

喷嘴布局对圆坯冷却的研究

连天龙¹, 王文学¹, 曾 晶¹, 杨拉道¹, 王 伦², 庞伟林²

¹中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安

²广西柳钢中金不锈钢有限公司, 广西 玉林

收稿日期: 2024年10月24日; 录用日期: 2024年12月13日; 发布日期: 2024年12月24日

摘 要

针对圆坯连铸二次冷却过程, 本文建立了喷嘴球面水量分布数学模型, 通过该模型可计算不同位置不同面积内的喷淋水量。本文同时建立了铸坯柱面网格水量分布数学模型, 通过该模型可计算出铸坯柱面水流密度数据。通过J. Wendelstorf研究出的公式计算出铸坯柱面每一个节点的喷淋换热系数, 为精细化圆坯三维温度场数学模型提供边界条件基础。

关键词

圆坯, 二次冷却, 喷嘴, 水流密度, 温度场, 换热系数

Research on the Nozzle Layout for Cooling Round Billets

Tianlong Lian¹, Wenxue Wang¹, Jing Zeng¹, Ladao Yang¹, Lun Wang², Weilin Pang²

¹China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Zhongjin Stainless Steel Company Limited of Guangxi Liuzhou Steel, Yulin Guangxi

Received: Oct. 24th, 2024; accepted: Dec. 13th, 2024; published: Dec. 24th, 2024

Abstract

Regarding the secondary cooling process of round billet continuous casting, this paper establishes a mathematical model for water distribution on the spherical surface of the nozzle. This model enables the calculation of spray water volume at various positions and areas. Additionally, a mathematical model for water distribution in the cylindrical grid of the casting blank is established, allowing for the calculation of water flow density data on the cylindrical surface of the casting blank. Using the formula developed by J. Wendelstorf, the spray heat transfer coefficient at each node on the cylindrical surface of the cast billet is calculated, providing a fundamental boundary condition for refining the three-dimensional temperature field mathematical model of the round billet.

文章引用: 连天龙, 王文学, 曾晶, 杨拉道, 王伦, 庞伟林. 喷嘴布局对圆坯冷却的研究[J]. 冶金工程, 2024, 11(4): 185-196. DOI: 10.12677/meng.2024.114023

Keywords

Round Billet, Secondary Cooling, Nozzle, Water Flow Density, Temperature Field, Heat Transfer Coefficient

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

连续铸钢技术是现代冶金工业中一项关键的工艺创新，能够有效减少生产工序和能耗，同时提高金属收得率[1][2]。圆坯连铸机作为一种近终形连铸技术，广泛应用于无缝钢管的生产。其通过直接浇铸成型的圆坯进行穿孔轧制，不仅节省能源，还提高了金属利用率。

在当前铸机设备与操作工艺相对固定的背景下，二冷区的喷水冷却成为影响铸坯热量传递的主要可控因素。喷嘴喷雾水滴与铸坯表面的热交换过程复杂多变，受多种因素影响，包括铸坯表面温度、水流密度、水滴速度和直径、铸坯表面状态以及喷嘴使用状况等。研究者们通常在实验室中对其简化，然后利用热模拟装置进行相关测定。研究结果表明，在一定温度条件下，传热系数与水流密度和表面温度呈现一定关系[3]。

现有研究一般得出了冷却区内的换热系数固定值，得出的换热计算公式未能充分反映实际生产中不同位置因喷嘴布局而导致的换热系数变化。因此，研究在冷却区内任意铸坯位置处的换热系数，对于实现精细化模拟和优化喷嘴布置，从而改善圆坯冷却均匀性，具有重要的理论和实际意义。

2. 圆坯喷淋冷却换热数学模型

2.1. 铸坯表面换热系数的计算

国内外对气水喷嘴向高温钢表面喷射雾化水滴的传热特性都有做过研究，一般得到的表面换热系数是与铸坯表面温度和水流密度之间的函数式。本文采用 J. Wendelstorf 研究出的公式[4]：

$$H_{wi}[z][x] = \tanh\left(\frac{Vs[z][x]}{8}\right) \left[140Vs \left(1 - \frac{Vs[z][x](Ts[z][x] - Tw)}{72000} \right) \right] + 3.26(Ts[z][x] - Tw)^2 \left[1 - \tanh\left(\frac{Ts[z][x] - Tw}{128}\right) \right] \quad (1)$$

