生产实践

纳米合金材料的除垢技术研究与实践

刘芳[1,2],王飞[1,2],陈鹏[1,2],王永[1,2],安宁[1,2],李函霏[1,2],孙中琦[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009)

摘要: 为解决冷轧厂设备管道结垢的难题,将纳米合金材料的物理除垢器应用于现场改造实践,并初步探索了除垢阻垢机理。结果显示,换热器出口平均水温较进口平均水温升高5 ℃左右,换热效果增强,水中重金属含量无明显变化,同时细菌总数降低了80%以上,水中$CaCO_3$结晶率降低,而且水中的$CaCO_3$晶体由坚硬的方解石状逐步向松散的文石状转变。纳米合金材料的应用不仅使除垢效果明显增强,而且使结垢的去除变得更加容易。

关键词: 纳米合金;循环冷却水;除垢
中图分类号: TG146 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)05-0067-06
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.05.011

Research and Practice of Scale Removal Technology for Nano-alloy Materials

LIU Fang[1,2], WANG Fei[1,2], CHEN Peng[1,2],
WANG Yong[1,2], AN Ning[1,2], LI Hanfei[1,2], SUN Zhongqi[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: To solve the problem of scale formation in the equipment pipelines of the cold rolling mill, the physical descaling device made of nano-alloy materials was applied to the on-site renovation practice, and the scale removal mechanism was preliminarily investigated. The results showed that the average outlet water temperature of the heat exchanger increased by approximately 5 °C compared to the inlet, demonstrating enhanced heat exchange efficiency. No significant variation in heavy metal content was observed in the water, while the total bacterial count decreased by over 80%. Furthermore, the crystallization rate of $CaCO_3$ in water was reduced, accompanied by a gradual transformation of the crystal morphology from rigid calcite to loose aragonite. The application of the nano-alloy materials not only yielded significant scale removal effect but also facilitated easier detachment of the accumulated scale.

Key words: nano-alloy materials; circulating cooling water; scale removal

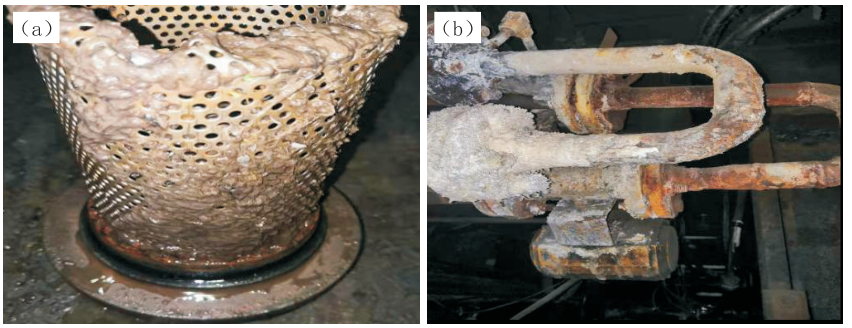
钢铁企业循环水系统运行过程中,水质、温度等因素使设备表面易出现腐蚀和结垢的现象,导致设备受损、管道阻塞,甚至破坏设备运行的稳定性,且容易造成安全事故[1]。因此,循环冷却水需投加水处理药剂,采用过滤等处理措施,保障循环水系统水质的稳定,减少冷却水对冷却设备、水处理设施及输送管道的影响[2]。然而持续的药剂添加,使循环水中的离子浓度持续攀升,腐蚀与结垢的倾向变大[3],因此,必须通过大量排污来维持循环水系统的稳定运行,从而造成水资源浪费及碳排放增加[4]。为避免水质二次污染,并响应国家节能减排号召,研究一种高效的物理除垢技术,对钢铁企业循环水系统的稳定运行具有重要意义。

