alloy steel. By analyzing the quantitative effects of elastic modulus and yield strength on the steady-state stress of dynamic recrystallization and its evolution with temperature, it was found that the steady-state stress of alloy steel could be increased by increasing the yield strength and elastic modulus within a certain

收稿日期: 2025-03-07

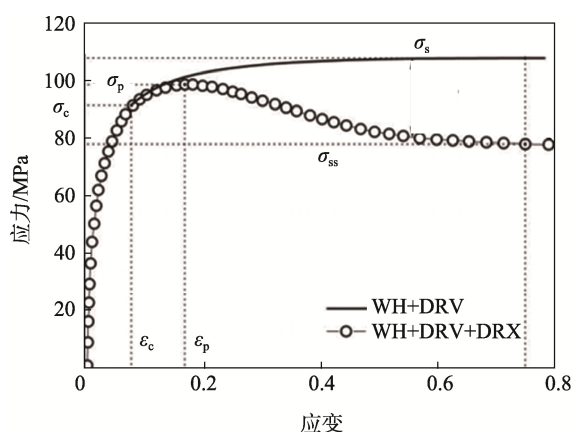
基金项目: 中央高校基金 (2024IAIS-ZD008); 国家自然科学基金面上项目 (12272073)

*通信作者

temperature range. This work provides an effective method for quantitative evaluation of dynamic recrystallization steady-state stress of alloy steel in a wide temperature range, and provides a theoretical basis for establishing the force-thermal coupling constitutive relationship in a wide temperature range.

KEY WORDS: dynamic recrystallization; steady-state stress; temperature-dependent; alloy steel; Li's principle of energy equivalence

合金钢被广泛应用于航空、航天、核能、冶金等高新技术领域,因其具有高强度、高硬度等特性,常被用于结构防护材料^[1-2]。高温环境是合金钢在服役过程中常面临的极端环境之一^[3],高温下合金钢容易发生应变硬化、动态回复和动态再结晶,显著影响材料的高温力学性能,进而影响防护结构的稳定性^[4-6]。某些合金钢如镁合金,仅通过动态回复就可以平衡应变硬化^[7-9];部分合金钢如变形抗力较高的奥氏体钢等,在高温环境中会发生动态再结晶,此时可通过动态回复和动态再结晶平衡应变硬化带来的位错增值,进而达到稳态流动阶段。动态再结晶是指在变形过程中,位错密度达到临界值时,材料通过晶粒结晶的方式消除过量的位错和内应力,使晶粒细化,变形抗力降低,并优化组织,消除缺陷,提高构件的力学性能^[10-13]。如图 1^[14]所示,当动态再结晶发生时,流动曲线上升趋势明显变缓,材料达到峰值应力 σ_p 后应力下降,直至达到一个稳定状态,该阶段被称为稳态流动阶段,此时对应的应力值为稳态应力 σ_{ss} 。动态再结晶稳态应力是反映合金钢动态再结晶过程的重要参数,对温度十分敏感。科学表征温度对合金钢动态再结晶稳态应力的影响,并建立合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型,对此类材料高温力学性能的评价和监测具有重要的科学意义和工程应用价值。



注: WH 表示加工硬化; DRV 表示动态恢复; DRX 表示动态再结晶。

图 1 金属材料压缩曲线示意^[14]

Fig.1 Diagram for compression curve of metal material^[14]

目前,学者们对合金钢在宽温域下动态再结晶稳态应力进行了大量研究。Wu 等对 Mn-Cu-V 耐候钢在

MMS-300 机器上进行不同温度的压缩试验,并通过分析应力应变曲线,测定该材料在不同温度下的动态再结晶稳态应力值,发现随着温度升高,动态再结晶稳态应力呈现显著的下降趋势。Ebrahimi 等对 13%Cr 马氏体不锈钢在 Zwick/Roell 250 试验机上进行不同温度下的压缩试验,依据应力-应变曲线得出与 Wu 等一致的结论,即动态再结晶稳态应力随温度升高而降低。

大多理论研究以 Z 参数的形式对实验数据进行拟合,从而得到不同温度下的动态再结晶稳态应力^[15-19]。

Z 参数的表达式为 $Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$, 稳态应力与 Z 参

数的关系式为 $\sigma_{ss} = AZ^n$, 其中 A 、 n 均为拟合参数,在表征 Z 参数过程中包含多个拟合参数。 Z 参数的引入为动态再结晶稳态应力在不同温度下的表征提供了一种有效方法,但是由于该方法包含多个拟合参数,外延能力差,导致使用中需要开展大量的宽温域实验,不便于工程应用,亟需建立无拟合参数的合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力模型。

