

## 高压水除鳞喷头外流场流速分析

崔 钺<sup>1</sup>, 廉 博<sup>2</sup>, 王丽元<sup>3</sup>, 刘海生<sup>1</sup>, 闫晓丽<sup>1</sup>

- (1. 唐山学院 河北省智能装备数字化设计及过程仿真重点实验室, 河北 唐山 063000;  
2. 河钢集团唐钢公司 唐钢新区热轧事业部, 河北 唐山 063016;  
3. 唐山科技职业技术学院 智能制造系, 河北 唐山 063001)

**摘要:**为提升钢坯除鳞效果, 基于可实现  $k-\epsilon$  模型选取在用粗轧机入口某型号扁平扇形喷嘴进行高压水除鳞喷头外流场流速分析。结果表明, 在高压水除鳞喷头结构参数确定的情况下, 外流场打击区域的高压水射流流速直接受靶距的影响; 不同入口压力下水射流流速随靶距的增加呈明显降低趋势, 最大流速差随靶距 (30~120 mm) 的增加由 40 m/s 降至约 18 m/s; 得到的不同压力下靶距 120 mm 处水射流流速分布趋势说明, 单纯提高高压水除鳞系统的工作压力对除鳞区域作用范围的影响不大; 模拟射流中心区域打击长度与实验打击作用线长度吻合良好, 说明仿真模型能够准确表达高压水除鳞喷头外流场流速的变化情况。

**关键词:** 高压水除鳞; 喷嘴; 流速; 可实现  $k-\epsilon$  模型; 靶距

**中图分类号:** TF303 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2023)03-0027-06

**DOI:** 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2023.03.005

## Flow Velocity Analysis for External Flow Field of the High-Pressure Water Descaling Nozzle

CUI Yue<sup>1</sup>, LIAN Bo<sup>2</sup>, WANG Li-yuan<sup>3</sup>, LIU Hai-sheng<sup>1</sup>, YAN Xiao-li<sup>1</sup>

- (1. Hebei Key Laboratory of Intelligent Equipment Digital Design and Process Simulation, Tangshan University, Tangshan 063000, China; 2. Department of Hot Rolling, Tangshan Iron and Steel Company of HBIS, Tangshan 063016, China; 3. Department of Intelligent Manufacturing, Tangshan Vocational College of Science and Technology, Tangshan 063001, China)

**Abstract:** In order to improve the descaling effect a certain type of flat fan-shaped nozzle at the entrance of roughing mill was selected to analyze the flow velocity based on realizable  $k-\epsilon$  model. The results show, when the nozzle structural parameters of the high-pressure water descaling were determined, the high-pressure water flow velocity in the impact area of the outflow field was directly affected by the target distance. The flow velocity of water jet at different inlet pressures decreased obviously with the increase of target distance, and the maximum velocity difference decreased from 40 m/s to 18 m/s with the increase of target distance (30~120 mm); the distribution trend of velocity at the target distance of 120 mm under different pressure was obtained, which showed that simply increasing the working

**基金项目:** 河北省教育厅科学技术研究项目 (QN2022198)

**作者简介:** 崔钺 (1987—), 男, 河北保定人, 讲师, 博士, 研究方向为机械设计、流体分析;

廉博 (1985—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 工程师, 研究方向为液压系统设计。

pressure of the high-pressure water descaling system had little effect on the action range of the descaling area. The simulated jet center striking length was in good agreement with the experimental striking line length, which meant that the simulation model could accurately reflect the velocity change of the outflow field of the high-pressure water descaling nozzle.

