

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3300

基于集成计算平台的高强韧铝合金 半连铸工艺优化

张增硕¹, 何生平², 詹磊³, 王新璋², 王贤年², 王依山¹, 单长智⁴, 郝海^{1,4}

(1. 大连理工大学材料学院 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 国电投宁夏青铜峡新材料有限公司, 宁夏 青铜峡 751603; 3. 国家电投集团铝电投资有限公司, 宁夏 银川 750003; 4. 大连理工大学宁波研究院, 浙江 宁波 315016)

摘要: 基于集成计算材料工程(ICME)思想, 使用数字化集成计算平台依托 ProCAST 仿真模拟软件、MATLAB 数值分析软件, 并使用最优化方法中序列(逐步)二次规划法(SQP), 优化了半连续铸造制备直径 254 mm 的 7050 铝合金圆锭工艺, 得到较优铸造温度为 690 °C, 所得铸锭的残余应力值最小。与传统优化方式, 即逐步调整工艺参数并分析模拟结果的方法相比, 数字化集成平台迭代进行工艺寻优的效率提高了 1 倍。在此优化工艺下得到铸锭的屈服强度为 218 MPa, 抗拉强度为 336 MPa。

关键词: 7050 铝合金; 半连续铸造; 集成计算材料工程; 工艺优化

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)05-0479-08

Optimization of a High-strength and Toughness Aluminium Alloy Semi-continuous Casting Process Based on an Integrated Computing Platform

ZHANG Zengshuo¹, HE Shengping², ZHAN Lei³, WANG Xinzhang², WANG Xiannian²,
WANG Yishan¹, SHAN Changzhi⁴, HAO Hai^{1,4}

(1. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. SDIC Ningxia Qingtongxia New Material Co., Ltd., Qingtongxia 751603, China; 3. SPIC Aluminum & Power Investment Co., Ltd., Yinchuan 750003, China; 4. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: Based on the idea of integrated computational materials engineering (ICME), the process of preparing 7050 aluminium alloy ingots with a diameter of 254 mm by semi-continuous casting was optimized by using a digital integrated computing platform, ProCAST simulation software and MATLAB numerical analysis software, and the sequential (step by step) quadratic programming method (SQP) as the optimization method. The optimum casting temperature is 690 °C, at which the residual stress in the ingot is the lowest. Compared with the traditional optimization method of adjusting the process parameters step by step and analysing the simulation results, the efficiency of the digital integrated platform for iterative process optimization is doubled. The yield strength and tensile strength of the ingot are 218 and 336 MPa, respectively.

Key words: 7050 aluminium alloy; semicontinuous casting; integrated computational materials engineering; process optimization

7050是一种Al-Zn-Mg-Cu系超硬铝, 拥有较高的强度和良好的加工性能, 在航天航空、高端制造、交通等领域得到了广泛的应用^[1-3]。7050铝合金的合

金化程度较高, 结晶温度区间较宽, 特别是裂纹倾向较高, 并且随着铸锭规格的增大, 在铸造过程中的裂纹倾向也会随之增大。在半连续铸造中, 影响铸锭质

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52171030); 校企合作项目(GDTXCL-QYGL-kjcx-2022-002)

作者简介: 张增硕, 1999年生, 硕士研究生。研究方向为高强韧铝合金成型制备过程数值模拟研究。Email: 1109031207@qq.com

通讯作者: 郝海, 1969年生, 教授。研究方向为铝/镁合金成型制备与集成计算等研究。Email: haohai@dlut.edu.cn

引用格式: 张增硕, 何生平, 詹磊, 王新璋, 王贤年, 王依山, 单长智, 郝海. 基于集成计算平台的高强韧铝合金半连铸工艺优化[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 479-486.

ZHANG Z S, HE S P, ZHAN L, WANG X Z, WANG X N, WANG Y S, SHAN C Z, HAO H. Optimization of a high-strength and toughness aluminium alloy semi-continuous casting process based on an integrated computing platform[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 479-486.

量的主要因素有冷却强度、铸造速度、铸造温度以及液面稳定性等^[5-6]。其中铸造温度对金属液的填充能力重要影响,如果铸造温度过低,合金熔体的黏度增加,导致熔体的补缩能力变差且内部气体和杂质不易排除,进而造成缩松、缩孔及冷隔等缺陷的形成。如果铸造温度过高,合金熔体在结晶器内的初始凝壳点将下移,易造成铸锭内部组织晶粒粗大、液穴深度增大和缩松缩孔等缺陷。选择适当的铸造温度,保证铸造时熔体的温差在合适的范围内,使得铸造过程中液穴的深度不至于过大,形状不至于过尖,从而有效地控制温度梯度,减小内应力,预防铸造过程中的开裂。

