● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4227

铅薄板单辊连铸机水冷辊的数值模拟与设计研究

郭伊利,周 雄,徐家乐,张庆硕,刘卓灵
(重庆科技大学 冶金与动力工程学院,重庆 401331)

摘 要:水冷辊是铅薄板单辊连铸技术中的核心部件,其冷却效果直接影响铅薄板的厚度控制和质量均匀性。基于单辊连铸工艺,采用 ANSYS Fluent 软件对水冷辊进行三维数值模拟,分析了不同出水孔数量对水冷辊温度场和流场的影响。结果表明,水冷辊内部流场的分布与出水孔数量密切相关,24 孔设计在冷却效果和温度均匀性方面表现最佳,能够将铅薄板的厚度控制在 1 mm 左右,减少温度波动。实验验证了模拟结果,设计的水冷辊样机生产的铅薄板厚度均匀、表面光滑,满足生产要求。

关键词:单辊薄板连铸机;水冷辊;铅薄板;ANSYS Fluent;数值模拟;冷却性能

中图分类号:TG233 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2025)07-0716-09

Numerical Simulation and Design of Water-cooled Roll Temperature Field in Lead Thin Plate Continuous Casting Machine

GUO Yili, ZHOU Xiong, XU Jiale, ZHANG Qingshuo, LIU Zhuoling
(School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: A water-cooled roll is the core component of single-roll continuous casting technology for lead sheets, and its cooling effect directly affects the thickness control and quality uniformity of lead sheets. On the basis of the single roll continuous casting process, a three-dimensional numerical simulation of a water-cooled roll was carried out via ANSYS Fluent software, and the influences of different numbers of water outlet holes on the temperature field and flow field of the water-cooled roll were analysed. The results show that the distribution of the flow field inside the water-cooled roll is closely related to the number of water outlet holes, and the 24-hole design has the best performance in terms of the cooling effect and temperature uniformity, which can effectively control the thickness of the lead sheet and reduce the temperature fluctuation. The simulation results are verified by experiments. The lead sheet produced by the designed water-cooled roll prototype has a uniform thickness and smooth surface, which can meet the production requirements.

Key words: single-roll thin slab continuous casting machine; water-cooled roll; lead thin slab; ANSYS Fluent; numerical simulation; cooling performance

近年来,我国引进并广泛应用了大极板电解铅这一先进工艺技术,以提升铅电解过程的效率和产品质量[1]。在电解过程中,阴极片的厚度对电解效率和生产成本有重要影响,过厚的阴极片不仅增加成本,还会影响电解液流动及沉积过程的稳定性[2]。因此,铅电解工艺要求对阴极片厚度进行精确控制,通常将其保持在 0.8~1.4 mm 之间[3]。然而,传统的铅板生产工艺,如重力铸造和压力铸造,在厚度控制方面难以满足这一精度要求,并且存在较高的能耗和生产成本。相比之下,连续铸造工艺不仅能有效控制铅板的厚度,还极大提高了生产效率和产品质量[4]。

目前,国内外在铅薄板生产领域的研究相对较少,大部分集中于双辊连铸技术。例如,张家富[5]通过双辊连铸机生产出厚度为 3~6 mm、宽度为 200 mm 的铅合金,并测试其抗腐蚀性和力学性能,发现这种技

收稿日期:2024-11-09
基金项目:重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2022NSCQ-LZX0071)
作者简介:郭伊利,1997 年生,硕士生.研究方向为铅薄板单辊薄板连铸技术.Email: 1198573190@qq.com
通信作者:周 雄,1970 年生,博士,教授.研究方向为流体动力.Email: 1998031@cqust.edu.cn
引用格式:郭伊利,周雄,徐家乐,张庆硕,刘卓灵.铅薄板单辊连铸机水冷辊的数值模拟与设计研究[J].铸造技术,2025,46(7):716-724.
GUO Y L, ZHOU X, XU J L, ZHANG Q S, LIU Z L. Numerical simulation and design of water-cooled roll temperature field in lead thin plate continuous casting machine[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 716-724.

中国知网 https://www.cnki.net

术生产的铅板晶粒更加均匀，综合性能优于传统工艺。陈慕禾[6]利用双辊连铸机制备出厚度为 10 mm、宽度为 320 mm 的铅带，而荀贺贺[7]则采用该技术生产出厚度为 12 mm、宽度为 360 mm 的铅带。蒋澄灿[8]基于双辊连铸技术，使用铅带连轧机将 10 mm 厚的铅带进一步轧制成 0.6~1.2 mm，实现了高精度薄板生产。杨萍[9]利用轮带式连铸机铸造出厚度为 12 mm、宽度为 90 mm 的铅带。此外，Jiang 等[10]通过 Fluent 软件对双辊连铸过程进行了模拟，并将铅带厚度优化到 8.5~9.0 mm。