上式中：

Vs 为平均水流密度， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

Ts 为铸坯表面的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

Tw 为喷淋水的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

从公式(1)中可以看出，计算出边界处的水流密度即可得出对应的换热系数。

2.2. 喷嘴水流密度的计算

从国内某喷嘴测试中心获取纯水圆锥喷嘴和气水圆锥喷嘴的型号及参数见表 1。

Table 1. Nozzle parameters
表 1. 喷嘴参数

参数	纯水喷嘴	气水喷嘴
型号	1/4PZ1577QZ5	HPZ1.8-65QZ2
气压[MPa]	0	0.2
水压[MPa]	0.3	0.2
气流量[Nm³/h]	0	7.30
水流量 W [L/min]	11.42	1.80
喷射高度 H [mm]	150	150
喷射角[°]	77.8	66.5

从纯水喷嘴和气水喷嘴的水流密度测试中得到水流密度分布图如图 1 和图 2 所示。

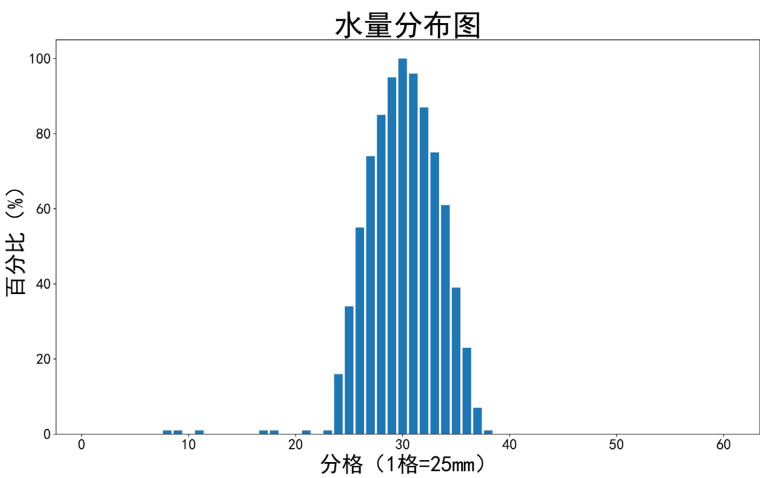


Figure 1. Distribution diagram of water flow density in pure water nozzle
图 1. 纯水喷嘴水流密度分布图

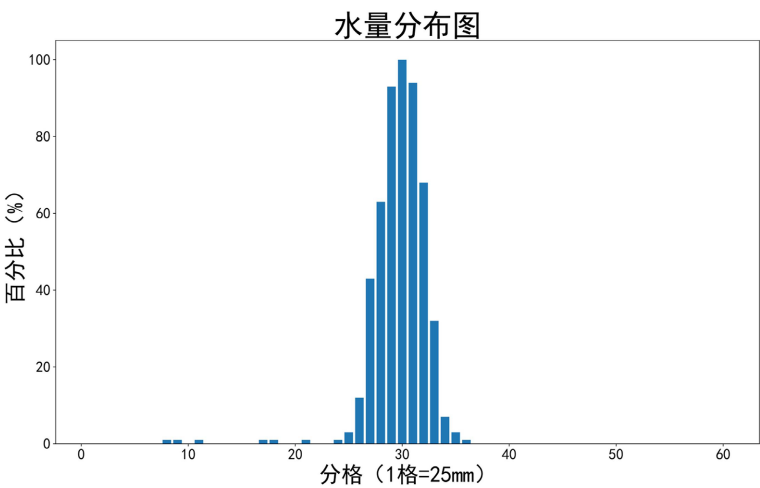


Figure 2. Distribution diagram of water flow density in air-water nozzle
图 2. 气水喷嘴水流密度分布图

设定喷嘴正下方的分格位置为 0，其余分格位置依次增加，对纯水喷嘴和气水喷嘴的水流密度分布进行均匀化处理，可以得到处理后的水流密度分布见表 2：

Table 2. Distribution of nozzle water flow density
表 2. 喷嘴水流密度分布

位置(mm)	纯水喷嘴	气水喷嘴	位置(mm)	纯水喷嘴	气水喷嘴
0	100	100	375	0	0
25	95.5	93.5	400	0	0
50	86	65.5	425	0	0
75	74.5	37.5	450	0	0
100	58	9.5	475	0.5	0.5
125	36.5	3.0	500	0	0
150	77.8	1.0	525	0.5	0.5
175	4	0	550	0.5	0.5
200	0.5	0	575	0	0
225	0.5	0.5	600	0	0
250	0	0	625	0	0
275	0	0	650	0	0
300	0.5	0.5	675	0	0
325	0.5	0.5	700	0	0
350	0	0	725	0	0

