轧制温度对GCr15钢直线滚动导轨残余应力和直线度的影响研究

周俞廷[1, 2]，宋俊辉[1, 3]

1.中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司　浙江宁波　315700
2.中国机械科学研究总院集团　北京　100044
3.宁波大学机械工程与力学学院　浙江宁波　315211

摘要：热轧成形是生产直线滚动导轨的关键工艺之一，轧制温度的控制对于保证导轨残余应力和直线度具有至关重要的作用。基于ABAQUS仿真软件开展了GCr15钢直线滚动导轨热轧过程的仿真模拟，研究了不同轧制温度对轧件残余应力和直线度的影响。结果表明：轧件横截面的轧制方向的残余应力从轧件中心到边缘呈现出典型的“M形残余应力分布”。随着轧制温度的升高，轧件沿轧制方向残余应力分布的均匀性得到提高；除了轧辊顶角对应轧件区域残余应力随着轧制温度上升而上升以外，轧件其余区域的残余应力均随着轧制温度的上升而下降，这表明轧制温度的升高有利于提高轧制过程中金属塑性变形能力，有利于轧件变形更加均匀；轧件直线度与轧制温度之间没有简单的线性关系，而是表现出波动的趋势，不同轧制温度下轧件的直线度变化明显，最大直线度与最小直线度之间相差0.121mm，800℃、900℃和1000℃下的直线度相对较好，表明可能存在一个或多个温度范围，在这些范围内材料的性能和轧制过程的条件能够达到最佳平衡，从而获得较好的直线度。

关键词：GCr15；热轧成形；残余应力；直线度；有限元模拟

Research on the influence of rolling temperature on residual stress and straightness of GCr15 steel linear rolling guide rail

ZHOU Yuting[1, 2], SONG Junhui[1, 3]

1. Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd., of China National Machinery Institute Group, Ningbo 315700, Zhejiang, China
2. China Academy of Machinery Science and Technology Group, Beijing 100044, China
3. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China

Abstract: Hot rolling forming is one of the key processes for producing linear rolling guide rails, and the control of rolling temperature plays a crucial role in ensuring residual stress and straightness of the guide rails. This article conducts simulation of the hot rolling process of GCr15 steel linear rolling guide rail based on ABAQUS simulation software, and studies the influence of different rolling temperatures on residual stress and straightness of the rolled piece. The results show that the residual stress in the rolling direction of the cross-section of the rolled piece exhibits a typical “M-shaped residual stress distribution” from the center to the edge of the rolled piece. With the increase of rolling temperature, the uniformity of residual stress distribution along the rolling direction of the rolled piece is improved; Except for the residual stress in the rolling area corresponding to the top angle of the rolling mill, which

increases with the increase of rolling temperature, the residual stress in the other areas of the rolling mill decreases with the increase of rolling temperature. This indicates that the increase of rolling temperature is conducive to improving the plastic deformation ability of the metal during the rolling process, which is conducive to more uniform deformation of the rolling mill; There is no simple linear relationship between the straightness of the rolled piece and the rolling temperature, but it shows a fluctuating trend. The straightness of the rolled piece varies significantly at different rolling temperatures, with a difference of 0.121mm between the maximum and minimum straightness. The straightness at 800℃, 900℃, and 1000℃ is relatively good, indicating that there may be one or more temperature ranges within which the material properties and rolling process conditions can reach the best balance, thereby obtaining better straightness.

Keywords: GCr15; hot rolled forming; residual stress; straightness; finite element simulation

1 序言

直线滚动导轨作为现代精密机械设备中不可或缺的组成部分，其性能直接影响着机械设备的精度、稳定性和可靠性。GCr15钢以其优良的疲劳抗力、高承载能力和良好的耐磨性，成为直线滚动导轨的主要原材料。热轧技术作为生产直线滚动导轨的关键工艺之一，在轧制成形过程中，轧制温度的控制对于保证导轨的最终性能，尤其是残余应力和直线度，具有至关重要的作用。残余应力的存在会导致材料性能降低，而直线度的偏差则直接影响导轨的精准导向性能。因此，深入研究轧制温度对GCr15钢直线滚动导轨热轧成形后残余应力和直线度的影响，对于提高产品质量和性能具有重要意义。

