

基于物性遗传的钢锭铸锻全过程数值模拟

关杉翰, 邱昊岳, 沈厚发

(清华大学材料学院, 北京 100084)

摘要: 基于凸包方法及Python语言, 编写了钢锭缩孔和缩松区域筛选与重构程序, 实现了物性遗传的铸造锻造全过程数值模拟。通过铸造模拟软件数据结果“.unv”提取满足阈值要求的坐标节点, 根据凸包算法重构特征区域的几何实体, 并输出锻造模拟软件可读取的STL文件。钢锭铸造锻造全流程数值模拟结果表明, 凝固过程形成的缩孔和缩松区域在变形过程中边界轮廓清晰。锻造压下率较小时(12%), 缩孔和缩松的体积变化率不大; 压下率达到21.74%时, 缩松区域的体积变化率大于2.7%, 可导致细小孔洞闭合。

关键词: 钢锭; 铸锻全过程; 数据传递; 数值模拟; 缩孔缩松

中图分类号: TG261 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 01-0022-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0004

作者简介:

关杉翰(2002-), 男, 硕士生, 主要研究方向为材料加工模拟仿真。E-mail: guansh21@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:

沈厚发, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 010-62789922, E-mail: shen@tsinghua.edu.cn

收稿日期:

2025-07-08 收到初稿,
2025-09-16 收到修订稿。

引用格式:

关杉翰, 邱昊岳, 沈厚发. 基于物性遗传的钢锭铸锻全过程数值模拟[J]. 铸造, 2026, 75(1): 22-27.

GUAN Shanhan, QIU Haoyue, SHEN Houfa. Numerical simulation of overall casting and forging processes for a steel ingot based on the inherited physical properties[J]. Foundry, 2026, 75(1): 22-27.

钢锭经铸造、锻造及热处理加工成零部件。热加工数值模拟是先进智能制造的重要内容, 全过程模拟仿真是多学科、宏微观耦合研究的发展方向^[1-3]。

目前, 国内外铸造和锻造行业均有功能强大的专业软件^[4-6], 能够实现热加工全过程模拟的软件不多^[7-8]。凝固模拟时, 常采用Niyama判据预测缩孔疏松的形成^[9-10]。Niyama判据基于凝固糊状区枝晶间残余液相渗透的补缩能力, 采用温度梯度及冷却速度的关系式表达。铸造后钢锭所有属性(包括缺陷, 如缩孔疏松、宏观偏析和夹杂物)遗传给锻造过程。因此, 多工序模拟应考虑界面的物性继承^[11-12]。Transvalor公司开发了铸造模拟软件THERCAST和锻造模拟软件FORGE^[4, 8]。THERCAST软件的计算结果将通过metal.may文件无缝传递到FORGE软件中^[13]。该文件包括钢锭凝固结束时的温度场、缩孔缩松、偏析以及应力场, 作为钢锭后续热处理及锻造仿真的初始状态^[7]。FORGE在锻造过程模拟时, 采用Niyama表示锻造过程中随温度梯度及冷却速度变化的疏松演变^[7, 13]。本研究采用特征区域筛选与重构的方法, 探讨基于物性遗传的铸造与锻造模拟衔接。

1 铸锻全过程数值模拟方法

1.1 铸造与锻造过程数值模拟

如图1所示, 采用Solidworks对钢锭几何结构建模。钢锭高度为700 mm, 冒口颈直径为460 mm, 锭尾直径360 mm; 重1.78 t。采用ProCAST软件进行四面体有限元网格划分。图中坐标轴的标定为: 坐标原点位于钢锭底部中心, X轴沿水平向右, Y轴垂直向上, Z轴水平向前。

钢锭的材质为16Mn, 成分如表1所示; 16Mn钢的液相线与固相线温度分别为1 495 °C和1 430 °C。钢锭的热物性参数: 热导率、密

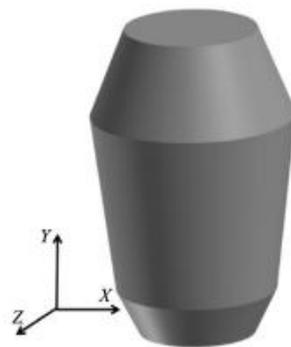


图1 钢锭几何模型

Fig. 1 Geometric model of the steel ingot

表1 钢锭的化学成分
Tab. 1 Chemical concentration of the steel ingot

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.11	0.22	1.48	0.008	0.001 2	0.16	0.35	0.01	0.056