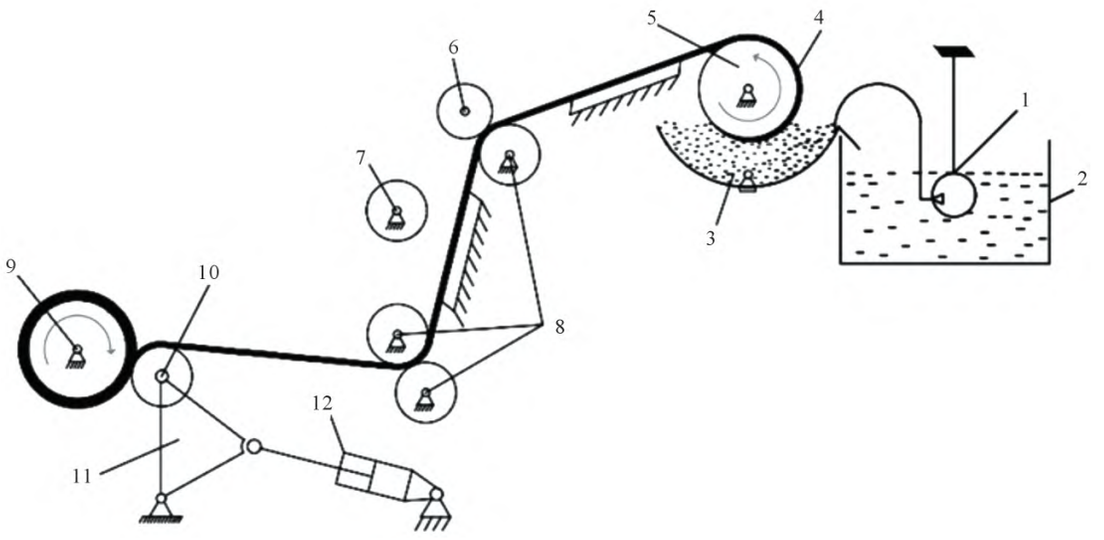
尽管双辊连铸技术在铅薄板生产中取得了一定的进展，但仍存在一些局限。其直接铸造出的铅薄板厚度通常在 3~12 mm 之间，难以满足更薄板材的生产需求。且由于冷却速度较快，铅板内部易出现微观组织不均匀和中心偏析问题，影响了板材的综合性能和质量均匀性。相比之下，单辊连铸技术在铅薄板生产中展现出独特优势[11-12]。Haga[13]通过对比单辊和双辊连铸机，发现单辊连铸机能有效避免中心偏析问题，铸造出的铅薄板微观组织更加均匀，且冷却速度明显高于双辊连铸机。此外，单辊连铸机具有结构简单、成本较低、占地空间小及生产过程节能等优点，逐渐成为铅薄板生产的优选设备。

在现有的单辊连铸技术研究中，Guo 等[14]建立了单辊薄带连铸过程的瞬态传热模型。李荣[15]侧重于研究水冷辊与收卷辊在生产过程中的张力控制，并设计了基于恒线速度和恒张力的电液伺服张力控制系统。于百业等[16]设计了一种铅酸蓄电池负极板连铸设备，并对冷却水量、动模长度与直径及壁厚等参数进行了计算。张鹏等[17]则利用 Fluent 软件对不同出水孔孔径下的水冷辊内部流场进行对比分析，得出了最优孔径。

综上所述，目前针对铅薄板单辊连铸技术的研究较为有限，特别是关于水冷辊结构参数设计的研究更为不足。水冷辊作为单辊连铸机的核心部件，其表面温度均匀性直接影响铅薄板的厚度控制和质量均匀性。合理的水冷辊设计不仅能够提升冷却效率，还能确保温度分布均匀，避免局部过热或冷却不足等问题。因此，本文基于单辊薄带连铸技术，采用 ANSYS Fluent 软件对水冷辊进行三维数值模拟，系统分析不同出水孔数量对水冷辊温度场和流场的影响[18-20]，为铅薄板生产中的冷却均匀性和厚度控制提供理论支持和设计依据。

1　铅薄板单辊连铸机工作原理

单辊薄板连铸机主要是由熔铅槽、铅泵、倾转槽、水冷辊、压边辊、风冷辊、引导辊、接触压辊、收卷辊组成，其工作原理如图 1 所示。铅薄板单辊连铸机是将纯度为 99.9%的精铅放入熔铅槽中熔融成铅液，铅泵将熔化的铅液(约 623.15 K)连续泵入倾转槽中并保持时刻充满，以保证铸造出的铅薄板厚度一定，倾转槽与熔铅槽之间有一定的倾转角度，溢出的铅液重新流回熔铅槽，将表面经粗糙化处理的水冷辊浸入装满熔融铅液的倾转槽中，水冷辊内部通入一定流量的冷却水对铅液进行冷却凝固，凝固后的铅薄板均匀地粘附在水冷辊表面，若通入的冷却水流量不变且水冷辊以一定线速度旋转，就能连续制造出具有一定厚度的薄铅板。随后，通过水冷辊上方的刮刀将其刮下，经压边辊进行整形，由收卷辊将



1-lead pump; 2-molten lead tank; 3-tilting tank; 4-lead sheet; 5-water-cooled rollers; 6-crimping rollers; 7-air-cooled rollers; 8-guide rollers
9-rewinding roller; 10-contact pressure roller; 11-contact pressure roller mechanism; 12-pneumatic cylinder

图 1 铅薄板单辊连铸机工作原理

Fig.1 Schematic diagram of the single-roll continuous casting machine for lead thin plates

中国知网 https://www.cnki.net

铅薄板卷绕成铅卷[15,21-22]。

2 水冷辊水路结构设计

在铅薄板连铸过程中，水冷辊作为单辊连铸机的核心部件之一，其辊面温度的高低及均匀性直接影响铸造铅薄板的厚度和均匀度。而水冷辊的辊面温度与其内部冷却水路设计密切相关。合理的水路设计能够提高冷却效率，均匀的水路布局确保水冷辊表面温度均匀分布，避免局部过热或冷却不足，从而有效控制铅薄板的厚度和均匀性。

水冷辊的水路结构设计如图 2 所示，采用双向水流结构。冷却水从两端的入口进入，沿水冷辊中心管道流动，通过出水孔流入水冷辊内部，与水冷辊内表面交换热量后，再通过两端的回流孔最终排至出口。在固定冷却水流量的条件下，出水孔的数量对水冷辊的冷却效率及温度分布均匀性有着重要影响[17]。

出水孔数量会直接影响冷却水的流场和热交换效率。随着出水孔数量的增加，冷却水的流动路径被分散，流速趋于均匀，这不仅能提升冷却水与水冷辊表面的热交换能力，还能缓解因局部流速过快导致的不均匀冷却，避免出现过冷或过热现象。同时，更多的出水孔有助于降低水流速度和压力波动，使冷却过程更加稳定。然而，过多的出水孔可能导致每个孔中的水流速度减缓，进而影响冷却效率。因此，设计时需在增加出水孔数量和保证水流畅通之间找到平衡，确保水流分布均匀，避免冷却不足或过度冷却。出水孔数量的合理设计是提高水冷辊冷却性能的关键。

