

连铸关键设备再制造技术及应用

侯峰岩, 任乔华, 高锦岩

(上海宝钢工业技术服务有限公司 机械制造分公司, 上海 201900)

摘 要: 连铸关键设备的再制造是高效、绿色钢铁发展的重要方向。介绍了连铸结晶器和连铸辊的失效形式、表面处理技术以及结构设计技术在结晶器和连铸辊上的研究与应用;分析总结了各种表面涂层的热稳定性、耐磨损性能和实际应用寿命;运用有限元解析技术对结晶器铜板和连铸辊的结构、服役条件进行分析,并对其进行各种优化设计,与优异的表面处理技术相配合,提高连铸设备的整体使用寿命。实践表明借助再制造工程体系的先进表面技术和先进设计与管理方法,可以使连铸设备不断得到性能恢复和技术改造升级,延长其寿命和报废期限,提高连铸设备的档次和附加值,具有良好的经济效益和社会效益。

关键词: 连铸设备;再制造;表面技术;热解析

中图分类号: TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)04-0031-05

Remanufacturing Technology in Continuous Casting Core Equipment and Its Application

HOU Feng-yan, REN Qiao-hua, GAO Jin-yan

(Machinery Manufacturing Branch, Shanghai Baosteel Industry Technological Services Co. Ltd., Shanghai 201900)

Abstract: Remanufacturing of continuous casting core equipment is an important direction for efficient development of green steel. The failure mode of continuous casting mold and roller was described. Surface technology and structural design techniques for continuous casting core equipment were introduced. Thermal stability, wear resistant and life of all type coatings were analyzed. Finite element analytical techniques were used to analyze the structure and service condition of continuous casting mold and roller. Designs were optimized and matched the excellent surface technology to improve the overall life of the continuous casting equipment. Practice show that the performance and technology of continuous casting equipment are improved through advanced surface technology, design and management of the remanufacturing engineering system. The life expectancy and retirement period are extended and the quality and added value are improved, resulting in good social and economical benefits.

Key words: continuous casting equipment; remanufacturing; surface technology; thermal analysis

0 引 言

钢铁产业正向着高效、绿色的模式发展,作为生产链中重要的一环,连铸的生产模式也向着追求更大经济效益、更少资源消耗和更低环境污染的一种先进经济模式转变。2011 年我国连铸坯产量约 6.2 亿吨,这意味着支持此巨大产出的

连铸设备,其优良的状态是连铸生产稳定运营、产品质量保障的关键。因此,结晶器、扇形段、电磁搅拌辊、电磁制动、油缸等连铸核心设备的长寿命、稳定化是实现高效、绿色钢铁发展模式的重要途径。

连铸设备所处的工况往往都十分恶劣,对连

收稿日期: 2012-04-23; 修回日期: 2012-05-22

作者简介: 侯峰岩 (1976—), 男(汉), 内蒙古人, 高级工程师, 博士; 研究方向: 冶金机械制造与再制造、表面工程与技术

网络出版日期: 2012-07-02 09:35; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120702.0935.001.html>

引文格式: 侯峰岩, 任乔华, 高锦岩. 连铸关键设备再制造技术及应用 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 31-35.

铸设备维护维修所做的资源和能源投入,已成为连铸生产运营的主要成本构成。应用再制造工程体系的先进表面技术和先进设计与管理方法^[1-2],对连铸设备进行技术创新和全生命周期管理,不断延长其寿命和报废期限,一方面降低新产品投入,从而减少制造过程中产生的能源消耗和环境污染,减少废弃产品对环境的污染以及处理工业固体垃圾的费用,节能节材、降低污染和创造更多的利润。同时,减少设备维修和停机时间,提高生产效率。可见,再制造工程因其所具有的系统功能完全一致于现代钢铁产业的发展方向,正在为现代钢铁产业的发展做出卓越的贡献^[3]。

在连铸设备中,用于连铸结晶器铜板和连铸辊的维护费用约占整个连铸设备的 80%,是连铸设备再制造技术应用的主体和核心。

1 连铸结晶器铜板再制造

1.1 连铸结晶器铜板的失效

连铸结晶器的工作环境具有如下特点:坯壳与铜板间的持续大摩擦力、高温氧化、钢液的化学与电化学腐蚀、各种渣氮的化学与电化学腐蚀、钢水静压力、钢热气量的传导^[4]。概括的讲连铸结晶器的工况是高温、高腐蚀、高磨损、高热通量的“四高”恶劣环境。

