

新型耐热钢 G115 大口径无缝管挤压模拟

车洪艳¹, 孙嘉汐¹, 孙东志², 马迎松³, 魏佳雨¹, 李永清⁴, 何西扣¹

- (1. 中国钢研科技集团 钢铁研究总院有限公司, 北京 100081; 2. 德国 sunCAE 咨询公司, 德国 弗莱堡 79098;
3. 广西科技大学 机械与汽车工程学院, 广西壮族自治区 柳州 545006;
4. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古自治区 包头 014030)

摘要: 为提高 G115 马氏体耐热钢产品质量、优化工艺流程、节约研发时间和成本, 采用通用有限元软件 ABAQUS 对 G115 钢大口径无缝管挤压过程进行模拟, 使用任意拉格朗日欧拉 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 公式的数值模型解决了模拟超大型塑性变形的难点, 同时建立了准确的摩擦模型和考虑各种影响因素的材料模型, 通过对比仿真与试验结果, 验证了模型的准确性, 并研究了初始挤压温度和挤压速度、摩擦因数、最大剪应力对挤压的影响。结果表明: 随着初始挤压温度的提高, 所需挤压力下降; 挤压速度越大, 所需挤压力越大; 摩擦因数、最大剪应力与挤压力均为正相关关系。

关键词: G115 马氏体耐热钢; 热挤压; ABAQUS; 大口径无缝管; 热力耦合

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.014

中图分类号: TG335.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 03-0120-08

Simulation of extrusion for large-diameter seamless tube of new heat-resistant steel G115

Che Hongyan¹, Sun Jiayi¹, Sun Dongzhi², Ma Yingsong³, Wei Jiayu¹, Li Yongqing⁴, He Xikou¹

- (1. Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., China Iron & Steel Research Institute Group Co., Ltd., Beijing 100081, China;
2. sunCAE Consulting, Gundelfingen 79098, Germany; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 4. Inner Mongolia Northern Heavy Industries Group Corp. Ltd., Baotou 014030, China)

Abstract: In order to improve the product quality, optimize the process flow and save the research and development time and cost of G115 martensitic heat-resistant steel, the extrusion process of large-diameter seamless tube of G115 steel was simulated by finite element software ABAQUS, and the difficulty of simulating super-large plastic deformation was solved by using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation. Then, an accurate friction model and a material model considering various influencing factors were established, and the accuracy of the model was verified by comparing the simulation and experimental results. Furthermore, the influences of initial extrusion temperature, extrusion speed, friction factor and maximum shear stress on the extrusion were studied. The results show that with the increasing of initial extrusion temperature, the required extrusion force decreases, while the influence of the extrusion speed is opposite. The greater the extrusion speed, the greater the required extrusion force. The friction factor and the maximum shear stress are both positively correlated with the extrusion force.

Key words: G115 martensitic heat-resistant steel; hot extrusion; ABAQUS; large-diameter seamless tube; thermal-mechanical coupling

节能减排是目前经济发展需要考虑的两个重要方向, 提高火电机组效率是目前实现节能减排目标行之有效的重要手段。火电机组的效率主要取决于机组的蒸汽温度和蒸汽压力, 而高温段耐热钢的开发是提高机组蒸汽参数的最关键因素。钢铁研究总院有限公司在国内率先开展 9Cr-3W-3Co 系耐热钢相

关研究工作, 经过数十年的攻关, 成功开发出在 620~650 °C 下具有优异组织稳定性的马氏体耐热钢 G115, 其蠕变性能为 P92 钢的 5 倍, 且高温抗氧化性能优于 P92 钢^[1-3]。

G115 钢的成功研发为提高火电机组的效率提供了材料基础, 而攻克大口径厚壁无缝管的制备技术则为 G115 钢的工程应用奠定基础。随着无缝管挤压技术的不断进步, 如何通过数值模拟优化工艺参数、减少缺陷并提高设备寿命, 成为了研究的另一个热点。因此, 模拟工具被用于设计和改进挤压模具, 调整挤压力、温度以及其他关键工艺参数。近

收稿日期: 2025-01-02; 修订日期: 2025-02-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFF0618901)