将上面的数据按照正态分布函数进行数据拟合，可以得到纯水喷嘴的拟合函数为：

$$f_v(x)=100\cdot\exp\left(-\frac{x^{2.5793}}{2\times348.8335^2}\right)$$

(2)

纯水喷嘴的原始数据和拟合曲线的对比图如图 3 所示：

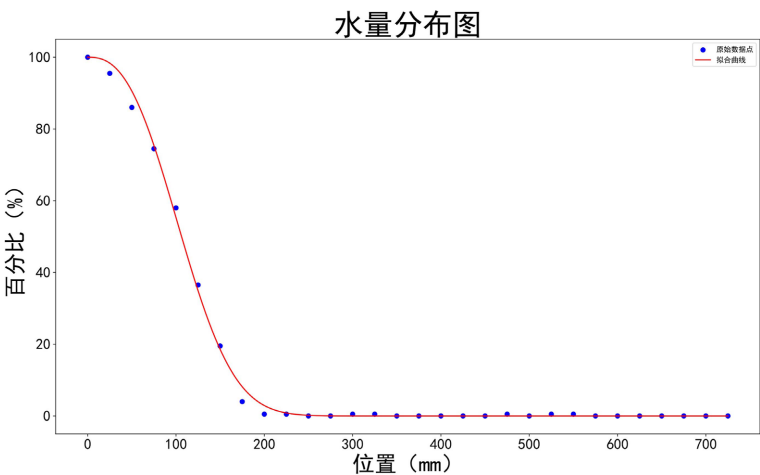


Figure 3. Comparison chart of raw data and fitting curve of pure water nozzle
图 3. 纯水喷嘴的原始数据和拟合曲线的对比图

每个喷淋网格在圆锥喷嘴喷淋球面上的面积的计算公式为：

$$A(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{H^2}{2\pi} \sin(0.25) & \varepsilon = 0 \\ \frac{H^2 \sin(\varepsilon)}{\pi} & \varepsilon \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

喷淋网格划分后的形状如图 6 所示：

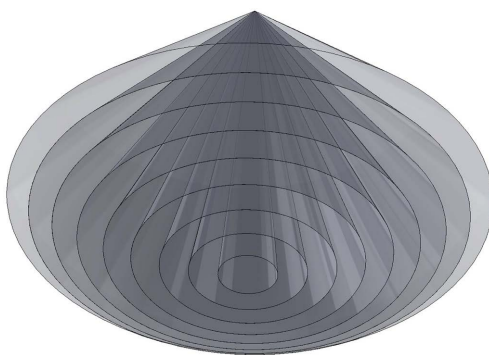


Figure 6. Schematic diagram of 3D division of spray grid
图 6. 喷淋网格三维划分示意图

因此每个喷淋网格的综合无量纲水流密度为：

$$Wfd(\varepsilon) = Lmn(\varepsilon) \cdot W(\varepsilon) \cdot A(\varepsilon) \quad (7)$$

每个喷淋网格的水量权重的计算公式为：

$$Wfw(\varepsilon) = \frac{Wfd(\varepsilon)}{\sum_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\eta} Wfd(\varepsilon)} \quad (8)$$

