砂芯保温能力对空心冷硬铸铁轧辊灰口层组织和硬度的影响

王　珺，曹千鹤，张　月，杨昊明
（辽宁工业大学材料科学与工程学院，辽宁锦州 121001）

摘要：为优化空心冷硬铸铁轧辊内表面灰口层组织，提高其服役性能，采用等壁厚热模拟试验装置，在不同砂芯厚度（30、50、70 mm）下制备了空心冷硬铸铁件，研究了砂芯保温能力及其对铸件灰口层组织和硬度的影响规律。结果表明，当砂芯厚度由30 mm增加到50 mm时，铁液温度平均降低速率由0.072 ℃/s降至0.063 ℃/s，灰口层中石墨形态变大变粗，渗碳体数量减少，平均布氏硬度大幅降低。当砂芯厚度由50 mm增加到70 mm时，铁液温度平均降低速率略升高至0.066 ℃/s，灰口层组织和硬度变化不明显。砂芯厚度为50 mm时保温效果最好，铸件硬度整体较为稳定。

关键词：冷硬铸铁；空心轧辊；砂芯；灰口组织；保温性能；石墨
中图分类号：TG143；TG162.6　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）09-1022-06
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0129

Effect of Thermal Insulation Performance of Sand Core on Microstructure and Hardness of Grey Zone of Hollow Chilled Cast Iron Roll

WANG Jun, CAO Qian-he, ZHANG Yue, YANG Hao-ming
(School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: In order to optimize the microstructure of the grey zone on the inner surface of hollow chilled cast iron roll and improve its service performance, the cast iron castings were prepared with different sand core thicknesses (30, 50, 70 mm), using an equal-wall-thickness thermal simulation experimental device. The heat preservation ability of sand core and its influence on microstructure and hardness of the casting grey zone were studied. The results show that, when the sand core thickness increases from 30 mm to 50 mm, the average cooling rate of molten iron decreases gradually from 0.072 ℃/s to 0.063 ℃/s, the graphites in grey zone become coarser, and the cementite content and the average Brinell hardness decrease significantly. When the sand core thickness further increases from 50 mm to 70 mm, the average cooling rate of molten iron increases slightly to 0.066 ℃/s, and the microstructure and hardness of the grey zone show no obvious changes. The sand core with a thickness of 50 mm exhibits the optimal thermal insulation effect, and the overall hardness of the casting is relatively stable.

Key words: chilled cast iron; hollow roll; sand core; grey zone microstructure; thermal insulation effect; graphite

空心冷硬铸铁轧辊作为造纸用铸造轧辊，兼具表面高硬度、耐磨以及芯部高韧性的优点，因此使用寿命较长[1-5]。在铸造空心冷硬铸铁轧辊时，砂芯用于形成轧辊内部的空心结构或其他复杂几何形状[6]，不同厚度砂芯的保温性能不同，这会改变轧辊内表面的冷却速率，影响灰口层的组织分布和硬度，从而影响轧辊

基金项目：国家自然科学基金青年基金（52404404）；辽宁省科技厅博士科研启动基金（2025080880-JH3/101）；辽宁省教育厅高等学校基本科研项目（JYTQN2023217）；辽宁工业大学博士科研启动基金项目（XB2023019）；辽宁省科技计划联合计划项目（2024-BSLH-119）；辽宁省引导支持地市科技发展专项计划（2025TSJH-JZ004）。
收稿日期：2026–05–11 收到初稿，2026–06–26 收到修订稿。
作者简介：王珺（1991–），男，讲师，博士，硕士生导师，研究方向为铜铝复合板材箔材的制备，铸铁和钛合金组织与性能的研究。E-mail：cailiaowangjun@sina.com
通信作者：张月（1991–），女，讲师，博士，硕士生导师，研究方向为超级奥氏体不锈钢和铸铁组织与性能研究。E-mail：clxyzy@lnut.edu.cn
引用格式：王珺，曹千鹤，张月，等．砂芯保温能力对空心冷硬铸铁轧辊灰口层组织和硬度的影响 [J]. 铸造，2026，75（9）：1022–1027.
Wang Jun，Cao Qianhe，Zhang Yue，et al. Effect of thermal insulation performance of sand core on microstructure and hardness of grey zone of hollow chilled cast iron roll [J]. Foundry，2026，75（9）：1022–1027.