**Key Words:** high-pressure water descaling; nozzle; flow velocity; realizable k- $\epsilon$  model; target distance

## 0 引言

中国钢铁工业协会在 2022 年初发布的数据显示,在满足市场供需动态平衡的前提下,虽然 2021 年全国钢产量较上一年减少了 3 500 万 t,但是钢铁主营业务利润总额却以 3 500 亿元创下了行业效益新高<sup>[1]</sup>。钢铁业扭亏为盈的原因主要是钢铁的品种质量得到了升级。从“双碳”目标下钢铁产业的展望来看,粗钢产量压减工作将会继续,市场也会继续倒逼钢铁品质提升。因此,提升品质仍是钢铁产业的主攻方向。

热轧钢坯在加热炉中与氧发生反应会在其表面形成一层致密的氧化铁皮(即鳞皮),它是影响钢材品质的主要因素之一,在钢坯进行热轧前,需要使用高压水除鳞系统将其去除。高压喷嘴喷射出的水流冲击到轧件上下表面,使快速降温下的氧化铁皮开裂而被冲走<sup>[2]</sup>。高压水除鳞喷嘴的结构和布置形式直接影响除鳞水的速度、打击力及打击范围<sup>[3]</sup>,决定了热轧钢坯表面质量的好坏。

在对高压水除鳞喷嘴的分析研究上,Frick<sup>[4]</sup>综合考虑了喷射角、射流流量、射流距离、射流水的冲击力和相邻两喷嘴的重叠度等因素,对高压水除鳞喷嘴内部结构进行改进,得出了最优的几何形状。Chatterjee 等<sup>[5]</sup>分析了换热器用空心喷嘴冷却过热模具的过程,并通过流体动力学软件进行数值模拟及实验研究,得出了不同的工况和结构参数对喷嘴射流扩散的影响。东北大学<sup>[6]</sup>进行了除鳞系统设计平台的开发,对不同除鳞参数(如喷射压力、喷射角度、喷嘴安装角度、除鳞流流量等)进行分析对比,得出了参数对除鳞效果的影响结果。高传昌等<sup>[7]</sup>以正交试验的方法分析了喷嘴结构参数间的相互影响,优化了结构参数的组合形式。

于兰英等<sup>[8]</sup>通过对喷嘴进行流场的数值模拟,证明了仅依靠增压和增大孔径来提升打击力的效果不明显。梁博健等<sup>[9-10]</sup>研究了喷头部分的扩张角、收缩角和流道深度对外流场指标的影响,获得了上述三因素对射流性能的交互作用效果。周万阳<sup>[11]</sup>在对扇形喷嘴分析中得出,射流打击力随喷嘴入口压力的增大而增大,但增幅逐渐减小。张桂冠等<sup>[12]</sup>研究了喷嘴雾化下的冲刷磨损情况,证明喷嘴磨损主要为脆性微切削磨损。

在国内外相关领域,高压水除鳞喷嘴的结构设计、性能测试、工业化生产等日趋完善,但缺乏对已投入使用的高压水除鳞系统根据具体工况变化(如生产线轧制钢坯宽度及断面规格变化)而进行的后期实时调整与跟进适配。因此,本文为提升钢坯除鳞效果,基于可实现 k- $\epsilon$  模型选取在用粗轧机入口喷嘴进行高压水除鳞喷头外流场流速分析,以为除鳞压力及喷嘴空间布置的实时调整提供参考。

## 1 流体计算模型

将高压水除鳞喷嘴射流流场简化为定常、湍流、不可压缩液体的冲击射流问题,可近似描述高压水除鳞喷嘴的射流真实情况,也可在保证计算精度的同时减少计算量。射流过程忽略热量传递,控制方程简化为连续性方程、动量方程及能量方程<sup>[13]</sup>。

连续性方程为:

$$\varphi \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v_s + \varphi_1 \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v = \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v_s + \rho \nabla \cdot v = 0; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot v_s = - \left( \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot v \right). \quad (2)$$

式中,  $\frac{d}{dt}$  为系统导数,  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} +$

$w \frac{\partial}{\partial z}$ ;  $t$  为时间;  $\nabla$  为梯度算子;  $\varphi$  为涡旋的体积分数,  $\varphi_1 = 1 - \varphi$ ;  $v_s$  为涡旋微团速度矢量;  $v$  为无旋微团速度矢量;  $\rho$  为流体密度。