经计算后，喷淋网格的水量权重如图 7 所示：

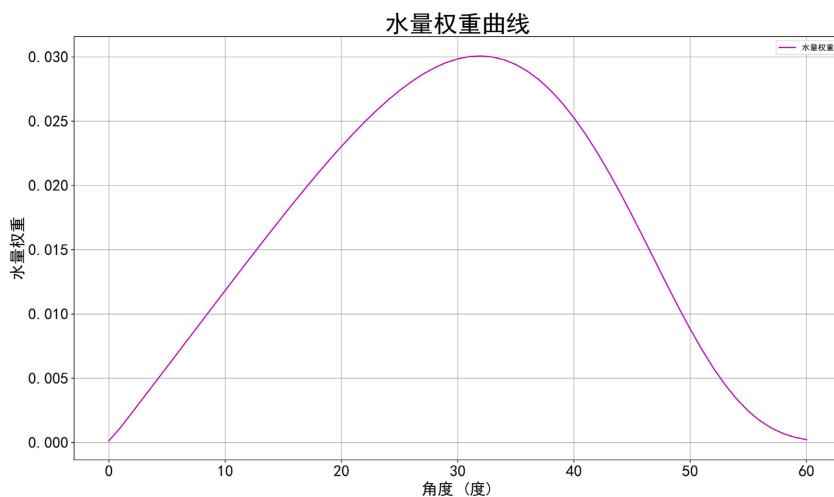


Figure 7. Calculation results of water weight for spray grids
图 7. 喷淋网格水量权重计算结果

在喷淋高度为 H 形成的喷淋球面中, 对一个喷淋面积为 Sr , 喷淋偏离角度为 e 的喷淋水量为 SPw , 其计算公式为:

$$SPw(Sr, e) = \frac{W \cdot Wfw(e) \cdot Sr}{A(e)} \quad (9)$$

2.3. 铸坯表面水流密度的计算

以圆坯弯月面的圆心为原点建立三维坐标系, 忽略铸机半径对坐标系的影响, 以原点沿水平方向为 X 方向, 沿竖直方向为 Y 方向, 沿拉坯方向为 Z 方向。

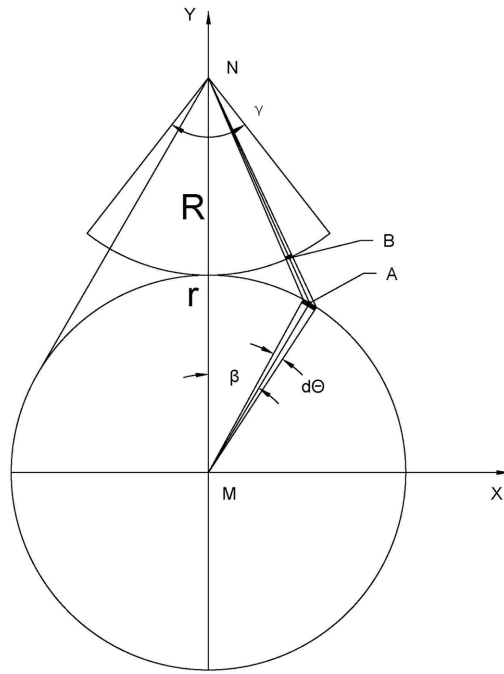


Figure 8. Schematic diagram of cross-section of round billet
图 8. 圆坯横截面示意图

如图 8 所示, 设定喷嘴的喷水量为 m , 铸坯一圈的喷嘴数量为 n , 圆坯几何半径为 r , 喷嘴与铸坯表面距离为 R , 如果是圆锥形喷嘴, 喷嘴的喷射角度 γ 。

设定沿拉坯方向任意一位置的圆心坐标 M 为 $(0, 0, Z_M)$, 在该圆心的横截面内的边界节点 A 的坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) , 节点 A 所在喷嘴 N 的坐标为 (X_N, Y_N, Z_N) , 由于喷嘴 N 在圆心 M 的正上方, 因此:

$$\begin{cases} X_N = 0 \\ Y_N = r + R \end{cases} \quad (8)$$

以喷嘴 N 的坐标为圆心, 以 R 为半径, 以喷嘴的喷射角度 γ 为辐射角度所形成的等水流密度球面面积为 S_N , 则:

$$S_N = 2\pi R^2 \cdot (1 - \cos(\gamma/2)) \quad (10)$$

节点 A 和圆心 M 的连线与喷嘴 N 和圆心 M 的连线的夹角为 β , β 的最大值为 $\beta_{\max}$, 每个喷嘴排共计有 n 个喷嘴, 但研究 β 的范围为 $(0, \beta_{\text{std}})$, 其中:

$$\beta_{\text{std}} = \frac{\pi}{n} \quad (11)$$

$$\beta_{\text{max}} = \arccos\left(\frac{r}{r+R}\right) \quad (12)$$

由于节点 A 和圆心 M 在通一个横截面内, 因此:

$$\begin{cases} X_A = r \cdot \sin \beta \\ Y_A = r \cdot \cos \beta \\ Z_A = Z_M \end{cases} \quad (13)$$

