

# 大型高压阀体多向模锻成形工艺及 晶粒组织演变预测

金 森 秦 锐 李文玉 金 森 李小龙 罗林丰 张庆玲\*

燕山大学机械工程学院, 秦皇岛, 066004

**摘要:**针对材质为4130钢的某7-15K大型闸阀阀体,提出了一种多向模锻成形工艺,并通过数值模拟预测了锻件内部组织的演变规律。基于4130钢的真应力-应变数据,构建了动态再结晶体积分数模型和晶粒尺寸模型,通过对比模型求解值与金相得到的试验数据,验证了模型的可靠性;将构建的模型集成至有限元分析软件中,对阀体的多向模锻成形过程进行了数值模拟。基于温度场和应变场的耦合分析,系统研究了4130钢阀体组织的演变规律,并针对完全再结晶区域和不完全再结晶区域提出了两种不同的晶粒组织均匀性评价方法。结果表明,与传统的锻造工艺相比,多向模锻成形工艺能够有效提高材料的塑性、锻件的力学性能和材料内部的变形均匀性。

**关键词:**大型高压阀体;4130钢;动态再结晶;多向模锻;晶粒组织演变

**中图分类号:** TG316.3; TH134

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Multi-directional Die Forging Forming Process and Grain Structure Evolution Prediction of Large High-pressure Valve Bodies

JIN Miao QIN Rui LI Wenyu JIN Miao LI Xiaolong LUO Linfeng ZHANG Qingling\*

School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

**Abstract:** A multi-directional die forging forming processes would proposed for a 7-15K large gate valve bodies made of 4130 steel, and the evolution of the internal microstructure of the forging processes was predicted by numerical simulation. Based on the true stress-strain data of 4130 steels, dynamic recrystallization volume fraction and grain size models were constructed, the reliability of these models was validated through comparisons between the model predictions and metallographic experimental measurements, the calibrated models were integrated into the finite element analysis software to simulate the multi-directional die forging processes of large high-pressure valve bodies. Based on the coupled analysis of temperature and strain fields, the evolution of microstructures in 4130 steel valve body was systematically investigated, and two different methods for evaluating the homogeneity of grain structure were proposed for the fully recrystallized and incompletely recrystallized regions. The results demonstrate that compared with conventional forging processes, the multi-directional die forging process may effectively enhance material plasticity, improve the mechanics properties of the forgings, and increase the uniformity of internal deformations.

**Key words:** large high-pressure valve body; 4130 steel; dynamic recrystallization; multi-directional die forging; grain structure evolution

### 0 引言

能源问题一直是全球关注的重点,随着社会的进步和科技的发展,人们对石油和天然气的需求量越来越大。阀门在石油开采过程中发挥着至关重要的作用,阀体作为阀门的核心部件在工作过程中常常涉及极端的高温高压条件,所以阀体必须具备很高的耐压、耐温、耐腐蚀性能<sup>[1]</sup>。

大型高压阀体目前最常用的工艺流程为以锻

造棒材为原料,通过自由锻或胎模锻制坯,然后经机加工制成成品<sup>[2]</sup>。但该生产工艺的材料利用率低,能耗高,生产周期长。近年来国内多向模锻技术与装备不断发展,为大型阀体的高效近净成形提供了新的技术途径<sup>[3]</sup>。

胡红磊<sup>[4]</sup>研究了水平带法兰阀体的多向模锻成形,表明采用多向模锻生产可以优化金属流动行为,使锻件微观结构均匀性显著提高,同时其抗腐蚀能力与力学性能参数均达到行业标准。顾文俊<sup>[5]</sup>在空排止回阀的成形工艺优化中,基于结构特征的参数匹配策略有效解决了复杂型腔填充难

收稿日期:2025-02-27

基金项目:中央引导地方科技发展资金(246Z1016G)

题,相关工艺方案已通过企业生产验证。殷华英<sup>[6]</sup>基于有限元模拟对四通阀体多向模锻成形工艺进行了研究,表明采用多向模锻工艺成形的阀体法兰部位几何精度显著提高,同时内部金属流线呈现优异的连续性和方向一致性。熊文涵<sup>[7]</sup>基于径向基函数(RBF)结构神经网络训练得到的规律,设计了三通阀体多向模锻成形方案,表明多向模锻成形效果良好、无裂纹或折叠缺陷。

本文针对材质为4130钢的某7-15K大型闸阀阀体,提出以连铸坯<sup>[8]</sup>为原材料,采用多向模锻工艺一次精密压制成形,压制成形后锻件外表面无需加工,仅加工阀体内腔即可形成成品。该工艺路线可大幅缩短生产流程,降低成本。但7-15K大型闸阀阀体锻件形状复杂,一次压制成形难度大,且成形过程中阀体各部分的变形状态有很大的不同<sup>[9]</sup>;同时,以连铸坯为原材料,成形后阀体各部分的组织状态也是一个值得关注的问题。为此本文针对该阀体的多向模锻成形工艺及组织演变进行了系统研究<sup>[10]</sup>,以期为大型复杂形状高压阀体的短流程绿色制造提供新路径。

## 1 7-15K 阀体锻件多向模锻成形工艺

7-15K 闸阀阀体锻件如图1所示。阀体上法兰的尺寸为 $\phi 614$  mm,左右两侧法兰的尺寸为 $\phi 521$  mm,高度为878 mm,质量为1820 kg。锻件纵向内孔为台阶孔,包括上方的圆柱孔和下方的椭圆形孔。

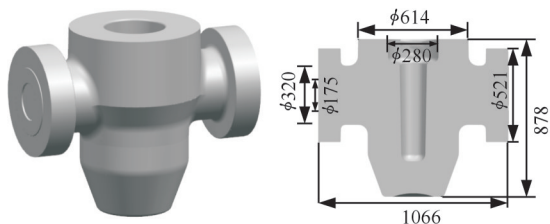


图1 阀体的三维模型

Fig.1 3D model of the valve body

坯料和模具的材料分别为4130钢和AISI-H-13钢,始锻温度分别为1220℃和350℃,摩擦系数为0.3,传热系数为11 000 W/(m<sup>2</sup>·K)。阀体成形采用水平分模,分模面位于侧法兰的中心面。阀体成形分3个阶段:第一阶段,垂直穿孔针沿纵向挤压坯料直至其接触水平挤压头,在这个阶段水平挤压头保持静止;第二阶段,垂直穿孔针保持同样的速度挤压坯料直至阀体纵向孔成形完毕,水平挤压头同时沿水平方向后退;第三阶段,垂直穿孔针保持静止,水平穿孔针以同样的速度沿水平方向向阀体锻件心部运动至阀体成形完