度、热焓及凝固固相率随温度变化的关系如图2所示。

采用含凝固潜热的能量守恒方程求解钢锭铸造过程温度场。采用Niyama判据预测缩松倾向性，其表达式为^[13]：

$$N_y = \frac{G}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (1)$$

式中： G 为温度梯度， ε 为冷却速率。 N_y 的临界值与钢锭的结构形状相关^[13]；其值越小，表明该部位出现缩松的倾向性越大。

钢锭凝固后产生缩孔疏松，从而导致钢锭内部物性参数不连续。本研究采用如下1.2节所述计算几何与凸包原理对缩孔疏松特征区域进行几何重构，并赋予相应的物性。然后，基于Abaqus模拟软件，对缺陷区域及非缺陷区域重新网格划分，并满足不同实体区域界面的匹配。采用热力耦合对装配后的钢锭进行加热与锻造过程中的弹塑性变形模拟。为了考察重构方法的有效性，研究不同压下率条件疏松区域的变形。

1.2 区域重构及物性遗传

铸造数值模拟软件通常不能直接输出STL格式的计算结果参数（如Niyama值、温度及浓度等），即使是包含几何信息的STP格式与STL格式也有所区别。本研究通过编写Python程序，按照如下特征区域筛选及重构两个步骤，实现由铸造到锻造的物性遗传。

铸造温度场模拟结束后，软件生成带有网格节点坐标、温度、Niyama值等数据信息的.unv文件。使用Visual Studio Code打开和编辑该文件。每一个节点序号伴随对应的三维坐标、温度及Niyama值。根据所需的坐标、温度、Niyama值筛选出所需要的节点序号，图3为该子程序流程图。首先，程序导入记载Niyama值的.unv文件，并设置行指针及程序配置环境容器。然后，遍历所有计算域。通过判断每一个网格节点温度值阈值与空间阈值的交集，筛选出需要保留的节点。阈值预设区间根据实际要求确定。如将预设区间设置