在这样的工况条件下,结晶器铜板会产生下面几种失效形式(如图 1 所示):铜板表面磨损、铜板表面划伤、铜板表面腐蚀、铜板表面热裂纹、铜板扇形变形。

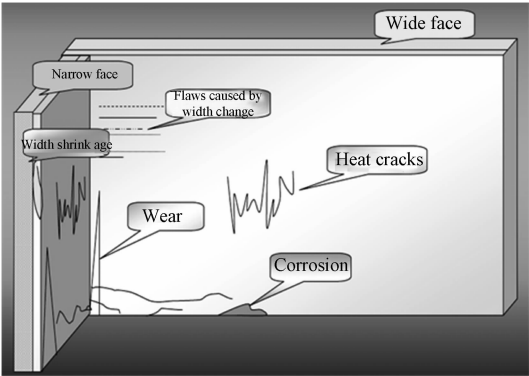


图 1 结晶器的失效形式

Fig. 1 Failure mode of continuous casting mold

1.2 连铸结晶器铜板的表面处理

结晶器铜板的失效最终基本上都表现为产

品的表面损伤。重新对失效的结晶器铜板进行表面涂镀,即可以恢复其外形尺寸和使用性能。因此,表面技术是结晶器再制造工程的重要方法。

对铜板表面进行表面改性已成为各国钢企普遍认同和重视的工作。近年来,结晶器铜板表面处理技术也取得了长足发展(如图 2 所示)。从最初的镀 Cr 开始,目前已逐步形成了镀 Ni、镀 Ni-Fe、镀 Ni-Co、镀 Co-Ni、热喷涂合金等几种主要涂层,产品的性能也逐步提高^[5-7]。长边铜板热喷涂、陶瓷复合镀层、新型合金镀层已成为研发热点,将成为新一代结晶器铜板表面处理技术。

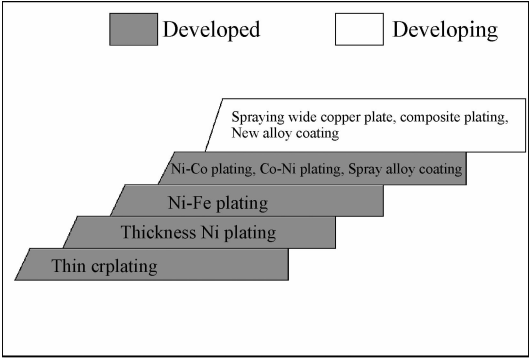


图 2 结晶器表面技术发展

Fig. 2 Development of surface technology for continuous casting mold

对 Ni、Ni-Fe、Ni-Co、Co-Ni 和 Ni 基合金热喷涂涂层进行了高温硬度、磨损性能进行了测定,各种涂层的实际应用寿命统计见表 1。由表可知,当热处理温度高于 300 ℃时,纯 Ni、Ni-Fe、Ni-Co 镀层的硬均降至了 200 HV 以下,而喷涂涂层和 Co-Ni 镀层的硬度随退火温度的增加基本保持不变,其硬度大大高于其他镀层。可见,喷涂涂层和 Co-Ni 镀层具有很好的热稳定性性能^[8-9]。

在同等磨损条件下,与纯 Ni 镀层相比,其他涂层的磨损率较低,Ni-Fe 和 Ni-Co 镀层分别降低了 1/4 和 1/6 左右,而 Co-Ni 镀层和喷涂涂层则分别降低了 1/50 和 1/250 左右。与纯 Ni 镀层相比,Ni-Co、Ni-Fe 镀层以及喷涂涂层的摩擦系数均有所升高,而 Co-Ni 镀层摩擦系数显著降低了 1/2 左右。与纯 Ni 镀层相比,Ni-Co 和 Co-Ni 镀层具有良好的耐磨损性能,尤其是喷涂涂层和 Co-Ni 镀层耐磨损性能优异^[8-9]。

从各种表面涂层的使用实绩来看,与涂层的性能规律相同,电镀 Co-Ni 和热喷涂结晶器的一次修复过钢量的数值较高,分别达到了 20 万吨左右,具有优异的使用寿命。

表 1 涂层的性能和实际应用寿命

Table 1 Characters and service life of coatings

Coatings	Hardness after heat treatment for 1 h / HV			Wear characters		Service life/ (10 ⁴ t)
	300	400	600	Mass loss rate/ (mg • h ⁻¹)	Friction coefficient	
Ni	175	140	105	77	0.40	5
Ni-Fe	270	195	150	20	0.89	8
Ni-Co	232	195	155	12	0.65	12
Co-Ni	200	215	217	2.5	0.20	20
Spraying	555	538	528	2.0	0.51	19