毕。整个工艺过程中阀体在各阶段的形态见图2。

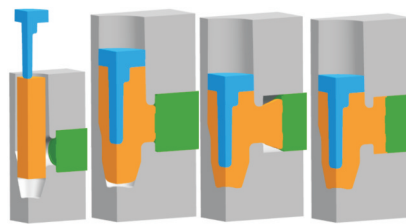


图2 阀体成形动作图

Fig.2 Valve body forming process diagram

## 2 4130 钢的热力学性能和组织演化规律研究

商用4130连铸坯的化学成分如表1所示,其初始组织平均晶粒尺寸为94.5  $\mu\text{m}$ ,如图3所示。

表1 试验用4130钢化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical compositions of 4130 steel for testing (mass fraction) %

$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Fe})$
0.29	0.557	0.319	1.04	0.04	0.261	余量

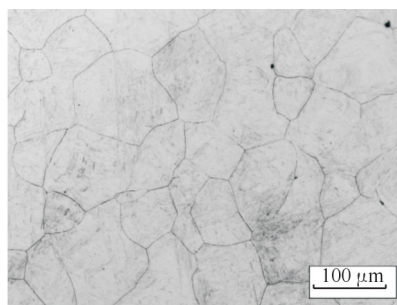


图3 4130钢的原始微观晶粒组织

Fig.3 Original microstructure of 4130 steel

### 2.1 4130 钢流变应力曲线

在4130钢连铸坯上取样,制成 $\phi 8$  mm $\times$ 12 mm的Gleeble试样<sup>[11]</sup>,在表2的工艺参数下进行热压缩试验。经过摩擦和温度修正<sup>[12]</sup>后的流变应力曲线见图4。在变形初期,位错密度增大,限制了位错的运动,从而加强了材料的加工硬化效应,导致流变应力值迅速上升;在第二阶段,随着应变量的不断增大,材料发生动态回复和动态再结晶,致使材料逐渐软化,流变应力值逐步下降;在第三阶段,加工硬化与动态软化达到动态平衡,流变应力值趋于稳定<sup>[13]</sup>。当材料的应变速率保持不变时,4130钢的流变应力与变形温度呈负相关。随着变形温度的升高,原子的动能增大,位错的攀移和交滑移变得更加容易;与此同时,再结晶的形核率增大,导致再结晶提前发生,从而使得流变应力值减小。当变形温度保持不变时,4130钢的流变应力与应变速率呈正相关<sup>[14]</sup>。随着应变速

率的增大,加工硬化效应更加显著,再结晶过程变得更为困难,从而导致流变应力值增大<sup>[15]</sup>。

表2 热压缩试验的工艺参数

Tab.2 The processing parameters of hot deformation

工艺条件	范围
温度/°C	850、1000、1100、1150、1200、1250
应变速率/s <sup>-1</sup>	0.01、0.1、1、5
变形程度/%	60

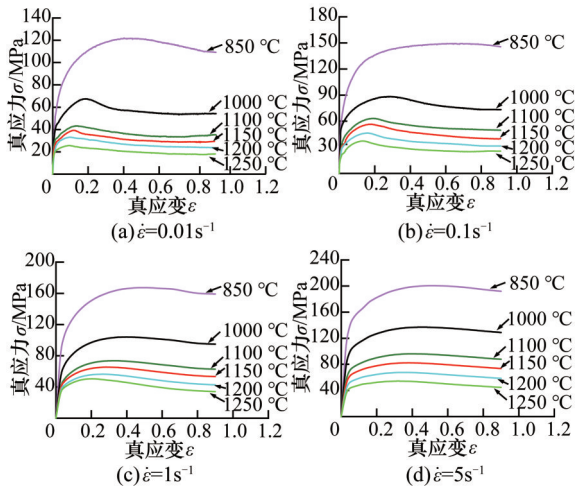


图4 不同条件下的流变应力曲线

Fig.4 Rheological stress curves under different conditions

2.2 4130钢动态再结晶临界应变模型

研究表明,动态再结晶与加工硬化率曲线存在内在关联<sup>[16]</sup>。图5所示为4130钢在1100 °C、0.1 s<sup>-1</sup>下加工硬化率与流变应力的关系。在加工硬化率与流变应力曲线上可以得到峰值应力 $\sigma_p$ 和稳态应力 $\sigma_{ss}$ <sup>[17]</sup>。通过对拐点附近数据进行三次多项式函数拟合<sup>[18]</sup>,可以得到加工硬化率-流变应力( $\theta$ - $\sigma$ )拟合曲线,再对 $\theta$ - $\sigma$ 曲线求导取负得到 $-d\theta/d\sigma$ 与 $\sigma$ 的关系曲线,该曲线的最小值即为临界应力 $\sigma_c$ ,对应的应变即为临界应变 $\epsilon_c$ 。图6所示为4130钢在所有变形条件下的临界应变。

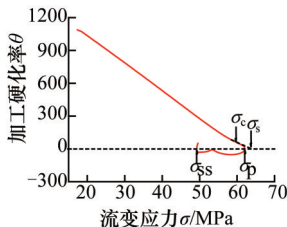


图5 加工硬化率与流变应力曲线  
Fig.5 Curve of work hardening rate and rheological stress

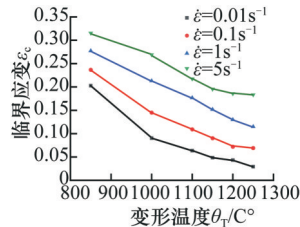


图6 不同条件下的临界应变  
Fig.6 Critical strain under different conditions

2.3 动态再结晶体积分数模型

因为试样的初始状态一致,即初始晶粒的尺

寸在不同条件下不发生变化,所以忽略初始晶粒尺寸的影响<sup>[19]</sup>。采用Yada模型<sup>[20-21]</sup>对4130钢的动态再结晶体积分数 $X_{drex}$ 进行定量评估并构建模型,其表达式如下:

$$X_{drex} = 1 - \exp(-\beta_d (\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}})^{k_d}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{0.5} = \alpha_2 \dot{\epsilon}^{m_2} \exp(\frac{Q_2}{RT}) \quad (2)$$