凌明成、余万华等[1，2]基于gleeble热模拟试验机对GCr15钢轧制成形终轧温度对其性能的影响展开了研究。近年来，随着计算机技术和数值模拟方法的飞速发展，仿真软件在材料成形和加工过程分析中扮演着越来越重要的角色。作为工程领域内广泛应用的有限元分析工具之一，ABAQUS以其强大的非线性分析能力和高度的可定制性，为模拟复杂的工程问题提供了可能。陈浩等[3]基于ABAQUS仿真软件研究了NM400钢不同终轧温度下残余应力的变化，发现终轧温度并不是影响NM400钢残余应力差异的关键因素。通过在ABAQUS中建立GCr15钢直线滚动导轨的热轧成形过程仿真模型，不仅可在不实际进行成形试验的情况下预测轧制温度对残余应力和直线度的影响，还能深入探讨影响机理，为实际生产提供理论指导和技术支持。

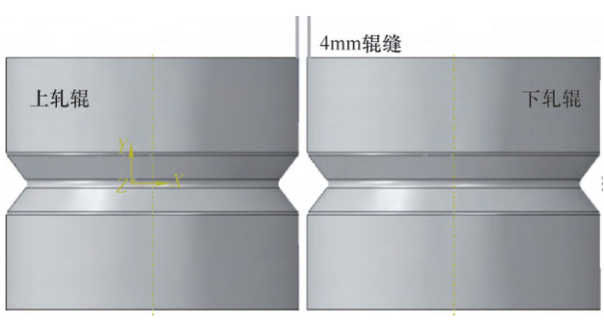
本文旨在利用ABAQUS软件，通过仿真研究方法，探讨在不同轧制温度下对GCr15钢直线滚动导轨轧件的残余应力和直线度的影响规律。通过对仿真结果的详细分析，旨在揭示轧制温度对轧件性能影响的内在机制，为直线滚动导轨的优化设计和制造工艺的改进提供科学依据。

2 模型建立

2.1 几何模型构建

根据直线滚动导轨的实际尺寸和轧制参数，在ABAQUS仿真软件中构建轧件和轧辊的三维几何模型，图1所示为轧件初始模型，直径为60mm、长为800mm的GCr15圆钢，截面面积为2174.6mm^2；图2所示为轧辊模型，上下轧辊均是顶角为105°的

图1 轧件初始模型



a）上轧辊　　b）下轧辊

图2 上下轧辊模型

菱形孔型，轧辊直径为ϕ350mm，孔型截面面积为1812.2mm^2，辊缝4mm，因此计算可得该道次延伸系数为1.3。

2.2 材料参数及边界条件

由于本文研究内容为轧制温度对轧件残余应力和直线度的影响，不对轧辊进行数据选取，又因轧辊强度往往远高于轧件强度，所以将轧辊定义为解析刚体。轧件材料本构关系选用Johnson-Cook本构模型表示。GCr15钢Johnson-Cook本构模型参数见表1。

表1 GCr15钢Johnson-Cook本构模型参数[4]

参数	*A*/MPa	*B*/MPa	*C*	*n*	*m*
数值	600	283	0.018	0.41	0.88

参考实际轧制情况，设定轧件表面与空气之间存在膜层散热系数0.7的热交换，环境温度固定为300K。轧件通过设置初始速度200mm/s进行驱动，在接触轧辊瞬间速度降为零。轧件表面与轧辊表面之间为面与面接触，接触时摩擦系数为0.4。

轧制温度的调整在初始条件中设置，轧制仿真试验开始之前需要将轧件的初始温度设置为试验温度，轧辊与环境初始温度均保持常温，试验温度分别为800℃、850℃、900℃、950℃、1000℃和1050℃。

2.3 网格划分

轧辊作为解析刚体，且网格尺寸大小不对轧件轧制情况产生影响，因此选择四面体网格划分，上下轧辊各划分网格5500个，如图3所示；轧件作为关键分析部件，对轧件圆边进行边布种，单元尺寸为2mm，径向布种单元尺寸为4mm，合计划分网格180000个，如图4所示。