1.3 连铸结晶器的结构设计

在连铸结晶器的再制造过程中,并非应用最好的表面涂层就能够提高产品寿命。铜板变形、热裂纹、铜板异常磨损等问题并不能依靠单一的涂镀层优化解决。因此,在继续推进结晶器铜板涂镀层材料开发和改善的同时,必须综合考虑结晶器的整体优化。运用有限元解析技术对结晶器铜板结构和服役条件进行分析和研究,从而对结晶器进行各种优化设计,包括结晶器的冷却结构、结晶器的锥度、连铸生产工艺参数、结晶器铜板涂层的形式规格等,不仅可以解决结晶器铜板在使用过程中产生的各类问题,也优化了生产工艺。

某连铸线结晶器铜板上口钢液面处产生微裂纹和局部剥落如图 3 所示,寿命只有 595 炉。对连铸工况和铜板结构进行了信息收集并做热解析分析,分析发现铜板的钢液面处温度过高,高出正常温度 40 ℃。提出修改铜板水槽结构以降低铜板温度的方案,并采用解析技术进行详细设计和预验证,最终经过冷却结构优化设计的结晶器钢液面处温度降低,裂纹和剥落现象消失,结晶器寿命提高到了 1088 炉过钢量。

某大方坯连铸结晶器铜板倘若设有水槽,则

容易因铸坯角部过冷而产生角部裂纹,所以原设计铜板角部没有冷却水槽(如图 4 所示)。但是铜板角部的密封圈由于所处温度较高、寿命很短,易造成烧焦停机。通过对铜板的温度场进行热解析后,对铜板后面的背板进行重新设计,在背板的角部位置开设冷却水槽,如此既实现了铸坯在结晶器内的缓冷,避免铸坯角部产生裂纹,又达到了铜板角部密封件的冷却目的,避免了密封件被烧焦而下线。经在线使用发现结晶器寿命提高了 3 倍多。

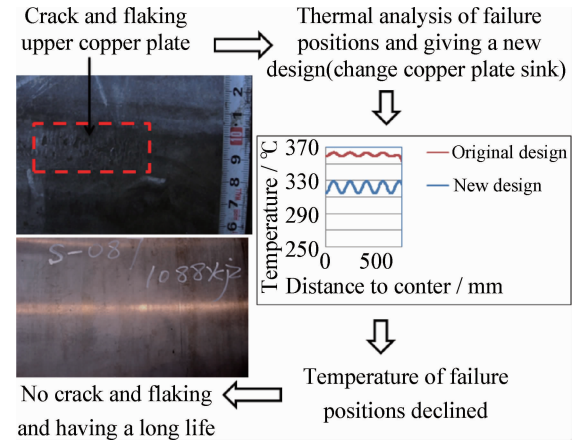


图 3 铜板结构优化

Fig. 3 Optimization of copper structure

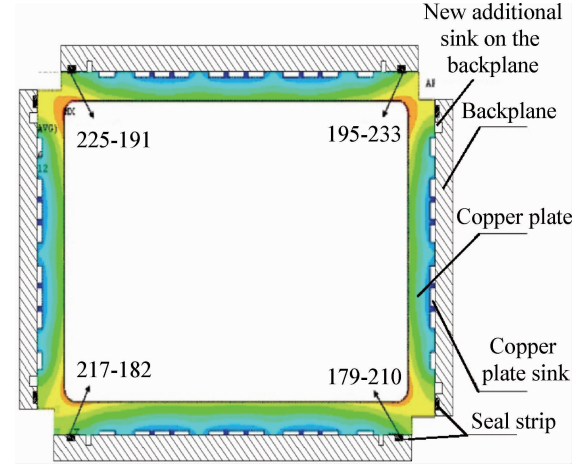


图 4 结晶器结构优化

Fig. 4 Optimization for structure of continuous casting mold

连铸浇注时,在浸入式水口处钢液搅动剧烈,形成的紊液流对结晶器铜板的中下部冲刷严重,和弯月部位一样,在结晶器的中央下也会出现热裂纹。对此进行了镀层厚度分布的优化

改进,如图 5 所示,在原设计中,水口冲刷部位的镀层较厚,镀层内应力高,容易产生龟裂。将原有均厚的厚镀层改为薄的梯度厚度镀层,可以有效缓解该部位钢液的热冲击和物理冲击,龟裂现象得到了很好的改善。