刘芳,硕士,高级工程师,2012年毕业于吉林大学环境工程专业。E-mail: wghliufang@126.com

纳米合金材料的研究为物理除垢技术提供了新方向。国内外对纳米材料在循环水除垢方面的应用已有研究，并且在低成本纳米涂层[5]和纳米合金材料的制备[6]等方面已经取得了一定成果。本研究通过将纳米合金材料应用于除垢设备的主要部件，对鞍钢股份有限公司冷轧厂（以下简称“冷轧厂”）冷却循环水系统改造实践，利用纳米合金材料持续产生的微电场来改变成垢离子的微观结构，研究其除垢防黏泥效果。与已有研究相比，具有作用效果更稳定、去除效率更高效的显著特点。

1 冷轧厂设备管道结垢现状

冷轧厂彩涂分厂车间内，共有两组彩涂薄板生产线。其中一组为空压机换热器、产线冷油器和冷媒水循环系统，所采用的冷却水均为自来水，硬度普遍在200ppm以下，设备结垢现象严重；另一组为滚筒循环水系统，采用一级软化水，硬度值偏小，但由于产线末端滚筒温度较高，滚筒内部结垢较多。导致循环水系统结垢、堵塞的主要原因是循环过程中循环冷却水中的Ca、Mg等金属离子与碱性物质发生反应沉淀并析出[7]，夏季结垢、堵塞现象尤为严重，由于冷却水的温度和被冷却介质油的温度都在上升，进一步加剧了Ca、Mg等金属离子的析出，增加了垢的产生[8]，结垢情况严重时，罩式炉钢卷冷却从进炉400 ℃到出炉，冷却时长由原先的10 h逐渐变为19 h，严重影响了生产效率。为减缓这种情况，彩涂分厂在循环冷却水中投入大量阻垢药剂，但是阻垢效果并不明显，不仅增加了系统的含盐量，而且给循环水系统带来了二次污染。罩式炉循环水系统结垢情况如图1所示。



(a) 罩式炉循环水过滤网；(b) 管道结垢

图1 罩式炉循环水系统结垢情况

Fig. 1 Scale Deposition Status in Circulating Water System of Bell-type Furnace

由图1可以看出，罩式炉循环水系统设备产生了较为严重的结垢现象，阻碍了换热过程，导致换热效果下降。为了保证换热效果和机组的正常运行，现场工作人员每年需要将换热器清洗1~4遍，频繁的清洗需要定期停机，严重影响设备的连续运行。目前换热器的常规防垢除垢方法是高压水清洗、酸洗和铜刷清洗[9]，以铜刷清洗应用最多。这些清洗方法不仅会减少设备的寿命，而且增加了废水排放量和污染环境等危害。

2 基于纳米合金材料的物理除垢技术

纳米合金材料由带有多种不同电负性的金属元素（Cu、Zn、Fe、Cr、Mn等）按一定配比高温化合而成，该材料微观形态呈柱状晶体结构，可持续向水体中释放电子，在水体与芯片之间形成持续微电场（稳态电流：15~35 μA），可同时实现阻垢、除垢和防腐蚀等多重效果。

（1）微电场可降低循环水系统中阳离子浓度，从而降低成垢指数，达到阻垢的效果；

（2）对已经形成的垢盐，持续的微电场作用可改变其结构形态，使其由板结的硬状垢逐步转向松软直至脱落，从而达到除垢的目的；

（3）纳米合金材料向水体中释放的自由电子，使水体中的溶剂分子产生极化现象，形成偶极子，这种极化后的偶极子可与管道壁裸露的金属表面发生反应，产生壁面效应，逐步在管壁表面形成一种成垢离子耦合物，积累在表面，将管壁金属与水体分隔，从而在一定程度上起到了金属管壁的防腐蚀作用。

3 改造措施

罩式炉循环冷却水系统采用净环水作为冷却水，工业新水作为补水，被冷却部件温度在400 ℃左右，进口水温20~30 ℃，冷却水直接对罩式炉喷淋冷却，长时间循环运行，罩式炉内结垢严重。为解决上述问题，具体改造措施如下：