的整体性能及使用寿命。目前针对冷硬铸铁轧辊的研究多集中于材料配比[7]，如加入稀土材料[8]、锰、硫[9]、铌[10]、钒[11-12]和铬[13-14]来改善轧辊的组织与性能。另外冷硬铸铁具有表面硬度高、耐磨性良好等优点，这无疑增加了切削加工难度，为解决这一问题，目前研究多集中于优化磨削加工工艺[15]和车削加工工艺[16-18]等。

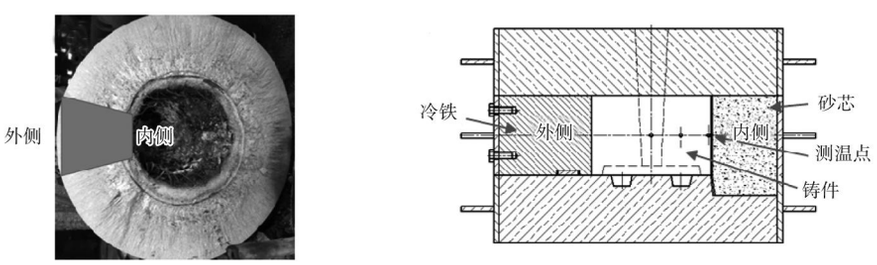
空心冷硬铸铁轧辊壁厚较薄，在保证外表面白口层厚度的前提下，其内表面很容易生成麻口组织，不仅增大切削加工难度，还会造成辊芯韧性不足、服役寿命缩短，该问题核心根源在于凝固过程温度梯度过小[19]。实际生产中多采用金属型配合低温浇注工艺来保障外部白口层厚度[20]，内部则依靠普通砂芯成形。普通砂芯对铁液的激冷作用较弱，却仍会显著降低轧辊内侧铁液的温度梯度，进而促使内表面产生麻口组织。目前，在不削弱空心冷硬铸铁轧辊外表面白口层厚度的基础上，通过使用保温砂芯及改变砂芯厚度来改善内表面凝固速度、灰口层组织和硬度等，尚缺乏系统、深入的研究[21]。

本课题以空心冷硬铸铁轧辊用砂芯为研究对象，采用等壁厚热模拟方法，在普通粘土砂内加入粒度3 mm、体积分数为15%的焦炭粒条件下，研究三种不同厚度砂芯保温性能与轧辊灰口层组织和性能的对应关系，以得出最佳砂芯厚度参数，为获得较厚心部灰口层的空心冷硬铸铁轧辊提供技术支持。

1 试验过程

1.1 等壁厚热模拟试验装置

由于空心冷硬铸铁轧辊尺寸很大，整体浇注试验成本高、周期长，故采用等壁厚热模拟方法开展研究，在实验室条件下还原轧辊凝固传热规律。选取壁厚为180 mm空心冷硬铸铁轧辊的一部分作为研究对象，如图1（a）所示。该类轧辊为细长管状铸件，凝固阶段热量以径向一维传递为主，为了保证试验的可行性，采用与铸造轧辊所用金属型厚度（140 mm）一致的冷铁替代金属型壁，以达到激冷效果。漂珠是优良的保温耐火材料，可以确保铸件温度只朝着冷铁的方向传递，减小试验误差。最终的热模拟试验装置如图1（b）所示。



（a）轧辊　　（b）热模拟试验装置

图1 冷硬铸铁轧辊与热模拟试验装置示意图

Fig. 1 Chilled cast iron roll and schematic diagram of the thermal simulation test apparatus

