

锻造

## 12%Cr 耐热钢裂纹萌生临界变形量

徐 月, 刘建生

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 以 12%Cr 耐热钢为研究对象, 基于 Gleeble-3800D 热模拟试验机进行高温拉伸实验, 得到不同变形温度和应变速率下的高温拉伸真应力-真应变曲线。结果显示: 应变速率越大、温度越低时材料的抗拉强度及屈服强度越大; 由高温拉伸断口微观组织可知, 温度越高、应变速率越小, 材料的塑性越好。结合高温拉伸实验与数值模拟方法确定了 12%Cr 耐热钢热锻过程中的临界损伤值, 并进一步将裂纹萌生临界损伤值转化为实际热锻的临界变形量, 建立了 12%Cr 耐热钢在给定变形温度和应变速率条件下热锻成形过程中的临界变形量模型, 并在 500 N 液压机上进行了镦粗工艺验证, 为超超临界转子锻造成形工艺提供了理论参考。

**关键词:** 12%Cr 耐热钢; 热锻; 裂纹萌生; 临界变形量; 临界损伤值

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.002

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0012-06

## Critical deformation amount of crack initiation for 12%Cr heat-resistant steel

Xu Yue, Liu Jiansheng

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** For 12%Cr heat-resistant steel, the high-temperature tensile experiments were conducted by thermal simulation test machine Gleeble-3800D, and the high-temperature tensile true stress-true strain curves at different deformation temperatures and strain rates were obtained. The results show that the higher the strain rate and the lower the temperature, the greater the tensile strength and yield strength of material. The microstructure of high-temperature tensile fracture indicates that the higher the temperature and the lower the strain rate, the better the plasticity of material. By combining the high-temperature tensile experiments and numerical simulation methods, the critical damage value during the hot forging process of 12%Cr heat-resistant steel was determined, and the critical damage value for crack initiation was further converted into the actual critical deformation amount during the hot forging process. A critical deformation amount model for the hot forging process of 12%Cr heat-resistant steel under the given deformation temperature and strain rate conditions was established, and the upsetting process was verified by 500 N hydraulic press, which provides the relevant theoretical references for the forging process of ultra-supercritical rotors.

**Key words:** 12%Cr heat-resistant steel; hot forging; crack initiation; critical deformation amount; critical damage value

在大型锻件的实际制造过程中, 开裂现象一直是常见的主要锻造缺陷之一, 对锻件微观组织、热力学性能等质量指标有很大的影响, 多年来难以得到有效的处理<sup>[1-3]</sup>。太原科技大学段兴旺等<sup>[4-5]</sup>从微观损伤力学的角度, 研究了 316LN 钢热锻开裂的机理, 并采用 Cockcroft & Latham 准则, 获得了 316LN 钢热锻裂纹萌生的损伤值; 梁晓宇<sup>[6]</sup>借助数值模拟方法, 采用不同断裂准则获得了 12%Cr 耐热钢对应

的裂纹萌生损伤值; 清华大学董岚枫等<sup>[7]</sup>采用 Cockcroft & Latham 断裂准则计算得到了 20SiMn 钢的断裂因子。

高中压转子作为超超临界火电机组的关键部件之一, 所用材料常为 9%~12%Cr 耐热钢, 由于该钢种的成分复杂、合金成分高, 具有变形抗力大、塑性差且锻造温度窗口狭窄等特点, 加之高中压转子在百吨级左右, 导致其在制坯和锻造成形过程中容易产生裂纹, 影响锻件质量, 严重时会造成废品<sup>[8-12]</sup>。故本文以 12%Cr 耐热钢为研究对象, 结合高温拉伸实验与 Deform 数值模拟方法确定其在热锻过程中的临界损伤值, 进一步确定该材料在给定变形温度和应变速率条件下热锻成形过程中的临界变形量, 并在 500 N 液压机上进行镦粗实验来验证给

收稿日期: 2023-10-23; 修订日期: 2024-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775361); 山西省基础研究计划项目 (202303021212230); 太原科技大学博士启动金 (20222055)