式中: $\epsilon$ 为应变; $\epsilon_c$ 为临界应变; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; $\epsilon_{0.5}$ 、 $Q_2$ 分别为动态再结晶发生一半时的应变和激活能,激活能单位为 $\text{kJ} \cdot (\text{mol})^{-1}$ ;  $\beta_d$ 、 $k_d$ 、 $\alpha_2$ 、 $m_2$ 为材料常数; $R$ 为摩尔气体常数,  $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T$ 为热力学温度,  $\text{K}$ 。

流变应力<sup>[22]</sup>可以表达为

$$\sigma = \sigma_p - X_{drex}(\sigma_p - \sigma_{ss}) \quad (3)$$

式中: $\epsilon_p$ 为峰值应力; $\epsilon_{ss}$ 为稳态应力。

当动态再结晶体积分数达50%,可以得到关系式 $\sigma_{0.5} - \sigma_p = 0.5(\sigma_{ss} - \sigma_p)$ ,利用2.2节的方法可以求解出 $\sigma_{ss}$ 和 $\sigma_p$ ,从而计算出 $\sigma_{0.5}$ ,然后可以从流变应力曲线上确定相应变形条件的 $\epsilon_{0.5}$ 值。

对式(1)取两次对数变形得

$$\ln(-\ln(1 - X_{drex})) = \ln\beta_d + k_d \ln \frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \quad (4)$$

根据上述方法求解出所有变形条件下50%动态再结晶时的应变,并将其和图6中的数据以及再结晶的体积分数 $X_{drex}$ 和应变值代入式(4)中,绘制不同变形条件下的 $\ln(-\ln(1 - X_{drex}))$ 与 $\ln((\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_{0.5})$ 关系曲线,如图7所示。取斜率和截距的平均值,得 $k_d=3.21$ ,  $\ln\beta_d=0.59789$ , 因此 $\beta_d=1.82$ 。代入式(1)中得

$$X_{drex} = 1 - \exp(-1.82(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}})^{3.21}) \quad (5)$$

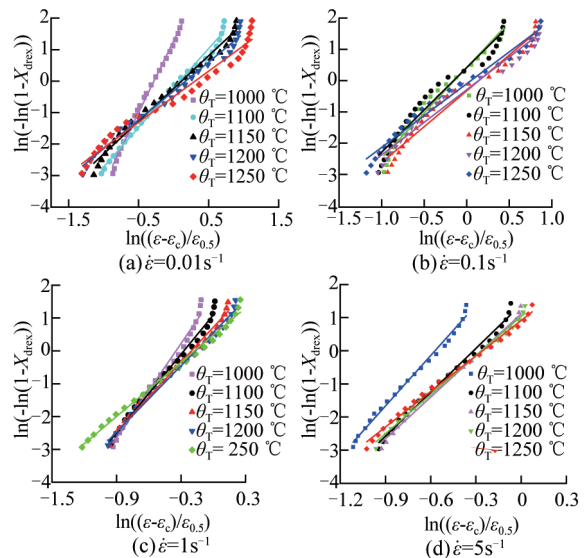


图7 不同变形条件下的拟合曲线

Fig.7 Fitting curves under different deformation conditions

综上所述,4130钢动态再结晶动力学模型为

$$X_{drex} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_c \\ 1 - \exp(-1.82(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}})^{3.21}) & \epsilon \geq \epsilon_c \end{cases} \quad (6)$$

$$\epsilon_{0.5} = 0.0436\dot{\epsilon}^{0.1403} \exp(\frac{23\,257.6}{RT})$$

2.4 晶粒尺寸模型

晶粒尺寸是探究材料在热变形过程中晶粒变化的关键指标,对调控材料微观结构以实现期望的整体性能发挥着至关重要的作用。

2.4.1 动态再结晶晶粒尺寸模型

利用包含变形温度、应变速率和应变量的方程来表达4130钢动态再结晶晶粒尺寸  $D_{drex}$ :

$$D_{drex} = \alpha_3 d_0^h \epsilon^{n_3} \dot{\epsilon}^{m_3} \exp(\frac{Q_3}{RT}) \quad (7)$$

式中:  $d_0$ 为初始晶粒的晶粒尺寸,  $\mu\text{m}$ ;  $\alpha_3, h, n_3, m_3, Q_3$ 为与材料相关的待回归系数。

因为试样的初始状态一样,即初始晶粒的尺寸在不同条件下不发生变化,所以忽略初始晶粒尺寸的影响,将  $h$  设为0。对式(7)两边取对数,并将不同变形条件下的数据代入,最终求得4130钢的动态再结晶晶粒尺寸模型为

$$D_{drex} = 263\,282.66\epsilon^{0.149} \dot{\epsilon}^{-0.124} \exp(\frac{-101\,549.48}{RT}) \quad (8)$$

2.4.2 残余原始晶粒和平均晶粒尺寸模型

为了精确预测锻件各部分的晶粒度,本文利用动态再结晶晶粒尺寸和动态再结晶体积分数来求解4130钢部分动态再结晶中的残余原始晶粒尺寸  $d_s^{[23]}$ :

$$d_s = d_0(1 - X_{drex})^{1/3} \quad (9)$$

本文采用TANG等<sup>[24]</sup>提出的计算热变形过程中平均晶粒尺寸的方法来求解4130钢的平均晶粒尺寸  $\bar{d}$ :

$$\bar{d} = D_{drex} X_{drex} + d_s(1 - X_{drex}) \quad (10)$$

2.5 动态再结晶动力学模型的验证

选取4个不同变形条件下的试样通过晶粒组织对其动态再结晶各个参数进行测量,变形条件如表3所示。

表3 所取试样的变形条件

Tab.3 Deformation conditions of the sampling

	变形温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变速率/ $\text{s}^{-1}$	应变
条件1	1150	0.1	1.2
条件2	1000	5	0.6
条件3	1100	5	1.2
条件4	1000	1	0.35