作者简介: 车洪艳 (1977-), 女, 博士, 正高级工程师

E-mail: chehy.2009@tsinghua.org.cn

年来,国内外学者在大口径厚壁管挤压成形工艺和材料性能方面进行了卓有成效的探索和研究。

国内相应领域的有限元模拟工作起步较晚,对于大口径无缝管的热挤压模拟主要开展了以下工作。朱祥龙等^[4]采用响应曲面法研究挤压成形参数对光管应力、等效塑性应变和挤压力的影响,得到用于预测凹坑换热管成形力学响应的响应曲面模型,得出各因素对应力的影响程度顺序为:挤压深度>挤压间距>压头半径。太原钢铁(集团)有限公司的于志强等^[5]对 316L 内圆外方的异型钢管热挤压进行了数值模拟和生产试验,研究了挤压温度、挤压速度对挤压生产的影响,确定最优挤压工艺为:挤压温度为 1180~1200℃,挤压速度为 200 mm·s⁻¹。马晓晖^[6]基于 Avrami 方程,通过统计回归首次得到了 P91 合金钢的动态再结晶数学模型,并应用于该钢种的组织预测,得到了挤压比对钢管组织性能的影响规律,确认生产中采用 5~7 的挤压比是合理的。翟月雯博士^[7]研究了热锻条件下 P91 合金钢材料的宏观变形力学特征和晶粒演化规律,构建了可用于热锻全过程数值模拟的宏微观耦合的本构模型。太原科技大学李永堂团队^[8~11]对厚壁管的新型挤压工艺做了大量细致的工作,建立了铸态 P91 钢厚壁管的热挤压有限元模型,得到了以规格 $\Phi 720$ mm(外径)×100 mm(壁厚) P91 钢厚壁管的热挤压模具优化参数,建议挤压角选取范围为 45°~55°,模具初始温度取值范围为 250~350℃,其中,铸坯预热温度、挤压速度和挤压比是影响管件晶粒大小及均匀性的主要因素,当铸坯预热温度为 1200℃、挤压比为 9、挤压速度为 40 mm·s⁻¹时,厚壁管晶粒细小且分布均匀。高润哲等^[10]和贾璐等^[11]研究了大口径厚壁管热挤压模具磨损模型,基于 Archard 磨损模型得到了一种能够预测大口径厚壁管热挤压模具磨损的模型,在金属坯料与模具处于热平衡状态时,该状态持续时间与当前温度是影响磨损的主要因素,得到了以温度变化为主的温度-硬度方程、温度-磨损系数方程,以及以时间变化的为主的时间-硬度方程、时间-磨损系数方程,优化了适用于大口径厚壁管热挤压模具的磨损模型。Hsiang S H 和 Lin Y W^[12~13]结合上限法和有限元差分法,建立了一个可以预测挤压过程中金属变形性能和载荷分布的数学模型,且通过正交法分析了不同工艺参数对管件成形的影响。Guo L G 等^[14]建立了 AISI304 不锈钢无缝钢管($\Phi 29$ mm(外径)×4.5 mm(壁厚))挤压过程的多尺度有限元模型,并通过数值

模拟研究了关键挤压参数,即初始坯料温度和挤压速度对动态再结晶体积分数、平均晶粒尺寸及其分布的影响规律,研究结果为挤压过程的优化设计和稳态控制提供了依据和指导。李春雨等^[15]在 ABAQUS 软件上建立 304 不锈钢热压缩和热挤压过程的热力耦合模型,对实验钢的热挤压模拟温度场和应力、应变场的变化规律进行了深入分析,同时借助 ABAQUS 的二次开发功能,对微观组织演变进行了数值模拟,揭示了动态再结晶体积分数、晶粒尺寸、平均晶粒尺寸以及晶粒分布均匀性等的变化规律。

目前,对于热挤压的模拟主要集中在采用 Avrami 方程和 Z 参数构建材料本构方程,主要考虑温度、应变速率与应力的关系或建立动态再结晶模型^[16]。对于部件与模具之间的摩擦问题,基本采用库伦摩擦模型来处理。而热挤压过程中不但有大量的部件塑性变形,也会在接触处产生极大的剪应变,导致在部件边缘产生很大的应变能,进而会促进边缘的再结晶及晶粒粗大^[17~18]。

总之,挤压过程的摩擦模型并非简单线性模型,需要综合考虑正应力、剪切应力及滑动速度的影响。而正确的模拟部件与模具之间的摩擦过程是决定模拟精度的重要因素。热挤压产品中经常出现的组织非均匀性与摩擦对晶粒的动态再结晶、静态再结晶及晶粒长大的影响直接相关。发展可靠适用的摩擦模型需要做较复杂的摩擦试验和开发有限元的子程序。本文主要针对 G115 马氏体耐热钢大口径无缝管的挤压过程进行建模,并通过试验确定材料参数和验证模拟结果,优化有限元模拟;研究挤压温度和挤压速度对挤压结果的影响。

1 试验材料与模型建立

1.1 试验材料

G115 马氏体耐热钢的化学成分如表 1 所示。挤压坯锭尺寸为 1250 mm×355 mm×1500 mm。采用天然气将钢锭加热至 (1140±10)℃,之后进行闭式镦粗+反挤压冲孔,镦粗比为 1.56,穿孔比为 1.1,制成空心坯料。将坯料加热至 (1270±10)℃,进行热

表 1 G115 钢的化学成分(%,质量分数)
Table 1 Chemical compositions of G115 steel
(%, mass fraction)

C	Cr	Co	W	Mn	Si	V	B	Cu	N	Fe
0.08	8.62	2.97	2.60	0.46	0.24	0.17	0.015	0.84	0.0074	余量