节点 A 沿周向分别向正方向和负方向旋转 $d\theta/2$, 沿拉坯方向分别向正方向和负方向延长 $dl/2$, 形成以点 A1、A2、A3 和 A4 为边界的弧面, 定义该弧面的面积为 S_A , 如图 9 所示, 则:

$$S_A = d\theta \cdot r \cdot dl \quad (14)$$

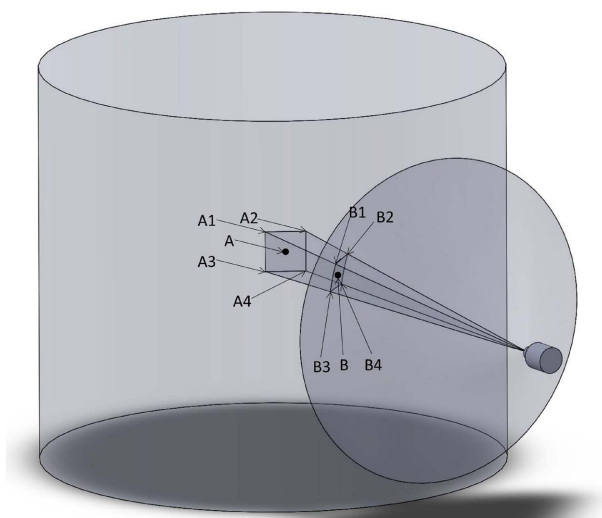


Figure 9. Schematic diagram of water flow density calculation
图 9. 水流密度计算示意图

设定 A1、A2、A3 和 A4 的坐标分别为 (X_{A1}, Y_{A1}, Z_{A1}) 、 (X_{A2}, Y_{A2}, Z_{A2}) 、 (X_{A3}, Y_{A3}, Z_{A3}) 、 (X_{A4}, Y_{A4}, Z_{A4}) , 可以得到:

$$\begin{cases} X_{A1} = r \cdot \sin(\beta + \theta/2) \\ Y_{A1} = r \cdot \cos(\beta + \theta/2) \\ Z_{A1} = Z_A + dl/2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} X_{A2} = r \cdot \sin(\beta - \theta/2) \\ Y_{A2} = r \cdot \cos(\beta - \theta/2) \\ Z_{A2} = Z_A + dl/2 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} X_{A3} = r \cdot \sin(\beta + \theta/2) \\ Y_{A3} = r \cdot \cos(\beta + \theta/2) \\ Z_{A3} = Z_A - dl/2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} X_{A4} = r \cdot \sin(\beta - \theta/2) \\ Y_{A4} = r \cdot \cos(\beta - \theta/2) \\ Z_{A4} = Z_A - dl/2 \end{cases} \quad (18)$$

设定点 A、A1、A2、A3 和 A4 和圆心的连线与球面 S_N 的交点分别为 B、B1、B2、B3 和 B4，对应的坐标分别为 (X_B, Y_B, Z_B) 、 (X_{B1}, Y_{B1}, Z_{B1}) 、 (X_{B2}, Y_{B2}, Z_{B2}) 、 (X_{B3}, Y_{B3}, Z_{B3}) 、 (X_{B4}, Y_{B4}, Z_{B4}) ，点 A 和喷嘴 N 的连线长度为 L_{A-N} ，点 A1 和喷嘴 N 的连线长度为 L_{A1-N} ，点 A2 和喷嘴 N 的连线长度为 L_{A2-N} ，点 A3 和喷嘴 N 的连线长度为 L_{A3-N} ，点 A4 和喷嘴 N 的连线长度为 L_{A4-N} ，可以计算出：

$$\begin{cases} L_{A-N} = \sqrt{(X_A - X_N)^2 + (Y_A - Y_N)^2 + (Z_A - Z_N)^2} \\ L_{A1-N} = \sqrt{(X_{A1} - X_N)^2 + (Y_{A1} - Y_N)^2 + (Z_{A1} - Z_N)^2} \\ L_{A2-N} = \sqrt{(X_{A2} - X_N)^2 + (Y_{A2} - Y_N)^2 + (Z_{A2} - Z_N)^2} \\ L_{A3-N} = \sqrt{(X_{A3} - X_N)^2 + (Y_{A3} - Y_N)^2 + (Z_{A3} - Z_N)^2} \\ L_{A4-N} = \sqrt{(X_{A4} - X_N)^2 + (Y_{A4} - Y_N)^2 + (Z_{A4} - Z_N)^2} \end{cases} \quad (19)$$