图8中,图8a、图8c的材料实现了完全动态再结晶,图8a的再结晶晶粒成长为粗大不均的晶粒组织,图8c的再结晶晶粒相对较小;图8b、图8d

中被圈出的为动态再结晶晶粒,未被圈出的为残余原始晶粒,由图知图8b的晶粒组织大部分为被压扁的原始粗大的晶粒,图8d的晶粒组织大部分为原始的粗大晶粒,仅有较少的再结晶晶粒,并且再结晶晶粒比较小。

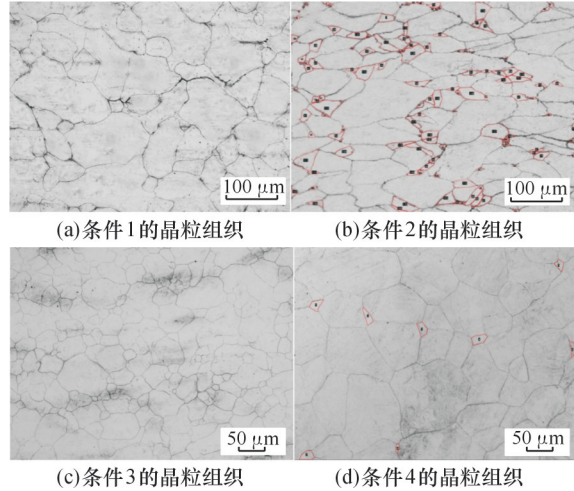


图8 不同条件下的晶粒组织

Fig.8 Grain structure under different conditions

表4所示为上述不同变形条件下动态再结晶各参数模型求解值和实际测量值的对比情况,可知预测值和实际测量值较为接近,即上述推导的各动态再结晶模型比较准确。

表4 动态再结晶参数对比

Tab.4 Comparison of dynamic recrystallization parameters

		再结晶体积分数 (%)	再结晶晶粒尺寸 ( $\mu\text{m}$ )	残余原始晶粒尺寸 ( $\mu\text{m}$ )	平均晶粒尺寸 ( $\mu\text{m}$ )
条件1	模型求解值	100	68	0	68
	实际测量值	100	65	0	65
条件2	模型求解值	12	14	91	81
	实际测量值	11	16	93	84
条件3	模型求解值	100	31	0	31
	实际测量值	100	32	0	32
条件4	模型求解值	1	7	94	92
	实际测量值	1	9	89	85

3 大型阀体多向模锻成形工艺模拟

3.1 大型阀体多向模锻成形过程

大型高压阀体采用多向模锻成形,成形装置如图9所示。考虑阀体是轴对称结构,采用1/4的模型进行有限元仿真,仿真模型如图10所示。

将4130钢的流变应力数据嵌入DEFORM,对阀体多向模锻成形进行数值模拟。阀体多向模锻成形主要分为图11所示的3个阶段。

图12为阀体最终成形的金属流线分布图,阀

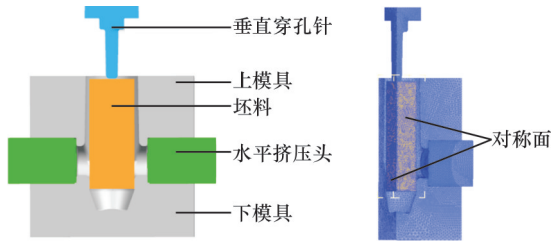


图9 成形阀体装置示意图  
Fig.9 Schematic diagram of formed valve body device

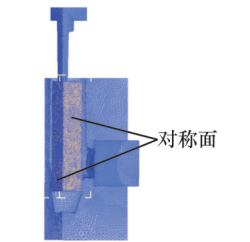


图10 有限元仿真模型 (1/4模型)  
Fig.10 Finite element simulation model(1/4 model)

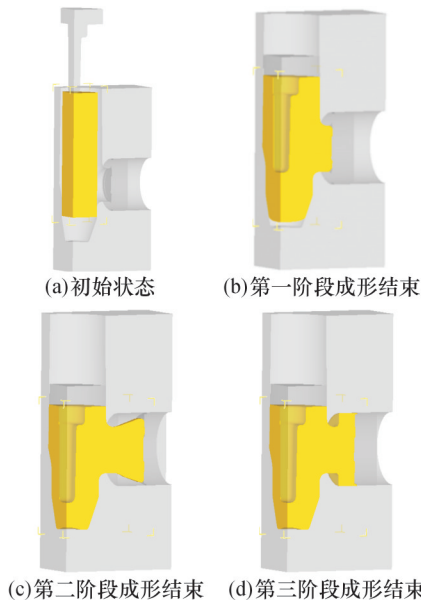


图11 阀体多向模锻成形  
Fig.11 Multi-directional die forging forming of valve body

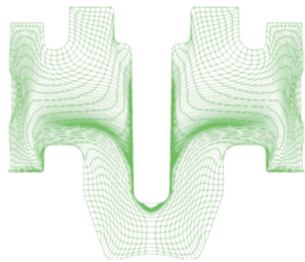
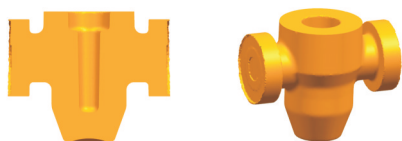


图12 大型阀体金属流线分布

Fig.12 Metal flow line distribution in large valve body  
体锻件的金属流线比较完整,没有出现如断流、折叠和断裂等明显金属流线缺陷。两侧法兰金属流线致密,金属流线分布错落有致。流线末端均匀填充模具型腔。阀体锻件最终成形如图13所示,