3 连铸区有限元模型建立及边界条件确定

3.1 初始条件

铅的熔点为 600.65 K，浇注温度为 623.15 K，环境温度为 303.15 K，水冷辊浸入铅液深度为 25 mm。水冷辊结构参数见表 1[17,21]。

表1 水冷辊结构参数[17,21]

Tab.1 Structural parameters for the water-cooled roll[17,21]

Structural parameter	Numerical value
Roll diameter/mm	350
Roll length/mm	890
Casting roll wall thickness/mm	12
Water hole diameter/mm	13
Cooling water velocity/(m·s^{-1})	2
Roll speed/(rad·s^{-1})	2
Cooling water temperature/℃	30

3.2 连铸区有限元模型建立

在铅薄板单辊连铸过程中，实际工作环境非常复杂。为了方便数据分析并提高仿真运算效率，对过程进行了简化和基本假设[20,23]。

(1)忽略热辐射损失，假设铅液的热量全部由水冷辊带走。

(2)只考虑水冷辊在铅液中的凝固过程，不涉及铅液被带出的过程。

(3)假设铸造区内铅液处于统一状态(液态、半固态或固态)，视为同一连续介质，密度与比热不随温度变化。

(4)假设铸造区内铅液成分均匀且各向同性。

(5)忽略由摩擦与塑性变形产生的热量，因为其远小于铅液被带走的热量。

简化后的连铸区几何模型如图 3 所示。

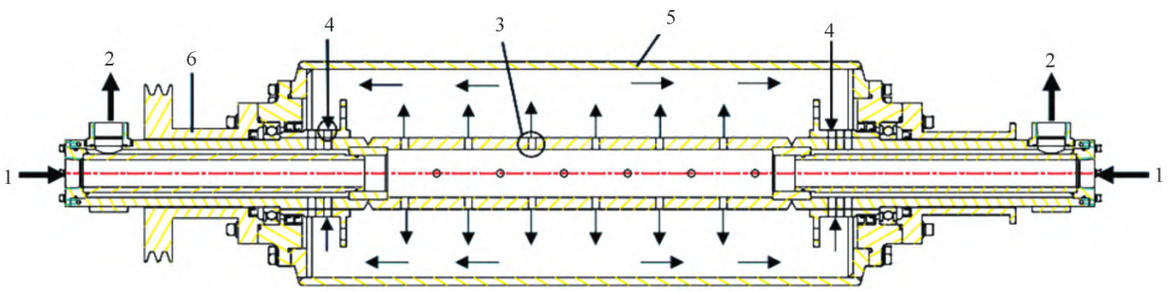
3.3 网格划分

将几何模型另存为 STEP 格式，导入 Geometry 模块以提取流体域，随后导入 Mesh 模块进行网格命名和区域网格划分。模型网格采用四面体单元划分，单元尺寸设为 20 mm，网格节点数为 330 482，单元数为 1 668 895，网格划分结果如图 4 所示。水冷辊及铅液的材料和物性参数见表 2[22-23]。

3.4 边界条件确定

(1)在铅液与水冷辊外表面之间的热传导过程中，热量按照傅立叶定律传递[23-24]：

$$q=-k\frac{\partial T}{\partial r}=h_1(t_q-t_r) \tag{1}$$



1-cooling water inlet; 2-cooling water outlet; 3-water outlet hole; 4-reflow hole; 5-water-cooled roller; 6-pulley

图 2 水冷辊冷却水路结构

Fig.2 Schematic diagram of the cooling water circuit for the water-cooling roll

中国知网 https://www.cnki.net

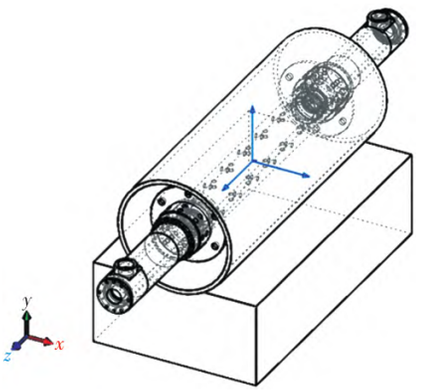


图 3 连铸区几何模型

Fig.3 Geometric model diagram of the continuous casting area



图 4 连铸区有限元网格划分结果

Fig.4 Result of finite element mesh division in the continuous casting area

表 2 水冷辊及铅液材料及物性参数[22-23]

Tab.2 Material and physical property parameters of the water-cooled roll and lead liquid[22-23]

	Water-cooled roll	Liquid lead
Materials	Q235	Pb
Density/(kg·m^{-3})	7 850	10 600
Specific Heat Capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	480	140
Thermal conductivity/(W·m^{-1}·K^{-1})	48	33

式中，q 为热流密度，W/m^2；k 为结晶轮外圈导热系数，W/(m·K)；t_q 和 t_r 分别为铅液温度和水冷辊外表面温度，K；h_1 为水冷辊外表面与铅坯的接触导热系数，经过计算得到 h_1 的值为 2 762 W/(m^2·K)。

(2)水冷辊外表面与环境空气之间的对流换热遵循牛顿冷却公式[23-24]：

$$h_2(t_{air}-t_r)=-k\frac{\partial T}{\partial r} \tag{2}$$

式中，t_{air} 为环境温度，K；h_2 为空气与水冷辊外表面间的换热系数，其值为 10 W/(m^2·K)。

(3)水冷辊内表面与冷却水之间的强制对流换热，可用下式来描述[23-24]：

$$h_3(t_w-t_r)=-k\frac{\partial T}{\partial r} \tag{3}$$

式中，t_w 和 t_r 分别为水的温度和水冷辊外表面温度，K；h_3 为冷却水与水冷辊内表面的对流换热系数，W/(m^2·K)，可通过下式计算获得[24]：

$$h_3=0.023\left(\frac{\nu_w\cdot D}{\mu}\right)^{0.8}\left(\frac{C_w\cdot\mu}{K_w}\right)^{0.4}\frac{K_w}{D} \tag{4}$$