作者简介: 徐 月 (1993-), 女, 博士, 讲师

E-mail: xuyue322520@163.com

定变形条件下材料的临界变形量，力求为超超临界转子锻造成形工艺提供相关理论参考。

1 实验材料及方法

高温拉伸实验用材料为 12%Cr 耐热钢，成分如表 1 所示。对原始锻态材料进行 1150 ℃保温 8 h 的均匀化处理，然后将其加工成尺寸为  $\Phi 10\text{ mm} \times$

121.5 mm 的光滑试样，如图 1 所示。实验所用设备为 Gleeble-3800D 热模拟试验机，首先以  $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的加热速度加热至 1200 ℃，保温 120 s，确保成分均匀化，再以  $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的冷却速度降至实验温度（900、1000、1100 和 1200 ℃），保温 60 s 以消除温度梯度，然后开始拉伸，拉伸完成后迅速空冷，具体高温拉伸工艺流程如图 2 所示。其中，应变速率为 0.01、0.1 和  $1\text{ s}^{-1}$ 。

表 1 12%Cr 耐热钢化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical components of 12%Cr heat-resistant steel（%，mass fraction）

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	W	V	Al	Nb	Fe
0.11~0.12	≤0.12	0.40~0.60	10~12	0.70~0.90	1.0~1.1	≤0.01	≤0.008	0.60~0.90	0.15~0.30	≤0.01	0.04~0.06	余量

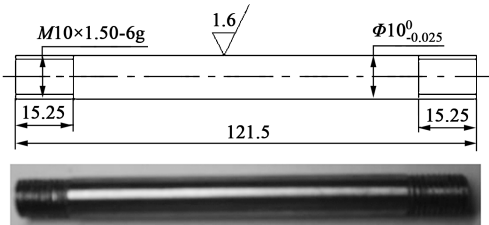


图 1 高温拉伸试样  
Fig. 1 High temperature tensile specimen

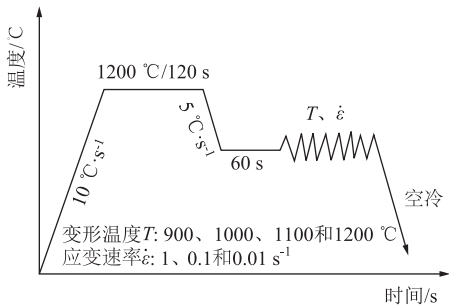


图 2 高温拉伸工艺流程  
Fig. 2 Process flow of high temperature tensile

2 实验结果

2.1 高温拉伸真应力-真应变曲线

图 3 为 12%Cr 耐热钢不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线。可以看到，在同一应变速率下，高温拉伸流变曲线均随着变形温度的升高，峰值应力呈下降趋势，这是因为随着变形温度的升高，晶界间的强度降低，试样在较低的变形量时即萌生损伤，导致峰值应变减小。在较低的变形温度下，应力达到峰值后急剧下降，说明较低温度下试样在颈缩后没有发生塑性变形；而

高温变形时，动态再结晶引起的软化机制占主导作用，使得流变应力缓慢下降。在整个热变形条件下，应变速率越大、变形温度越低，材料的屈服强度及抗拉强度越大。

2.2 高温拉伸断口微观组织分析

图 4 为 12%Cr 耐热钢在应变速率为  $1\text{ s}^{-1}$  时不同变形温度下材料的拉伸断口形貌。从图 4 中可以明显地看到：900 ℃时断口形貌特征为准解理与韧窝共存，而且韧窝较浅。1000 ℃时断口形貌特征仍为准解理与韧窝共存，与 900 ℃相比韧窝数目增多且变深；1100 和 1200 ℃时断口形貌特征仍为韧窝，韧窝变深、变大，有明显的变形痕迹，是典型的纤维断口。因此，可以推断变形温度越高，材料的塑性越好。图 5 为变形温度为 1000 ℃时不同应变速率下材料的拉伸断口形貌。由图 5 可知：应变速率较低时，断口处有明显的韧窝存在，而且韧窝较深；应变速率较高时，其断口处虽有韧窝存在，但是韧窝较浅，说明应变速率较大时材料的塑性较差。故由高温拉伸断口微观组织可知，变形温度越高、应变速率越小，材料的塑性越好。