(a)锻件内孔成形情况 (b)锻件整体成形情况  
图13 大型阀体成形结果  
Fig.13 Large valve body forming results

阀体锻件纵向的圆孔和长椭圆孔成形较好;不易成形的两侧法兰填充完整,并有一些余料;模拟成形的阀体与实际阀体相似度极高,充满率达100%,在多向模锻成形阀体时没有出现诸如折叠等缺陷,阀体的整体成形质量优良。

### 3.2 大型阀体锻件物理场分析

在阀体热锻成形时,温度和应变对锻件成形的质量有较大影响。成形温度太高,会出现组织缺陷;成形温度太低,会造成成形力大的问题。材料在塑性变形过程中存在临界应变阈值,当应变太大超过该阈值时,位错密度梯度驱动的晶界迁移机制将主导动态再结晶过程,最终形成平均晶粒尺寸较小的均匀等轴晶组织;而当应变太小低于临界值时,位错湮灭速率不足以触发完全再结晶,导致显微组织呈现原始粗晶与局部细晶共存的非均匀特征。

阀体锻件温度场和等效应变场分别如图14、图15所示。

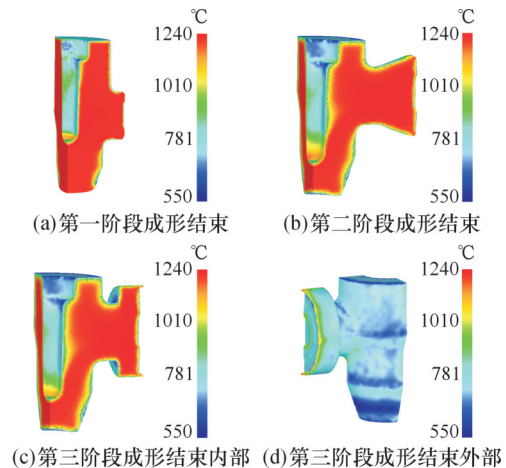


图14 阀体锻件温度场

Fig.14 Temperature field of valve body forgings

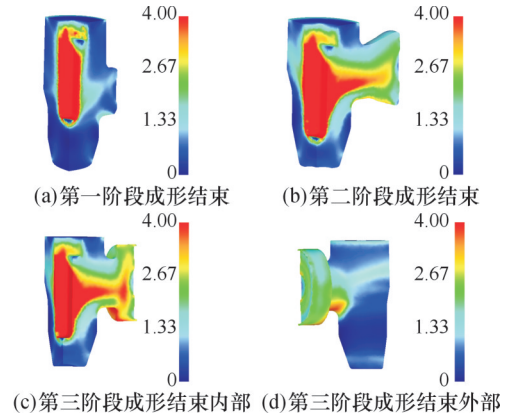


图15 阀体锻件等效应变场

Fig.15 Equivalent strain field of valve body forgings

第一阶段,坯料和模具的初始温度分别为1220℃和350℃。如图14a所示,在成形过程中

由于坯料与垂直穿孔针和上下模具的接触造成不同程度的热量散失,接触区域最低温度约为700℃,心部因为塑性功的作用最高温度升至1240℃。如图15a所示,坯料与垂直穿孔针接触部位应变较大,最大应变的部位主要集中在长椭圆孔处。

第二阶段,随着坯料与模具接触面积的增大,接触部位的温度有所下降,其最低温度约为680℃。心部的最高温度基本保持不变,如图15b所示,金属横向流动区域的心部也存在相对较大的应变。

第三阶段,随着水平挤压头移动到预期位置,阀体多向模锻完成,此阶段成形时间较短,坯料的温度基本没有变化,最低温度约为600℃,最高温度约为1230℃。随着水平挤压头到达预期位置,阀体侧法兰应变迅速增大,成为大应变区域。

## 4 大型阀体锻件组织演变预测

### 4.1 阀体锻件组织演变

将第2节中建立的各晶粒演变模型嵌入到DEFORM-3D软件,对4130钢在热加工过程中的组织演化进行数值模拟。由图16可知,阀体成形件超过92%的区域为红色,即动态再结晶体积分数达到100%,该区域由于发生了完全动态再结晶,因此不存在残余原始晶粒。如图17所示,阀体成形件超过92%的区域为蓝色,即残余原始晶粒尺寸为零。结合图14和图15可知,锻件外侧底部区域动态再结晶不充分现象与模具-坯料界面热传导效应密切相关,该区域在成形过程中持续接触下模导致温度在700℃左右,热变形激活能降低致使位错密度梯度演化受阻,动态再结晶形

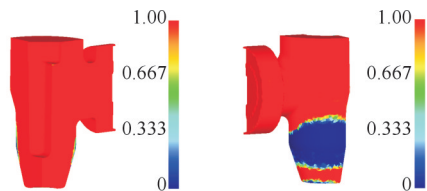


图16 成形件动态再结晶体积分数

Fig.16 Dynamic recrystallization volume fraction of formed parts

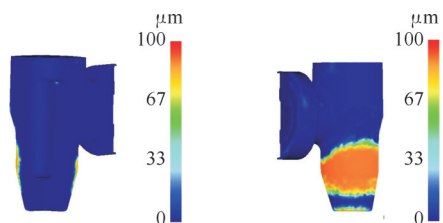


图17 成形件残余原始晶晶粒尺寸

Fig.17 Residual original grain size of formed parts

核密度下降,最终导致该区域再结晶体积分数较低,存在残余原始晶粒。阀体成形件其他部位由于应变大和温度高等有利条件,在多向模锻过程中几乎都发生了完全动态再结晶。

图18所示为阀体成形件动态再结晶晶粒尺寸分布情况。由于热交换使坯料温度降低,所以锻件外表面和纵向孔区域动态再结晶晶粒尺寸都小于30μm;有些部位由于应变较小,不利于动态再结晶晶粒的长大,因此晶粒尺寸也较小。虽然锻件心部区域应变不大,发生动态再结晶时间较晚,但由于散热少且塑性功产生热量导致心部温度总是高于1200℃,其再结晶晶粒在形核后会快速长大,锻件心部动态再结晶晶粒尺寸约为55μm。