目前对于半连续铸造过程工艺参数的优化,大多都是通过仿真模拟软件对铸造过程温度场、流场、应力场等耦合模拟分析的方法,进而选择最优的工艺参数。但通过逐步修改工艺参数后观察模拟结果会耗费大量的时间和精力。在2008年美国国家材料顾问委员会上首次提出了集成计算材料工程概念,通过将材料计算工具与其他工程领域的计算和分析工具集成,从而减少从研发到生产的时间和成本。近年来集成计算材料工程在材料科学与工程领域的应用越来越广泛。Guo等^[9]开发了一种数值模拟方法来预测铸件的微观组织、缺陷形成和力学性能;Martin等^[10]应用集成计算材料工程(integrated computational materials engineering, ICME)将人工神经网络与遗传算法集成在一起,预测了用于航空航天领域的Ti-6Al-4V的力学性能;Chang等^[11]应用ICME构建了镁合金仿真集成平台(MASIP),实现了从CAD模型数据输入到过程-微观结构-性能的自动化操作,优化了低压铸造镁合金薄壁圆柱形零件的浇注温度等工艺参数。

因此,为提高半连续铸造过程中得到较优工艺的效率,基于集成计算材料工程思想,本文使用铝合金集成计算平台调用ProCAST仿真模拟软件和MATLAB数值分析软件,建立半连续铸造的工艺参数-应力分析自动化模拟与结果分析流程,分析了铸造温度在675~705℃区间对 $\phi 254$ mm的7050圆铸锭半连续铸造的影响,选用序列(逐步)二次规划法(sequential quadratic programming, SQP),以等效应力为目标变量,探究最小等效应力下铸造温度的最优解。

1 集成计算流程

铝合金集成计算平台通过Python脚本文件以及dos命令相结合的方式,实现自动化仿真计算流程。集成计算平台在读取提前设置好的工艺变量初始值后,调用模拟仿真软件实现对铸件的模拟计算,在模拟结束后访问目标变量,并调用优化算法对输入的工艺变量进行重新赋值后进入下一次迭代计算,利用优化算法反复进行工艺变量-目标变量之间迭代计算,最终找到最优的工艺变量-目标值,跳出迭代。图1为铝合金集成计算平台界面图。

该平台可以调用ANSYS、ProCAST等仿真模拟软件和MATLAB等数值分析软件,并且平台自带序列(逐步)二次规划法、拟牛顿法(BFGS)等优化算法,实现仿真模拟与工艺参数迭代自动化。具体流程如图2所示,首先要选择需要优化的工艺变量并设置迭代区间,可以设置一个或多个;然后调用模拟仿真软件,如ANSYS、ProCAST等,在调用之前,需将模拟所用模型导入模拟仿真软件中设置边界条件及模拟参数;自动模拟结束后,调用数值分析软件,如MATLAB软件等,对模拟结束后导出的数据进行处理及保存;最后选择优化算法和目标变量,集成平台自带



图1 铝合金集成计算平台界面

Fig.1 Interface of the aluminium alloy integrated computing platform

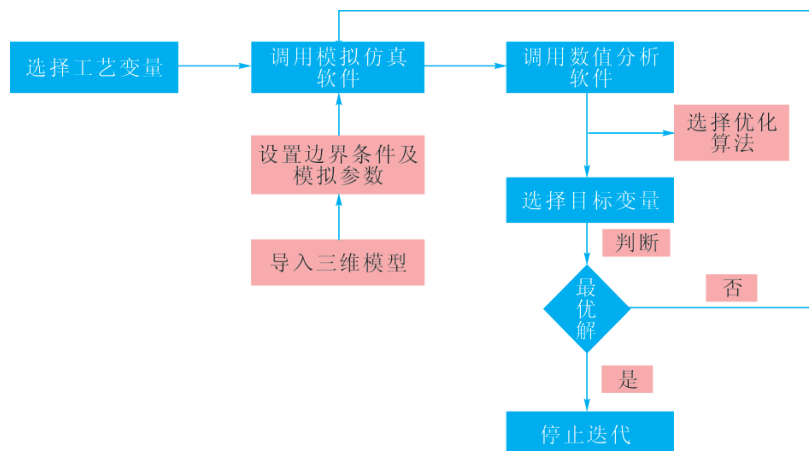


图2 集成平台流程图

Fig.2 Integration platform flow chart

SQP、BFGS等优化算法,按照需求自行选择。开始迭代后,集成平台会将每次运行完所得目标变量值与迭代中产生的局部最优值自行比较,保留最小值,重复此过程,直至迭代出全局最优值为止。

1.1 几何模型及热物性参数的确定

由于圆铸锭具有对称特性,因此为减少计算量,截取四分之一进行模拟仿真。将三维模型导入ProCAST仿真模拟软件中Mesh模块并对其进行网格划分,如图3所示,该模型由热顶、结晶器、引锭头和铸锭组成,其中铸锭尺寸为 $\phi 254\text{ mm}$ 。模拟所用7050铝合金的成分如表1所示。