2.3 裂纹萌生临界损伤值确定

采用 Deform 软件并基于 Normalized Cockcroft & Latham 准则模拟材料高温拉伸变形过程，模拟用试样尺寸及变形条件与物理实验相一致，由模拟结果获得损伤值，即裂纹萌生的临界损伤值<sup>[13]</sup>。按此方法获得的不同变形温度和应变速率下的裂纹萌生临界损伤值如图 6 所示。由图 6 可知，裂纹萌生损伤值随着变形温度的升高和应变速率的降低而变大，说明变形温度越高、应变速率越低，裂纹越不容易产生。

2.4 临界变形量模型的建立

为便于实际热锻过程中的裂纹控制，将裂纹萌

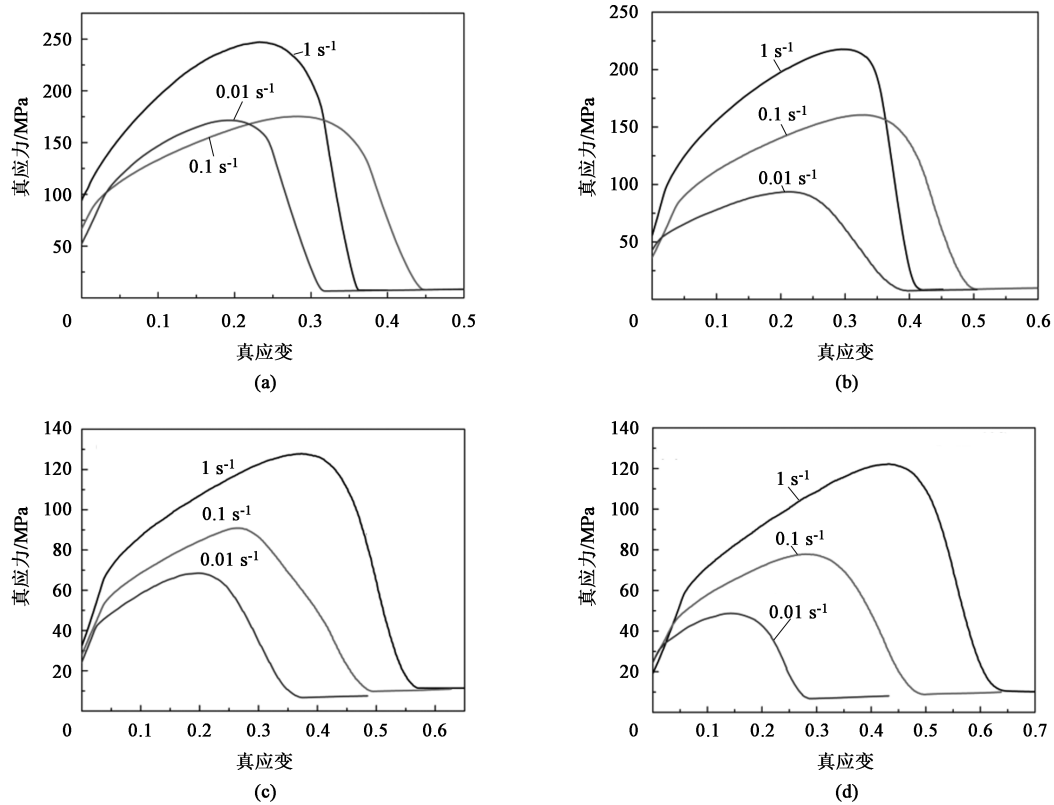


图 3 不同变形温度下 12%Cr 耐热钢的真应力-真应变曲线

(a) 900 °C (b) 1000 °C (c) 1100 °C (d) 1200 °C

Fig. 3 True stress-true strain curves of 12%Cr heat-resistant steel under different deformation temperatures