1 模型建立

合金钢动态再结晶的发生取决于变形金属的位错积累^[20]。热变形过程中,合金钢会发生应变硬化,同时伴随动态回复。如果动态回复造成材料位错湮灭的速率低于应变硬化导致位错增值的速率,则位错密度持续增加,促使动态再结晶发生。动态再结晶后,位错增值系数依然大于位错湮灭系数,位错密度继续增加,直至达到第 1 次平衡,此时的应力值为峰值应力。此后的位错湮灭速率高于位错增值速率,位错密度减小,应力值降低,应变硬化、动态回复和动态再结晶 3 种机制再次达到平衡,此时材料的位错密度趋于稳定,应力值达到稳态应力,进入稳态流动阶段。随着变形温度的升高,材料更易发生位错运动,从而加速动态再结晶的进程,材料更容易进入稳态流动阶段。根据上述事实,基于 Li 能量等效原理,合金钢储存的热能和位错能之间存在一种等效关系。不同温度下,当变形体单位体积储存的热能及与之等效的位错能之和达到定值时,材料进入稳态流动阶段,数学表达式见式 (1)。

$$W_{\text{Total}} = W_p(T) + kW_T(T) \quad (1)$$

式中: W_{Total} 为单位体积合金钢达到稳态流动阶段时对应的固定不变的能量值; $W_p(T)$ 为单位体积材

料在温度 T 下储存的热能; $W_p(T)$ 为单位体积材料在温度 T 下达到稳态流动阶段时对应的位错能; k 为热能与位错能之间的等效系数, 推导过程中可消除。

温度达到材料熔点 T_m 时, 材料可失去承载能力, 此时单位体积合金钢对应的固定不变的能量的计算见式 (2)。

$$W_{\text{Total}} = kW_T(T_m) \quad (2)$$

对于任意一个参考温度 T_0 , 单位体积合金钢达到稳态流动阶段时对应的固定不变的能量的计算见式 (3)。

$$W_{\text{Total}} = W_p(T_0) + kW_T(T_0) \quad (3)$$

联立式 (2) ~ (3), 可将 k 表示为式 (4)。

$$k = \frac{W_p(T_0)}{W_T(T_m) - W_T(T_0)} \quad (4)$$

单位体积合金钢在温度 T 下储存的热能的计算见式 (5) [21]。

$$W_T(T) = \int_0^T \rho_p(T) c_p(T) dT \quad (5)$$

式中: $\rho_p(T)$ 为合金钢温度相关性密度; $c_p(T)$ 为温度相关性定压比热容。

单位体积合金钢在温度 T 下对应的位错能的计算见式 (6) [23]。

$$W_p(T) = \frac{1}{2} G(T) b^2 \rho(T) \quad (6)$$

式中: b 为柏氏矢量; $G(T)$ 为温度相关性剪切模量; $\rho(T)$ 为温度相关性位错密度。

根据位错理论, 流动应力与位错密度间的关系 [24] 见式 (7) ~ (8)。

$$\sigma_p(T) = M \beta G(T) b \sqrt{\rho(T)} \quad (7)$$

$$\sigma(T) = \sigma_y(T) + \sigma_p(T) \quad (8)$$

式中: M 为泰勒因子; β 为材料常数; $\sigma_y(T)$ 为温度相关性屈服强度; $\sigma_p(T)$ 为流动应力的塑性部分。

联立式 (6) ~ (8), 可将单位体积合金钢在温度 T 下对应的位错能表示为式 (9)。

$$W_p(T) = \frac{[\sigma(T) - \sigma_y(T)]^2}{2M^2 \beta^2 G(T)} \quad (9)$$

当 $\sigma(T) = \sigma_{ss}(T)$ 时, 单位体积合金钢在温度 T 下的位错能可表示为式 (10)。

$$W_p(T) = \frac{[\sigma_{ss}(T) - \sigma_y(T)]^2}{2M^2 \beta^2 G(T)} \quad (10)$$

结合式 (1)、式 (3)、式 (4)、式 (10) 可得式 (11)。

$$\sigma_{ss}(T) = \sqrt{\frac{G(T) \int_{T_0}^{T_m} \rho_p(T) C_p(T) dT}{G(T_0) \int_{T_0}^{T_m} \rho_p(T) C_p(T) dT}} [\sigma_{ss}(T_0) - \sigma_y(T_0)] + \sigma_y(T) \quad (11)$$