试验所用试块的规格为180 mm × 100 mm × 120 mm。为了测量浇注时铁液的温度，在靠近砂芯一侧打1个深入型腔内部、直径为1 cm的洞，用于插入热电偶进行测温。冷铁通过铆钉固定在砂箱上。将普通粘土砂（平均砂粒度AFS30-35）与粒度为3 mm、体积分数为15%的焦炭粒按比例混合，再倒入少量水混合均匀后得到砂芯材料。将其少量多次倒入如图2（a）所示的砂芯盒中，一层一层夯实，最后脱模，制备出厚度分别为30、50、70 mm的砂芯（宽120 mm、高150 mm）。对砂芯进行烘干，表面涂刷一层厚度约0.5 mm的水基耐火涂料后，再放入烘箱内烘干，获得最终的砂芯，如图2（b）所示。

1.2 试验材料制备

根据木型体积计算所需生铁、Q235钢和75硅铁的质量。为了防止生铁和Q235钢表面杂质导致结果出现误差，试验前将生铁和Q235钢放入喷丸机进行清理。在浇注前应将砂箱放在熔炼炉炉口，确定浇口杯位置后再开始熔炼。并将准备好的热电偶、无纸记录仪放在指定位置，以确保试验的流畅性。采用25 kg中频感应电炉进行熔炼，铸铁成分如表1所示。将Q235钢和部分生铁放入熔炼炉中，待生铁部分熔化后，沿炉壁缓慢加入剩余生铁。持续增加熔炼炉的功率至原材料充分熔化，此时铁液温度达到1 500 ℃左右，加入75硅铁。关闭熔炼炉，使用热电偶对铁液温度进行测量。在温度降低的过程中，铁液表面会逐步有杂质析出，应及时清理。待温度降至1 220 ℃后开始浇注，浇入预热温度为120 ℃的铸型内，通过无纸记录仪记录温度变化。砂型冷却后，获得铸铁试块，如图3所示，采用角磨机清理掉试块上残留的耐火涂料。



（a）砂芯盒木模　　（b）砂芯

图2　砂芯盒木模与砂芯示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the sand core box wooden pattern and the sand core

表1　铸铁的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of the cast iron　w_B/%

C	Si	Mn	P	S
3.8	0.6	0.5	0.5	0.2

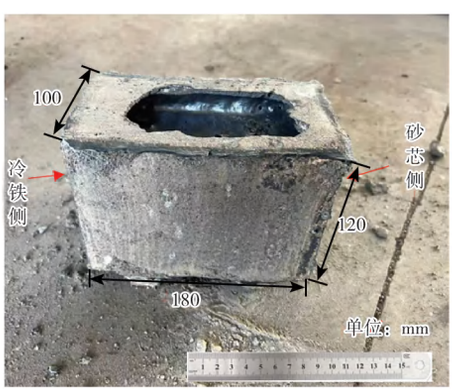


图3　铸铁试块

Fig. 3 Cast iron test block

1.3　表征方法

采用线切割在清理后的试块上切取试样，如图4（a）所示，依次使用120#~800#砂纸对试样进行打磨，并将其表面抛光至无划痕，使用体积分数4%的硝酸酒精溶液腐蚀试样表面，然后用酒精清洗、吹干，得到金相试样。

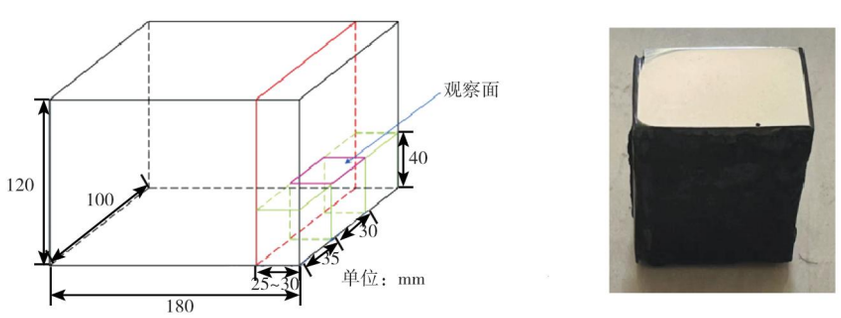
采用Axio Vert.A1型光学显微镜对试样灰口层微观组织进行观察。采用布氏硬度计测定试样硬度，在测试面上均匀打五行三列共15个点，计算得出每个试样的平均硬度，以及每一排的平均硬度。