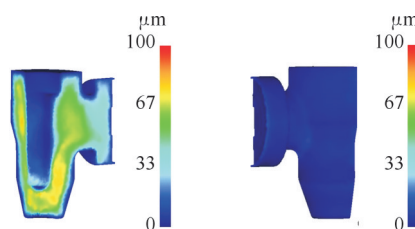


图18 成形件动态再结晶晶粒尺寸

Fig.18 Dynamic recrystallization grain size of formed parts

图19所示为阀体成形件平均晶粒尺寸分布情况。锻件与下模具早期接触的底部和中部区域因为存在温度梯度或应变不大的情况,导致该区域难以实现完全动态再结晶。因此该区域同时存在残余原始晶粒和动态再结晶晶粒,故平均晶粒尺寸较大,约为85μm。锻件外表面其他区域的平均晶粒尺寸小于30μm。锻件内表层晶粒呈现显著细化特征,平均晶粒尺寸较小,几乎都小于30μm。而心部区域则存在明显粗化倾向。平均晶粒尺寸则相对较粗大约为55μm。

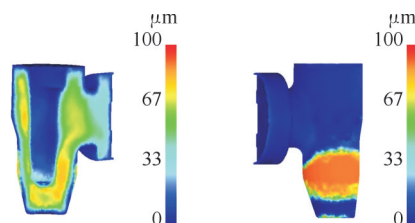


图19 成形件平均晶粒尺寸

Fig.19 Average grain size of formed parts

图20所示为阀体成形件动态再结晶体积分数占比情况。可知在成形过程中,阀体的多数区域都实现了完全动态再结晶,其中阀体成形件至少有92%的区域体积分数超过90%,仅有2.2%的区域动态再结晶体积分数未达到10%。

图21所示为阀体成形件动态再结晶晶粒尺寸占比情况。再结晶晶粒尺寸基本上都比较小,

其中有超过 85% 的区域再结晶晶粒尺寸小于 60 μm。

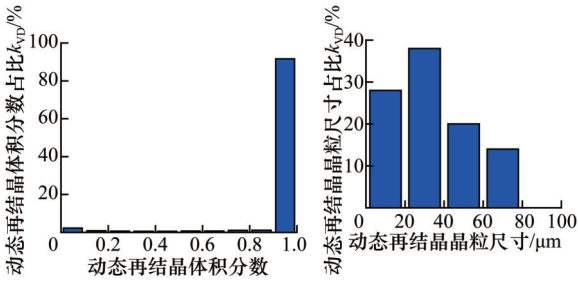


图 20 动态再结晶体积分数占比

Fig.20 Proportion of dynamic recrystallization volume fraction

图 21 动态再结晶晶粒尺寸占比

Fig.21 Proportion of dynamic recrystallization grain size

图 22 所示为阀体成形件残余原始晶粒尺寸占比情况。在变形过程中,多数残余原始晶粒都演变成了再结晶晶粒,仅有约 6% 的区域存在残余原始晶。

图 23 所示为阀体成形件晶粒尺寸占比情况,可知多向模锻过程显著细化了阀体的晶粒组织,其中超过 85% 的区域平均晶粒尺寸小于 60 μm。

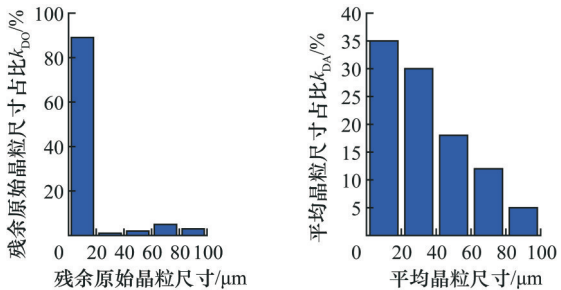


图 22 残余原始晶粒尺寸占比

Fig.22 Proportion of residual original grain size

图 23 平均晶粒尺寸占比

Fig.23 Proportion of average grain size

为了方便评估锻件晶粒度是否符合标准,并指导生产实践,将金属平均晶粒尺寸与显微晶粒度等级的对应关系集成到用户自定义程序中,旨在量化模拟 4130 钢阀体在热加工过程中的晶粒度变化。图 24 所示为阀体锻件晶粒度等级分布情况。锻件外表面除了与下模具早期接触的中部区域晶粒度等级较低,保留了较粗大的原始晶粒,其他区域的晶粒度等级较高,普遍超过 8 级,这些区域都完全再结晶。由图可知,锻件纵向孔区域的晶粒度大多超过了 8 级,锻件心部区域晶粒度约为 5 级,阀体锻件整体晶粒度较高。

从上述各图可以看出,在成形过程中,锻件各部位存在变形条件的差异,这引起了动态再结晶过程中晶粒尺寸的显著差异。在一些区域,没能

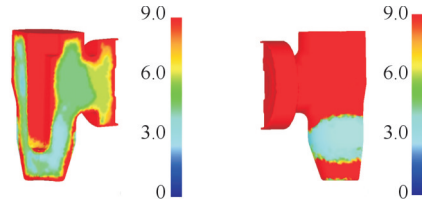


图 24 大型阀体锻件晶粒度等级分布

Fig.24 Grain size distribution of large valve body forgings

实现完全动态再结晶,所以既存在原有的粗大晶粒也存在新生成的动态再结晶晶粒,因此阀体锻件的晶粒结构呈现出不均匀性。

#### 4.2 阀体锻件晶粒组织均匀性评价

定量评估阀体锻件晶粒组织均匀性的方法如下。

1) 大型阀体锻件完全再结晶部位,利用均匀性函数  $M$  评估大型阀体锻件各部位组织的均匀性:

$$M = \frac{1}{G_{avg}} \sqrt{\sum_{i=1}^m (G_i - G_{avg})^2 \frac{P_i}{p}} \quad (11)$$

式中:  $G_{avg}$  为平均晶粒度等级;  $m$  为用于计算的晶粒度等级个数;  $G_i$  为第  $i$  个晶粒度等级;  $P_i$  为第  $i$  个晶粒度等级中包含的晶粒个数;  $p$  为所有晶粒度等级中包含的晶粒总数。晶粒组织均匀性好的区域  $M$  值较小。