正向挤压，挤压速度为 $45\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，挤压比为 5.2。

部分材料参数如图 1 和表 2 所示，图 1 为不同温度、不同应变速率下材料的真应力-真应变曲线。

表 2 为 G115 钢的力学性能参数，包括不同温度下的热扩散率、比热容、热导率、杨氏模量、剪切模量和泊松比。

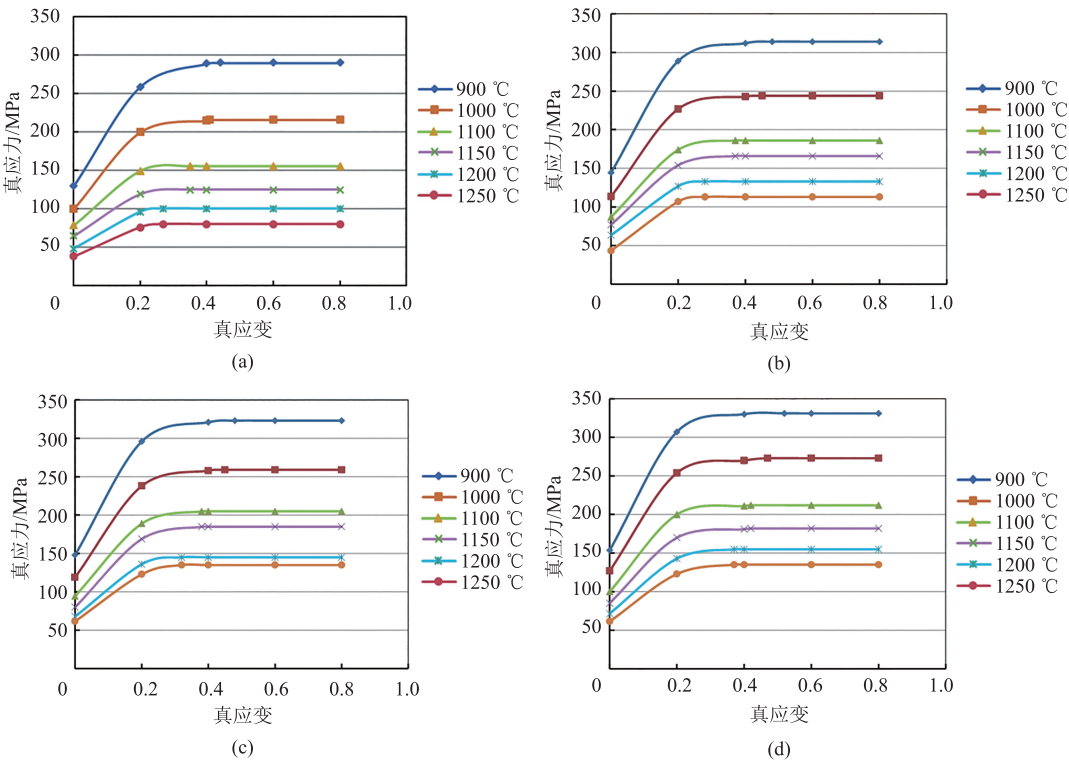


图 1 不同温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

(a) 应变速率为 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (b) 应变速率为 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (c) 应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (d) 应变速率为 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Fig. 1 True stress-true strain curves at different temperatures and strain rates

(a) Strain rate of $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (b) Strain rate of $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (c) Strain rate of $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (d) Strain rate of $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

表 2 G115 钢的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of G115 steel

温度/℃	热扩散率/ $(\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	杨氏模量/GPa	剪切模量 G/GPa	泊松比 μ
100	6.19	518	25.7	211	81.5	0.30
200	5.91	586	27.3	205	78.8	0.30
300	5.63	655	29.0	198	76.1	0.30
400	5.34	716	30.2	191	73.0	0.31
500	5.02	768	30.5	182	69.4	0.31
600	4.51	817	29.1	172	64.7	0.33
700	3.89	843	25.9	159	81.5	0.35

注：200 ℃ 以下的数据为外推值。

1.2 模型建立

在热挤压变形过程中，温度对变形影响较大，材料变形应变与温度密切相关，厚壁管的挤压过程为热力耦合的过程。本文采用适合大变形模拟的 Abaqus/Explicit 算法，同时采用任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 公式的数值模

型解决了模拟超大塑性变形的难点，建立了准确的摩擦模型和考虑各种影响因素的材料模型。

在厚壁管的高温挤压过程中，坯料的温度在 1100 ℃ 以上，其屈服点低塑性变形极大，而模具的温度只有 350 ℃ 左右并且受载应力小，所以在模拟时可以处理为刚体或线弹性体。坯料和模具的相互

作用与流体-结构的相互作用类似。任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 有限元方法是一种有效模拟流体与结构相互作用的工具。当结构附近的流体网格经历大变形并变得不可接受的扭曲, 会导致显式计算的时间步长变得非常小, 甚至无解, 使用 ALE 方法则可为流体区域生成一个新的未扭曲网格, 从而使计算得以继续。ALE 方法能够独立控制网格几何形状与材料几何形状。流体-结构相互作用中的关键点之一是需要应用 ALE 公式。该方法基于参考域的任意位移, 除了常见的材料域和空间域之外, 还引入了一个第 3 域——参考域。有限元网格对应于参考域, 因此, 参考系的任意移动必须伴随可靠的网格移动算法, 以便应对合适的移动^[19-20]。下面给出的仿真结果是使用有限元仿真软件 Abaqus/Explicit 中的任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 方法得出的。此外温度增量表达式为:

$$\theta_{m+1}^N = \theta_m^N + \Delta t_{m+1} \dot{\theta}_m^N \quad (1)$$

式中: θ_{m+1}^N 为 $m+1$ 时刻节点 N 的温度; θ_m^N 为 m 时刻节点 N 的温度; Δt_{m+1} 为增量时间; $\dot{\theta}_m^N$ 为 m 时刻节点 N 的温度增量速度。