2　试验结果与分析

2.1　砂芯厚度对温度降低速率的影响

图5为靠近不同厚度砂芯处的铁液温度降低曲线，砂芯初始温度为室温，浇注温度为1 220 ℃。可以看出，30 mm砂芯厚度下铁液浇入后温度降低速率最快。随着时间的延长，一段时间内，不同砂芯厚度的铁液温度降低速率基本一致。计算得出30、50、70 mm砂芯厚度下铁液温度平均降低速率分别为0.072、0.063、0.066 ℃/s。砂芯厚度为70 mm时铁液温度平均降低速率比砂芯厚度为50 mm时稍快。

综上所述，厚度为50 mm的砂芯保温效果最好，但砂芯厚度在50~70 mm之间时，厚度对铁液温度降低速率影响不大。



（a）取样位置　　（b）金相试样

图4　试块取样位置及金相试样示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of sampling locations and metallographic specimen of the test block

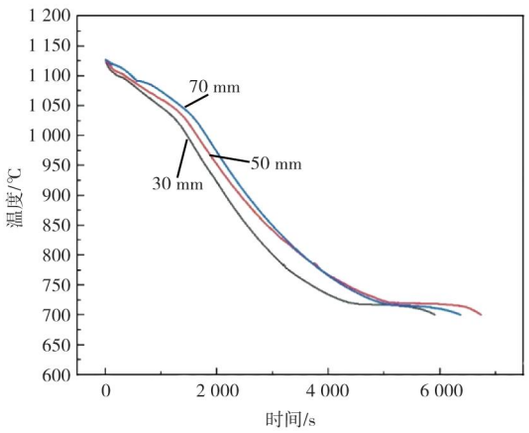


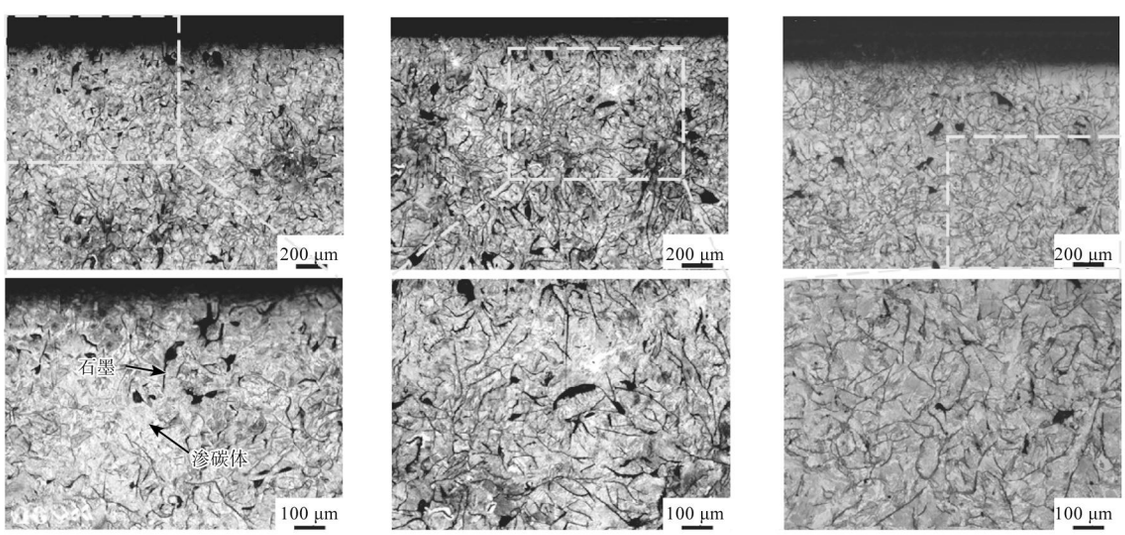
图5 不同砂芯厚度下靠近砂芯处的铁液降温曲线

Fig. 5 Temperature decrease curves of the molten iron near sand cores under different core thicknesses