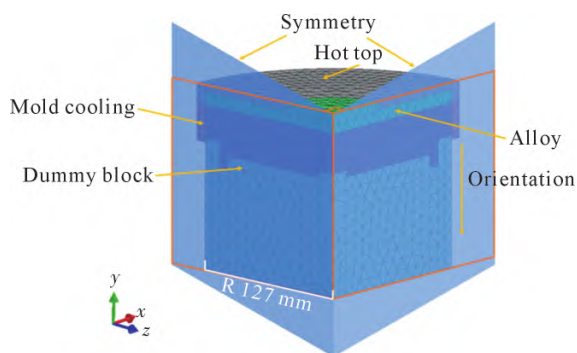


图3 三维模型有限元模型

Fig.3 3D finite element model

表1 7050铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the 7050 aluminium alloy (mass fraction/%)

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V	Zn	Zr	Al
0.018	2.27	0.112	1.8	0.018	0.136	0.025	0.01	6.28	0.102	Bal.

通过查阅手册^[2]得到7050铝合金的泊松比为0.33,液相线温度为 $635\text{ }^{\circ}\text{C}$,固相线为 $524\text{ }^{\circ}\text{C}$,本文7050铝合金材料其余物性参数通过查阅文献[13-15]和JMatPro专业材料性能模拟软件计算得到,如图4所示。

当金属液的温度降低到液相线温度时,开始由

液相转变为固相,并在转变过程中产生结晶潜热。本文采用热焐法处理结晶潜热^[16-17],由式(1~2)计算。

$$H=H_0+\int_{T_0}^T C_p \cdot dT+(1-f_s) \cdot L \quad (1)$$

式中, C_p 为比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_0 为选取的参考温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; H 为热焐,单位 kJ/kg ; H_0 为参考温度下对应的热焐; L 为潜热, kJ/kg 。

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_L \quad (2)$$

式中, T 为空间和时间的函数; ρ 为密度,单位 kg/m^3 ; c 为比热,单位 $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{C}$; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为 x 、 y 、 z 方向上的热传导系数; Q_L 为结晶潜热。

1.2 初始条件的确定

半连铸过程中的初始条件有铸造温度、铸造速度、冷却水流量等,为确保7050铝合金在凝固时有良好的排气补缩能力^[21],因此将铸造温度选择在 $675\sim 705\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内,通过查阅加工手册及实际生产所得数据,本实验选用铸造速度和冷却水流量如表2所示。

表2 7050合金铸造工艺参数

Tab.2 7050 alloy casting process parameters

Time/min	0	43	53	110	142
Casting speed/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	40~60	-	50~60	65~80	-
Water flow/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	90~100	100~150	-	-	150

1.3 边界条件的确定

半连续铸造过程的换热边界条件由铝液与结晶器之间的对流换热^[14]、铸锭与冷却水间的对流换热和引锭头与铸锭的接触换热3部分组成^[16],其中以铝液与结晶器间的换热和铸锭与冷却水间的换热为主。

1.3.1 铝液与结晶器间的换热

随着铸锭表面温度的升高,结晶器换热系数呈现先迅速增大,当升至一定温度后换热系数逐渐趋于定值。通过参考文献[17-20]与结晶器换热的实际

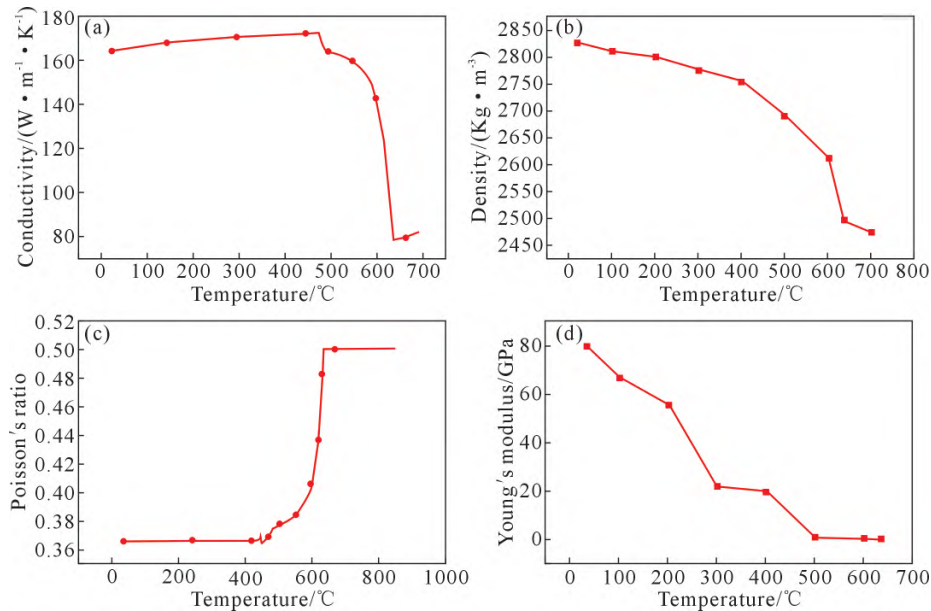


图4 7050 铝合金热物性参数:(a) 热导率;(b) 密度;(c) 泊松比;(d) 杨氏模量

Fig.4 Thermal properties of the 7050 aluminium alloy: (a) conductivity; (b) density; (c) Poisson's ratio; (d) Young's modulus