点 A1 和点 A2 的连线长度为 L_{A1-A2} ，点 A1 和点 A3 的连线长度为 L_{A1-A3} ，点 A2 和点 A4 的连线长度为 L_{A2-A4} ，点 A3 和点 A4 的连线长度为 L_{A3-A4} ，点 A1 和点 A4 的连线长度为 L_{A1-A4} ，可以计算出：

$$\begin{cases} L_{A1-A2} = 2r \sin(d\theta/2) \\ L_{A1-A3} = dl \\ L_{A2-A4} = dl \\ L_{A3-A4} = 2r \sin(d\theta/2) \\ L_{A1-A4} = \sqrt{L_{A1-A2}^2 + L_{A2-A4}^2} \end{cases} \quad (20)$$

铸坯表面每个喷淋网格的面积 GS 的计算公式如下：

$$GS = L_{A1-A2} \cdot L_{A1-A3} \quad (21)$$

线 L_{A1-N} 和 L_{A2-N} ，的夹角为 $\alpha_{(A1-N),(A2-N)}$ ，线 L_{A1-N} 和 L_{A3-N} ，的夹角为 $\alpha_{(A1-N),(A3-N)}$ ，线 L_{A2-N} 和 L_{A4-N} ，的夹角为 $\alpha_{(A2-N),(A4-N)}$ ，线 L_{A3-N} 和 L_{A4-N} ，的夹角为 $\alpha_{(A3-N),(A4-N)}$ ，线 L_{A1-N} 和 L_{A4-N} 的夹角为 $\alpha_{(A1-N),(A4-N)}$ ，线 L_{M-N} 和 L_{A-N} 的夹角为 $\alpha_{(M-N),(A-N)}$ ，则：

$$\begin{cases} \alpha_{(A1-N),(A2-N)} = \arccos\left(\frac{L_{A1-N}^2 + L_{A2-N}^2 - L_{A1-A2}^2}{2L_{A1-N}L_{A2-N}}\right) \\ \alpha_{(A1-N),(A3-N)} = \arccos\left(\frac{L_{A1-N}^2 + L_{A3-N}^2 - L_{A1-A3}^2}{2L_{A1-N}L_{A3-N}}\right) \\ \alpha_{(A2-N),(A4-N)} = \arccos\left(\frac{L_{A2-N}^2 + L_{A4-N}^2 - L_{A2-A4}^2}{2L_{A2-N}L_{A4-N}}\right) \\ \alpha_{(A3-N),(A4-N)} = \arccos\left(\frac{L_{A3-N}^2 + L_{A4-N}^2 - L_{A3-A4}^2}{2L_{A3-N}L_{A4-N}}\right) \\ \alpha_{(A1-N),(A4-N)} = \arccos\left(\frac{L_{A1-N}^2 + L_{A4-N}^2 - L_{A1-A4}^2}{2L_{A1-N}L_{A4-N}}\right) \\ \alpha_{(M-N),(A-N)} = \arccos\left(\frac{(R+r)^2 + L_{A-N}^2 - r^2}{2(R+r)L_{A-N}}\right) \end{cases} \quad (22)$$

线 L_{A1-A2} 在等水流密度球面 S_N 的投影为点 B1 和 B2 连接而成的弧线，其长度设为 A_{B1-B2} ，线 L_{A1-A3} 在球面 S_N 的投影为点 B1 和 B3 连接而成的弧线，其长度设为 A_{B1-B3} ，线 L_{A2-A4} 在球面 S_N 的投影为点 B2 和 B4 连接而成的弧线，其长度设为 A_{B2-B4} ，线 L_{A3-A4} 在球面 S_N 的投影为点 B3 和 B4 连接而成的弧线，其长度设为 A_{B3-B4} ，则：

$$\begin{cases} A_{B1-B2} = R \cdot \alpha_{(A1-N),(A2-N)} \\ A_{B1-B3} = R \cdot \alpha_{(A1-N),(A3-N)} \\ A_{B2-B4} = R \cdot \alpha_{(A2-N),(A4-N)} \\ A_{B3-B4} = R \cdot \alpha_{(A3-N),(A4-N)} \\ A_{B1-B4} = R \cdot \alpha_{(A1-N),(A4-N)} \end{cases} \quad (23)$$