2.2 砂芯厚度对灰口层组织的影响

图6为不同砂芯厚度下铸铁试样灰口层的显微组织形貌。可以看出，当砂芯厚度为30 mm时，由于铁液温度降低较快，靠近砂芯处的组织中石墨少而细小，分布也不均匀，且出现了少量渗碳体。当砂芯厚度为50 mm时，铁液温度降低速率较小，靠近砂芯处的铸铁组织中石墨较多且更粗大，渗碳体显著减少。当砂芯厚度为70 mm时，组织中石墨较多但形态细长，尺寸介于前两者之间，只出现极少量渗碳体。

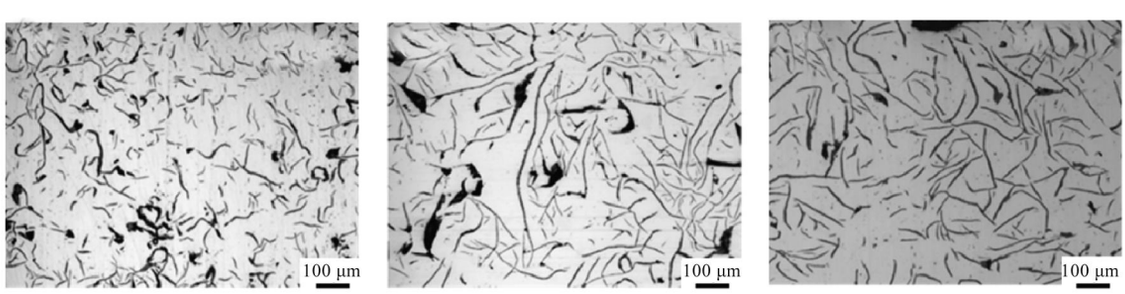
图7为铸铁试样灰口层腐蚀前的显微组织形貌。计算得到30、50、70 mm砂芯厚度下铸件组织中石墨占比分别为7.28%、10.1%、9.63%。综上可知，砂芯厚度为50 mm时，铸铁试样灰口层石墨数量更多、形态更大，更符合组织要求。



（a）30 mm （b）50 mm （c）70 mm

图6 不同砂芯厚度下铸铁试样腐蚀后的显微组织

Fig. 6 Microstructures of the etched cast iron specimens under different sand core thicknesses



（a）30 mm （b）50 mm （c）70 mm

图7 不同砂芯厚度下铸铁试样腐蚀前的显微组织

Fig. 7 Microstructures of the unetched cast iron specimens under different sand core thicknesses

2.3 砂芯厚度对灰口层硬度的影响

图8为不同砂芯厚度下铸铁试样的硬度曲线。可以看出，砂芯厚度为30 mm时，由于砂芯较薄，保温能力较弱，铁液冷却速率快，形成的石墨组织细小，因此硬度高。砂芯厚度为50 和70 mm时，由于冷却速率慢，出现了粗大石墨，故而硬度低，但整体较为稳定。

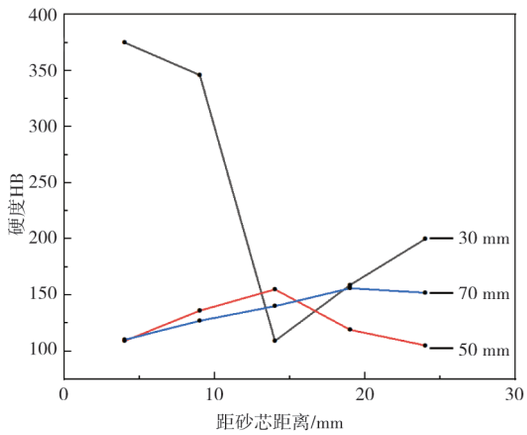


图8　不同砂芯厚度下铸铁试样的硬度曲线

Fig. 8 Hardness curves of the cast iron specimens under different sand core thicknesses