图3 轧辊网格划分

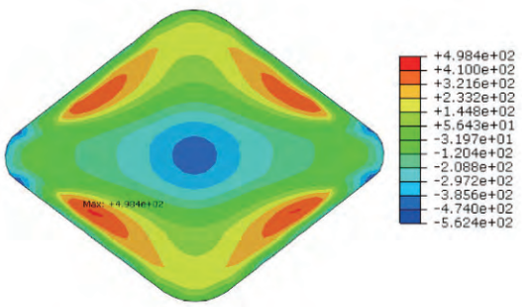
图4 轧件网格划分

3 模拟结果分析

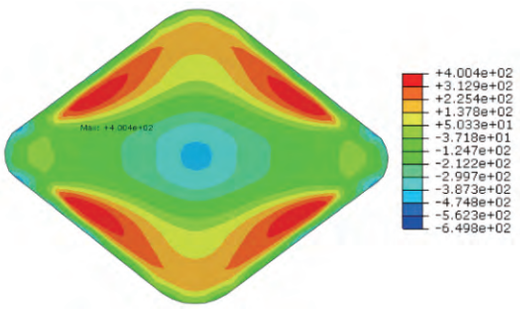
图5所示为不同轧制温度下轧件横截面轧制方向残余应力分布。由图5可知，轧件横截面的轧制方向残余应力呈典型的“M形残余应力分布”，即轧件中心区域为压应力（应力值为负表示压应力，为正表示拉应力）且中心位置应力值最大，逐渐向外减小，然后过渡为拉应力，一直持续到轧件表层下方区域，最后又过渡为压应力。这是因为菱形孔轧制时，金属材料发生复杂的三维塑性变形，材料在轧制过程中不仅在轴向，而且在径向和圆周方向都很复杂。轧制过程中表面金属被压缩变形，在压入的同时向轧件内部流动，形成了表层的压应力和表层下方的拉应力。轧件中心区域受到的来自轧辊的直接力量较小，变形速率相对更接近轧辊的外层更慢，中心区域金属流动受到阻碍，且受到四周材料的压缩作用，从而导致生成压应力，这样也能使得轧件整体达到力的平衡，有利于维持整体结构的稳定[5]。

沿轴向在轧件中间区域截取截面，提取截面单元划分3条路径，路径一为圆心*O*到轧件表面区域（见图6中蓝色线段）；路径二为轧件位于轧辊顶角下方表面区域（见图6中黑色弧线），*A*点为中心点，路径一上距离*A*点位移沿顺时针方向从负到正；路径三为辊缝侧边轧件表面区域（见图6中黄色弧线），*B*点为中心点，路径二上距离*B*点位移沿顺时针方向从负到正。

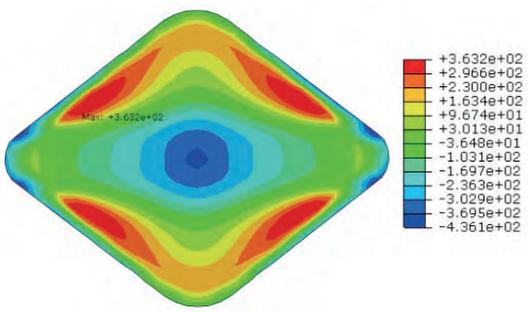
提取轧件沿轴向方向与轧件接触区域路径四上，稳定轧制区域内200～800mm内各节点随轴向变化在*x*方向上的位移，绘制成如图7所示的*x*方向偏移曲线，对该偏移曲线采用最小区域包容法计算直线度[6]，即选取轴向位移为200mm与780mm处的点连线，并在点655mm处做该连线平行线，计算两条