由图 16 可知,大型阀体锻件左右两侧法兰实现了完全再结晶,通过使用点追踪方法对阀体成形件的侧法兰进行分析。图 25 所示为侧法兰的取点位置,图 26 为其节点与晶粒度的关系曲线。经过计算得,阀体成形件侧法兰区域  $M=0.17$ 。均匀性函数  $M$  不仅可以评估成形件的某一个区域,而且可以评估整个成形件<sup>[25]</sup>。图 27 所示为大型高压阀体锻件晶粒度等级占比情况,  $M=0.43$ 。

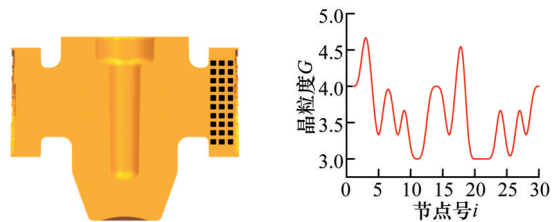


图 25 侧法兰点追踪位置

Fig.25 Side flange point tracking position

图 26 完全再结晶区节点与晶粒度的关系曲线

Fig.26 Relationship curve between complete recrystallization zone nodes and grain size

2) 大型阀体锻件未完全再结晶部位,利用均匀性函数  $K$  来评估大型阀体锻件各部位组织的均匀性:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{G}_{S_i} - \bar{G}_X|}{n} \quad (12)$$

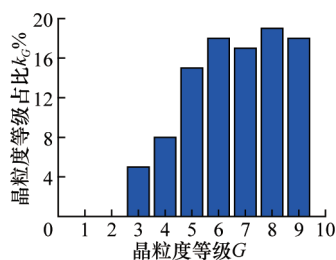


图27 晶粒度等级占比

Fig.27 Proportion of grain size grade

式中： $\bar{G}_s$ 为残余原始晶平均晶粒度等级； $\bar{G}_X$ 为动态再结晶平均晶粒度等级； $n$ 为取样节点总数。

晶粒组织均匀性好的区域 $K$ 值较小。

## 5 结论

1)针对大型高压阀体制定了多向模锻成形工艺,基于DEFORM-3D软件对其成形进行了有限元模拟,表明了塑性金属横向流动接触到水平挤压头时,水平挤压头以垂直穿孔针移动的速度后退可以保证阀体侧法兰顶部和底部同时成形,有效避免折叠等缺陷。

2)基于阀体成形时的温度场和应变场分析了动态再结晶体积分数、动态再结晶晶粒尺寸、残余原始晶粒尺寸和平均晶粒尺寸演变规律,表明了低温和小应变不利于阀体锻件实现完全动态再结晶,同时也表明了阀体在多向模锻过程中细化了晶粒、减少了组织缺陷,并改善成形质量。

3)提出了阀体锻件晶粒组织均匀性评价的方法,并利用点追踪功能对阀体侧法兰进行分析,表明了多向模锻成形的阀体组织均匀性优良。

## 参考文献:

- [1] 拱中秋. 海洋油气开采用深水闸阀关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.  
GONG Zhongqiu. Research on Key Technology of Deep-water Gate Valve for Marine Oil and Gas Exploitation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [2] 聂俊初, 王峥, 邢健博, 等. 基于数值模拟的QT500-7固定底座砂型铸造工艺优化研究[J]. 金属加工(热加工), 2025(2): 140-146.  
NIE Junreng, WANG Zheng, XING Jianbo, et al. Optimization of Sand Casting Process for QT500-7 Fixed Base via Numerical Simulation[J]. MW Metal Forming, 2025(2): 140-146.
- [3] 张家伟, 王金业, 吴艳丽, 等. 球阀阀体的两种多向模锻成形工艺探究[J]. 锻造与冲压, 2023(7): 41-43.  
ZHANG Jiawei, WANG Jinye, WU Yanli, et al. Research on Two Multi-directional Die Forging Process of Ball Valve Body[J]. Forging & Metalforming, 2023(7): 41-43.
- [4] 胡红磊. 水平带法兰阀体多向模锻工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.  
HU Honglei. Study on Multiple-ram Forging Process of Level Flanged Valve[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [5] 顾文俊. 空排止回阀阀体多向模锻工艺研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.  
GU Wenjun. Research on Multidirectional Forging Process for Check Valve Body[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [6] 殷华英. 基于有限元模拟的四通阀体多向模锻工艺研究[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(2): 81-90.  
YIN Huaying. Multi-directional Die Forging Process for Four-way Valve Body Based on Finite Element Simulation[J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(2): 81-90.
- [7] 熊文涵. 三通阀体多向模锻工艺有限元仿真及工艺参数优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.  
XIONG Wenhan. Finite Element Simulation and Process Parameter Optimization of Multi-direction Die Forging for Three-way Valve Body[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [8] 李岩杰, 臧振东, 李立勋, 等. 含V微合金钢连铸坯高温热塑性的表征及应用[J]. 中国冶金, 2025, 35(1): 70-76.  
LI Yanjie, ZANG Zhendong, LI Lixun, et al. Characterization and Application of High Temperature Thermoplasticity of V-containing Microalloyed Steel Continuous Casting Billets[J]. China Metallurgy, 2025, 35(1): 70-76.
- [9] ZHANG Rui, LI Zhou, SHENG Xiaofei, et al. Grain Refinement and Mechanical Properties Improvements in a High Strength Cu-Ni-Si Alloy during Multidirectional Forging[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 159: 111766.
- [10] 罗林丰. 4130钢阀体多向模锻过程晶粒演化及数值模拟研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.  
LUO Linfeng. Study on Grain Evolution and Numerical Simulation of 4130 Steel Valve Body in Multi-directional Die Forging Process[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [11] 向彪, 孙朝远, 陈雷. F22高强钢的热变形行为与晶粒组织预测[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(9): 144-150.  
XIANG Biao, SUN Chaoyuan, CHEN Lei. Hot Deformation Behavior and Grain Structure Prediction of F22 High-strength Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(9): 144-150.
- [12] 王庆娟, 张昭, 杜忠泽, 等. B55SiCr钢的高温流变行为及动态再结晶临界条件[J]. 钢铁, 2024, 59(4): 168-178.  
WANG Qingjuan, ZHANG Zhao, DU Zhongze, et al. High-temperature Flow Behavior and Critical Conditions of Dynamic Recrystallization of B55SiCr Steel[J]. Iron & Steel, 2024, 59(4): 168-178.
- [13] 侯成浩, 周楠, 黎小辉, 等. MgAlLiZnTi轻质高熵合金的热变形行为与热加工图研究[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(4): 612-618.  
HOU Chenghao, ZHOU Nan, LI Xiaohui, et al. Study on Thermal Deformation Behavior and Hot Working Diagram of MgAlLiZnTi Light High Entropy Alloy[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(4): 612-618.
- [14] 房芳, 李继文, 魏世忠, 等. 烧结态W-80Cu合金高温压缩变形行为及本构关系[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 1-7.  
FANG Fang, LI Jiwen, WEI Shizhong, et al. High Temperature Compression Deformation Behavior and Constitutive Relationship of Sintered W-80Cu Alloy[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 40(6): 1-7.
- [15] 周潼, 程军, 王克鲁, 等. Ti2AlNb基合金热变形行为及