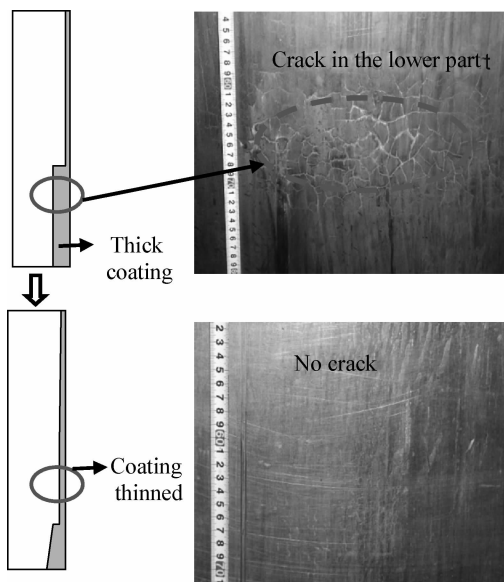


图 5 镀层厚度分布优化

Fig. 5 Optimization for distribution of plating thickness

2 连铸辊再制造

2.1 连铸辊的失效

连铸辊失效的主要的原因是热疲劳损坏、腐蚀和磨损。连铸辊连续不断地与内部还未凝固的高温铸坯接触,工作状态的辊子在环面和垂直环面方向的温度分布都不均匀,冷热冲击的循环作用始终作用在整个辊子上,而且还受到板坯鼓肚力和静压力的交变机械应力的作用,连铸辊在机械应力和热应力的共同作用下产生热疲劳损坏。连铸辊在工作状态时辊面会发生高温氧化,同时在上部喷水区由于连铸保护渣的大量氟离子和氢离子生成的氢氟酸而造成酸蚀作用,辊面易产生高温腐蚀。同时连铸辊与半凝固和凝固的高温铸坯接触,机械力较大,铸坯表面的氧化铁皮会对辊面造成严重的磨损。

2.2 连铸辊的表面处理

堆焊是连铸辊再制造过程的主要表面处理技术。为了最大限度地发挥堆焊技术的优越性,优质、高效、低稀释率是国内外连铸辊堆焊技术的重要研究方向。连铸辊堆焊工艺通常为丝极

埋弧焊、带极埋弧焊和明弧焊。因为明弧焊堆焊前连铸辊无需预热,堆焊时热量相对较小,堆焊后无需做退火处理,所以连铸辊变形量也比较小,而且堆焊层材料组织中含有氮元素,因此具有较好的耐腐蚀性和抗磨损性,但明弧焊焊丝成本比较高。采用埋弧焊焊丝替代明弧焊焊丝目前已成功得到应用,采用明弧焊堆焊工艺,堆焊层材料组织中同样含有氮合金,因此也具有较好的耐腐蚀性和抗磨损性,而且埋弧焊焊丝成本比明弧焊焊丝低很多。

2.3 连铸辊的结构设计

在连铸辊的再制造过程中,针对连铸辊整体结构的设计对提高连铸辊的使用寿命十分关键,优异的表面处理技术需要和适宜的辊体结构相匹配,才能相得益彰。

常规的扇形段连铸辊为中心冷却水孔结构,该结构对辊子表面的冷却效果不佳。采用新型的连铸辊结构——近外壁冷却辊,连铸辊子冷却方式由中心孔通水冷却改为近辊面环缝冷却,如图 6 所示,把新制辊芯或下线需要堆焊修复的连铸辊辊芯表面铣冷却水螺旋槽,然后套上辊套。