式中，D 为冷却水槽的当量直径，m；K_w 为冷却水的导热系数，W/(m·K)；μ 为冷却水黏度，kg/(m·s)；C_w 为冷却水的比热，kJ/(kg·K^{-1})；ν_w 为冷却水流量，kg/(m^2·s)，计算得到 h_3 的值为 4 569 W/(m^2·K)。

4 仿真结果与分析

改变流道轴上的出水孔间距，取不同的出水孔数量(24、28、32 个)作为变量，以分析水冷辊表面温度和冷却均匀性随出水孔数量变化的情况。

4.1 水冷辊温度场分析

根据上述边界条件输入参数进行模拟，得到不同出水孔数量下水冷辊的温度场分布，如图 5 所示。在冷却水进口温度为 303.15 K，水冷辊浸入温度为 623.15 K 的高温铅液中，铅液在水冷辊表面凝固成形时释放大量的热，而水冷辊内部的循环冷却水通过热交换的形式将热量带走。从温度场分布云图可以看出，当出水孔数目为 24 个时，铅辊接触壁面温度最低，为 596.73 K；随着出水孔数目的增加，接触壁面温度逐渐升高，温度分布的不均匀性也随之加剧。当出水孔数目为 32 个时，接触壁面温度达到最高值 600.64 K。这一现象的主要原因在于，当冷却水流量保持不变时，过多的出水孔数量会导致水流在水冷辊内部的分布更加分散，使单个出水孔流速降低。同时，流速分布不均和流体阻力增大进一步削弱了对流换热效率，从而导致温度分布不均匀性增加和冷却效果下降。

4.2 辊面温度随时间变化规律

图 6 显示了水冷辊面同一水平线上的平均温度随流动时间的变化曲线。从曲线可以看出，在冷却初始阶段，由于水冷辊表面温度(623.15 K)与冷却水温度(303.15 K)之间存在较大温差，换热效率显著提高，导致冷却效果最为强烈，辊面平均温度下降速度最快。随着冷却过程的进行，辊面温度逐渐降低，与冷却水温度之间的温差逐渐减小，单位时间内的热交换量随之减少，冷却效果逐渐减弱。同时，随着热传导和对流换热逐渐达到稳定，辊面温度的下降速率变缓，直至凝固的铅薄板被辊筒转动带出，冷却过程结束。在不同出水孔设计中，24 个出水孔的冷却效果最优，温度下降更显著，辊面平均温度最低，展现出最佳的热交换性能。

4.3 水冷辊流场分析

图 7 展示了不同出水孔数量下冷却水在水冷辊内部的流动特性。冷却强度与冷却水流速成正比，较高的水流速度能有效地带走热量，从而提供更强的冷却效果。从速度矢量分布图中可以看出，在24 孔设计下，冷却水分布均匀且最大流速达 3.52 m/s，因此