式中: $\sigma_{ss}(T)$ 、 $\sigma_{ss}(T_0)$ 分别为任意温度 T 、任意参考温度 T_0 下的合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力; $\sigma_y(T)$ 、 $\sigma_y(T_0)$ 分别为任意温度 T 、任意参考温度 T_0 下的合金钢的屈服强度; $G(T)$ 、 $G(T_0)$ 分别为任意温度 T 、任意参考温度 T_0 下的合金钢的剪切模量。

研究发现 [25-26], 在一定温度范围内, 合金钢泊松比和密度对温度不敏感, 因此式 (11) 可改写为式 (12)。

$$\sigma_{ss}(T) = \sqrt{\frac{E(T) \int_{T_0}^{T_m} C_p(T) dT}{E(T_0) \int_{T_0}^{T_m} C_p(T) dT}} [\sigma_{ss}(T_0) - \sigma_y(T_0)] + \sigma_y(T) \quad (12)$$

式中: $E(T)$ 、 $E(T_0)$ 分别为合金钢在任意温度 T 和任意参考温度 T_0 下的弹性模量。

由于合金钢的比热容难以获取且计算复杂, 因此根据课题组前期工作 [27-28], 通过原子动能、势能和位错能的等效对模型进行简化, 可得不包含比热容的金属温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型, 见式 (13)。

$$\sigma_{ss}(T) = [\sigma_{ss}(T_0) - \sigma_y(T_0)] \left[\frac{E(T)}{E(T_0)} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \right]^{0.5} + \sigma_y(T) \quad (13)$$

2 模型验证与讨论

2.1 模型验证

比较合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型的预测值与实验值, 验证模型的可靠性。计算所需的所有参数均来源于文献和材料手册, 具体数值以表格形式给出。需要注意, 随着温度的升高, 实验难度随之增加, 更难获得实验数据, 因此选择文献中获取的最低实验温度作为验证过程的参考温度。模型通过材料熔点、参考温度下的动态再结晶稳态应力和不同温度下的弹性模量、屈服强度来预测任意温度下的动态再结晶稳态应力。

2.1.1 Mn-Cu-V 耐候钢

Wu 等 [29] 对 Mn-Cu-V 耐候钢在 MMS-300 机器上进行不同温度、不同应变率下的压缩试验, 其中压缩试件的直径为 10 mm, 高为 15 mm。首先将试件加热至 1 473 K, 保温 3 min 以消除温度梯度, 然后以 10 K/s 的速度冷却至规定温度, 并压缩至 80% 的固定真实应变。压缩试验温度分别为 1 173、1 223、1 273、1 323 K, 压缩试验应变率分别为 0.1、1、5 s⁻¹。弹性模量从合金钢压缩过程的应力-应变曲线 (图 2) 中获取, 并以塑性应变为 0.2% 时的应力值为屈服强度。Mn-Cu-V 耐候钢的熔点通常为 1 673~1 793 K, 本研究采用的

熔点为 1 673 K。模型计算涉及的材料参数如表 1 所示,合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型预测结果与实验结果对比如图 3 所示,可见模型预测结果与实验结果具有良好的一致性。

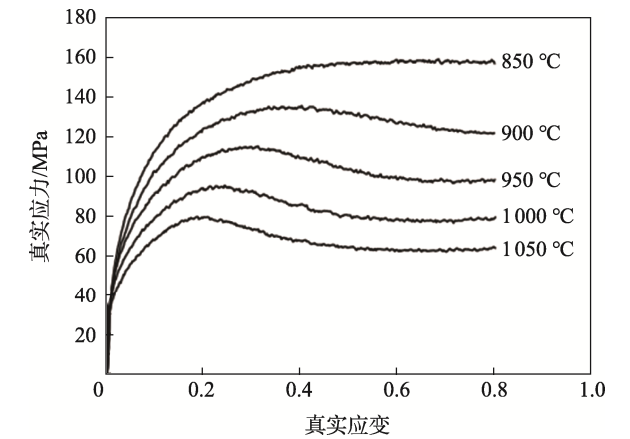


图 2 Mn-Cu-V 耐候钢在 0.1 s⁻¹ 应变率下的应力-应变曲线^[29]
Fig.2 Stress-strain curve of Mn-Cu-V weathering steel at 0.1 s⁻¹ strain rate^[29]

表 1 0.1 s⁻¹ 应变率下用于 Mn-Cu-V 耐候钢温度相关性动态再结晶稳态应力预测的材料参数

Tab.1 Material parameters for predicting temperature-dependent dynamic recrystallization stress of Mn-Cu-V weathering steel at 0.1 s ⁻¹ strain rate					
<i>T</i> /K	<i>E</i> (<i>T</i>)/MPa	σ_y (<i>T</i>)/MPa	σ_{ss} (<i>T</i> ₀)/MPa	<i>T</i> _m /K	<i>T</i> ₀ /K
1 173	1 023	94.3			
1 223	826	81.1			
1 273	626	67.8	121	1 673	1 173
1 323	451	70.7			