通过试验测量了不同砂芯厚度下铸铁试样的硬度值，如图9所示，30、50、70 mm砂芯厚度下平均硬度分别为HB237、HB124、HB137。

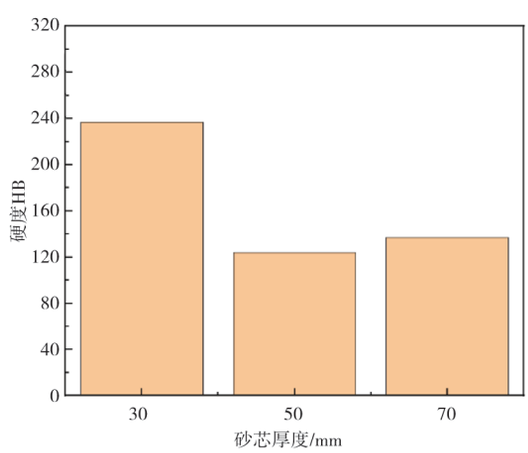


图9　不同砂芯厚度下的铸铁试样硬度

Fig. 9 Hardness values of the cast iron specimens under different sand core thicknesses

2.4　砂芯厚度与保温性能的对应关系

空心冷硬铸铁轧辊外表面应为耐磨白口层，内表面为韧性灰口层，其中灰口层厚度是影响其服役性能的关键，砂芯厚度、金属型厚度、合金成分等多因素协同决定铁液凝固与组织演化。本试验固定金属型厚度（140 mm冷铁等效）、浇注温度（1 220 ℃）、铁液成分、铸型涂料及砂芯的种类，通过调节砂芯厚度改变铁液冷却速率，为生产优化提供支撑。

砂芯保温性能通过影响铁液冷却速率，进而影响灰口层组织形貌与硬度，二者非简单线性正相关，结合试验结果分析如下：砂芯厚度为30 mm时，保温能力弱，铁液平均冷却速率0.072 ℃/s，石墨形核生长受到抑制，灰口层石墨细小，含少量渗碳体，平均硬度HB237，无法满足要求；砂芯厚度为50 mm时，保温性能最优，铁液平均冷却速率0.063 ℃/s，石墨形核生长充足、占比10.1%，渗碳体减少，平均硬度HB124，满足空心冷硬铸铁轧辊内表面韧性要求；砂芯厚度为70 mm时，保温性能趋于饱和，铁液平均冷却速率0.066 ℃/s，与50 mm厚度下相近，灰口层石墨略小、占比9.63%，硬度HB137，50~70 mm区间内厚度对保温性能影响不显著。

综上，砂芯厚度与保温性能呈30~50 mm显著提升、50~70 mm趋于平稳的规律，50 mm厚度砂芯的保温效果最好。

3　结论

（1）砂芯厚度为30、50、70 mm时，靠近砂芯处的铁液温度平均降低速率分别为0.072、0.063、0.066 ℃/s，呈现随砂芯厚度增加先减小后略有增大的规律。砂芯厚度为50 mm时，铁液温度降低速率最低，砂芯保温能力最优。

（2）砂芯厚度从30 mm增加到50 mm时，由于铁液温度降低速率慢，石墨形核时间长，石墨变得粗大，且渗碳体数量减少。当砂芯厚度为50~70 mm时，厚度对铁液温度降低速率影响较小，石墨尺寸变化不大，砂芯保温效果相近。砂芯厚度为50 mm时，石墨占比最高，为10.1%。

（3）砂芯厚度为30、50、70 mm时，所得铸铁试块灰口层平均布氏硬度分别为HB237、HB124、HB137，呈现随砂芯厚度增加先显著减小后略有增大的趋势，这与50、70mm砂芯厚度下石墨粗化相关，这两种厚度下铸件硬度整体较为稳定。

参考文献：

[1] 程耀祖. 冷硬铸铁轧辊防开裂与白口层控制技术研究 [D]. 锦州：辽宁工业大学，2024.