中国知网 https://www.cnki.net

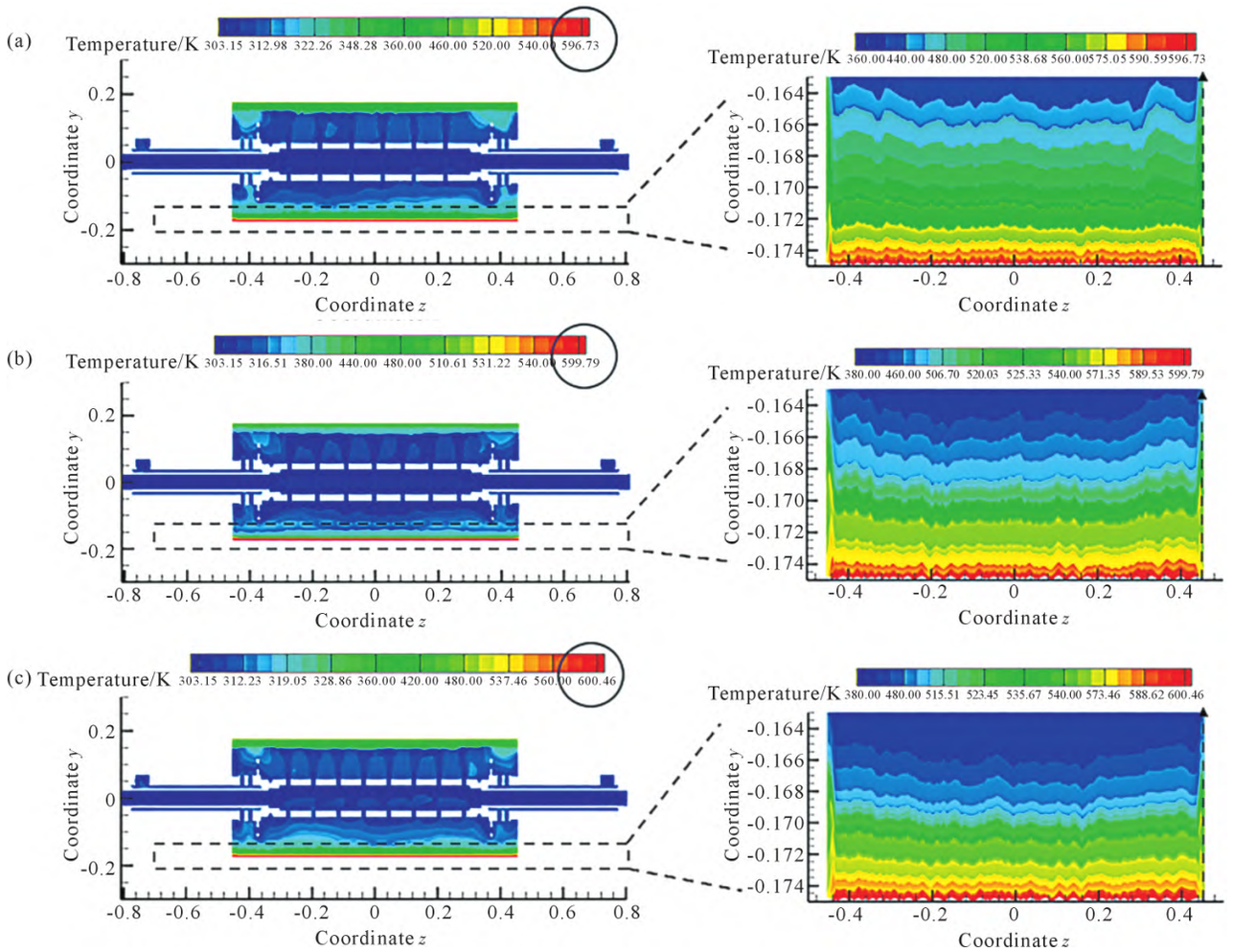


图 5 x=0 处截面水冷辊温度分布云图:(a) 24 个;(b) 28 个;(c) 32 个

Fig.5 Cloud maps of the temperature distribution of the water-cooled roll at the cross-section x=0: (a) 24; (b) 28; (c) 32

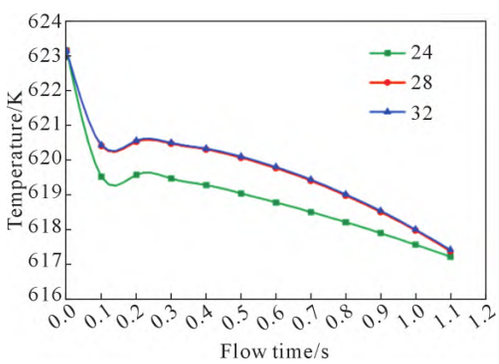


图 6 辊面平均温度随时间变化曲线

Fig.6 The average temperature of the roll surface changed with time

冷却强度最大。随着出水孔数量的增加,冷却水分布逐渐分散,且流速逐渐降低。28 孔设计时,冷却水分布出现分散现象,部分区域流速较低,最大流速降至 2.72 m/s,冷却强度有所减弱。32 孔设计时,虽然冷却水分布范围更广,但最大流速进一步降低至 2.55 m/s,导致冷却强度最弱。通过对比分析发现,出水孔数量并非越多越好,24 孔设计在维持较高流速和保证热交换效率方面具有显著优势,是优化冷却效果的最佳选择。

4.4 辊面温度分布均匀性对比

图 8a 展示了不同横坐标出水孔数量对水冷辊表面温度分布的影响。可以看出,辊面温度分布普遍呈现波动起伏的趋势。这种现象主要归因于冷却水流道上出水孔的分布,导致局部区域热量积聚,使接触壁面温度呈高低交替的波动。在水冷辊中心位置(x=0),辊面温度波动幅度最为显著。这是因为当辊面从左侧开始接触铅液后,逐渐吸收热量,到达中心位置时已累积大量热量,换热效果减弱,温度波动加剧。此外,中心位置(x=0)是换热的关键过渡区域,其温度既受铅液热量传递的影响,又开始显现冷却反馈的作用。由于热量积累和冷却动态过渡的共同作用,导致中心位置温度波动尤为突出。图 8b 为不同纵坐标出水孔数量对水冷辊表面温度分布的影响。水冷辊从左侧接触铅液开始,到右侧离开铅液的弧长距离内需将铅液凝固成铅薄板,并使其附着在水冷辊表面,随着水冷辊转动,铅薄板被带出。通过图