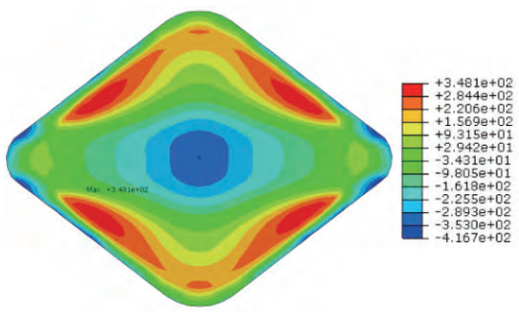
a）800℃轧件截面轧制方向残余应力分布



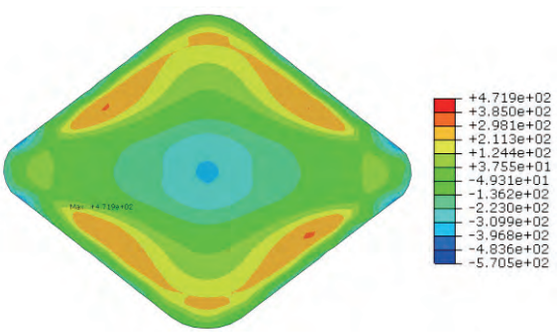
b）850℃轧件截面轧制方向残余应力分布



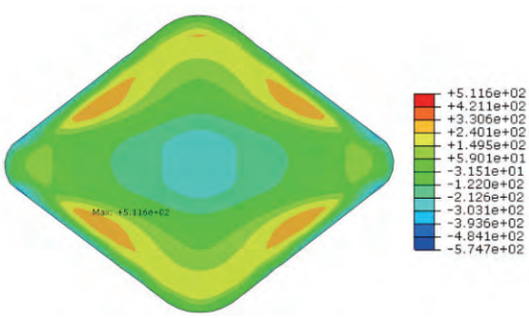
c）900℃轧件截面轧制方向残余应力分布



d）950℃轧件截面轧制方向残余应力分布



e）1000℃轧件截面轧制方向残余应力分布



f）1050℃轧件截面轧制方向残余应力分布

图5　不同温度下轧件横截面轧制方向残余应力分布

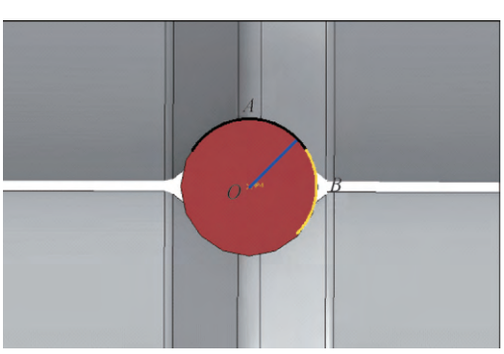


图6　轧件截面路径划分

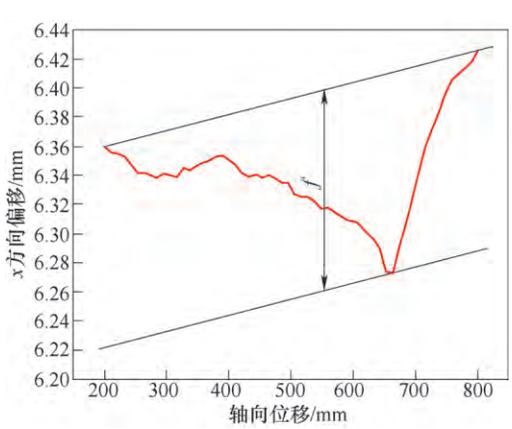


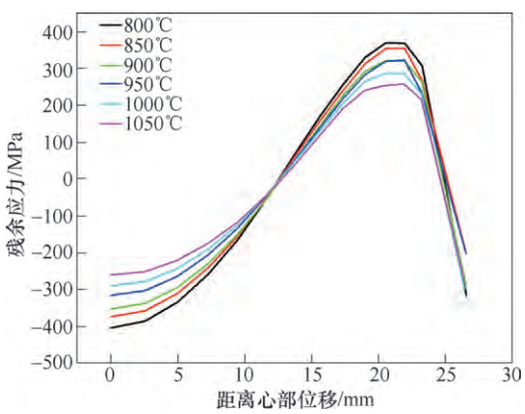
图7　最小区域包容法实例

平行线在x方向上的偏移量即为轧制过后轧件在x方向的直线度。本文仅考虑轧制温度对直线度造成的

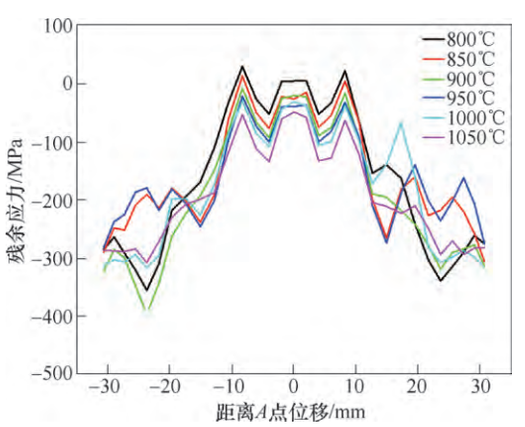
影响，因此只对x方向上轧件直线度进行分析即可。

3.1 残余应力分析

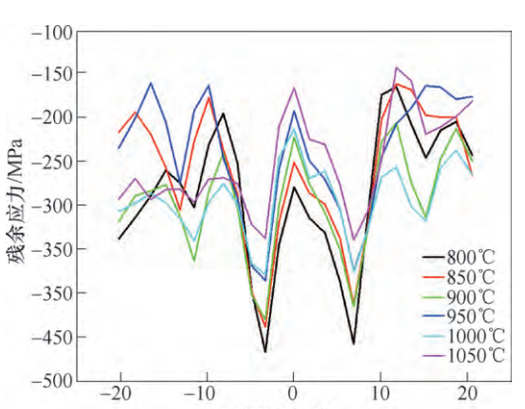
图8a所示为不同轧制温度下轧件中心横截面路径一轧制方向残余应力分布，图8b所示为不同轧制温度下轧件中心横截面路径二轧制方向残余应力分布，图8c所示为不同轧制温度下轧件中心横截面路径三轧制方向残余应力分布。



a）路径一不同温度下轧制方向残余应力分布



b）路径二不同温度下轧制方向残余应力分布



c）路径三不同温度下轧制方向残余应力分布

图8 残余应力分布

由图8a可得，不同轧制温度下轧件横截面从中心到边缘轧制方向残余应力分布基本一致，在轧件中心区域和轧件表面均表现为压应力，随着远离中心压应力逐渐降低，在某一节点过渡为拉应力，上升到最大值后逐渐下降，在另一节点过渡为压应力，直至到达轧件表面。路径一上残余应力随着轧制温度的上升均呈现出下降趋势，最大压应力出现在轧件心部，最大拉应力出现在轧件表层下方，二者差值随着温度上升也逐渐下降，即残余应力的均匀性得到提高[7]。