(编辑 王旻玥)

- 加工图研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(11): 2757-2765.
- ZHOU Tong, CHENG Jun, WANG Kelu, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of Ti<sub>2</sub>AlNb-based Alloys[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(11): 2757-2765.
- [16] POLIAK E I, JONAS J J. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation[J]. ISI International, 2003, 43(5): 684-691.
- [17] 陈国鑫, 桑宝光, 刘宏伟, 等. H13钢高温热变形特征与动态再结晶行为[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(6): 193-202.
- CHEN Guoxin, SANG Baoguang, LIU Hongwei, et al. Hot Deformation Characteristics and Dynamic Recrystallization Behavior of H13 Steel at High Temperature[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(6): 193-202.
- [18] 丁小凤, 赵富强. 挤压态镁合金动态再结晶临界模型[J]. 重型机械, 2020(5): 31-35.
- DING Xiaofeng, ZHAO Fuqiang. Critical Model on Dynamic Recrystallization of As-extruded Magnesium Alloys [J]. Heavy Machinery, 2020(5): 31-35.
- [19] 王涛, 曹澜川, 万志鹏, 等. GH4720Li铸态合金热变形动态再结晶预测[J]. 热加工工艺, 2022, 51(8): 48-52.
- WANG Tao, CAO Lanchuan, WAN Zhipeng, et al. Prediction on Dynamic Recrystallization of GH4720Li Cast Superalloy during Hot Deformation[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(8): 48-52.
- [20] 胡志强, 王开坤, 崔磊, 等. 退火态42CrMo钢的热变形行为[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(2): 125-134.
- HU Zhiqiang, WANG Kaikun, CUI Lei, et al. Hot Deformation Behavior of Annealed 42CrMo Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(2): 125-134.
- [21] WANG Zhongtang, ZHANG Shihong, CHENG Ming, et al. Kinematics and Dynamics Model of GH4169 Alloy for Thermal Deformation[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17(7): 75-78.
- [22] LIU J, CUI Z, RUAN L. A New Kinetics Model of Dynamic Recrystallization for Magnesium Alloy AZ31B[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 529: 300-310.
- [23] THOMAS J P, BAUCHET E, DUMONT C, et al. EBSD Investigation and Modeling of the Microstructural Evolutions of Superalloy 718 during Hot Deformation[C]// Proceedings of the 10th International Symposium on Superalloys(Superalloys 2004). Pennsylvania, 2004: 959-968.
- [24] TANG Xuefeng, WANG Baoyu, HUO Yuanming, et al. Unified Modeling of Flow Behavior and Microstructure Evolution in Hot Forming of a Ni-based Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 662: 54-64.
- [25] ITO Y, HOSHI N, HAYAKAWA T, et al. Mechanical Properties and Biological Responses of Ultrafine-grained Pure Titanium Fabricated by Multi-directional Forging[J]. Materials Science and Engineering: B, 2019, 245: 30-36.

**作者简介:**金 淼(第一作者),男,1968年生,教授、博士研究生导师。研究方向为锻造工艺、成形设备现代设计理论、板料成形。E-mail:jmiao@ysu.edu.cn。金 淼(第四作者),硕士研究生。张庆玲(通信作者),女,1980年生,博士、正高级实验师。主要研究方向为弹塑性分析设计理论与试验。E-mail:zhql@ysu.edu.cn。

**本文引用格式:**

金淼,秦锐,李文玉,等. 大型高压阀体多向模锻成形工艺及晶粒组织演变预测[J]. 中国机械工程, 2026, 37(3): 717-725.

JIN Miao, QIN Rui, LI Wenyu, et al. Multi-directional Die Forging Forming Process and Grain Structure Evolution Prediction of Large High-pressure Valve Bodies [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3): 717-725.

**(上接第716页)**

[30] KUHN H A. Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials [J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1971, 7: 15-26.

[31] 任学平, 康永林. 粉末塑性加工原理及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 75-76.

REN Xueping, KANG Yonglin. Principle and Application of Powder Plastic Processing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 75-76.

[32] 刘鸿文. 材料力学- II [M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 33.

LIU Hongwen. Mechanics of Materials [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2011: 33.

(编辑 王旻玥)

**作者简介:**王国栋,男,1994年生,博士研究生。研究方向为锂离子电池极片辊压工艺。E-mail:wanguodong0150@163.com。

王东城(通信作者),男,1981年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为高端带材产品质量智能检测与控制、板带轧制理论与技术。E-mail:wangdongcheng@ysu.edu.cn。

**本文引用格式:**

王国栋,王东城,段伯伟,等. 基于Kuhn屈服准则的锂离子电池极片辊压力建模与分析[J]. 中国机械工程, 2026, 37(3): 708-716.

WANG Guodong, WANG Dongcheng, DUAN Bowei, et al. Modeling and Analyses of Calendering Pressure for Lithium-ion Battery Electrodes Based on Kuhn Yield Criterion [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3): 708-716.