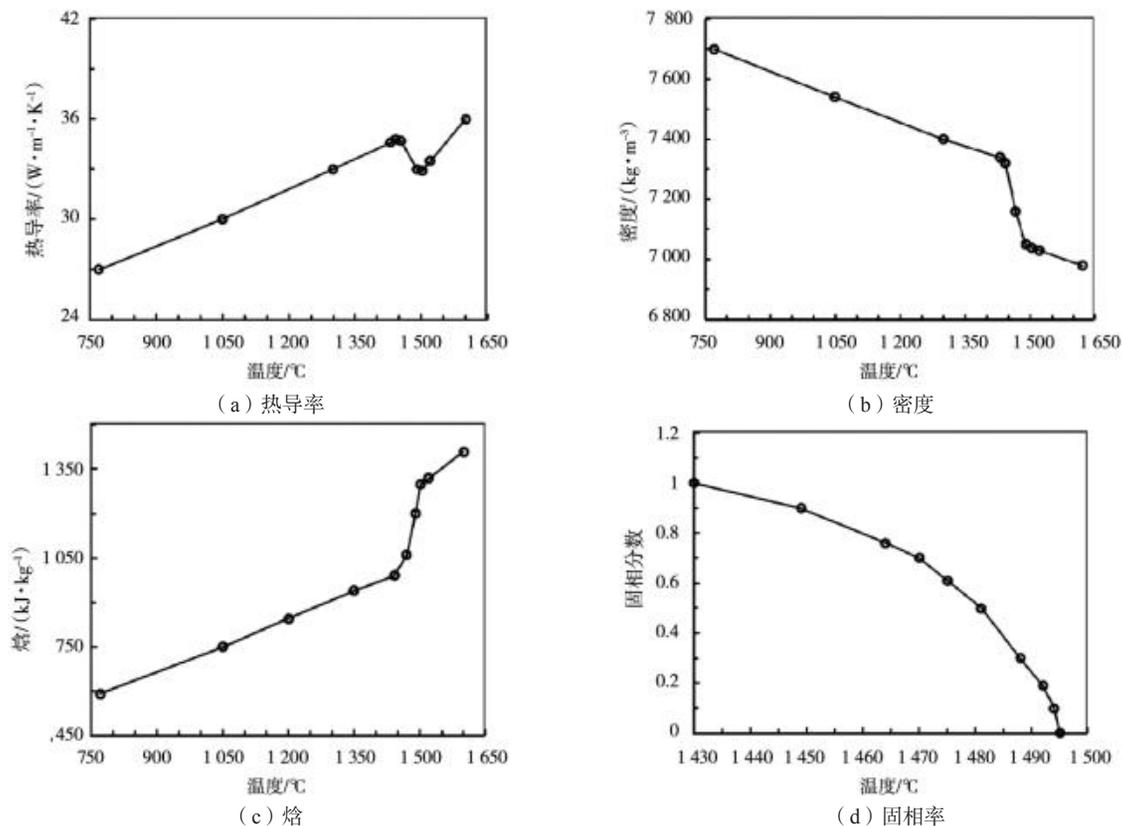


图2 16Mn钢物性参数及凝固固相分数与温度的关系

Fig. 2 The relationships of physical property parameters and solidification solid phase fraction of 16Mn steel with temperature

2 结果及分析

2.1 铸造凝固过程数值模拟及缩孔缩松区域显示

图6表示采用ProCAST模拟得出的钢锭凝固温度场及缩孔疏松。由图可见，钢锭的凝固过程由底部向冒口，由表面向心部进行。凝固前沿呈U型从底部向顶部推进。约1 h，钢锭完全凝固。

由凝固后Niyama值分布可见，钢锭冒口上表面处形成缩孔（图6中b1），并在芯部沿中心轴线产生疏松（图6中b2）。钢锭中心疏松区域的孔隙率约2.7%；相应的，密度比相同温度条件下的材料低。另外，宏观偏析的计算结果表明，中心疏松区域的偏析指数约1.15。采用开发的程序对凝固疏松及缩孔区域进行几何重构，生成的实体如图6中b1、b2所示，可见，缩孔和缩松区域重构后与数值模拟显示的结果一致。重构特征区域的保真度取决于铸造数值模拟网格划分的精度。

2.2 锻造过程数值模拟

图7表示基于Abaqus软件构建缩孔和缩松区域并将其重新嵌入原钢锭本体后加热后的温度场及锻造拔长后的变形。如图7（a）所示，加热后钢锭心部最低温度约为1 050 ℃，表面温度为1 250 ℃。图7（b）中色标表示温度。

图8表示锻造变形前后中心缩松区域在Z=0钢锭中心纵截面及在Y=0钢锭底部横截面的投影位置（图中坐标轴的约定与图1相同）。由图可见，在横截面上，中心疏松区域沿压下方（X方向）的变形相对于垂向（Z方向）的变形更大（图8（b））。由于横断面整体受压，体积收缩，导致在纵断面沿自由方向Y有所伸长（图8（a））。