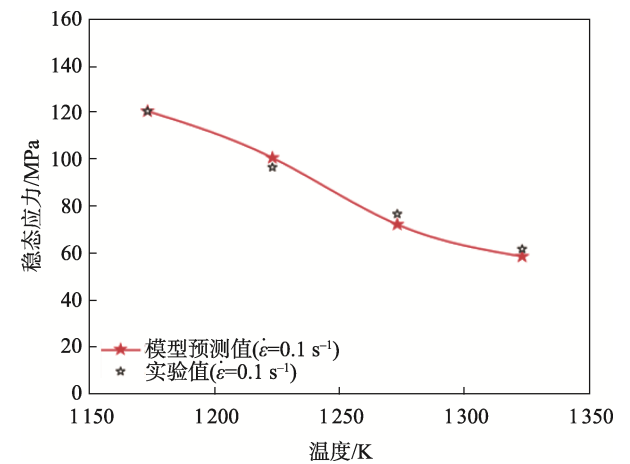


图 3 0.1 s⁻¹ 应变率下 Mn-Cu-V 耐候钢的预测值与实验值比较
Fig.3 Comparison between predicted values and experimental values in Mn-Cu-V weathering steel at 0.1 s⁻¹ strain rate

2.1.2 13%Cr 马氏体不锈钢

Ebrahimi 等^[30]对 13%Cr 马氏体不锈钢在 Zwick/Roell 250 试验机上进行不同温度、不同应变率的压缩试验,其中压缩试件为直径 8 mm、高 12 mm 的圆柱体。测试前,将试件加热至 1 200 K,保持 5 min,然后冷却至测试温度。压缩试验温度分别为 1 223、1 273、1 323、1 373 K,压缩试验应变率分别为 0.001、0.01、0.1 s⁻¹。弹性模量从合金钢压缩过程的应力-应变曲线(图 4)中获取,并以塑性应变为 0.2%时的应力值为屈服强度。13%Cr 马氏体不锈钢熔点为 1 673~1 723 K,本研究采用的熔点为 1 673 K。模型通过不同应变率下的弹性模量和屈服强度间

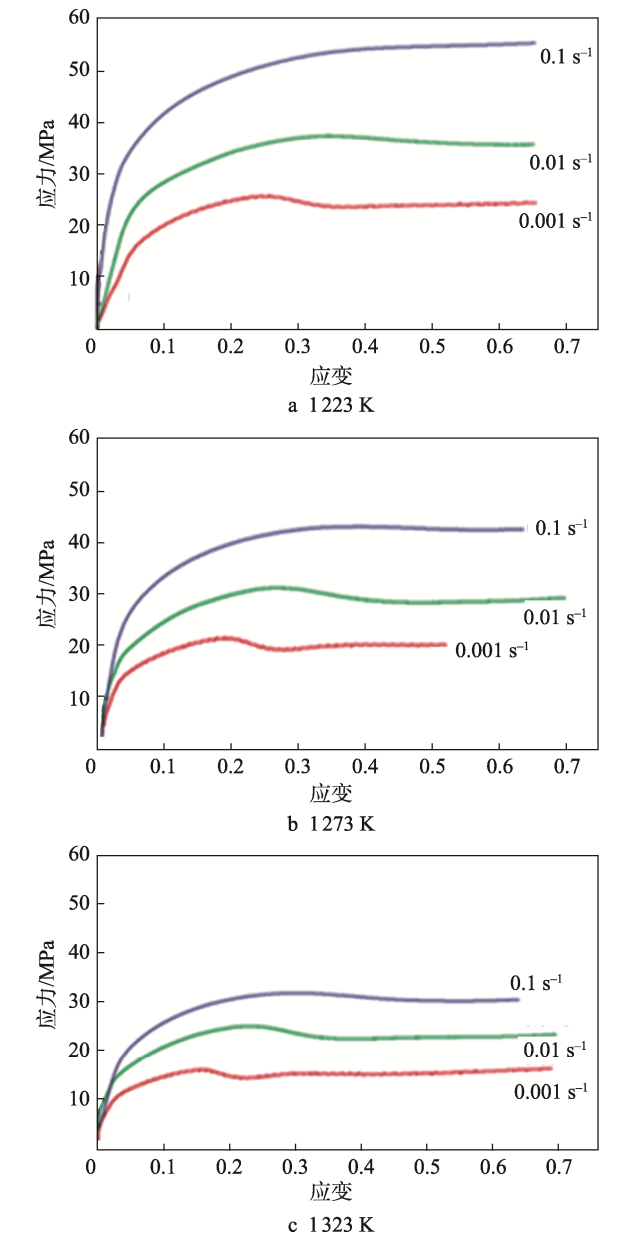


图 4 13%Cr 马氏体不锈钢在不同温度下的应力-应变曲线^[30]
Fig.4 Stress-strain curve of 13%Cr martensitic stainless at various strain rates^[30]