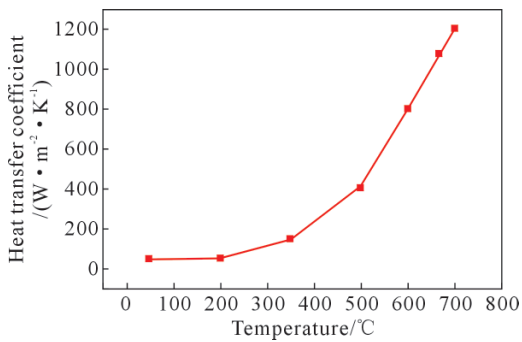


图5 铝液与结晶器间换热系数

Fig.5 Heat transfer coefficient between liquid aluminium and the crystallizer

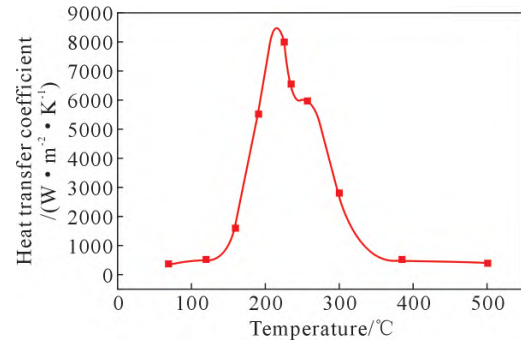


图6 二冷区换热系数与铸锭表面温度的关系

Fig.6 Relationship between the secondary cooling zone heat transfer coefficient ingot and surface temperature

情况, 选用铝液与结晶器间的换热系数如图5所示。

1.3.2 铸锭与冷却水间的换热

铸锭在离开结晶器后受到冷却水作用, 使得表面温度迅速降低, 散失的热量约占总量的80%^[14]。冷却水与高温铝液间的换热分为气膜换热、核态沸腾换热和自然对流换热3阶段, 使得铸锭与冷却水间的换热系数随温度的减低呈现先增加后减小最后趋于稳定的趋势。参考张卓^[17]、胡谦谦^[21]、侯忠霖等^[22]研究所得二冷区换热系数, 选择此次模拟所用二冷换热系数, 如图6所示。

1.4 铝合金集成计算平台导入脚本

铝合金集成计算平台可通过批处理*.bat脚本调用外部程序, 选择调用ProCAST仿真模拟软件及MATLAB数值分析软件。在调用ProCAST仿真模拟软件前需通过录制前处理和后处理*.py脚本如图7所示, 再通过编写相应*.bat脚本调用电脑处理器自动运行。同理, 编写完MATLAB脚本后需编写对应*.bat脚本。如图8所示, 按照步骤1~4依次操作, 完成脚

本的导入后, 点击求解即可自动运行*.bat脚本从而实现CAD模拟仿真与工艺优化全流程自动进行。

1.5 优化算法的选择

铝合金集成平台自带有SQP、SLP、BFGS等优化算法, 对比3种算法, SQP算法收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强等优点被广泛应用于求解非线性优化问题, 通过在每个迭代中求解一个二次规划子问题来逐步逼近最优解。

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_u(x) \leq 0 (u=1, 2, \dots, p) \\ h_v(x) = 0 (v=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (3)$$

SQP思想是利用泰勒展开式将非线性约束问题如式(3)所示在迭代点 X^k 处简化成二次函数, 将约束条件简化成线性函数, 结果如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \min f(X) = \frac{1}{2} |X - X^k|^T \nabla^2 f(X^k) |X - X^k| + \nabla f(X^k)^T |X - X^k| \\ \text{s.t. } \nabla g_u(X^k)^T |X - X^k| + g_u(X^k) \leq 0 (u=1, 2, \dots, p) \\ \nabla h_v(X^k)^T |X - X^k| + h_v(X^k) \leq 0 (v=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (4)$$