动量方程为:

$$\iiint_V \left[ \varphi \frac{d(\rho v_s)}{dt} + \rho v_s \nabla \cdot v_s + \varphi_1 \frac{d(\rho v)}{dt} + \rho v \nabla \cdot v \right] dV = \iiint_V f \rho dV + \oint_A p_n dA = \iiint_V f \rho dV + \iiint_V \nabla \cdot P dV. \quad (3)$$

式中,  $f$  为单位微团所受质量力;  $p_n$  为作用于整个系统表面的应力矢量;  $A$  为控制体表面积;  $V$  为流体体积;  $P$  为张量:

$$P = p_x i + p_y j + p_z k = (p_{xx} i + p_{xy} j + p_{xz} k) i + (p_{yx} i + p_{yy} j + p_{yz} k) j + (p_{zx} i + p_{zy} j + p_{zz} k) k. \quad (4)$$

能量方程为:

$$\frac{dE}{dt} = \iiint_V \left\{ \varphi \frac{d}{dt} \left[ \rho \left( e + \frac{v_s'^2}{2} \right) \right] + \rho \left( e + \frac{v_s'^2}{2} \right) \nabla \cdot v_s + \varphi_1 \frac{d}{dt} \left[ \rho \left( e + \frac{v'^2}{2} \right) \right] + \rho \left( e + \frac{v'^2}{2} \right) \nabla \cdot v \right\} dV = \oint_A n (\lambda \Delta T) dA + \iiint_V \rho q_R dV + \iiint_V f \rho (\varphi v_s + \varphi_1 v) dV + \oint_A p_n [\varphi^{2/3} v_s + (1 - \varphi^{2/3}) v] dA. \quad (5)$$

式中,  $E$  为流体能量;  $\lambda$  为热导率;  $\Delta T$  为单位微团温度差;  $n$  为微团数量;  $e$  为流体分子能量;  $q_R$  为热辐射率。

## 2 模型及边界条件设置

选取某钢厂 2 050 mm 热轧线高压水除鳞系统粗轧机入口某型号扁平扇形喷嘴, 对高压水除鳞喷嘴外流场特性进行分析。

图 1 为高压水除鳞喷嘴整体结构。高压水从除鳞集管进入过滤器过滤后经稳流器稳流, 然后进入高压水除鳞喷嘴。构建喷嘴模型, 尺寸参数见图 2。图 2 中, 内锥孔入口收缩角  $\alpha$  为  $80^\circ$ ; 入口直径  $d$  为 18 mm; 喷头长度  $l$  为 33 mm; 内孔深度  $h$  为 22 mm; U 形槽切槽宽度  $f$  为 1.5 mm; 切槽深度  $e$  为 3.5 mm。对喷头