中国知网 https://www.cnki.net

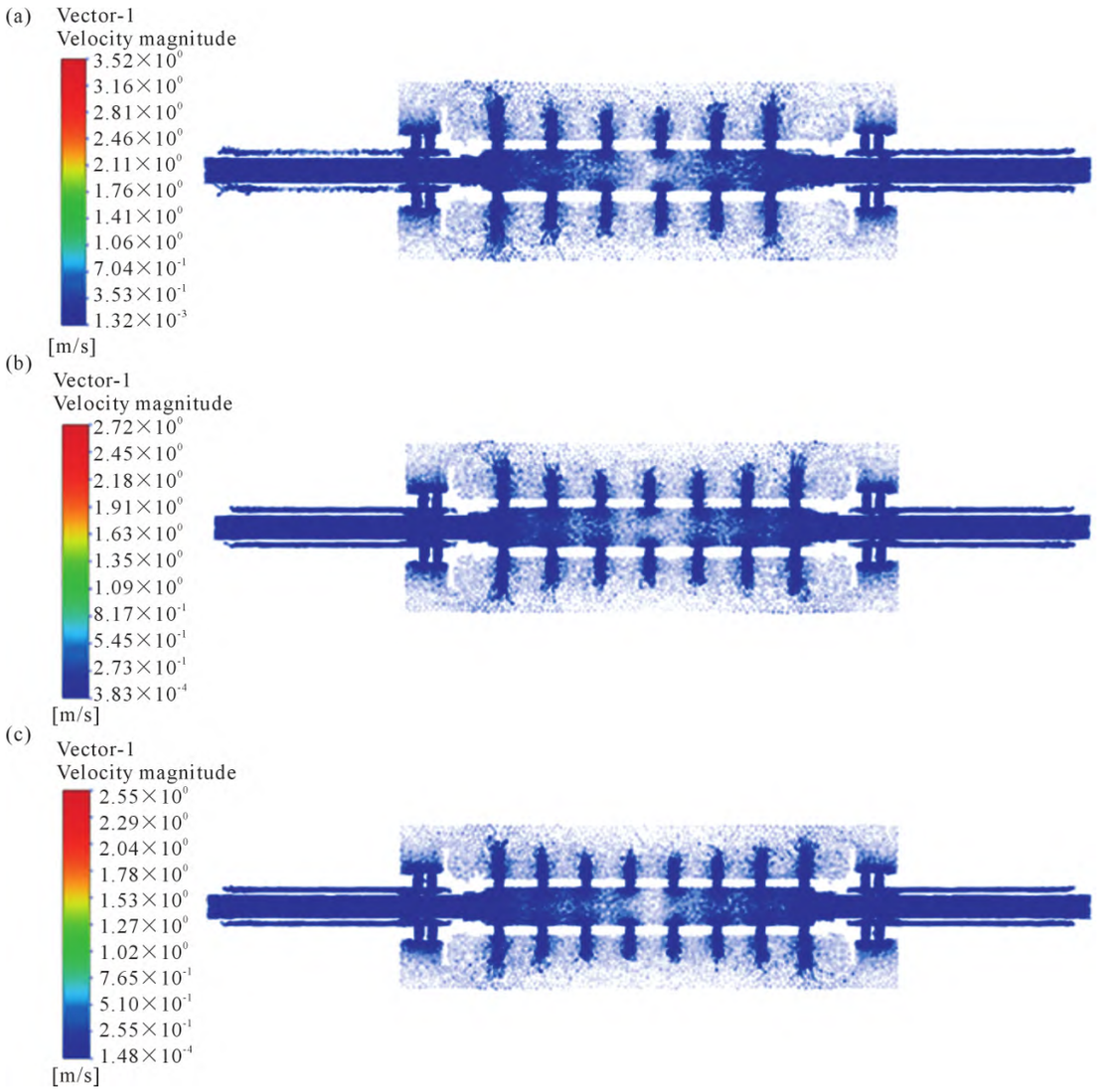


图 7　y=0 处截面不同水孔数目对应速度矢量分布：(a) 24 个；(b) 28 个；(c) 32 个

Fig.7　Velocity vector distributions corresponding to different numbers of water holes at cross-section y=0: (a) 24; (b) 28; (c) 32

示可以看出，在左侧 y=−167.705 mm 位置，温度波动较大，冷却效果较差；随着水冷辊转动并冷却时间的延长，冷却效果逐渐改善，水冷辊表面温度逐步降低，且温度波动减小。在 y=175 mm 位置，温度变化最小，冷却效果最优。

对比不同出水孔数量的设计，从不同横坐标和不同纵坐标同一水平线的温度分布变化来看，24 孔水冷辊在辊面 z 轴方向上的温度最低且更均匀，波动幅度最小，整体温度分布更加平滑。而 28 孔和 32 孔设计则在相同位置出现了明显的温度波峰和波谷，均匀性显著降低。冷却水流道的设计受到出水孔数量的影响，虽然冷却水总流量恒定，但出水孔数量增加会导致水流分散，流速降低，从而降低换热效率。热量无法及时被带走，局部区域温度升高，形成更明显的波动。

综上，24 孔设计的水冷辊在冷却效率、温度控制稳定性和温度分布均匀性方面表现最优。这是由于适度的出水孔数量确保了冷却水的流速和热交换效率，使水冷辊表面温度更为均匀，避免了过冷或过热的局部现象。因此，选择合适的出水孔数量至关重要，过多的出水孔可能不会带来更好的冷却效果，反而会使温度分布不均匀。

5　样机测试结果

根据以上仿真结果，将设计和制造出的水冷辊用于实际铸造铅薄板，图 9a 为水冷辊铸造过程实物，取铅薄板同一水平线上不同位置测量其厚度，数据见表 3。可以看出，铅薄板厚度均匀，为 1 mm 左右，宽度为 890 mm 左右。图 9b 为铸造铅薄板的表面宏观形貌，可以看出表面光洁、平滑，边部整齐，且铸造过程没有出现连铸区铅液泄漏与堵塞的情况，满足大极板铅电解阴极片的需求。验证了理论分析的可靠性，该方法适用于不同铸造坯宽度的水冷辊设计[17]。