热应力物理方程为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = D_{ijkl}^{-1} \boldsymbol{\sigma}_{kl} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^0 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^0 = [\alpha_T \Delta T, \alpha_T \Delta T, \alpha_T \Delta T, 0, 0, 0]^T \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ 为材料形变的张量表示, 包含弹性应变和热膨胀应变; $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^0$ 为热膨胀应变; D_{ijkl}^{-1} 为材料的柔度特性, 描述应力如何转换为弹性应变; $\boldsymbol{\sigma}_{kl}$ 为材料内部受状态的张量表示; α_T 为热膨胀系数; ΔT 为温差。

根据热挤压中坯锭、芯棒、上模具和下模具的几何对称性, 为减少计算量, 有限元分析选用轴对称 1/24 模型, 即在模拟计算的过程中材料的位移、应变、温度、应力等均为轴对称。

本文探讨了摩擦力对挤压载荷位移曲线的影响, 这里在采用库伦摩擦模型的同时, 引入了一个剪应力极限值, 即界面在表面开始滑动之前能够承受的最大剪应力值 τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \sigma_e / \sqrt{3} \quad (4)$$

式中: σ_e 为等效屈服应力。

2 G115 钢热挤压有限元模拟

2.1 热挤压有限元模型及材料设置

本文中大口径厚壁管的挤压方式为正向挤压, 几何模型建立为轴对称模型。图 2 显示模拟的挤压系统包括上下模具、挤压筒、挤压垫、芯棒和坯料。

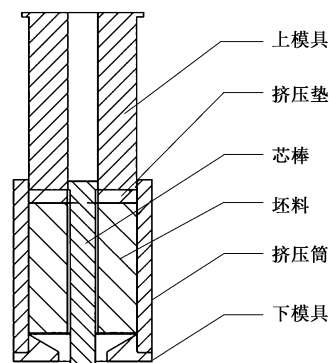


图2 挤压系统的轴对称模型

Fig. 2 Axisymmetric model of extrusion system

挤压过程中三维模型 (1/24 模型) 如图 3 所示。坯料为可变形塑性体, 模具在不考虑接触面热传导的情况下定义为刚体, 在考虑接触面热传导的情况下定义为线弹性体, 下模模角为 45° , 定径区长度为 100 mm, 模具采用 H13 合金钢。坯锭采用锻态 G115 合金钢热压缩试验所得的本构方程和利用拟合所得的材料热物理性能参数。仿真中使用了弹塑性 Von Mises 本构模型, 相应的真应力-真应变曲线及温度和应变速率的影响是以表格的形式输入的。

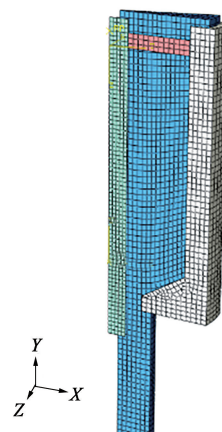


图3 挤压过程中坯料及模具的三维图 (1/24 模型)

Fig. 3 3D diagram of billet and die during extrusion process (1/24 model)

2.2 网格划分及边界条件设置

热挤压属于大塑性变形, 为保证有限元计算的精度, 坯锭网格采用欧拉三维实体八节点缩减积分单元 (EC3D8R), 网格划分采用结构化划分, 并且为了减少网格畸变达到计算收敛, 坯锭网格选用 ALE 划分, 即采用 Lagrange 和 Euler 耦合的算法。坯料和模具的热传导方式主要为接触换热, 坯料在流出挤压筒后热传导方式主要为辐射散热。定义间隙热传导系数、间隙热辐射率及边界层系数, 坯料

与模具接触为面接触。对比了试验结果与仿真结果,并分析了3种摩擦因数对模拟结果的影响,其中包括摩擦因数取为0.01、0.02和0.04,定义最大摩擦剪应力为52 MPa。模具初始温度为350 ℃,坯料初始温度为1170、1220和1270 ℃,下模位置约束固定,上模挤压速度为25、35和45 mm·s⁻¹,计算模拟不同工艺参数下的挤压过程。

3 数值模拟结果分析

图4为挤压力-位移曲线试验结果与模拟(初始挤压温度为1270 ℃、挤压速度为45 mm·s⁻¹、最大摩擦剪应力为52 MPa、模具初始温度为350 ℃、摩擦因数为0.02)结果对比。从图4中可以看出,模拟结果与试验结果吻合较好,验证了模型的准确性。基于此模型中挤压温度、挤压速度、摩擦因数对模拟结果的影响进行了对比分析。