接考虑应变率对合金钢动态再结晶稳态应力的影响,计算涉及的材料参数如表 2 所示,合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型预测结果与实验结果对比如图 5 所示,可见模型预测结果和实验结果具有良好的一致性。

表 2 用于 13%Cr 马氏体不锈钢温度相关性动态再结晶稳态应力预测的材料参数

Tab.2 Material parameters for predicting steady-state stress in temperature-dependent dynamic recrystallization of 13%Cr martensitic stainless steel				
应变率/ s^{-1}	参数	1 223 K	1 273 K	1 323 K
0.1	$E(T)/MPa$	858	1 178	764
	$\sigma_y(T)/MPa$	26	22	20
	$\sigma_{ss}(T_0)/MPa$	—	55	—
0.01	$E(T)/MPa$	377	504	718
	$\sigma_y(T)/MPa$	28	22	15
	$\sigma_{ss}(T_0)/MPa$	—	36	—
0.001	$E(T)/MPa$	525	362	407
	$\sigma_y(T)/MPa$	21	17	14
	$\sigma_{ss}(T_0)/MPa$	—	24	—
	T_m/K	—	1 673	—
	T_0/K	—	1 273	—

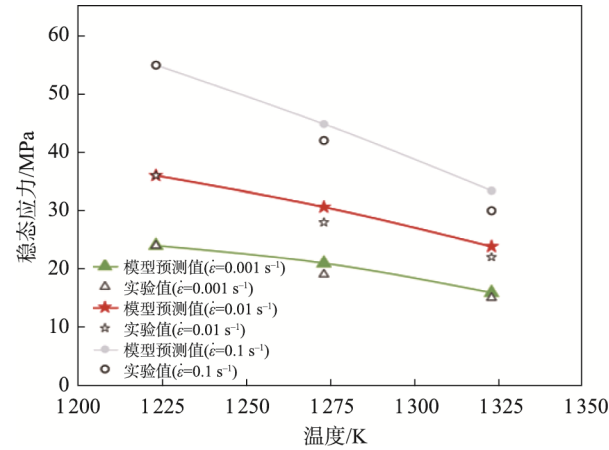


图 5 13%Cr 马氏体不锈钢在不同应变率下的预测值与实验值比较
Fig.5 Comparison between predicted values and experimental values in 13%Cr martensitic stainless steel at various strain rates

2.1.3 高强度钢

Wu 等^[31]对高强度钢在 Gleeble-1500 试验机上进行不同温度、不同应变率的压缩试验,其中压缩试件为直径 8 mm、高 12 mm 的圆柱体。每个试样以 10 K/s 的速度加热至 1 473 K,保温 3 min,然后以 5 K/s 的速度冷却到变形温度,保温 30 s。压缩试验温度分别为 1 273、1 323、1 373、1 423 K,压缩试验应变率分别为 0.1、1、5 s^{-1} 。弹性模量从合金钢压缩过程的

应力-应变曲线(图 6)中获取,并以塑性应变为 0.2%时的应力值为屈服强度。高强度钢熔点为 1 673~1 813 K,本研究采用的熔点为 1 773 K。模型计算涉及的材料参数如表 3 所示,合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力理论表征模型的预测结果与实验结果对比如图 7 所示,可见模型预测结果与实验结果具有良好的一致性。

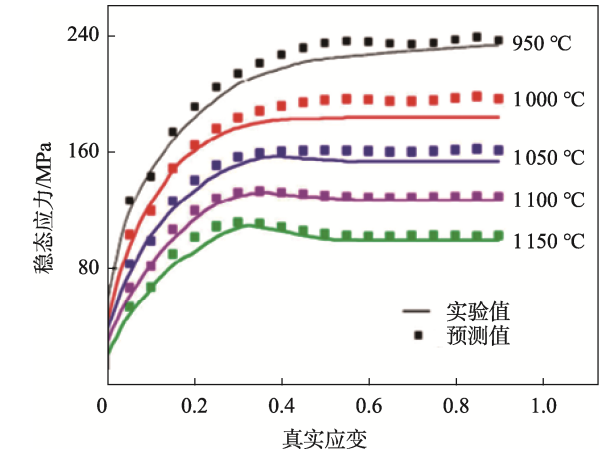


图 6 高强度钢在 5 s^{-1} 应变率下的应力-应变曲线^[31]
Fig.6 Stress-strain curve of high-strength steel at 5 s^{-1} strain rate^[31]