中国知网　https://www.cnki.net

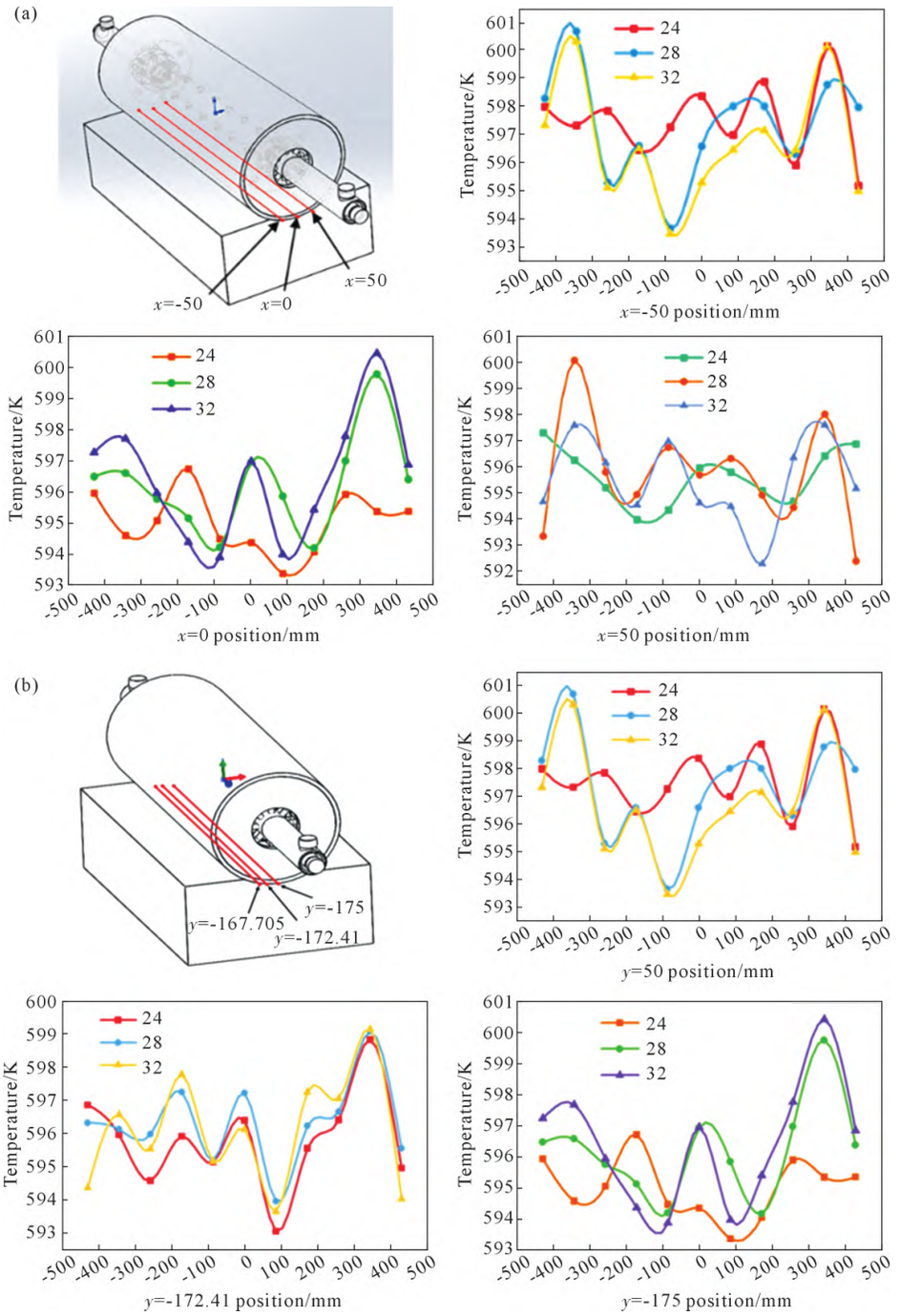
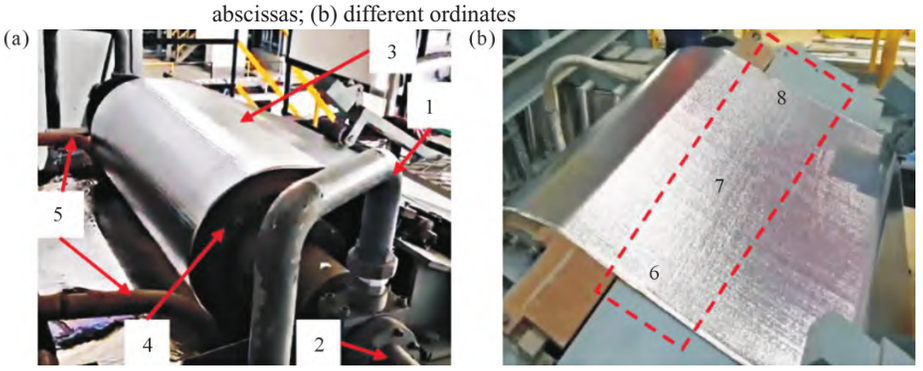


图 8 不同位置铅辊接触壁面同一水平线温度分布:(a) 不同横坐标;(b) 不同纵坐标

Fig.8 Temperature distribution diagram of the same horizontal line of the lead roller contact wall at different positions: (a) different abscissas; (b) different ordinates



1-water inlet pipe; 2-outlet pipe; 3-lead sheet; 4-water-cooled rollers; 5-lead pump

图 9 铅薄板实物图:(a) 水冷辊铸造过程;(b) 表面宏观形貌

Fig.9 Physical diagram of the lead sheet: (a) casting process of the water-cooled roll; (b) macroscopic morphology of the surface

中国知网 https://www.cnki.net

表3 铅薄板厚度
Tab.3 Thickness of the lead sheet

No.6 thick /mm	No.7 thick /mm	No.8 thick /mm	Length /m	Weight /kg	Breadth /mm
1.05	1.12	1.01	3	26.69	889
1.10	1.08	0.95	3	25.73	889
0.96	1.17	1.04	3	27.76	889
1.00	1.18	0.98	3	25.95	889
0.96	1.06	1.00	3	26.83	889
1.09	1.21	1.01	3	28.26	889
1.07	1.08	1.06	3	27.30	889
1.03	1.06	1.01	3	25.94	889
1.16	1.18	1.15	3	28.12	889
1.07	1.19	1.00	3	27.75	889
1.08	1.24	1.13	3	28.35	889
1.16	1.21	1.14	3	28.58	889
0.95	1.18	0.88	4	35.98	889
0.98	1.04	0.92	4	36.17	889
0.90	1.13	0.95	4	36.50	889
1.09	1.16	0.93	4	34.95	889
0.93	1.14	1.02	4	37.35	889
1.10	1.15	1.08	4	38.12	889

6　结论

(1)在冷却水流速为 2 m/s、水冷辊转速为 2 rad/s、出水孔直径为 13 mm 的条件下，24 孔设计在冷却效果和温度均匀性方面表现最佳。该设计不仅使水冷辊表面整体温度较低，且温度波动幅度最小。

(2)实验结果表明，24 孔设计的水冷辊能够有效生产出厚度均匀、表面光洁的铅薄板，符合大极板铅电解阴极片的技术要求，验证了仿真分析的可靠性。

(3)验证了适度的出水孔数量对冷却性能的关键影响，孔数过多并未进一步提升冷却效果，反而导致温度分布不均匀。24 孔设计有效平衡了冷却效率和温度稳定性。

参考文献：

[1] 刘吉良. 大极板铅电解工艺技术分析[J]. 世界有色金属，2017(7): 186-187.
LIU J L. Technical analysis of lead electrolysis with large plate[J]. World Nonferrous Metals, 2017(7): 186-187.