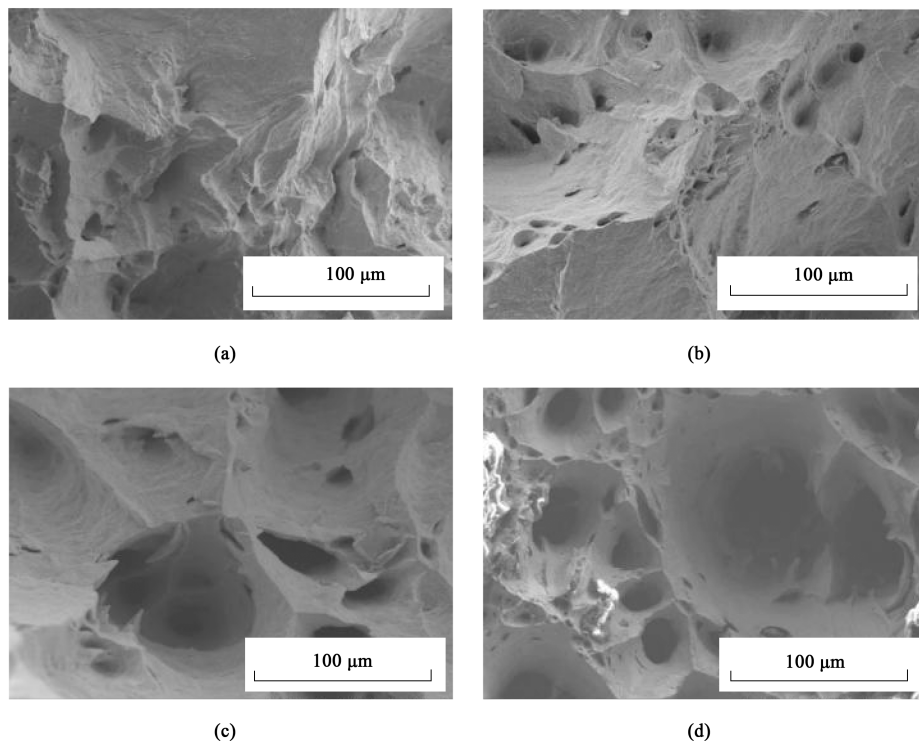


图 4 应变速率为  $1 \text{ s}^{-1}$  时不同变形温度下 12%Cr 耐热钢的高温拉伸断口形貌

(a) 900 °C (b) 1000 °C (c) 1100 °C (d) 1200 °C

Fig. 4 High temperature tensile fracture morphologies of 12%Cr heat-resistant steel under different deformation temperatures at strain rate of  $1 \text{ s}^{-1}$

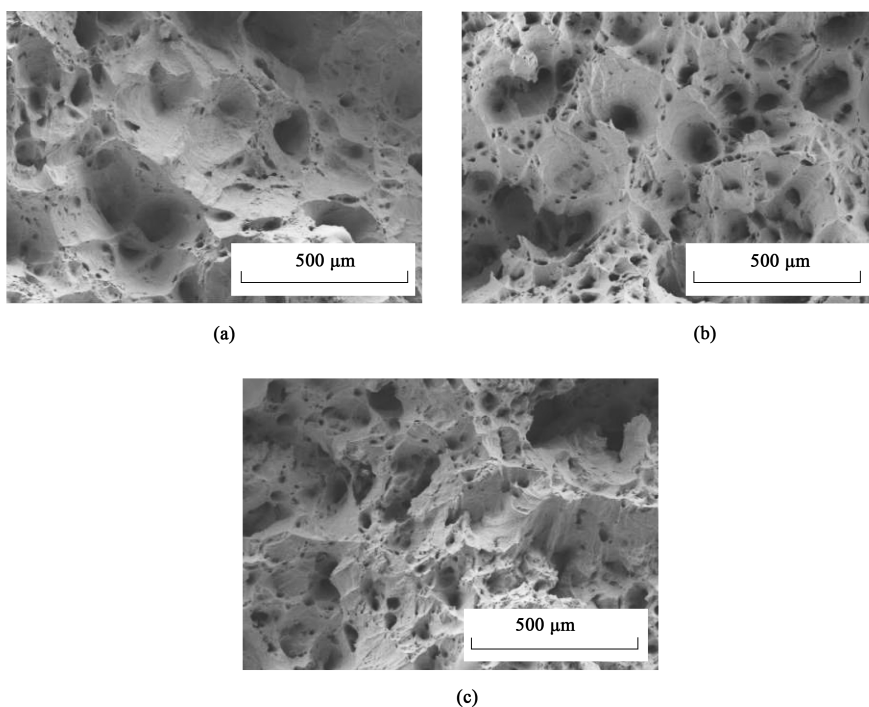


图5 变形温度为 1000 °C 时不同应变速率下 12%Cr 耐热钢的高温拉伸断口形貌

(a)  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (b)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (c)  $1 \text{ s}^{-1}$ 