表 3 5 s^{-1} 应变率下用于高强度钢温度相关性动态再结晶稳态应力预测的材料参数

Tab.3 Material parameters for predicting steady-state stress in temperature-dependent dynamic recrystallization of high-strength steel at 5 s^{-1} strain rate					
T/K	$E(T)/MPa$	$\sigma_y(T)/MPa$	$\sigma_{ss}(T_0)/MPa$	T_m/K	T_0/K
1 273	1 189	131	184	1 773	1 273
1 323	892	108			
1 373	647	88			
1 423	567	78			

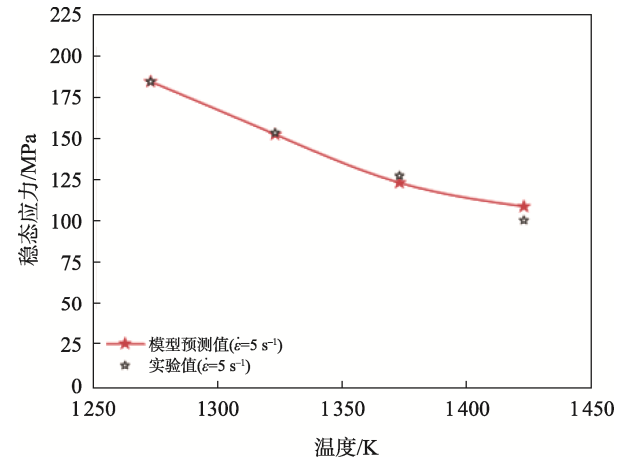


图 7 高强度钢在 5 s^{-1} 应变率下的预测值与实验值比较
Fig.7 Comparison between predicted values and experimental values in high strength steel at 5 s^{-1} strain rate

2.2 参数分析

考虑到弹性模量和屈服强度对合金钢动态再结晶稳态应力的显著影响, 且弹性模量和屈服强度对温度均十分敏感, 因此有必要定量分析不同温度下弹性模量和屈服强度的变化对合金钢动态再结晶稳态应力的影响。现以 5 s^{-1} 应变率下的高强度钢为例, 分析上述影响。

图 8 为高强度钢屈服强度对动态再结晶稳态应力的定量影响及其随温度的演化, 可见提高屈服强度可以有效提升合金钢动态再结晶稳态应力, 且温度越高, 相同屈服强度变化率导致动态再结晶稳态应力的变化量越小。

图 9 为高强度钢弹性模量对动态再结晶稳态应力的定量影响及其随温度的演化, 可见提高弹性模量可以有效提升合金钢的动态再结晶稳态应力, 且温度越高, 相同弹性模量变化率导致动态再结晶稳态应力的变化量越小。图 9 中仅考虑弹性模量的变化对合金

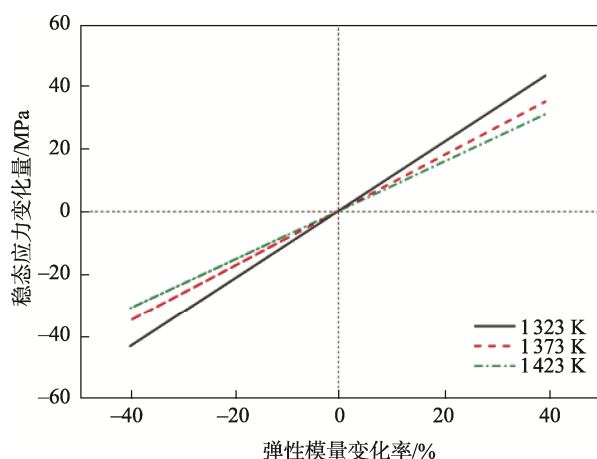


图 8 高强度钢屈服强度的变化对稳态应力的影响
Fig.8 Effect of changes in yield strength of high-strength steel on steady-state stress