[2] 闫琼琼，闫相林. 大极板铅电解过程的工艺控制[J]. 有色冶金节能，2022, 38(2): 58-60.
YAN Q Q, YAN X L. Process control of large plate lead electrolysis[J]. Energy Saving in Nonferrous Metallurgy, 2022, 38(2): 58-60.

[3] 周雄. 大极板铅电解自动化生产成套装备研发及产业化[M]. 重庆：重庆科技学院，2019.
ZHOU X. Research and development and industrialization of complete equipment for automatic production of large plate lead electrolysis[M]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2019.

[4] 胥孝龙，李玉娇. 基于专利分析的电池用金属极板铸造方法发展趋势[J]. 中国科技信息，2021(19): 15-17, 12.
XU X L, LI Y J. Development trend of battery metal plate casting method based on patent analysis[J]. China Science and Technology Information, 2021(19): 15-17, 12.

[5] 张家富. 铝合金板带双辊连续铸轧温度场模拟及其实验研究[D]. 长沙：中南大学，2010.
ZHANG J F. Simulation and experimental study on temperature field of continuous casting and rolling of lead alloy strip with two rollers[D]. Changsha: Central South University, 2010.

[6] 陈慕禾. 宽铅带连铸技术及其实验研究[D]. 苏州：苏州大学，2013.
CHEN M H. Technology and experimental study of wide lead strip continuous casting[D]. Suzhou: Soochow University, 2013.

[7] 荀贺贺. 宽铅带双辊连铸机的研究与改进[D]. 保定：河北农业大学，2017.
XUN H H. Research and improvement on continuous casting machine of wide lead strip and double roll[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2017.

[8] 蒋澄灿. 铅带双辊连铸传热模型与连轧过程负荷分配控制[D]. 苏州：苏州大学，2017.
JIANG C C. Heat transfer model for twin-roll continuous casting of lead strip and load distribution control in continuous rolling process[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.

[9] 杨萍. 90 mm×12 mm 铅带连铸设备及其工艺参数的研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2015.
YANG P. Research on 90 mm×12 mm lead strip continuous casting equipment and its process parameters[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.

[10] JIANG C, RUI Y. Thermodynamic behavior research analysis of twin-roll casting lead alloy strip process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 352-362.

[11] HAGA T, OIDA K, YAMAZAKI K, WATARI H, NISHIDA S. Strip casting of Al-4.7%Mg with impurity Fe using a single roll caster with a scraper[J]. Materials Science Forum, 2022, 1073: 115-122.

[12] HAGA T, TSUKUDA K, OIDA K, WATARI H, NISHIDA S. Casting of Al-Mg strip using single roll caster equipped with a scraper[J]. Key Engineering Materials, 2021, 880: 49-56.

[13] HAGA T. High speed roll caster for aluminum alloy[J]. Metals, 2021, 11(3): 520.

[14] GUO W L, BRIAN G. THOMAS. Transient thermal model of the continuous single-wheel thin-strip casting process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27(3): 509-525.

[15] 李荣. 电液伺服张力控制在铅片卷取机中的应用研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2014.
LI R. Research on the application of electro-hydraulic servo tension control in lead sheet coiler[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.

[16] 于百业，王志亮，冯勇. 柯广云，杨小兰. 一种铅酸蓄电池负极板连铸设备设计[J]. 南京工程学院学报(自然科学版)，2016, 14(2): 12-18.
YU B Y, WANG Z L, FENG Y. KE G Y, YANG X L. Design of

中国知网 https://www.cnki.net

continuous casting equipment for negative plate of lead-acid battery[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2016, 14(2): 12-18.

[17] 张鹏,唐一科,周雄. 基于 Fluent 的水冷滚筒流场数值模拟与设计[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(4): 113-116.
ZHANG P, TANG Y K, ZHOU X. Numerical simulation of flow field and designation of water-cooling roller based on fluent[J]. Journal of Qing University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 14(4): 113-116.

[18] 邢静忠. ANSYS 应用实例与分析[M]. 北京:科学出版社,2006.
XING J Z. ANSYS application case and analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[19] 湛利华,李晓谦,钟掘. 基于 ANSYS 的快速铸轧过程温度场数值模拟[J]. 重型机械,2005(2): 39-44.
ZHAN L H, LI X Q, ZHONG J. Numerical simulation of temperature field in rapid casting and rolling process based on ANSYS[J]. Heavy Machinery, 2005(2): 39-44.

[20] 刘劲松,张良利,王松伟,孔凡亚,刘羽飞,张旺. 基于双温度场耦合的铜板坯水平连铸过程有限元模拟[J]. 铸造技术,2022, 43(7): 511-518.
LIU J S, ZHANG L L, WANG S W, KONG F Y, LIU Y F, ZHANG W. Finite element simulation of copper slab continuous casting process based on dual temperature field coupling[J]. Foundry Technology, 2022, 43(7): 511-518.

[21] 左时伦,周雄. DM 机主要零部件的设计与制造[J]. 机床与液压,2011, 39(22): 33-36.
ZUO S L, ZHOU X. Design and manufacturing of the main components of DM machine[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2011, 39(22): 33-36.

[22] PRABHAKAR A, MIELNICKA J, JOLLY M, SALONITIS K. Improving energy efficiency in direct method for continuous casting of lead sheets [A]. Energy Technology 2018: Carbon Dioxide Management and Other Technologies[C]. Cham: Springer, 2018: 121-132.

[23] 饶刚,杨萍,周家林,冯栋兵,张磊,董逸君. 轮带式连铸机应用于铸铅带的数值模拟[J]. 铸造技术,2015, 36 (6): 1510-1512.
RAO G, YANG P, ZHOU J L, FENG D B, ZHANG L, DONG Y J. Numerical simulation of belting leather type continuous casting machine applied in cast lead[J]. Foundry Technology, 2015, 36(6): 1510-1512.

[24] 陶文栓. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2019.
TAO W S. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.

(责任编辑:李亚敏)

中国知网 https://www.cnki.net