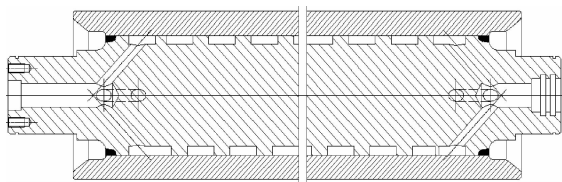


图 6 近外壁冷却辊结构

Fig. 6 Structure of cooling roll near outer wall

对连铸辊的温度场进行热解析(见图 7),由图 7(a)可看出原设计中心冷却水孔冷却结构辊子最高温度为 261.5°C ,平均温度为 239°C 。由图 7(b)可以看出新设计的近外壁冷却结构辊子最高温度为 152.4°C ,平均温度为 116°C 。新设计后连铸辊的平均温度降低约 120°C ,从而有效提高了辊子尤其是辊面的冷却强度,减少了辊子的热应力,从而提高辊面的耐磨损能力及疲劳寿命。通过该方法再制造的连铸辊上线使用寿命为原来的 2~3 倍,不仅大幅度降低了连铸机的维修成本,还大幅度提高了连铸机的作业率。

3 结 论

再制造工程着眼于设备全生命周期内的节

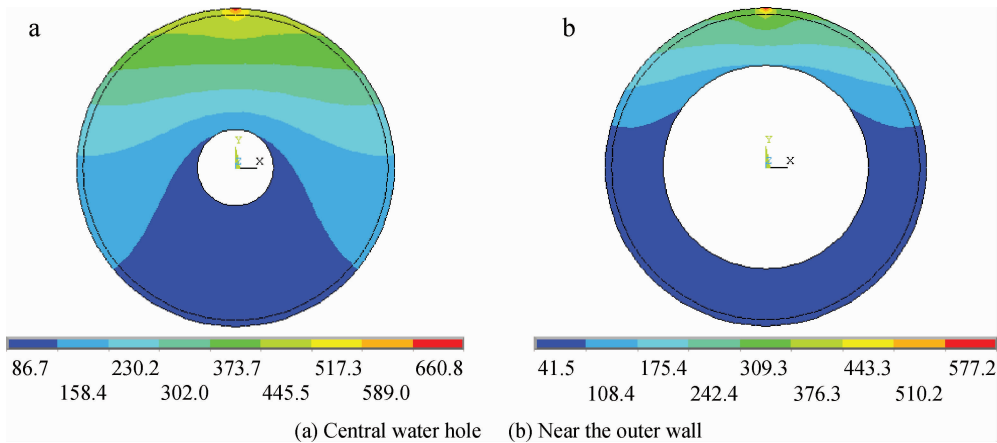


图 7 连铸辊温度场分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 7 Temperature distribution of the casting roll (Unit: $^{\circ}\text{C}$)

能、降耗及循环利用,在产品形成、应用和到达寿命的全过程中,任何技术和管理的进步与创新都是再制造技术发展的基础和源泉,再制造技术的外延也随着这些进步与创新的发展而不断拓展。实践表明借助再制造工程体系的先进表面技术和先进设计与管理方法,可以使连铸设备不断得到性能恢复和技术改造升级,延长其寿命和报废期限,提高连铸设备的档次和附加值,具有良好的经济、社会效益。连铸设备的再制造工程对践行高效、绿色钢铁发展模式十分重要。

参考文献

[1] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
[2] 徐滨士, 刘世参, 史佩京. 再制造工程和表面工程对循环经济的贡献分析 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(1): 1-6.
[3] 侯峰岩, 谭兴海, 李朝雄, 等. 再制造工程和表面工程技术在钢铁产业中的应用 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(增

刊): 102-103.
[4] 蔡开科. 连铸结晶器[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
[5] 侯峰岩, 谭兴海, 蒋丽敏, 等. 连铸结晶器表面电镀技术的应用进展 [J]. 表面技术, 2007, 36(3): 61-63.
[6] 王建丽, 李光强, 朱诚意, 等. 表面改性技术在连铸结晶器上的应用进展 [J]. 电镀与涂饰, 2005, 24(12): 58-62.
[7] 朱诚意, 李光强. 连铸结晶器表面镀层技术研究进展 [J]. 材料保护, 2005, 38(5): 43-47.
[8] 侯峰岩, 路庆华, 谭兴海, 等. Co-Ni 合金镀层的组织结构及性能研究 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28(1): 123-126.
[9] 侯峰岩, 黄丽, 蒋丽敏, 等. 结晶器表面电镀 Co-Ni 技术及热喷涂技术 [C]. 2007 年全国板坯连铸结晶器技术研讨会, 上海, 2007: 61-65.

作者地址: 上海市宝山区宝钢厂区 201999
经五路纬一路路口宝钢机械厂
Tel: (021) 5693 0410
E-mail: houfengyan@baosteel.com