（1）改造优化原有循环水系统管路，在换热器进水口总管处安装两台物理除垢器，采取旁路安装，充分提高系统能效；

（2）采取旁路运行，安装简便，不占用空间，充分保障系统运行的稳定性；

（3）根据管径不同，选择不同型号的物理除垢器，本研究选择型号为DN 100的物理除垢器。

本技术改造无需用电，无需化学药剂，不仅可优化循环水系统水质，同时，物理除垢器有效除垢距离为3~5 km，且免维护，还降低了处理成本，其结构由外层的壳体和内层的芯片组成，水流经芯片流过，可使流体中的阴、阳离子不易结合成水垢，从而达到防垢、除垢效果。物理除垢器安装改造图如图2所示，物理除垢器内部结构图如图3所示。

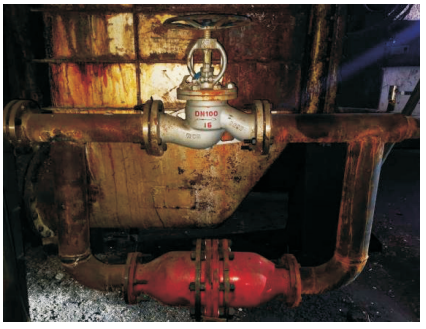


图2 物理除垢器安装改造图

Fig. 2 Installation and Renovation Diagram of Physical Descaling Device



图3 物理除垢器内部结构图

Fig. 3 Internal Structure Diagram of Physical Descaling Device

4 应用效果

4.1 运行前后换热器进出口温度对比

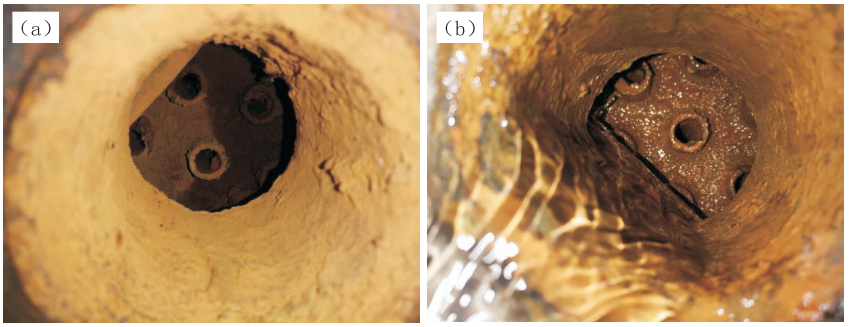
该设备运行6个月后，对换热器进出口温度进行了检测，改造前后换热器进出口水温对比情况如表1所示，检查了换热器的结垢情况，换热器结垢情况对比如图4所示。

安装物理除垢器前，换热器每年需进行2~3次的清洗，严重影响生产效率，由表1可知，安装物理除垢器后，换热器出口平均温度较安装前高5 ℃左右，换热效果增强，进而提高生产效率。由图4可知，安装后，换热器没有新结的水垢，且对原有水垢有温和的去除效果。

表1 改造前后换热器进出口水温对比情况

Table 1 Comparison of Inlet and Outlet Water Temperatures of the Heat Exchangers before and after Transformation

项目	换热器进口平均温度/℃	换热器出口平均温度/℃	平均温差/℃
改造前	22.4	26.0	3.6
改造后	22.4	31.3	9.1



(a) 改造前；(b) 改造后

图4 改造前后换热器结垢情况对比

Fig. 4 Comparison of Fouling Conditions in Heat Exchangers before and after Transformation

4.2 总碱度变化分析

对循环水的总碱度进行持续检测，改造前后循环水中总碱度变化曲线如图5所示。

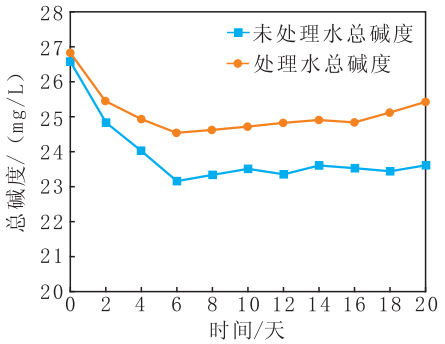


图5 改造前后循环水中总碱度变化曲线

Fig. 5 The Variation Curve of Total Alkalinity in Circulating Water before and after Transformation