图9表示锻造变形前后冒口处缩孔区域沿Z=0钢锭中心纵截面及沿Y=0钢锭底部横截面的投影位置。比较图9及图8可见，冒口处缩孔区域与中心疏松区域变形

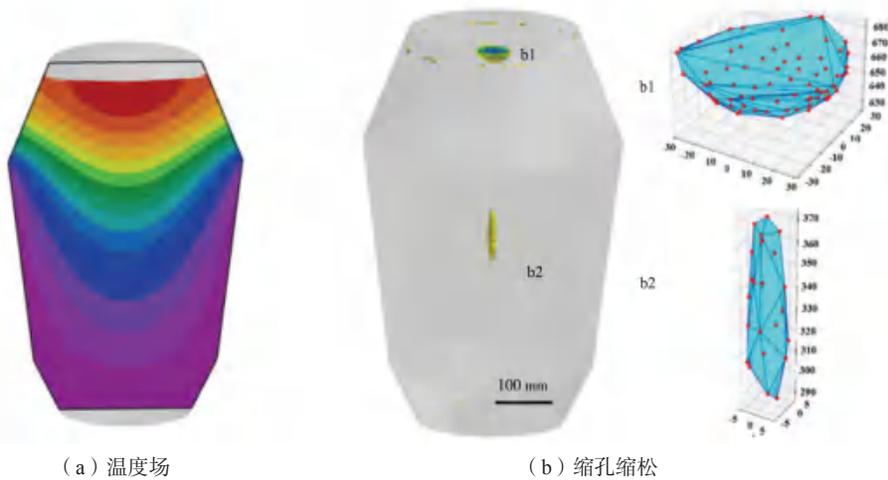


图6 完全凝固后（1 h）凝固温度场模拟及缩孔缩松预测结果

Fig. 6 Results of solidification temperature field simulation and shrinkage cavity and shrinkage porosity prediction after completely solidified (1 h)

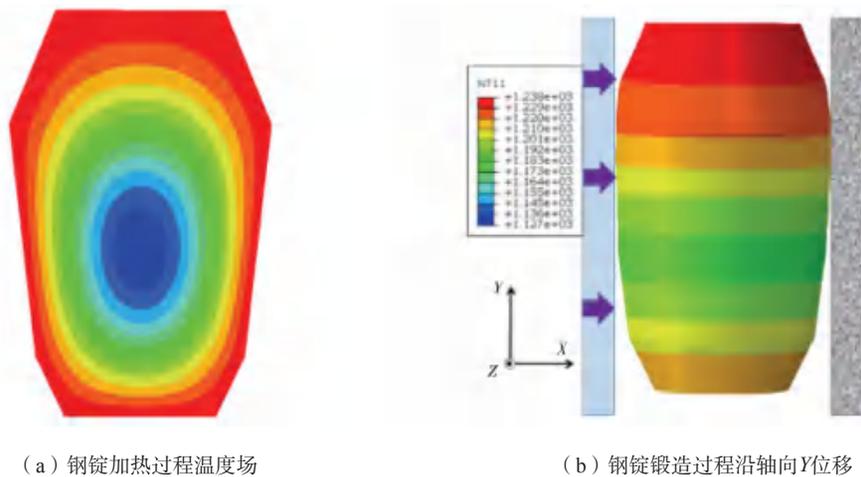


图7 钢锭加热后温度场及锻造后的温度场与变形

Fig. 7 The temperature field after heating and the temperature field and deformation after heating and forging for the steel ingot

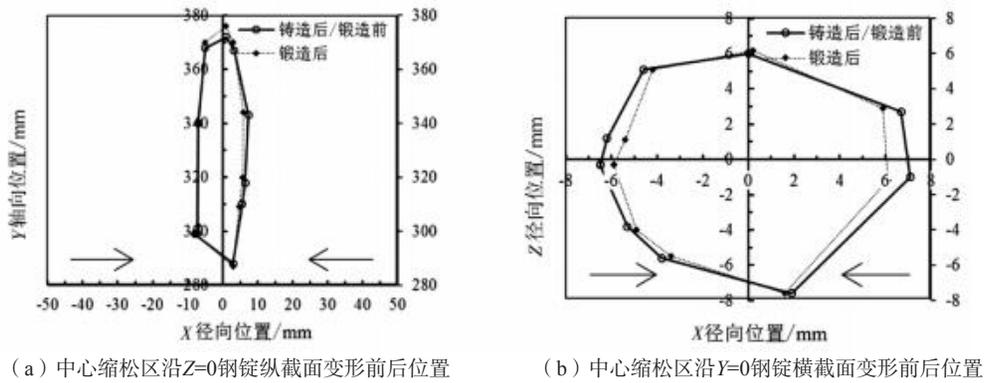


图8 中心缩松区变形前后位置
Fig. 8 Positions of central shrinkage porosity regions before and after deforming