的重点位置进行四面体网格划分, 对椭圆形切槽与喷头内部流动收缩区域进行网格加密。

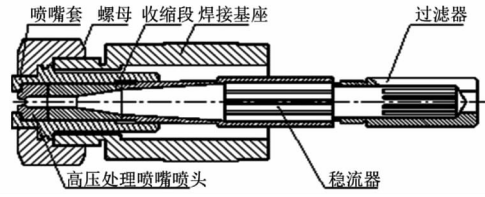


图 1 高压水除鳞喷嘴结构示意图

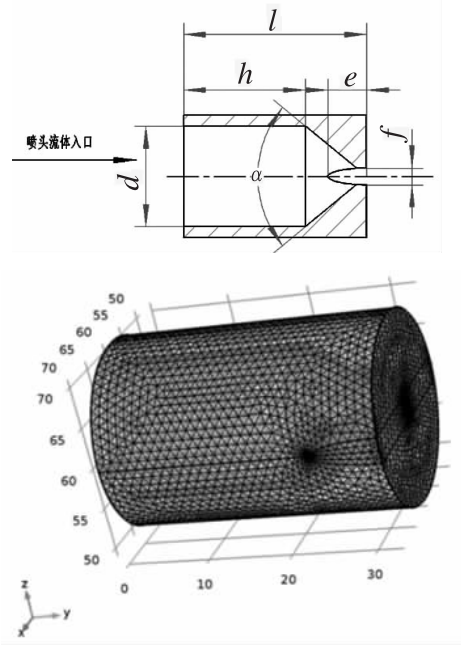


图 2 高压水除鳞喷头尺寸及其网格划分

图 3 为高压水除鳞喷嘴外流场边界条件设置及网格划分。外流场设置为边长 140 mm 的立方体区域, 在喷头与外流场交界处(切槽位置)进行非结构化网格的加密处理; 外流场根据几何特点进行结构化网格划分。划分后产生了由 252 182 个域单元、12 630 个边界单元和 754 个边单元组成的完整网格, 有效减少了整体计算中的网格数量, 提高了内外流场交界处的计算精度。将图 3 中喷头的左端面入口区域设为压力入口(23 MPa); 将图 3 中喷头与外流场交界区域(立方体左侧面)设为壁面, 外流场区域的其他 5 个面设为压力出口。初始条件是喷嘴内为高压水区域, 外流场区域为空气。喷嘴的流道壁面设为无滑移壁面。用交错迭代法对高压水除鳞喷嘴外流场流速进行求解。

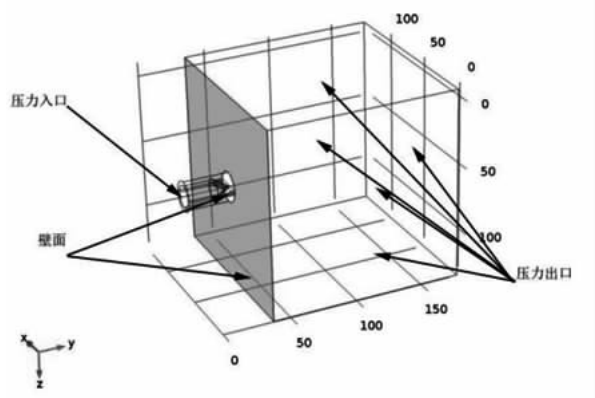


图 3 高压水除鳞喷头外流场边界  
条件设置及网格划分

### 3 模拟结果与实验验证

基于可实现  $k-\epsilon$  模型进行高压水除鳞喷头流场模拟,得到外流场流速分布。沿喷头中心轴线作外流场区域  $XY$  平面及  $YZ$  平面,观察流速分布,结果见图 4。在图 4 中, $XY$  平面及  $YZ$  平面的流速以喷头中心轴线对称,且整体流速随  $Y$  轴方向的靶距增大而逐步衰减。射流中心区域最高流速达  $200\text{ m/s}$  以上,且随着  $Y$  轴方向的靶距增大,快速衰减,在  $115\text{ mm}$  处的打击速度在  $60\text{ m/s}$  左右;受喷头收缩区域与切槽区贯通的影响, $XZ$  平面的扇形打击范围大于  $YX$  平面。在整体射流边缘水流与空气的剪切作用明显,使流速降至  $40\text{ m/s}$  以下。

图 5 为  $XZ$  平面外流场流速截面图。水射流在  $XZ$  平面内呈条形扁平状分布,与实际除鳞打击区域相符。沿  $Y$  轴方向在距喷头  $30\sim 120\text{ mm}$  距离内按等间距剖切 4 个流速截面,截面中心位置流速最大,沿  $X$  轴方向呈扁平状分布;在打击区域的外围流速降低,呈现快速衰减