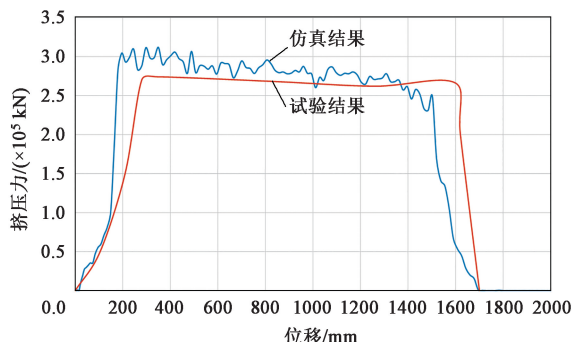


图4 挤压力-位移曲线模拟结果与试验结果的对比

Fig. 4 Comparison of extrusion force-displacement curve between simulation and experiment results

3.1 初始挤压温度的影响

挤压温度的选择需要根据坯锭 G115 合金钢相图、合金性质、挤压时变形热等进行综合考虑,挤压温度应为变形区温度,然而在实际生产中,严格控制挤压温度较难实现。因此,本文研究坯料的初始挤压温度对挤压过程的影响。在热挤压过程中,坯料热量来源包含初始温度、挤压产生的变形热、金属受挤压力作用与模具摩擦产生的摩擦热。在挤压变形过程中,大部分的变形能量将以热量的方式释放,一般来说,挤压变形区的温度会比初始挤压温度高几十度,如果初始挤压温度过高,则变形区的温度也较高,过高的温度会影响坯锭的表面质量及尺寸精度,降低金属流动速度,使得坯锭晶粒粗大甚至过烧,本文依据工程实际设计初始挤压温度为1170、1220和1270 ℃。

图5a为不同初始挤压温度下挤压力(载荷)与位移的关系,其中挤压比为5.2,挤压速度为45 mm·s⁻¹,摩擦因数为0.02,最大摩擦剪应力为52 MPa。图5b为不同挤压速度下挤压力-位移曲线的对比,挤压温度为1270 ℃,摩擦因数为0.02,最大摩擦剪应力为52 MPa。

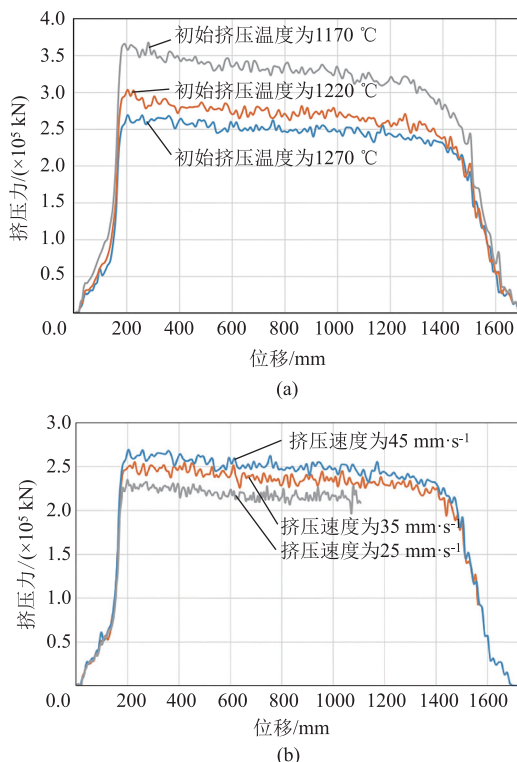


图5 不同初始挤压温度下(a)和不同挤压速度下(b)挤压力-位移曲线对比

Fig. 5 Comparison of extrusion force-displacement curves under different initial extrusion temperatures (a) and different extrusion speeds (b)

由图5a可知,不同挤压温度下,在挤压初始阶段挤压力随着挤压的进行而逐渐增大,在达到最大值后,随着金属流出挤压筒,坯料与模具接触面减少,挤压力不断下降;在相同挤压条件下,1270 ℃下最大挤压力为 2.64×10^5 kN左右,随着挤压温度的降低,挤压力升高。这与材料的应力-应变曲线随温度的变化一致。在1170 ℃,最大挤压力达到 3.6×10^5 kN左右,而1220 ℃下的最大挤压力为 3×10^5 kN左右,且所有的挤压力随着挤压的进行逐渐降低。

3.2 挤压速度的影响

挤压速度的大小直接影响挤压生产的效率,一般在保证产品质量和设备能力的条件下,应尽可能提高挤压速度。对于G115难变形合金钢来说,可挤压性较差,挤压过程中需要较大的挤压速度,根据工程实际,研究挤压速度为25~45 mm·s⁻¹的挤

压情况。图 5b 为不同挤压速度下, 挤压头在挤压过程中挤压力与位移的关系, 其中热挤压温度为 $1270\text{ }^{\circ}\text{C}$, 挤压比为 5.2, 摩擦因数为 0.02, 最大摩擦剪应力为 52 MPa 。