由图5可知，设备运行初期，总碱度由27 mg/L下降至25 mg/L左右，这是由于水中的$Ca(HCO_3)_2$不断分解生成$CaCO_3$沉淀，使总碱度呈下降趋势，但在物理除垢器作用的影响下，$CaCO_3$结晶的概率明显降低，水中HCO_3^-浓度增加，因此，改造后循环水系统的总碱度高于改造前系统的总碱度（23 mg/L）。

4.3 重金属变化分析

物理除垢器的核心部件采用纳米合金材料，在水流的作用下，如果材料成分产生流失，则会对水质产生非常严重的二次污染，即使具备再好的防垢效果，也不能够在鞍钢的水循环系统中使用，否则会对周围环境产生不可逆的影响。为验证纳米合金材料在使用过程中是否会向水体中分解物质，试验检测了物理除垢器应用前后水中重金属含量的变化，改造前后重金属含量变化如表2所示。

表2 改造前后重金属含量变化

Table 2 The Changes of Heavy Metal Content before and after Transformation ppm

项目	Mn	Ni	Cu	Sn	Pb	Zn	Ag
改造前	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.08	<0.01
改造后	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.08	<0.01

由表2可知，水中的Mn、Ni、Cu、Pb等重金属的含量均未发生变化。试验结果说明物理除垢器的合金材料，其成分虽然产生了微弱电流，但是材料本身并未随着水流分解进入到循环水中，因此，该抑垢除垢技术不存在二次污染的问题。

4.4 细菌总数变化分析

对物理除垢器应用前后循环水中的细菌总数进行测定，分析其含量变化，改造前后细菌总数变化趋势图如图6所示，改造前后细菌总数对比分析结果如表3所示。

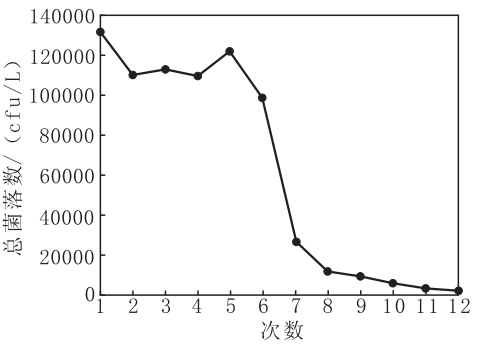


图6 改造前后细菌总数变化趋势图

Fig. 6 Trend Chart of Total Bacterial Count Changes before and after Transformation

表3 改造前后细菌总数对比分析结果

Table 3 Analysis Result of Total Bacterial Count Comparison before and after Ttransformation

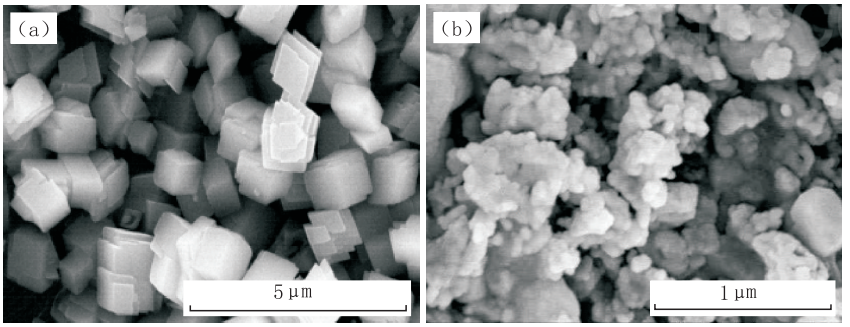
项目	编号	总菌落数/(cfu/L)
改造前	1	131 400
	2	109 000
	3	112 600
	4	108 900
	5	122 500
	6	98 000
改造后	7	26 000
	8	10 900
	9	9 032
	10	5 560
	11	2 841
	12	1 670