图7 ProCAST 仿真模拟软件脚本录制
Fig.7 Script recording of ProCAST simulation software

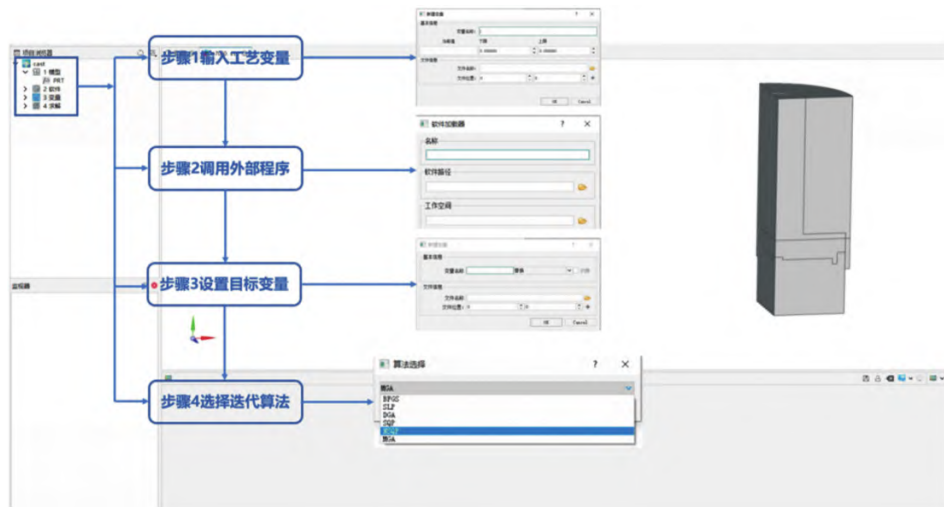


图8 铝合金集成平台操作流程
Fig.8 Flowchart of the aluminium alloy integrated platform

1.6 模拟结果

根据图2所示流程图,导入批处理脚本后,设置铸造温度迭代区间为675~705℃,选择SQP算法开始迭代,在迭代7次后,得到铸造温度在690℃时模拟所得铸锭残余应力值最小。从模型导入到模拟结束,需要至少10 h,若通过人为修改参数的方法得到

最优铸造温度则至少需要4天,而通过集成平台迭代自动寻优仅花费了2天,工作效率提高了一倍。如图9所示,通过数字化集成计算平台迭代,观察各迭代温度的温度场及凝固场后,发现在675~705℃温度范围内随着温度的增加,液穴的深度有所增加,初始凝亮点也有所下移。按照图10所示,从铸锭中选择3

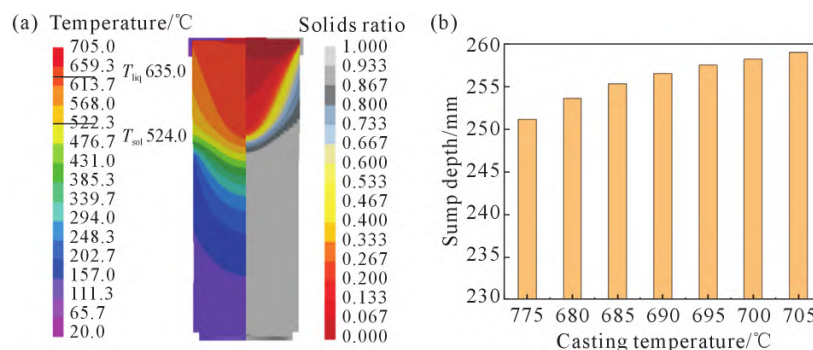


图9 温度场和凝固场分布以及液穴深度:(a) 温度场与凝固场分布;(b) 液穴深度随铸造温度的变化
Fig.9 Temperature field and solidification field distribution and sump depth: (a) temperature field and solidification field distribution; (b) sump depth variation with casting temperature

处位置进行应力分析,其中(i)为铸锭外表面应力最大值时的位置,(ii)为铸锭与引锭头接触面的边缘位置,(iii)为铸锭中心初始位置。将各温度下(i)、(ii)、(iii)位置所受应力的迭代结果导出,如图11~13所示,对比不同温度下各应力曲线,得到690℃时铸锭(i)、(ii)、(iii)3个位置的残余应力值最小,热裂倾向最小,因此后续选择铸造温度为690℃进行实验。

2 中试实验

选取最优铸造温度(690℃)进行试验,得到图14a铸锭试样,表面无裂纹、气孔等缺陷,符合铸锭质量要求。为表征该铸锭力学性能,从铸锭试样中切割一圆块并从中心、R/2、边缘处分别选取拉伸试样,如图14b所示,拉伸试样尺寸如图14c所示,拉伸速率

为2 mm/min。根据模拟温度场结果可知,铸锭由中心到边缘冷却速率逐渐增大,导致过冷度逐渐增大,形核率逐渐增大,因此铸件的晶粒尺寸由中心向边缘逐渐减小,根据Hall-Petch公式可知,晶粒尺寸越小,屈服强度越大^[23],因此拉伸试样屈服强度大小为试样1>试样2>试样3。实验所测各拉伸试样应力应变如图15所示,力学性能如表3所示,该实验所得7050铸锭退火后的屈服强度约为218 MPa,抗拉强度约为336 MPa。

表3 试样拉伸力学性能

Tab.3 Mechanical properties of the tensile specimens

Sample	1	2	3	Average value
Yield strength/MPa	221	217	216	218
Ultimate tensile Strength/MPa	335	339	334	336