从图 5b 可知, 随着挤压的进行, 挤压力不断增加, 达到最大值后, 挤压力随着挤压的进行而缓慢的降低, 当金属完全流出挤压筒后, 挤压力大幅降低。随着挤压速度的增加, 最大挤压力增加, 其

中挤压速度为 $45\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的挤压力最大, 挤压效率最高; 挤压速度为 $25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的挤压力最小, 在同样的时间内未完全完成挤压。此结果与应变率对材料屈服点的影响一致。

图 6 为挤压温度为 $1270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、挤压速度为 $45\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.02、最大摩擦剪应力为 52 MPa 时不同计算步骤下的应力云图。图 7 为等效塑性应变云图, 图 8 为模具温度变化云图。

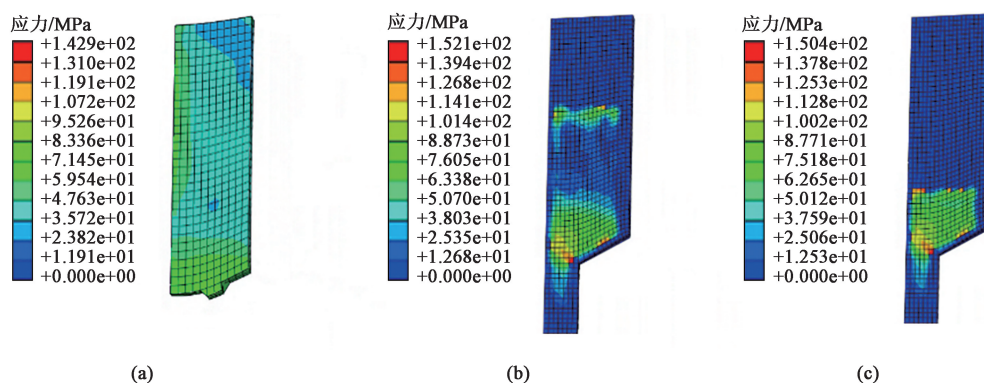


图 6 不同挤压时间下的应力云图

(a) Step 10 (b) Step 30 (c) Step 50

Fig. 6 Stress nephograms at different extrusion time

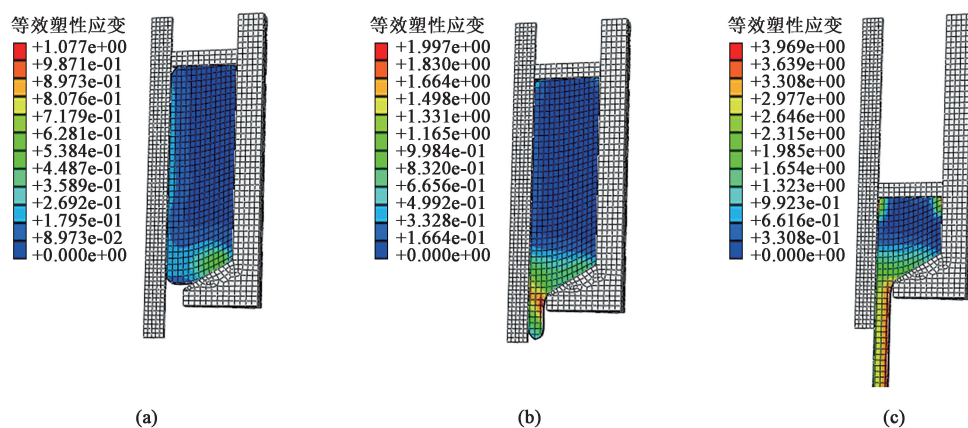


图 7 不同挤压时间下的等效塑性应变云图

(a) Step 10 (b) Step 30 (c) Step 50

Fig. 7 Equivalent plastic strain nephograms at different extrusion time

从图 6 可以看出, 应力随着挤压的进行逐渐增加, 在挤出口附近应力达到最大值, 随着金属流出挤压筒, 应力逐渐降低。从图 7 可以看出, 挤压开始以后, 坯料与模具接触处的应变较大, 金属流出挤压筒后, 在出口处应变达到最大值。从图 8 可以看出, 坯料与模具之间发生了热传导, 其中上压头与坯料相接触表面的温度较高, 达到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 随着挤压的进行, 内挤压筒散热较慢, 外挤压筒散热较快。

3.3 摩擦对挤压结果的影响

本文采用的摩擦模型是基于库伦摩擦模型与剪应力极限的结合, 即界面在表面开始滑动之前能够承受的最大剪应力值为 τ_{\max} (式 (4))。根据高温拉伸试验结果, 将 σ_e 取为 90 MPa , 因此 $\tau_{\max} = 52\text{ MPa}$ 。

图 9 为摩擦因数分别为 0.01、0.02 和 0.04 情况下挤压力与位移的关系曲线, 其中最大剪应力值为 52 MPa 。随着摩擦因数的加大, 总的挤压力增