由图8b可得，不同轧制温度下轧件横截面轧辊顶角下方区域，轧制方向残余应力分布基本一致，整体呈现为压应力，且关于变形后顶点A呈对称分布。轧制方向最大压应力出现在路径二两侧边缘，即轧件与轧辊直接接触区域，最小压应力出现在A点，表明轧制过程中，轧辊下方轧件金属变形程度小，轧件与轧辊直接接触区域发生主要变形，金属沿着轧辊菱形边以及轧制方向发生复杂流动，因此压应力最大。随着轧制温度的上升，路径二轧制方向上残余应力整体呈现出逐渐上升的趋势，这是由于温度的上升，导致材料的流速性得到增强，轧辊下方轧件区域变形也得到增大，同时金属流动性的增强也使得该区域残余应力的分布均匀性得到增强。

由图8c可得，不同轧制温度下轧件横截面辊缝侧边轧件表面区域，轧制方向残余应力分布基本一致，整体呈现为压应力，且关于辊缝中心线对应轧件水平顶点B呈对称分布。随着轧制温度的上升，路径三区域残余应力均呈现出下降趋势，最大压应力出现在轧件与轧辊直接接触区域，最下压应力出现在辊缝中心线点B处。随着轧件温度的提高，轧件路径三两端与中心位置残余应力差值越来越小，残余应力的均匀性变得更好。

3.2 直线度分析

图9所示为轧件直线度随轧制温度变化曲线。由图9可得，轧件直线度与轧制温度之间没有简单的线性关系，表现出波动的趋势，并不是随着温度的升高或降低而单调变化。当轧制温度为950℃时，200～800mm内轧件直线度最大，为0.15242mm；当轧制温度为800℃时，200～800mm范围内轧件直线度最小，为0.03174mm，直线度最大值与最小值相差

0.121mm。综上所述，当温度在800～1050℃之间时，轧制温度的变化对轧件直线度有着显著影响，但影响不是单调的，800℃、900℃和1000℃下的直线度相对较好，表明可能存在一个或多个温度范围，在这些范围内材料的性能和轧制过程的条件能够达到最佳平衡，从而获得较好的直线度。