Fig. 5 High temperature tensile fracture morphologies of 12%Cr heat-resistant steel under different strain rates at deformation temperature of 1000 °C

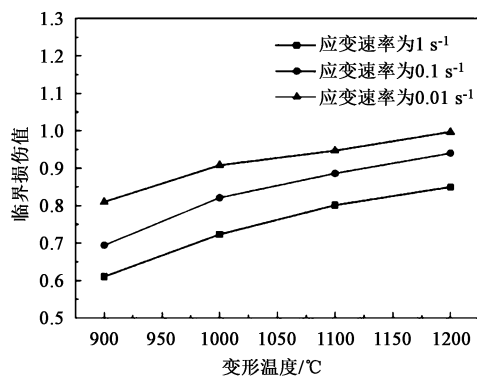


图6 不同变形温度和应变速率下的裂纹萌生临界损伤值

Fig. 6 Critical damage values of crack initiation under different deformation temperatures and strain rates

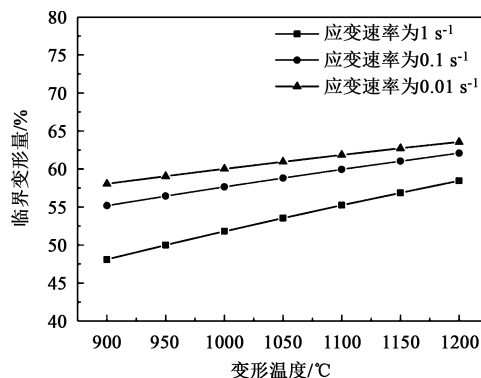


图7 不同变形条件下的临界变形量

Fig. 7 Critical deformation amounts under different deformation conditions

生临界损伤值转化为实际热锻的临界变形量。但临界损伤值在实际操作过程中无法直接获得,以锻粗工艺为研究对象,采用有限元模拟方法确定临界变形量<sup>[13]</sup>。图7为基于模拟获得的不同变形条件下的临界变形量。

为了量化裂纹萌生的临界变形量与变形参数之间的关系,采用非线性方程进行拟合,得到锻态 12%Cr 耐热钢的裂纹萌生临界变形量模型为:

$$C_d = 0.1056T^{0.2554} - 0.8756\dot{\epsilon}^{0.3923} + 0.1333T^{0.2554}\dot{\epsilon}^{0.3923} \quad (1)$$

式中:  $C_d$  为临界变形量;  $\dot{\epsilon}$  为应变速率;  $T$  为变形

温度。

### 3 锻粗实验对临界变形量的验证

通过锻粗实验来验证上述模型求得的临界变形量是否准确可靠。试样尺寸与 Deform 有限元模拟中的相同,均为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ,实验材料为 12%Cr 耐热钢。变形条件如下:应变速率为  $0.01 \text{ s}^{-1}$ ,变形温度为 1200 °C。为了保证试样从加热炉至压机的过程以及变形过程的温度恒定,在试样外侧包上石棉,在加热炉内以  $15 \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$  的加热速度将试样从室温加热至 1200 °C,保温 3 h,以保证试样内外的



温度均匀性,然后在 500 N 的液压机上进行上平砧下平砧的镦粗实验,镦粗结束后试样立即水冷,镦粗后试样的宏观照片如图 8 所示。其中,由于表面存在氧化皮,从宏观图片上很难观察到镦粗后试样的具体开裂情况。根据上述所建立的临界变形量计算模型可知,变形温度为 1200 ℃、应变速率为  $0.01\text{ s}^{-1}$  时的临界变形量是 63.5%,故将验证实验的变形量设置为 60%、70%和 80%。



图 8 不同变形量下试样镦粗后的宏观照片

Fig. 8 Macroscopic photos of samples after upsetting under different deformation amounts