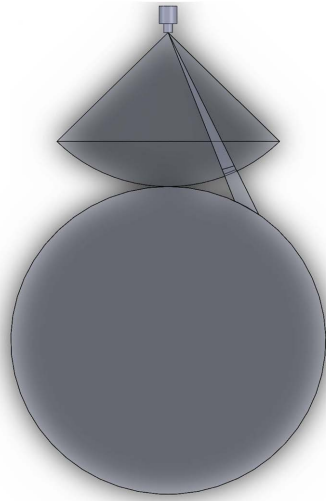


Figure 10. Top view of water flow density calculation
图 10. 水流密度计算俯视图

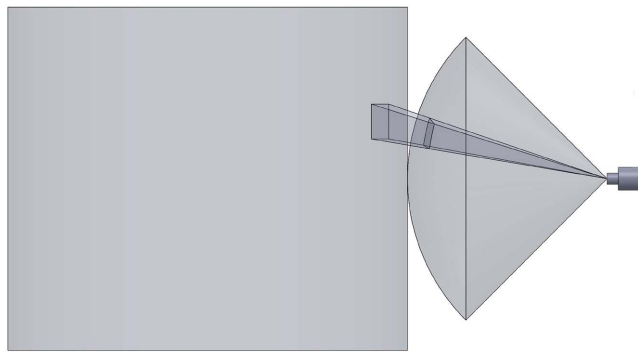


Figure 11. Side view of water flow density calculation
图 11. 水流密度计算侧视图

从图 9、图 10、图 11 可以看出，节点代表面 S_A 在等水流密度球面 S_N 上的投影为以点 B1、B2、B3 和 B4 围成的球面 S_B ，该球面可认为是由弧 B1B2、B1B4、B2B4 组成的三角形 E 和弧 B1B3、B1B4、B3B4 组成的三角形 F 拼接而成，因此三角形 E 的面积、三角形 F 的面积和 S_G 的面积计算公式为：

$$SEa = \frac{A_{B1-B2} + A_{B1-B4} + A_{B2-B4}}{2} \quad (24)$$

$$S_E = \sqrt{SEa \cdot (SEa - A_{B1-B2}) \cdot (SEa - A_{B1-B4}) \cdot (SEa - A_{B2-B4})}$$

$$SFa = \frac{A_{B1-B3} + A_{B1-B4} + A_{B3-B4}}{2} \quad (25)$$

$$S_F = \sqrt{SFa \cdot (SFa - A_{B1-B3}) \cdot (SFa - A_{B1-B4}) \cdot (SFa - A_{B3-B4})}$$

$$S_G = S_E + S_F \quad (26)$$

S_G 在喷嘴标准喷淋球面上的投影面积 S_R 的计算公式为:

$$S_R = S_G \cdot \left(\frac{H}{R}\right)^2 \quad (27)$$

则该节点 A 的单个喷嘴水流密度 $W_s(\beta)$ 为:

$$W_s(\beta) = \frac{SPw(S_G, \beta = \alpha_{(M-N)(A-N)})}{GS} \quad \beta \in [0, \beta_{\max}] \quad (28)$$

因为多个喷嘴在铸坯上的喷水区域有重叠部分, 因此节点 A 的多个喷嘴水流密度 $W_m(\beta)$ 为:

$$W_m(\beta) = \begin{cases} W_s(\beta) & \beta \in [0, 2\beta_{\text{std}} - \beta_{\max}] \\ W_s(\beta) + W_s(2\beta_{\text{std}} - \beta) & \beta \in [2\beta_{\text{std}} - \beta_{\max}, \beta_{\text{std}}] \end{cases} \quad (29)$$

3. 计算结果分析

本次计算案例的几何参数、喷嘴参数和物性参数如表 3 所示。

Table 3. Case parameters
表 3. 案例参数

参数	纯水喷嘴	气水喷嘴
型号	1/4PZ1577QZ5	HPZ1.8-65QZ2
R (mm)	150	150
R (mm)	80	125
单喷嘴排喷嘴数	8	4
铸坯角度步长(°)	1	1
拉坯方向步长(mm)	2	2
铸坯温度(°C)	1000	1000
喷淋水温度(°C)	30	30