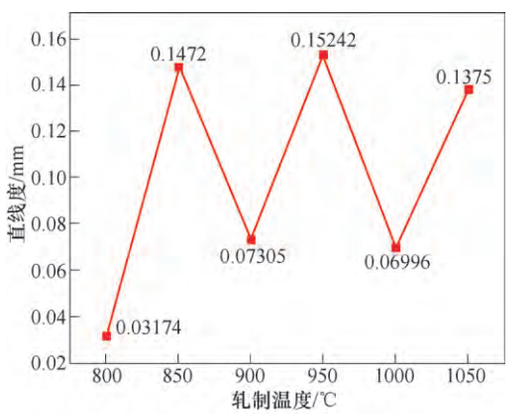


图9　轧件直线度随轧制温度变化曲线

4　结束语

本文基于ABAQUS仿真软件对GCr15直线滚动导轨热轧过程进行三维建模，通过设置不同的轧制温度，对轧制过后轧件轴向中心区域横截面轧制方向残余应力，以及轧件轧制方向直线度进行分析，探究了轧制温度对轧件残余应力和直线度的影响规律，得到了如下结论。

1）轧件横截面的轧制方向残余应力呈现出典型的“M形残余应力分布”，轧件中心区域残余应力表现为压应力，且中心位置应力值最大，逐渐向外减小，然后过渡为拉应力，一直持续到轧件表层下方区域，最后又过渡为压应力。

2）在800～1050℃下，随着轧制温度的升高，轧件横截面轧制方向残余应力最大值与最小值差值呈现下降趋势，轧件横截面残余应力分布均匀性得到增强；除轧辊顶角下方对应轧件区域残余应力随着轧制温度的上升而增大以外，轧件横截面残余应力均随着轧制温度的上升而下降，这是由于轧制温度的上升使得轧件的金属流动性得到增强，轧件上下两侧金属变形量得到增大，其余部分阻碍金属变形的抵抗力下降，因此残余应力下降。

3）在800～1050℃下，轧件200～800mm内轴向直线度受到轧制温度的显著影响，但影响不是单调的，而是在不同温度下表现出复杂的波动。800℃、900℃和1000℃下的直线度相对较好，表明可能存在一个或多个温度范围，在这些范围内材料的性能和轧制过程的条件能够达到最佳平衡，从而获得较好的直线度。

参考文献：

[1] 凌明成. 终轧温度对GCr15轴承钢组织与硬度的影响[J]. 热加工工艺，2022，51（19）：76-78.

[2] 余万华，石素锦，刘玉坤，等. 轧制温度对GCr15轴承钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报，2020，41（1）：80-85.

[3] 陈浩，丁文红，方玉，等. NM400钢终轧温度对其相变行为及残余应力的影响[J]. 金属热处理，2023，48（9）：14-22.

[4] 张方圆. 硬切削GCr15轴承钢表面变质层微观组织及抗磨损性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2019.

[5] 温飞娟，谭春梅，温奇飞，等. 增材制造金属结构件残余应力的研究进展[J]. 中国材料进展，2024，43（1）：66-78.

[6] 胡伟. 滚动直线导轨冷拔工艺研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.

[7] 王卫卫，胡霄雨，肖金福，等. 热轧板带钢轧制残余应力的研究：“第十四届中国钢铁年会”论文集[C]. 北京：中国金属学会，2023.

MW 20240315

（上接第115页）

[12] 杨清，李爽，王旭，等. 大型框架铸钢导轨铸造工艺设计与优化[J]. 铸造，2022，71（9）：1163-1168.

[13] 申恩强. 铁路铸钢件湿性粘土砂铸造工艺优化及缺陷防治[D]. 武汉：华中科技大学，2011.

[14] 王文清，李魁盛. 铸造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

[15] 申恩强，樊自田，龙威，等. 车钩钩舌的铸造工艺模拟与优化[J]. 铸造，2011，60（8）：765-768.

[16] 邵雄. 基于CAE分析的铸钢件冒口优化技术的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2011.

[17] 李永刚，王焕宁，宋学恩，等. 一种发动机飞轮壳塌陷缺陷分析及改进[J]. 铸造设备与工艺，2022（6）：44-45，57.

MW 20240125