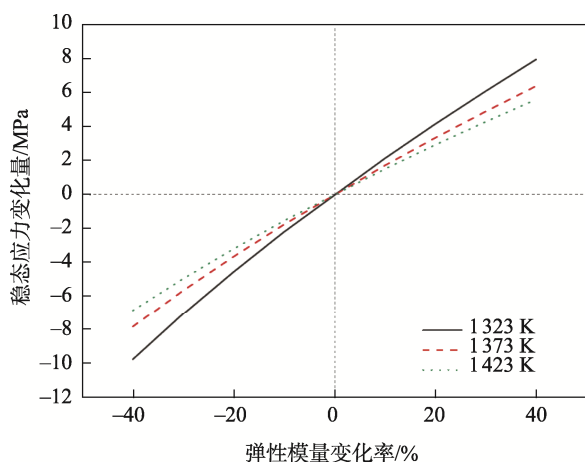


图 9 高强度钢弹性模量的变化对稳态应力的影响
Fig.9 Effect of changes in elastic modulus of high-strength steel on steady-state stress

钢动态再结晶稳态应力的影响, 并未考虑由此导致的屈服强度变化对动态再结晶稳态应力的深入影响。因此, 有必要考虑不同温度下弹性模量和屈服强度对合金钢动态再结晶稳态应力的耦合影响。

图 10 为屈服强度与高强度钢弹性模量变化对动态再结晶稳态应力的耦合影响及其随温度的演化, 可见提高弹性模量可以有效提高合金钢的动态再结晶稳态应力, 且温度越高, 相同弹性模量变化率导致动态再结晶稳态应力的变化量越小。

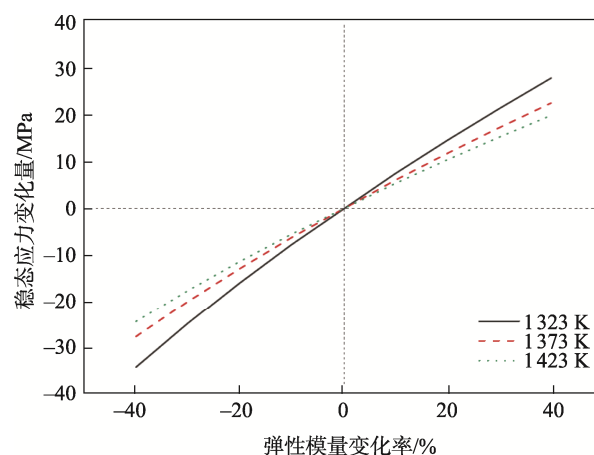


图 10 屈服强度与高强度钢弹性模量的变化对稳态应力的耦合影响

Fig.10 Coupling effect of yield strength and elastic modulus of high-strength steel on steady-state stress

3 结语

基于 Li 能量等效原理, 建立合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力模型。模型考虑温度对 3 种不同的合金钢动态再结晶稳态应力的影响, 针对 13% Cr 马氏体不锈钢, 通过代入不同应变率下的弹性模量和屈服强度, 实现对稳态应力的预测; 模型预测结果与获取的 5 组动态再结晶稳态应力实验结果一致。定量分析不同温度下弹性模量和屈服强度的变化对合金钢动态再结晶稳态应力的影响, 发现弹性模量和屈服强度的增加都会提高稳态应力, 且温度越低, 相同弹性模量和屈服强度变化率导致的动态再结晶稳态应力变化量越大。本研究为合金钢温度相关性动态再结晶稳态应力提供一个简单有效的理论预测模型, 为提升防护结构在宽温域下的稳定性提供理论基础。

参考文献:

- [1] PRAMANIK A, ISLAM M N, DAVIES I J, et al. Contribution of Machining to the Fatigue Behaviour of Metal Matrix Composites (MMCS) of Varying Rein-