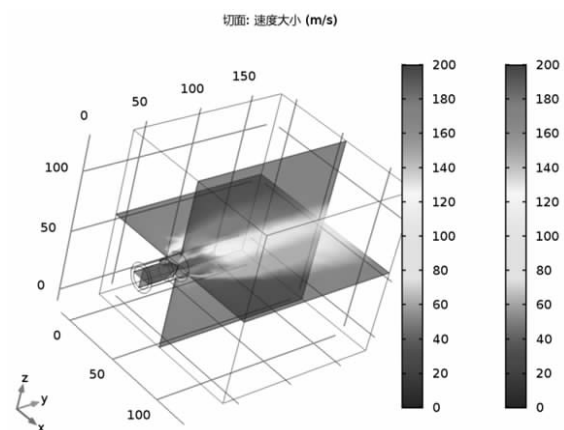


图 4  $XY$  平面及  $YZ$  平面外流场流速截面图  
趋势;随着  $Y$  轴方向的靶距增大,截面的整体  
流速下降,打击范围增大。

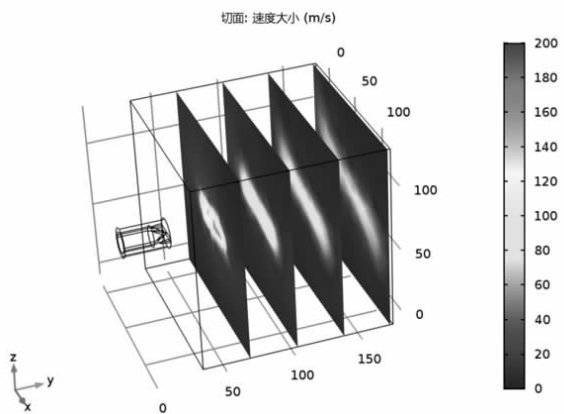


图 5  $XZ$  平面外流场流速截面图

参照产品参数手册中除鳞喷嘴的实验打击数据,选用直径为  $1\text{ mm}$  的压力传感器按照设定路线行走对流体喷射区域进行打击力数据采集(图 6),然后对模拟数据与实验打击数据进行对比,结果如图 7 所示。图 7 中模拟的射流中心区域长度与实验打击作用线长度数据基本吻合。在靶距由  $30\text{ mm}$  增至  $120\text{ mm}$  的过程中,模拟的射流中心区域长度由  $40\text{ mm}$  增至  $81\text{ mm}$ ,且随着靶距的增加,射流中心区域长度的增加有所减缓。沿  $Y$  轴方向靶距  $40\text{ mm}$ ,  $50\text{ mm}$ ,  $70\text{ mm}$ ,  $80\text{ mm}$ ,  $100\text{ mm}$  及  $110\text{ mm}$  处,实验所得打击作用线长度与模拟计算结果吻合良好。