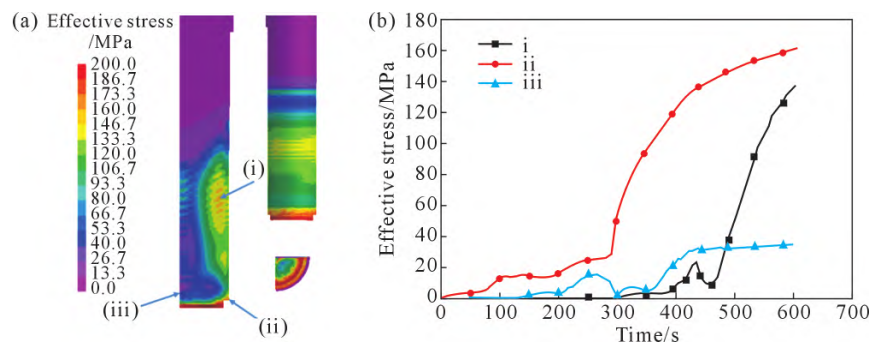


图 10 690℃下应力分布:(a)应力场分布;(b)不同位置等效应力与时间的关系

Fig.10 The stress distribution at 690℃: (a) stress field distribution; (b) relationship between the equivalent stress at different locations and time

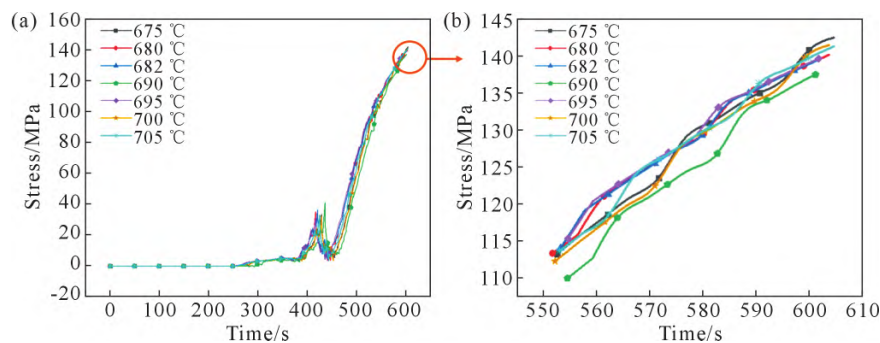


图 11 铸锭(i)位置处应力结果:(a)不同时间下应力值;(b)(a)的局部放大图

Fig.11 Stress results at the (i) position of the ingot: (a) stress at different times; (b) local enlarged diagram of (a)

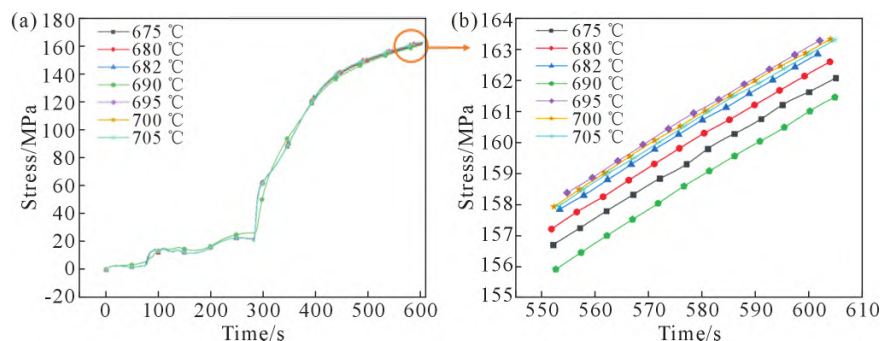


图 12 铸锭(ii)位置处应力结果:(a)不同时间下应力值;(b)(a)的局部放大图

Fig.12 Stress results at the (ii) position of the ingot: (a) stress at different times; (b) local enlarged diagram of (a)

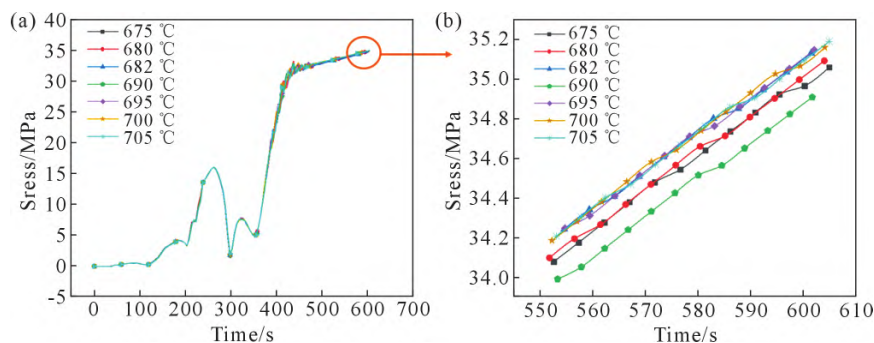


图 13 铸锭(iii)位置处应力结果:(a)不同时间下应力值;(b) (a)的局部放大图
Fig.13 Stress results at the (iii) position of the ingot: (a) stress at different times; (b) local enlarged diagram of (a)