- forcement Size[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 102: 9-17.
- [2] AJAY K P, ROHATGI P, WEISS D. 50 Years of Foundry-Produced Metal Matrix Composites and Future Opportunities[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14(2): 291-317.
- [3] 姚草根, 吕宏军, 贾新潮, 等. 金属热防护系统材料与结构研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2005, 35(2): 10-13.
- YAO C G, LYU H J, JIA X C, et al. Research Progress on Materials and Structures of Metal Thermal Protection System[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2005, 35(2): 10-13.
- [4] LIN Y C, CHEN X M. A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Descriptions for Metals and Alloys in Hot Working[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(4): 1733-1759.
- [5] ZHENG J F, DEMIR H V, SABNIS V A, et al. Self-Aligned Via and Trench for Metal Contact in III-V Semiconductor Devices[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 24(3): 1117-1122.
- [6] SITDIKOV O, KAIBYSHEV R. Dynamic Recrystallization in Pure Magnesium[J]. *Materials Transactions*, 2005, 42(9): 1928-1937.
- [7] ZHENG Q, YING T, JIE Z. Dynamic Softening Behaviour of AZ80 Magnesium Alloy during Upsetting at Different Temperatures and Strain Rates[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture*, 2010, 224(11): 1707-1716.
- [8] GOETZ R L, SEETHARAMAN V. Modeling Dynamic Recrystallization Using Cellular Automata[J]. *Scripta Materialia*, 1998, 38(3): 405-413.
- [9] 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.
- [10] MOMENI A, DEGHANI K, EBRAHIMI G R. Modeling the Initiation of Dynamic Recrystallization Using a Dynamic Recovery Model[J]. *Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-State Chemistry and Physics*, 2011, 509(39): 9387-9393.
- [11] URAI J L, MEANS W D, LISTER G S. Dynamic Recrystallization of Minerals[M]. *American Geophysical Union (AGU)*, 1986.
- [12] JAFARI M, NAJAFIZADEH A. Correlation between Zener-Hollomon Parameter and Necklace DRX during Hot Deformation of 316 Stainless Steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2009, 501(1/2): 16-25.
- [13] KOOIKER H, PERDAHÇIOĞLU E S, VAN D B A H. A Continuum Model for the Effect of Dynamic Recrystallization on the Stress-Strain Response[J]. *Materials*, 2018, 11(5): 867.
- [14] VARELA-CASTRO G, CABRERA J, PRADO J. Critical Strain for Dynamic Recrystallisation. The Particular Case of Steels[J]. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 2020, 10(1): 135.
- [15] QUAN G Z, LI G S, CHEN T, et al. Dynamic Recrystallization Kinetics of 42CrMo Steel during Compression at Different Temperatures and Strain Rates[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(13/14): 4643-4651.
- [16] POLIAK E I, JONAS J J. Critical Strain for Dynamic Recrystallization in Variable Strain Rate Hot Deformation[J]. *ISIJ International*, 2003, 43(5): 692-700.
- [17] QIN Y, PAN Q, HE Y, et al. Modeling of Flow Stress Considering Dynamic Recrystallization for Magnesium Alloy ZK60[J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2010, 25(7): 527-533.
- [18] ZHU S L, CAO H Z, YE J S, et al. Dynamic Recrystallization Behavior of Medium Carbon Cr-Ni-Mo-Nb Steel during Hot Deformation[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(3): 264-271.
- [19] MIRZADEH H, NAJAFIZADEH A. Prediction of the Critical Conditions for Initiation of Dynamic Recrystallization[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(3): 1174-1179.
- [20] ZHANG J L, ZHANG Y Q, LI H M, et al. Determination of Critical Dynamic Recrystallization Conditions and Mechanism Analysis of Ti600 High-Temperature Titanium Alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(1): 229-238.
- [21] LI W G, YANG F, FANG D N. The Temperature-Dependent Fracture Strength Model for Ultra-High Temperature Ceramics[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26(2): 235-239.
- [22] FANG D N, LI W G, CHENG T B, et al. Review on Mechanics of Ultra-High-Temperature Materials[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(9): 1347-1370.
- [23] GALINDO-NAVA E I, SIETSMA J, RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTILLO P E J. Dislocation Annihilation in Plastic Deformation: II. Kocks-Mecking Analysis[J].

- Acta Materialia, 2012, 60(6/7): 2615-2624.
- [24] TAYLOR G I. The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals. Part I. Theoretical[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1934, 145(855): 362-387.
- [25] YAO Q Y, YANG J B, DONG P, et al. Modeling of Acoustic Field Dependent Tensile Property for Metal Materials[J]. Extreme Mechanics Letters, 2023, 60: 101980.
- [26] YANG J B, HE Y, MA Y L, et al. Theoretical Model of the Temperature-Dependent Ultimate Tensile Strength from the Viewpoint of Dislocation Kinetics Approach for FCC Metals[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2024, 103: 105160.
- [27] ZHANG X H, LI W G, MA J Z, et al. A Novel Temperature Dependent Yield Strength Model for Metals Considering Precipitation Strengthening and Strain Rate[J]. Computational Materials Science, 2017, 129: 147-155.
- [28] LI Y, LI W G, DENG Y, et al. Theoretical Model for the Tensile Strength of Polymer Materials Considering the Effects of Temperature and Particle Content[J]. Materials Research Express, 2019, 6(1): 015315.
- [29] WU H Y, DU L X, LIU X H. Dynamic Recrystallization and Precipitation Behavior of Mn-Cu-V Weathering Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(12): 1131-1138.
- [30] EBRAHIMI G R, KESHMIRI H, MALDAR A R, et al. Dynamic Recrystallization Behavior of 13%Cr Martensitic Stainless Steel under Hot Working Condition[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(5): 467-473.
- [31] WU G L, ZHOU C Y, LIU X B. Dynamic Recrystallization Behavior and Kinetics of High Strength Steel[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1007-1014.