经过计算, 得出纯水喷嘴和气水喷嘴的换热系数在铸坯表面的分布如图 12 和图 13 所示。

从图 12、图 13 中可以看出纯水喷嘴换热系数的最大值为 $557.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 气水喷嘴的换热系数的最大值为 $19.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 均出现在喷嘴的正下方处。纯水喷嘴换热系数的最小值为 $24.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 气水喷嘴换热的最小值为 $1.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 均出现在两个喷嘴的对称线远离喷嘴排最远的位置。图中计算结果和数据分布符合预期, 云图显示喷嘴喷淋交叠的部分对换热影响很小, 同时可以看出气水喷嘴对铸坯表面带来的换热系数偏小, 需要对其更换水量更大一些的喷嘴。

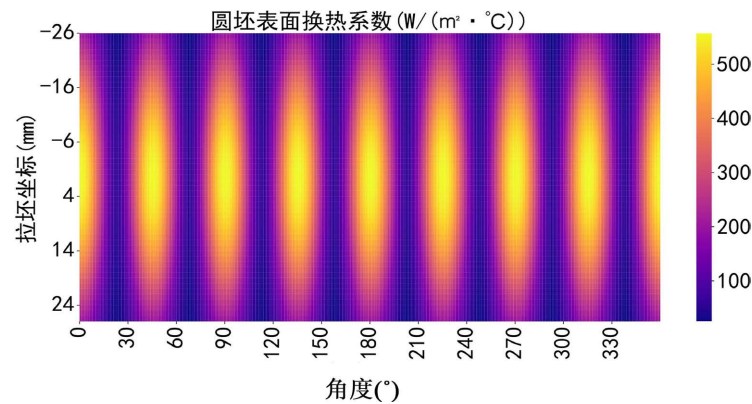


Figure 12. Heat transfer coefficient nephogram of pure water nozzle on the surface of slab

图 12. 纯水喷嘴铸坯表面换热系数云图

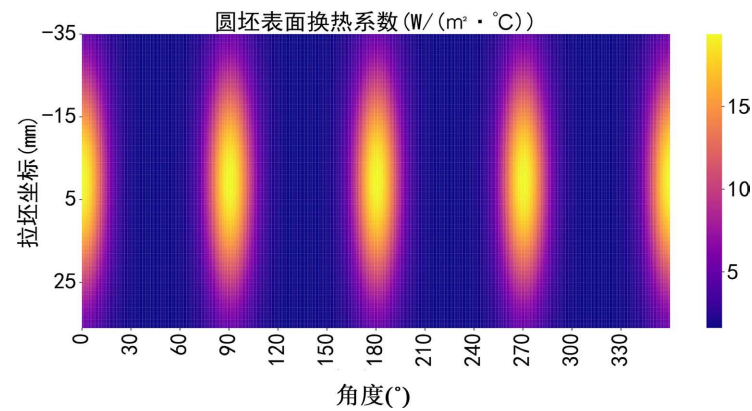


Figure 13. Heat transfer coefficient nephogram of air-water nozzle on the surface of slab

图 13. 气水喷嘴铸坯表面换热系数图

4. 结论

1) 换热系数的变量性：研究表明，铸坯表面的换热系数并不是固定的，而是与喷嘴水流密度、铸坯表面温度等密切相关。在实际生产中，换热系数会因喷嘴布局的不同而有所变化。

2) 喷嘴的布局优化：论文提出通过数学建模分析换热系数在不同位置的分布，能够为喷嘴的优化布局提供指导，进而提升冷却均匀性和铸坯质量。

3) 实验与理论的结合：本文研究结合了实验室模拟与数值计算，这种方法可以更准确地反映冷却过程的实际情况，实现更精确的过程控制与优化。

参考文献

- [1] 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 1-14.
- [2] 黄文, 连天龙, 张兴中, 杨拉道, 高琦. 异形坯连铸离线动态二冷控制模型的研究与开发[J]. 中国机械工程, 2016, 27(12): 1643-1647.
- [3] 王水根, 冯科, 韩志伟. 考虑圆坯周向冷却均匀性的传热模型研究及应用[J]. 工业加热, 2020, 49(11): 36-39.
- [4] Wendelstorf, J., Spitzer, K.-H. and Wendelstorf, R. (2008) Spray Water Cooling Heat Transfer at High Temperatures and Liquid Mass Fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **51**, 4902-4910. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.01.032>