在不同压力( $19\sim 27\text{ MPa}$ )下沿  $Y$  轴方向射流中心区域流速分布模拟数据如图 8 所示。

在预设压力为  $23\text{ MPa}$  的入口压力下,水

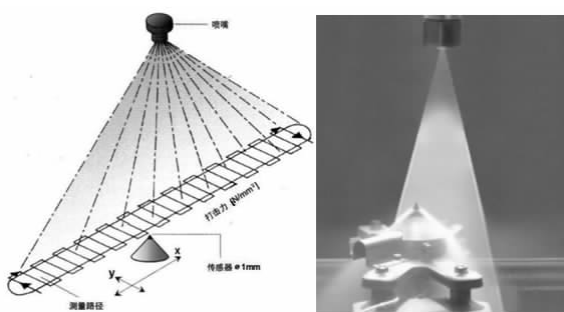


图6 喷嘴打击力测量装置

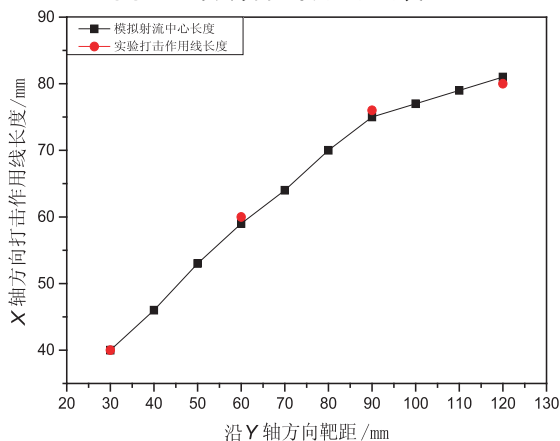


图7 模拟射流中心区域长度与实验打击作用线长度对比

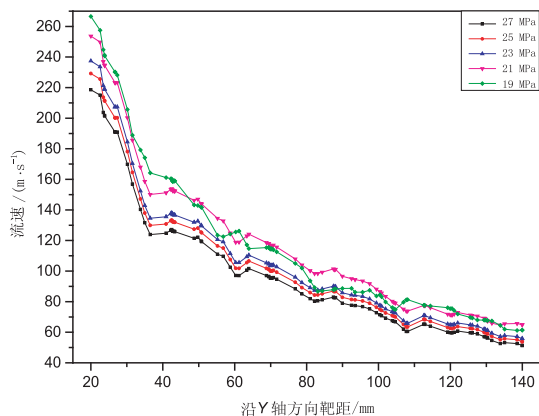


图8 不同压力下沿Y轴方向射流中心区域的流速分布

射流流速随着靶距的增加呈明显降低趋势,在距喷头 30 mm 处,射流中心流体流速约为 180 m/s;在远端距喷头 140 mm 处,最大流速降至约 55 m/s;在最大压力 27 MPa 与最小压力 19 MPa 下,在喷头的出口至中间位置(靶距 60 mm)最大流速差约为 40 m/s;随着靶距的增加,在射流远端位置,最大流速差降至约 18 m/s。

高压水射流流速的降低取决于外流场中空气的阻力,且在流体高速运动时阻碍作用明显,即在射流中心线上沿 Y 轴方向的前半段(30~70 mm)流速的降幅高于后半段(70~140 mm)。

参照现场情况设定 120 mm 的打击距离,进行不同压力下水射流流速分析,结果如图 9 所示。水射流流速以 X 轴方向的 70 mm 处为对称中心接近对称分布,且随着 Y 轴方向靶距的增加,射流中心区域在 X 轴方向上流速分布得更加均匀;不同压力下水射流流速分布具有共性,即射流中心区域流速较高,且随着 X 轴方向以对称中心为起点(70 mm 处)向两侧延伸,当超出射流中心区域到达边界区域时,流速下降明显。压力在 25 MPa 及以上时,射流中心区域略向左偏置约 3 mm;单纯地升高入口压力,对 120 mm 靶距处射流中心区域的流速及除鳞区域作用范围的影响都不大。

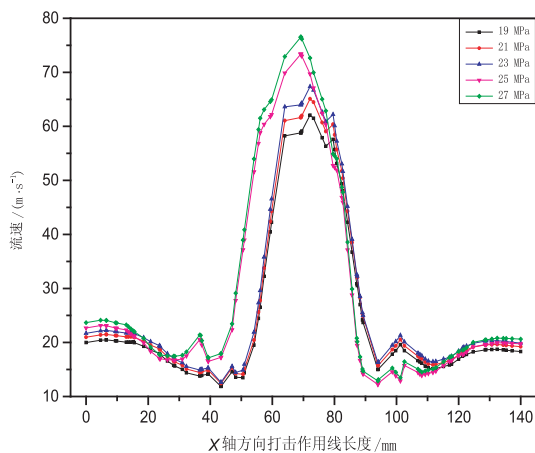


图9 不同压力下靶距 120 mm 处沿 X 轴方向的流速分布

#### 4 结论与展望

基于可实现 k- $\epsilon$  模型模拟了某生产线高压水除鳞系统粗轧机入口扁平扇形喷嘴外流场特性,并结合现场实验得出如下结论。

(1)在高压水除鳞压力及喷头结构参数确定的情况下,外流场打击区域的高压水射流流速直接受靶距的影响。流速导致的流体动能越大就越会升高与之对应的打击力,且喷头外流场截面流速越均匀,提供的水射流打击力分布也越均匀。横截面的流速分布情况可作为选择