由图6和表3可知，改造后细菌总数明显下降，循环水中微生物得到了有效抑制，最终使循环水系统中细菌总数降低了80%以上。

4.5 除垢机理分析

试验分别取物理除垢器运行前后的水垢进行扫描电镜(SEM)分析,观察其微观形貌,水垢形态表征如图7所示。

循环水中含有Ca、Mg元素,气温的升高或者水压的变化促进了Ca、Mg晶体的形成,由图7(a)可知,未经物理除垢器处理的水垢,微观形态呈方解石状,结构紧密并且掺杂有一些其他矿物,这种状态晶体质地坚硬[10],形成的水垢堆积在一起将难以剥离,吸附性强,容易附着在设备或管壁上,随着不断累积,严重影响换热设备的正常运行,使换热效率下降;由图7(b)可知,经物理除垢器处理的水垢,微观形态呈松散的文石状,文石$CaCO_3$晶体表面无电荷,不易附着在管壁上[11],当有外力冲击时很容易将其打散,形成平均粒径更小的垢粒,随着水流冲走,这就使水垢的去除变得容易。



(a)改造前;(b)改造后

图7 水垢形态表征

Fig. 7 Morphology of Scale

Ca^{2+}在水溶液中所呈现的形态是水垢形成的关键。在冷却循环水系统中,受电导率以及水温等因素影响,通常Ca^{2+}以不稳定的六水合物$[Ca(H_2O)_6]^{2+}$形式存在,这种形态的化合物可以无阻碍地形成水垢,最终形成坚硬的方解石状水垢。本试验采用的纳米合金材料,当流体经过时,在合金的阳极芯片和阴极芯片之间能够形成35 μA左右的稳态电流和无数个极微小的电极,从而构成微电池,进而产生微电场。此能量可以改变水中Ca^{2+}与H_2O的结合方式,使不稳定的六水合物$[Ca(H_2O)_6]^{2+}$逐步转变为稳定的$\{[Ca(H_2O)_6]\cdot 20H_2O\}^{2+}$水合物[12],这种钙的正十二面体水合物是一个封闭的球形结构,氢键无向外延伸,不易附着,尺度微小,渗透力强,具有很好的防垢和除垢的作用。钙的水合物结构变化如图8所示。

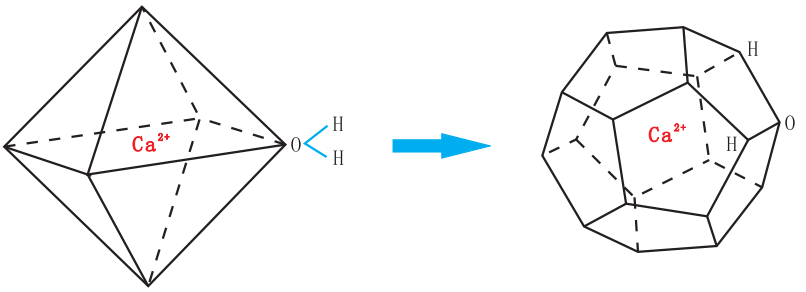


图8 钙的水合物结构变化

Fig. 8 Structural Changes of Calcium Hydrate

5 结语

针对冷轧厂设备管道结垢的难题,将纳米合金材料应用在物理除垢器上,并采取旁路安装的方式对原有循环水系统管路进行改造优化。纳米合金材料的物理除垢器运行6个月后,换热器出口平均水温较进口平均水温升高5 ℃左右,换热效果显著增强。改造后循环水系统的总碱度由27 mg/L下降至25 mg/L左右,高于

改造后的23 mg/L，降低了碳酸钙的结晶率，起到了一定的阻垢效果。同时对富集的微生物黏泥垢也有明显的去除效果，循环水系统中细菌总数降低80%以上，并且重金属含量无明显变化。