[2] Opapaiboon J，Inthidech S，Ozaki K I，et al. Characteristics of fracture mechanics in cast roll materials for steel hot rolling [J]. International Journal of Metalcasting，2026，20（3）：1769–1784.

[3] Zhu H W，Xia S L，Zhai L，et al. Effect of （NbTi）C particles on the microstructure and hardness of high chromium and nickel indefinite chilled cast iron [J]. Crystals，2022，12（7）：978.

[4] Cao X B，Zhang Q X，Yu J G，et al. Effect of compositional changes and heat treatment on microstructure and mechanical properties of gray cast iron [J]. Journal of Materials Research and Technology，2025，35：5336–5352.

[5] Yuan G，Yan C，Wu H，et al. Study on microstructure and hot deformation behavior of high chromium cast iron/low carbon steel laminate [J]. Archives of Metallurgy and Materials，2025，70（2）：609–616.
[6] 康进武，刘宝林，荆涛，等. 镂空铸型（砂芯）的设计与生成方法 [J]. 铸造，2025，74（8）：1045–1057.
[7] 邵黎军. 新一代精轧后段无限冷硬铸铁轧辊的开发 [J]. 冶金设备，2025（6）：64–67.
[8] 郭克星，夏鹏举. 稀土铝变质处理对镍铬钼冷硬铸铁耐磨性的影响 [J]. 稀土，2020，41（2）：71–77.
[9] 陈玉海. Mn/S值对合金冷硬铸铁轧辊铸造缺陷的影响 [J]. 铸造，2016，65（4）：379–382.
[10] Rego G C，van Drunen J，Matijevic B，et al. Effects of niobium and molybdenum addition on microstructural characteristics and wear properties of 14wt.%Cr white cast irons [J]. Materials Chemistry and Physics，2024，317：129210.
[11] 高杰，郭克星，支泽林，等. 钒添加量对冷硬铸铁组织及耐磨性的影响 [J]. 机械工程材料，2023，47（12）：45–50.
[12] 王锡灶. Nb、V合金化对铸铁轧辊组织和性能的影响 [D]. 秦皇岛：燕山大学，2021.
[13] 杨智强，郭红星，强少光，等. 高镍铬无限冷硬球墨铸铁轧辊工作层离心铸造过程数值模拟 [J]. 中国铸造装备与技术，2024，59（5）：24–31.
[14] 杨智强，郭红星. 中镍无限冷硬球墨铸铁轧辊辊颈缺陷原因分析及应用 [J]. 云南冶金，2024，53（1）：204–209.
[15] 杨星，王立平，张鹏翔，等. 基于响应曲面法的大型轧辊磨削工艺参数优化研究 [J]. 工具技术，2021，55（6）：18–25.
[16] 高奇. 造纸冷硬铸铁压光辊车削加工研究 [J]. 石河子科技，2025（3）：13–15.
[17] 刘姣艳. 基于造纸机械的冷硬铸铁压光辊车削加工工艺研究 [J]. 模具制造，2024，24（8）：147–149.
[18] 王健. 造纸机械中的冷硬铸铁压光辊车削加工工艺优化探讨 [J]. 造纸科学与技术，2021，40（6）：68–70.
[19] 尧军平，周淇. 影响冷硬铸铁轧辊白口层深度主要因素的回归分析 [J]. 铸造技术，2002，23（3）：162–164.
[20] 董选普，李继强. 铸造工艺学 [M]. 2版. 北京：化学工业出版社，2022.
[21] 万敏，王玮，张涛. 钒添加对离心复合铸造ICDP轧辊组织和性能的影响 [J]. 铸造，2023，72（11）：1404–1409.

（编辑：王杰，wj@foundryworld.com）