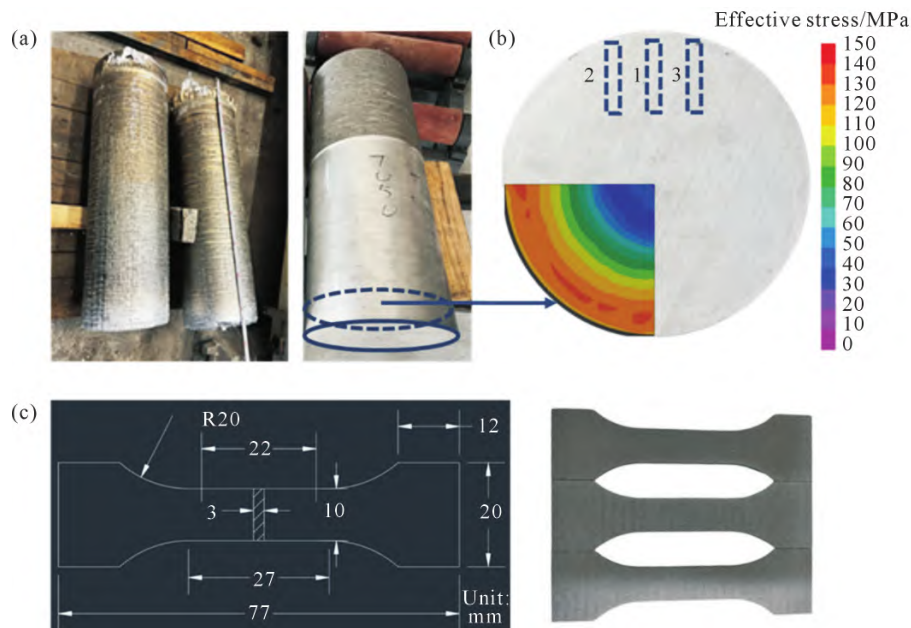


图 14 $\phi 254$ mm 7050 合金铸锭及拉伸试样示意图:(a) $\phi 254$ mm 7050 合金铸锭;(b) 拉伸试样取样位置;(c)拉伸试样尺寸示意图
Fig.14 $\phi 254$ mm 7050 alloy ingot and tensile sample diagram: (a) $\phi 254$ mm 7050 alloy ingot; (b) position of the tensile sample; (c) diagram of the tensile specimen size

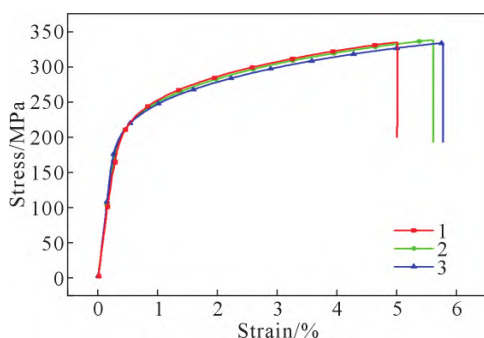


图 15 工程应力-应变曲线
Fig.15 Engineering stress-strain curve

3 结论

(1)通过铝合金数字化集成计算平台选用SQP算法,将铸造温度从675~705 °C区间中迭代,得到最优铸造温度为690 °C,与逐步调整输入参数并观察模拟结果的方法相比,节省了一半的时间,提高了工作效率。

(2)使用上述铸造温度为690 °C模拟所用参数指

导实验,所得铸锭屈服强度约为218 MPa,抗拉强度约为336 MPa。

参考文献:

- [1] WANG M, HUANG L P, CHEN K H, LIU W S. Influence of minor combined addition of Cr and Pr on microstructure, mechanical properties and corrosion behaviors of an ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy[J]. Micron, 2018, 104: 80-88.
- [2] PENG X Y, LI Y, LIANG X P, GUO Q, XU G F, PENG Y Y, YIN Z M. Precipitate behavior and mechanical properties of enhanced solution treated Al-Zn-Mg-Cu alloy during non-isothermal ageing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 964-974.
- [3] 张王军,李云,吴玉娜,江静华,马爱斌. 超高强7XXX系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 现代交通与冶金材料, 2023, 3(3): 52-60, 84.
ZHANG W J, LI Y, WU Y N, JIANG J H, MA A B. A critical review of the state-of-the-art of ultra-high strength 7XXX aluminum alloys[J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2023, 3(3): 52-60, 84.
- [4] 陶国林,潘复生,梁小平. 7050铝合金铸锭裂纹形成及控制分析