参考文献

[1] 黄泽民，王亚翰，周兆年. 钢厂循环水系统清洗预膜技术的应用[J]. 冶金动力，2024(5)：53-56.
[2] 张炜华，郁雷，梁鹏飞，等. 电化学水处理技术在烧结余热发电循环水系统的应用[J]. 冶金动力，2024(5)：44-47.
[3] RAHMANI K，JADIDAN R，HAGHTALAB S. Evaluation of inhibitors and biocides on the corrosion，scaling and biofouling control of carbon steel and copper-nickel alloys in a power plant cooling water system[J]. Desalination，2016，393：174-185.
[4] 江裕，梅刚，唐世宝，等. 低磷阻垢剂对电厂循环水电解除垢性能的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版)，2023，50(6)：14-21.
[5] 马昂，王南. 基于纳米涂层技术的锅炉水冷壁防腐蚀方法研究[J]. 自动化应用，2025，66(11)：246-248.
[6] 张思源，张鑫，王彦军，等. FeCr纳米合金粉的制备及性能[J]. 有色金属工程，2023，13(8)：23-27.
[7] 冀成，臧克培，任彦峰. 空压机冷却器结垢原因分析及清洗[J]. 山西焦煤科技，2014(9)：44-46.
[8] 陈世通. 循环水系统结垢的原因分析及处理措施[J]. 氮肥技术，2015，36(3)：28-31.
[9] 史恒亮，魏振山，吴宏，等. 扫频磁电除垢仪用于空压机换热器防垢的研究[J]. 纯碱工业，2025(4)：18-19.
[10] 徐浩，延卫. 阴极电流密度对电化学除垢技术生成水垢的影响[J]. 西安交通大学学报，2013，47(7)：47-51.
[11] 姜德宁，Sintayehu Zewdu，曹继华，等. 交变磁场对换热器阻垢效果的研究[J]. 中国给水排水，2008，24(7)：57-59.
[12] 余丰人，罗维瑛. 电磁水处理的防垢和除垢机理探讨[J]. 仲恺农业工程学院学报，2009，22(1)：44-48.

（编辑 白璐）
修回日期：2026-01-12

（上接第52页）

4 结语

拦焦车导焦栅后退保护技术是在焦炉机车无线通信网络技术的基础上，结合炼焦生产实际，通过逻辑判断，对推焦联锁进行优化，弥补了焦炉机车控制程序的缺陷，解决了拦焦车在推焦结束但推焦杆未完全退出导焦栅时可以操作导焦栅后退的问题，避免了导焦栅提前后退造成红焦落地，进而造成拦焦车烧毁、焦炉长时间停产甚至人员伤亡的事故，确保了炼焦生产安全有序进行。技术实施后，可实现年创效约为51.70万元。

参考文献

[1] 于庆泉，崔金林，孙强. 推焦联锁系统功能优化[J]. 鞍钢技术，2019(2)：13-16.
[2] 于庆泉，周鹏，马富刚，等. 焦炉机车信息化管控系统研究与实践[C]//第十二届中国钢铁年会论文集. 北京：中国金属学会，2019：95-103.
[3] 韩超，曹详同. 无线通讯技术在冶金行业冷轧处理线中的应用[J]. 科技创新导报，2018，15(22)：95-96.
[4] 左殿杰，王艳勇. 焦炉车辆自动化控制与管理系统的应用[J]. 燃料与化工，2009，35(4)：5-10.
[5] 李公法，孔建益，蒋国璋. 焦炉生产的智能控制与管理系统研究[J]. 化工自动化及仪表，2008，35(1)：53-58.
[6] 王栋. 基于超宽带无线通信技术的焦炉机车连锁保护系统研究[D]. 西安：西安理工大学，2023.
[7] 陶文英，周荣富，吴鹏松. 焦炉四大车定位及通信连锁控制[J]. 现代工业经济和信息化，2016，6(18)：35-39.
[8] 闫忠浩，田广涛，张建发. 焦炉四大车全自动操作系统与设备管理[J]. 燃料与化工，2011，42(6)：30-32.
[9] 吴小丘，唐永利，张栋梁. 推焦连锁系统的优化[J]. 燃料与化工，2011，42(6)：37-40.
[10] 吉明鹏，龙伟国，丁海泉. 焦炉四车对位系统的应用[J]. 冶金自动化，2010，34(2)：24-28.

（编辑 许营）
修回日期：2026-09-22