为了进一步观察试样镦粗过程中裂纹的萌生情况,将镦粗后的试样沿轴向切开,切取鼓形部位的材料并在金相显微镜下观察,观察结果如图 9 所示。从图 9a 中可以看出,当变形量为 60%时,材料内部组织并未出现空洞现象,这说明该材料在此变形条件下不会萌生裂纹。当变形量为 70%时,能够从图 9b 中观察到在试样晶界处有裂纹产生,这说明在此变形条件下该材料的裂纹开始萌生。随着变形量不断增加至 80%时,能够从图 9c 中清楚地观察到空洞的形成。综上所述,变形温度为 1200 ℃、应变速率为  $0.01\text{ s}^{-1}$  条件下 12%Cr 耐热钢的临界变形量为 63.5%,即在此变形条件下当材料的变形量小于 63.5%时,试样不会产生空洞,当变形量大于 63.5%时,试样会萌生裂纹,并随着变形量的增加,空洞逐渐长大。实验观察结果验证了所建立的裂纹萌生临界变形量模型的可靠性,为 12%Cr 耐热钢的锻造成形工艺的制定提供了基础理论指导。

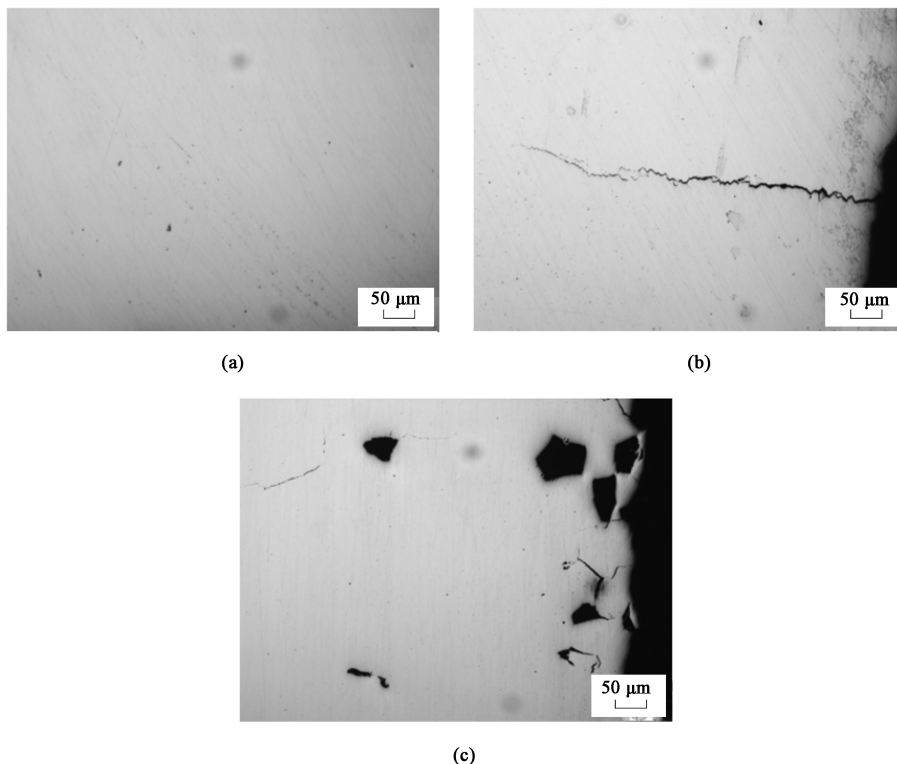


图 9 不同变形量下鼓形部位的金相组织

(a) 60% (b) 70% (c) 80%

Fig. 9 Metallographic structures of drum-shaped parts under different deformation amounts