最佳靶距的依据。

(2)水射流流速随着靶距的增加呈明显降低趋势,不同入口压力(19~27 MPa)在喷头的出口至中间位置(靶距 60 mm)最大流速差约为 40 m/s;而随着靶距的增加,在射流远端位置,最大流速差降至约 18 m/s。高压水射流流速降低取决于外流场中空气的阻力,且在流体高速运动时阻碍作用明显,因此,单纯提高高压水除鳞系统的工作压力对流速的影响不大。靶距小可得到大的流速,但会造成水射流打击作用线变短,局部打击力分布不均匀,而由此会增大管桶上除鳞喷头的分布数目,造成水资源浪费;靶距过大会造成水射流流速过小而达不到所需的除鳞打击力度。

(3)不同压力下靶距 120 mm 处水射流流速分析结果显示,水射流的流速分布具有共性,即射流中心区域流速较高,并且沿 X 轴方向以对称中心为起点向两侧延伸而超出射流中心区域到达边界区域时,流速下降明显。因此,单纯提高高压水除鳞系统的工作压力对除鳞区域作用范围的影响不大。

(4)模拟的射流中心区域打击长度与实验打击作用线长度吻合良好,说明仿真模型能够准确表达高压水除鳞喷头外流场流速的变化情况,可以为优化高压水除鳞系统喷头的空间布置以及提升不同轧制规格板坯的除鳞效果提供计算方案。

本研究存在主要问题是:外流场流速计算采用湍流流体方程进行推导,未考虑流固耦合情况下流体打击到钢坯上交互作用力的变化。下一步的工作将在此研究的基础上,基于流固耦合效应,针对不同规格的轧制钢坯,综合考虑其相应物理参数及高压水除鳞系统相关参数的共同作用来考察轧件表面高压水除鳞的整体效果。

#### 参考文献:

- [1] 感知中国经济韧性|减量提质 钢铁业效益创新高 品质实现新突破[EB/OL]. (2022-01-08). <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2022-01-18/doc-ikyarmz5902370.shtml?cref=cj>.
- [2] 梁博健,高殿荣. 高压水除鳞喷嘴结构参数对喷嘴射流性能的影响[J]. 中国机械工程, 2018,29(24):2939-2946.
- [3] 黄福洲. 中厚板高压水除鳞有限元模拟[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
- [4] FRICK J W. Optimisation of nozzle arrangements on descaling headers [C]// 4th International Conference on Hydraulic Descaling. London: IoM Institute of Materials, 2003:87-97.
- [5] CHATTERJEE D, MAZUMDAR D, PATIL S P. Physical and mathematical modeling of two-phase flows in a hollow jet nozzle [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2007,38:819-831.
- [6] 许凯林. 高压水射流仿真及除鳞系统设计平台开发[D]. 沈阳:东北大学,2013.
- [7] 高传昌,黄丹,马建娇,等. 喷嘴几何参数对自激吸气脉冲射流性能影响的正交试验[J]. 排灌机械工程学报, 2016,34(6):525-531.
- [8] 于兰英,周万阳,邓斌,等. 基于 CFD 的清洗用扇形喷嘴清洗参数研究[J]. 机床与液压, 2016,44(13):164-167.
- [9] 梁博健,高殿荣,毋少峰,等. 关键结构参数对高压除鳞喷嘴性能影响的研究[J]. 液压与气动, 2016(6):24-29.
- [10] 梁博健,徐云辉,高殿荣,等. 喷淋梁上喷嘴位置参数对平整机工艺润滑的影响[J]. 润滑与密封, 2016(9):121-127.
- [11] 周万阳. 地铁隧道清洗设备的结构研究和扇形喷嘴分析[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [12] 张桂冠,赵玉刚,高跃武,等. 气-固两相流雾化喷嘴的磨损分析[J]. 表面技术, 2017,46(9):121-126.
- [13] 克里斯托夫·巴伊,热纳维耶芙·孔特·贝洛. 湍流[M]. 北京:国防工业出版社,2018:201-218.

(责任编辑:李秀荣)