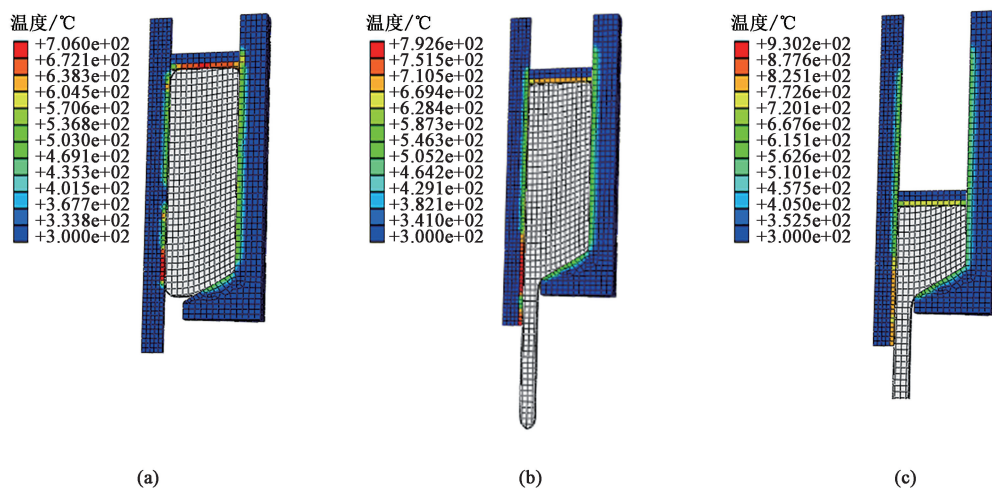


图 8 不同挤压时间下的模具温度云图

(a) Step 10 (b) Step 30 (c) Step 50

Fig. 8 Die temperature nephograms at different extrusion time

加。应变的分布受摩擦力的影响很大，摩擦力导致在坯料与模具的接触面附近应变大于芯部的应变值，如图 7 所示，最终造成显微组织在横截面分布不均匀。此外，还探讨了最大剪应力对挤压力-位移曲线的影响（摩擦因数为 0.02），图 10 为不同剪应力下挤压力-位移曲线对比。

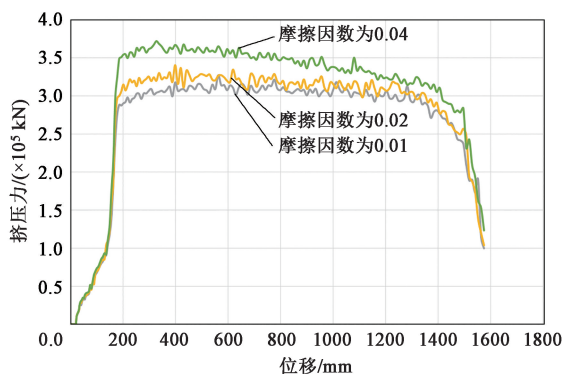


图 9 不同摩擦因数下的挤压力-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of extrusion force-displacement curves under different friction factors

从图 10 可以看出，同样摩擦因数（0.02）下，不同最大剪应力值对载荷-位移曲线有一定的影响，随着剪应力的增加，最大载荷增加，最大剪应力为 52 MPa 时峰值载荷最低。在同样的摩擦因数下，峰值载荷随着最大剪应力的增加而增加，因此，考虑最大剪应力的摩擦模型可以更加准确地模拟实际试验。

4 结语

为提高产品质量，优化工艺流程，节约研发时

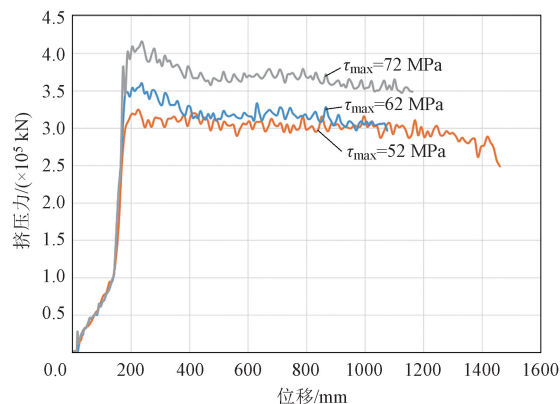


图 10 不同剪应力下挤压力-位移曲线对比

Fig. 10 Comparison of extrusion force-displacement curves under different shear stresses

间和成本，对 G115 钢大口径无缝管挤压过程进行了系统的有限元模拟。使用任意拉格朗日欧拉 (ALE) 公式的数值模型解决了模拟超大塑性变形的难点，同时用不同方法模拟了坯料与模具之间的摩擦效应，预测了挤压温度和挤压速度对宏观挤压力 and 微观应力应变分布的影响，为分析加工工艺与显微组织的关系提供了必要的基础数据。随着挤压速度的增加，挤压力明显提高，在研究的范围内坯料初始温度的影响不大。坯料与模具的摩擦导致应变分布非均匀，表面应变高于内部应变。

参考文献:

- [1] 刘正东, 程世长, 王起江, 等. 中国 600 °C 火电机组用锅炉钢进展 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
Liu Z D, Cheng S C, Wang Q J, et al. Progress in Boiler Steels