- [J]. 材料导报, 2007, 21(z2): 352-354, 358.
- TAO G L, PAN F S, LIANG X P. The analyses of formation and control of the cracks about 7050 aluminum alloy[J]. Materials Reports, 2007, 21(z2): 352-354, 358.
- [5] 孙德勤. 提高铝合金铸锭质量的关键技术[J]. 铸造技术, 2010, 31(5): 660-663.
- SUN D Q. Key technologies of improving the quality of Al alloy ingots[J]. Foundry Technology, 2010, 31(5): 660-663.
- [6] 邵正荣, 邵海霞, 吕让涛, 谢一舟, 高鑫. 铝合金铸造工艺与铸锭质量的关系[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(4): 16-17.
- SHAO Z R, SHAO H X, LU R T, XIE Y Z, GAO X. Relation between aluminium alloy casting process and ingot quality[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34(4): 16-17.
- [7] 胡仕成, 马维策. 铝合金大铸锭半连续铸造过程的热应力数值模拟[J]. 机械工程材料, 2008, 32(7): 82-86.
- HU S C, MA W C. Numerical simulation of thermal stress of large aluminum ingot in semi-continuous casting process[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(7): 82-86.
- [8] National Research Council of the National Academies. Integrated computational materials engineering: A transformational discipline for improved competitiveness and national security [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2008.
- [9] GUO J Z, SCOTT S, CAO W S, KÖSER O. Casting simulation within the framework of ICME: Coupling of solidification, heat treatment, and structural analysis[J]. JOM, 2016, 68: 1411-1418.
- [10] MARTIN B W, ALES T K, ROLCHIGO M R, COLLINS P C. 17-Developing and applying ICME + modeling tools to predict performance of additively manufactured aerospace parts [M]// FROES F, BOYER R. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Amsterdam: Elsevier, 2019: 375-400.
- [11] CHANG X Y, SHEN Q, FAN W X, HAO H. Optimization of magnesium alloy casting process: An integrated computational materials engineering (ICME) approach[J]. Materials Science Forum, 2021, 1035: 808-812.
- [12] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000.
- WANG Z T, TIAN R Z. Aluminium alloy and its processing manual [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2000.
- [13] BOLDUC S, KISS L I. Sensitivity study of the influence of the water boiling parameters on aluminum semi-continuous DC casting [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 151: 106276.
- [14] 关敬波. 7050铝合金大扁锭半连续铸造工艺参数匹配规律的仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- GUAN J B. Simulation study on process parameter matching rule of 7050 aluminum alloy large flat ingot semi-continuous casting [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [15] 白清领, 李宏祥, 张济山, 庄林忠. 7050铝合金半连续铸造过程应力场及开裂倾向[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(11): 1527-1533.
- BAI Q L, LI H X, ZHANG J S, ZHUANG L Z. Stress field and cracking tendency of AA7050 alloy during direct-chill casting [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(11): 1527-1533.
- [16] 张晓明. 7050铝合金半连续铸造工艺过程主参数匹配规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- ZHANG X M. Study on Main parameter matching rule of 7050 aluminum alloy semi-continuous casting process [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [17] 张卓, 何生平, 王新璋, 叶强, 杨林, 王依山, 姜凯曦, 单长智, 郝海. 6061铝合金半连续铸造数值模拟与工艺优化[J]. 铸造技术, 2023, 44(7): 671-679.
- ZHANG Z, HE S P, WANG X Z, YE Q, YANG L, WANG Y S, JIANG K X, SHAN C Z, HAO H. Numerical Simulation and process optimization of semi-continuous casting 6061 aluminum alloy [J]. Foundry Technology, 2023, 44(7): 671-679.
- [18] HERR A M, KRONSTEINER J. On numerical simulation of casting in new foundries: Dynamic process simulations [J]. Metals, 2020, 10(7): 886.
- [19] 黄燕. 立式半连续铸特厚板坯凝固过程的模拟分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- HUANG Y. Simulation and analysis of solidification process of extra-thick slab in vertical semi-continuous casting [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [20] BOLDUC S, KISS L I. Sensitivity study of the influence of the water boiling parameters on aluminum semi-continuous DC casting [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 151: 106276.
- [21] 胡谦谦. 7XXX铝合金热顶半连续铸造的数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- HU Q Q. Numerical simulation of 7XXX aluminum alloy hot top semi-continuous casting [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [22] 侯忠霖, 姚山, 王廷利, 张兴国, 金俊泽. 一种铝合金水冷界面换热系数反求方法的研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(1): 157-161.
- HOU Z L, YAO S, WANG T L, ZHANG X G, JIN J Z. A method of inverse evaluation for interface heat transfer coefficient between aluminium alloy and cooling water [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(1): 157-161.
- [23] ZHAO Z X, WU R Q, WANG B, HUANG M C, LEI G P, LUO F H. Effects of aging on the microstructure and properties of 7075 Al sheets[J]. Materials, 2020, 13(18): 4022.