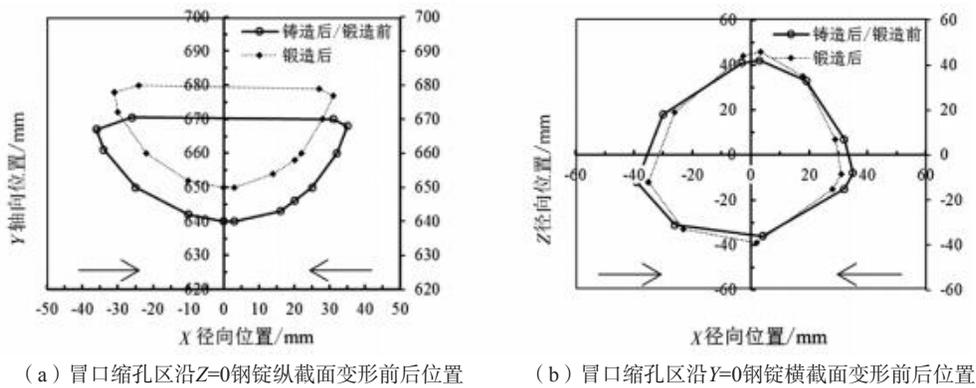


图9 冒口缩孔区沿钢锭纵截面及横截面变形前后位置

Fig. 9 Positions of the shrinkage cavity regions before and after deforming

趋势一致。

图10表示压下率对中心缩松区域体积变化率的影响。随着压下率的增加，缩松区域的体积变化率增加。压下率较小时（12%），缩孔缩松的体积变化率变化不大；此时，钢锭加热保温后外部温度高（图7（a）），压下效果主要作用于钢锭的外部，而芯部受到的影响较小。压下率进一步增大，中心缩松体积变化率增大。当压下率为21.74%时，缩松区域的体积收缩率大于2.7%。即：压下可以使缩松区域致密。这一结果与实际及采用热力耦合仿真的结果一致。

以上说明，本研究方法为研究锻造致密性评估提供了一个参考。值得指出的是，本研究假设疏松区域空隙弥散，尺寸较小。该钢锭中心疏松径向特征尺寸约20 mm。若疏松中空隙均匀弥散，根据孔隙率估算空隙的平均尺寸为mm量级。通常实际钢锭中的疏松空隙并非弥散均匀，因此采用本文方法在评估压下效果时过于激进。此外，借鉴本方法可以尝试锻造过程中钢锭冒口正偏析及底部负偏析堆区域的变形分布研究。

3 结论

(1) 基于计算几何与凸包原理，编写了钢锭缩孔

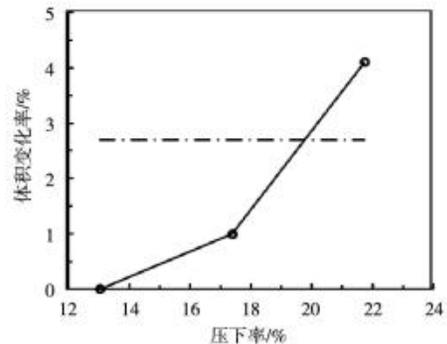


图10 压下率与中心缩松区域体积变化率
Fig. 10 The volume change rates of central shrinkage porosity regions with reduction rates

缩松区域筛选与重构的Python程序，实现了铸造锻造的全过程数值模拟。通过铸造模拟软件数据结果.unv提取了满足阈值要求的坐标节点，根据凸包算法重构了特征区域的几何实体，并输出了锻造模拟软件可读取的STL文件。锻造热力耦合时，对重构的实体赋予铸造后的物性，满足了不同工序界面物性遗传的要求。

(2) 铸造锻造全流程数值模拟结果表明，铸造及锻造基本结果能够显示凝固及塑性变形特征。缩孔缩松区域在变形过程中边界轮廓清晰。压下率较小时

(12%)，缩孔缩松的体积变化率变化不大；压下率进一步增大，体积变化率增大；压下率达到21.74%时，缩松区域的体积变化率大于2.7%，从而可导致细小孔

洞闭合。

(3) 研究方法的结果对探讨钢锭锻造过程中宏观偏析等区域性缺陷的位置演变具有参考性帮助。

参考文献:

- [1] 李殿中, 马璇, 徐斌, 等. 高效愈合钢锭内部缺陷的锻造工艺设计 [J]. 金属学报, 2016, 52 (10): 1199-1206.
- [2] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012 (10): 1105-1115.
- [3] MICHELI P D, SETTEFRATI A, MARIE S, et al. Towards the simulation of the whole manufacturing chain processes with forge [C]// NEMU 2015: New Developments in Forging Technology 2015. Stuttgart, Germany. 2015: 1-25.
- [4] GEISLER A, SADEGHIFAR M, MORIN J B, et al. Void closure during open die forging of large size martensitic stainless-steel ingots an experimental-analytical-numerical study [J]. International Journal of Material Forming, 2023, (16): 1-11.
- [5] 张琦, 曹苗, 张帅, 等. 汽车轮毂铸锻一体化制造工艺 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (2): 1-6.
- [6] 徐斌, 孙明月, 李殿中. 锻造过程中钢锭内部孔洞型缺陷闭合规律研究 [J]. 金属学报, 2012, 48 (10): 1194-1200.
- [7] BÖHMICHEN U, SCHUBERT N, LEHNERT T, et al. From casting to forging: the combined simulation for a steel component [J]. Engineering Reports, 2022, (4): 2-12.
- [8] NIU L, LIANG Z L, TIAN T, Simulation and experiment research on integrated casting and forging process of automobile control arm [J]. International Journal of Material Forming, 2023, 16 (3): 1-12.
- [9] 王晓花, 厉英. 钢锭凝固过程温度场数值模拟 [J]. 铸造, 2013, 62 (5): 410-419.
- [10] 徐亚东, 沈厚发, 雷丙旺, 等. 基于凝固模拟的钢锭模锥度设计与验证 [J]. 铸造, 2014, 63 (3): 249-256.
- [11] 赵子文, 曹艳飞, 秦卓, 等. 大型钢锭铸锻一体化液芯锻造数值模拟及工艺实践 [J]. 锻压技术, 2019, 44 (5): 21-28.
- [12] AFAZOV S M, BECKER A A, HYDE T H. Development of a finite element data exchange system for chain simulation of manufacturing processes [J]. Advances in Engineering Software, 2012, 47: 104-113.
- [13] 吉晓霞, 韩兴, 李晗. 大型钢锭铸锻一体化数值模拟 [J]. 大型铸锻件, 2024 (4): 42-47.
- [14] BERG M D, CHEONG O, KREVELD M, 等. 计算几何—算法与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 89-101.
- [15] PREPARATA F P, HONG S J. Convex hulls of finite Sets of points in two and three dimensions [J]. Communications of the ACM, 1977, 20 (2): 87-93.

Numerical Simulation of Overall Casting and Forging Processes for a Steel Ingot Based on the Inherited Physical Properties

GUAN Shan-han, QIU Hao-yue, SHEN Hou-fa

(School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

By using of the convex hull method and the Python language, a screening and reconstruction program for the shrinkage cavity and shrinkage porosity of steel ingot was developed, and the numerical simulation of overall casting and forging processes based on the inherited physical properties was realized. The coordinate nodes meeting the threshold requirements were extracted from the .unv format file of the casting simulation software, and the geometric entities of the feature regions were reconstructed using the convex hull algorithm, generating an STL output file readable by the forging simulation software. The numerical simulation results of casting-forging chain processes indicate that the boundary contours of the shrinkage cavity and shrinkage porosity regions formed during solidification process remain clear during the deformation process. When the reduction rate is relatively low (12%), the volume variation rate of the shrinkage cavity and shrinkage porosity changes little. Whereas when the reduction rate reaches 21.74%, the volume variation rate of the shrinkage porosity area is greater than 2.7%, enabling the closure of tiny voids.

Key words:

steel ingot; chain process of casting and forging; data transfer; numerical simulation; shrinkage cavity and shrinkage porosity