## 4 结论

(1) 通过对不同变形温度、不同应变速率下 12%Cr 耐热钢高温拉伸实验进行研究,由真应力-

真应变曲线发现,应变速率越大、变形温度越低时材料的抗拉强度及屈服强度越大;由高温拉伸断口微观组织可知,变形温度越高、应变速率越小,材料的塑性越好。

(2) 确定了 12%Cr 耐热钢热锻过程中的临界损

伤值, 进一步将裂纹萌生的临界损伤值转化为实际热锻的临界变形量, 为 63.5%, 建立了该材料热锻成形过程中的临界变形量模型, 并进行了镦粗工艺验证。

#### 参考文献:

- [1] 龙必查. 42CrMo 曲轴锻件开裂的原因分析 [J]. 金属材料与冶金工程, 2022, 50 (2): 27-30, 35.  
Long B C. Causes analysis of 42CrMo crankshaft forging cracking [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2022, 50 (2): 27-30, 35.
- [2] 冯超, 王荣奇, 高轲, 等. 大型弯刀板锻件热锻成形仿真及工艺分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 26-34.  
Feng C, Wang R Q, Gao K, et al. Simulation and process analysis on hot forging for large machete plate forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 26-34.
- [3] 李昌义, 王行, 王爱琴, 等. 大型奥氏体不锈钢锻件的晶粒尺寸控制 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 22-28.  
Li C Y, Wang H, Wang A Q, et al. Grain size control for large austenitic stainless steel forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 22-28.
- [4] Duan X W, Liu J S. Research on damage evolution and damage model of 316LN steel during forging [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 588: 265-271.
- [5] 段兴旺, 刘建生, 郑晓华, 等. 316LN 钢裂纹萌生的临界损伤值 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (3): 60-64.  
Duan X W, Liu J S, Zheng X H, et al. Critical damage value of 316LN steel crack initiation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (3): 60-64.
- [6] 梁晓宇. 12%Cr 钢热锻裂纹的理论与实验研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2011.  
Liang X Y. Research on Theoretical and Experimental for Hot Forging Cracks of 12%Cr Steel [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2011.
- [7] 董岚枫, 钟约先, 马庆贤, 等. 大型水轮机主轴锻造过程裂纹缺陷的预防 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48 (5): 765-768.  
Dong L F, Zhong Y X, Ma Q X, et al. Prevention of forging cracks in heavy hydro-generator shafts [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48 (5): 765-768.
- [8] 马晓然, 曾龙, 胡侨丹, 等. 铸态 12%Cr 马氏体不锈钢的热变形行为与热加工图 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (23): 17-20.  
Ma X R, Zeng L, Hu Q D, et al. Hot deformation behavior and processing map of as-cast 12%Cr martensitic stainless steel [J].

Hot Working Technology, 2014, 43 (23): 17-20.

- [9] 赵畅. 超超临界高中压转子用 Cr 钢材料性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Zhao C. Research on the Properties of Cr Steel Materials for Ultra Supercritical High and Medium Pressure Rotors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [10] 梅林波. 9%Cr 钢汽轮机转子材料性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
Mei L B. Research on the Material Properties of 9%Cr Steel Turbine Rotors [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [11] Yoon J H, Yoon E P, Lee B S. Correlation of chemistry, microstructure and ductile fracture behaviours of niobium-stabilized austenitic stainless steel at elevated temperature [J]. Scripta Materialia, 2007, 57 (1): 25-28.
- [12] Viswanathan R, Bakker W T. Materials for ultra-supercritical coal power plants-boiler materials; Part 1 [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001, 10 (1): 81-95.
- [13] 李景丹. CAP1400 主管道热锻过程微观组织演变行为与工艺控制 [D]. 太原: 太原科技大学, 2020.  
Li J D. Microstructure Evolution Behavior and Process Control of CAP1400 Main Pipe during Hot Forging [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020.

#### 更正

《锻压技术》杂志 2024 年第 49 卷第 7 期刊登文章《基于 GTN 损伤模型的 6061-T6 铝合金辊弯成形断裂研究》, 作者为邹知良、韩飞、姚冉。

将此文第 228 页中“若假设特征体积单元周围的孔洞不可压缩, 孔洞的增大将依赖基体的塑性变形, 通过统计方法得出初始孔洞体积分数的增长率

$\dot{f}_{\text{growth}}$ :

$$\dot{f}_{\text{growth}} = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \varepsilon_P \quad (4)''$$

更正为:

“若假设特征体积单元周围的孔洞为不可压缩, 孔洞的增大将依赖基体的塑性变形, 通过统计方法得出新成核孔洞体积分数的增长率  $\dot{f}_{\text{nucleation}}$ :

$$\dot{f}_{\text{nucleation}} = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \varepsilon_P \quad (4)''$$

特此更正。

《锻压技术》编辑部