- for 600 °C Thermal Power Units in China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [2] 杨素宝, 刘正东, 程世长. 超超临界火电机组用关键锅炉炉性能分析 [J]. 钢铁研究学报, 2010, 22 (1): 37-42.
- Yang S B, Liu Z D, Cheng S C. Property analysis of key boiler steels used for ultra-supercritical power plants [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22 (1): 37-42.
- [3] 张伟. 不同铬含量耐热钢的高温蒸汽氧化行为研究 [D]. 北京: 钢铁研究总院, 2024.
- Zhang W. Study on High Temperature Steam Oxidation Behavior of Different Chromium Content Heat Resistant Steels [D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2024.
- [4] 朱祥龙, 谢帅, 董超群, 等. 基于响应曲面法的凹坑换热管挤压成形力学行为数值模拟 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 110-120.
- Zhu X L, Xie S, Dong C Q, et al. Numerical simulation of mechanical behaviour for dimpled heat exchange tube extrusion forming based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 110-120.
- [5] 于志强, 宋丛飞. 316L 方圆管热挤压工艺数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (3): 126-129.
- Yu Z Q, Song C F. Numerical simulation of hot extrusion process for 316L inner-circular outer-square tube [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (3): 126-129.
- [6] 马晓辉. P91 钢厚壁管立式挤压工艺模拟研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2012.
- Ma X H. Simulation and Experimental Research on Vertical Extrusion for P91 Thick Wall Steel Tube [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2012.
- [7] 翟月雯. P91 合金钢晶粒演化特征研究与厚壁管热挤压工艺数值模拟 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2013.
- Zhai Y W. A Study on Grain Evolution Characteristics of P91 Steel and Numerical of Hot Extrusion of Thick Wall Tube [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2013.
- [8] 王瑞麒, 李永堂, 贾璐, 等. P91 厚壁管热挤压模具参数优化设计 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (1): 58-65.
- Wang R Q, Li Y T, Jia L, et al. Optimal parameters design of hot extrusion die for P91 thick-walled pipe [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (1): 58-65.
- [9] 贾璐, 李永堂, 惠恬静. 大口径厚壁管均匀性热挤压工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (5): 132-141.
- Jia L, Li Y T, Hui T J. Uniformization hot extrusion of heavy caliber thick-walled pipe [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (5): 132-141.
- [10] 高润哲, 雷步芳, 张翔宇, 等. 大口径厚壁管热挤压模具磨损模型的建立 [A]. 第九届全国地方机械工程学会学术年会论文集 [C]. 郑州, 2019.
- Gao R Z, Lei B F, Zhang X Y, et al. Establishment of a wear model for hot extrusion dies of large-diameter thick-walled tubes [A]. Proceedings of the 9th National Academic Annual Meeting of Local Mechanical Engineering Societies [C]. Zhengzhou, 2019.
- [11] 贾璐, 李永堂, 李振晓. 基于 ABAQUS 的铸态耐热合金钢热挤压成形数值模拟研究 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (5): 108-115.
- Jia L, Li Y T, Li Z X. The numerical simulation based on ABQUS for extrusion forming of cast heat-resisting alloy steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (5): 108-115.
- [12] Hsiang S H, Lin Y W. Optimization of the extrusion process for magnesium alloy sheets using the fuzzy-based taguchi method [J]. The Arabian Journal for Science and Engineering, 2009, 34 (1C): 175-185.
- [13] Hsiang S H, Lin Y W. Application of fuzzy theory to predict deformation behaviors of magnesium alloy sheets under hot extrusion [J]. Journal of Material Processing Technology, 2008, 201 (1-3): 138-144.
- [14] Guo L G, Dong K K, Zhang B J, et al. Dynamic recrystallization rules in needle piercing extrusion for AISI304 stainless steel pipe [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: s519-s527.
- [15] 李春雨, 邱春林. 304 不锈钢热挤压过程中动态再结晶数值模拟研究 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (10): 56-64, 74.
- Li C Y, Qiu C L. Numerical simulation study on dynamic recrystallization during hot extrusion of 304 stainless steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (10): 56-64, 74.
- [16] 李攀, 罗建国, 卜祥丽, 等. 大口径厚壁管道热挤压成形过程微观组织模拟及试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 169-178.
- Li P, Luo J G, Pu X L, et al. Simulation and experimental study on microstructure of large diameter and thick wall pipes during hot extrusion forming process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 169-178.
- [17] Ockewitz A, Sun D Z, Andrieux F. Development of a numerical method for simulation of aluminum extrusion processes with modeling of microstructure [J]. Key Engineering Materials, 2012, 491: 257-264.
- [18] Sun D Z, Ockewitz A, Trondl A. Simulation of extrusion processes of aluminum profiles with modeling of microstructure [A]. International Conference on Aluminum Alloys ICAA16 [C]. Montreal, 2018.
- [19] Souli M, Ouahsine A, Lewin L. ALE formulation for fluid-structure interaction problems [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 190 (5): 659-675.
- [20] Messahel R. ALE and SPH Formulations for Fluid Structure Interaction: Shock Waves Impact [D]. Lille: École doctorale Sciences pour l'ingénieur, 2016.