

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.05.007

薄带连铸结晶辊表面处理

孙小平*, 吕春雷

(宝武装备智能科技有限公司, 上海 201900)

摘要: 本文结合宝钢-宁钢薄带连铸产业化项目,介绍了关键备件结晶辊的表面处理生产实践。研究表明:通过表面处理不仅能够提高结晶辊表面耐磨性,而且能够保护铜基体,增加修复次数。通过滚压规则沟槽纹理形貌,喷丸毛化不规则形貌,可以提高结晶辊表面积,使之改善传热特性,进而提高带钢表面质量。

关键词: 薄带连铸;结晶辊;电镀

中图分类号: TQ153.1 **文献标识码:** A

Surface Treatment Technology of Crystallization Roller for Strip Continuous Casting

SUN Xiaoping*, LV Chunlei

(Baowu Equipment Intelligent Technology Co. Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: Based on the industrialization project of continuous casting of thin strip in Bao Steel-Ning Steel, the production practice of surface treatment of casting roll was introduced in this paper. The surface treatment can not only improve the surface wear resistance of the crystallization roller, but also protect the copper matrix and increase the number of repairs. The heat transfer characteristics can be improved by regular groove texture and irregular shot blasting surface, so it can improve the surface quality of the strip steel.

Keywords: strip continuous casting; crystallization roller; plating

薄带连铸技术是冶金及材料研究领域内的一项前沿技术,实现铸轧一体化,简化了带钢的生产工序,使钢铁生产流程更紧凑,生产、投资成本更低。薄带连铸技术不仅缩短生产周期,而且更节能环保。其工艺方案因结晶器的不同分为带式、辊式、辊带式等,其中受到广泛关注的是双辊薄带连铸技术,其工作原理如图1所示。

目前,国外薄带连铸均已进入商业化阶段。我国由宝钢集团与宁波钢铁公司合建的年产50吨钢的薄带连铸工厂也已于2014年投入生产。2016年东北大学与河北敬业集团也签订了协议,建设薄带

连铸工程项目^[1]。

结晶辊是薄带连铸机中的关键设备之一,与传统的连铸机的结晶器作用相似。其主要作用是将注入的钢水快速冷却、凝固成具有一定厚度的板带坯,并轧制形成厚度为1~5 mm带钢。整个过程中,结晶辊匀速旋转,将钢水凝固的同时施加一定的轧制力,其自身同时需承受钢水的热蚀、板带的磨损和周期性热载荷。

结晶辊通常由不锈钢芯轴和铜合金辊套组成,其结构形式如图2所示。为了提高结晶辊使用寿命、提高薄带连铸生产效率。与传统的方坯、板坯连

收稿日期: 2020-08-14

修回日期: 2020-11-19

通信作者: 孙小平,工程师,主要从事冶金机械备件修复,Email: manu518@163.com

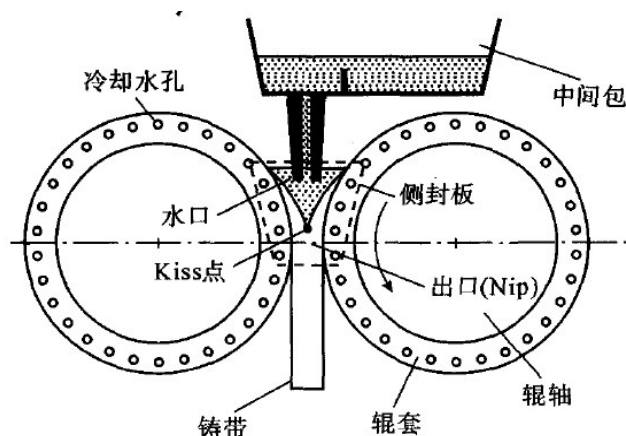
图1 双辊薄带连铸机示意图^[2]

Fig.1 Schematic diagram of double-roll strip continuous caster

铸结晶器一样,可以在结晶辊表面镀覆一层金属镀层。但是,与传统结晶器不同,结晶辊要求更快速均匀传热,而且要满足连铸和轧制双要求,因此对镀层的要求更苛刻,镀层需具有导热性良好、耐磨性良好并能抗热疲劳;同时需对结晶辊表面进行粗糙处理,

形成一定的纹理,以控制热传导,从而控制凝固过程,实现均匀冷却。另外,考虑到工业化对结晶辊周期和成本的要求,结晶辊需具有可修复性。

本文主要阐述了薄带连铸结晶辊的工业化应用中涉及的镀层和辊面精密加工技术研究情况。

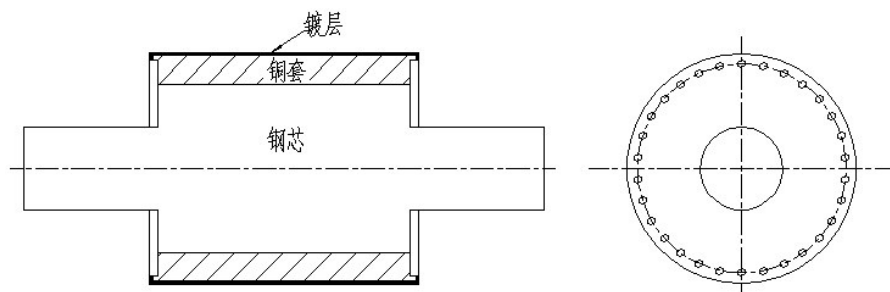


图2 结晶辊结构示意图

Fig.2 Structure diagram of crystallization roller

1 结晶辊电镀及毛化技术

结晶辊镀层一方面可以对结晶辊本体进行保护,减轻浇铸时产生的热应力和机械应力对结晶辊的损伤,另一方面能增加表面耐磨性,保持辊型及表面形貌。在结晶辊使用一定周期后,只需重新修复镀层即可再次上线使用,大大延长了结晶辊的整体寿命,从而降低了薄带连铸生产成本,为工业化应用奠定了基础。

结晶辊的镀层技术大致经历了镀镍、镀铬、镀镍+镀铬等3种技术路线。由于结晶辊辊体总长度达5425 mm,直径达800 mm,重量达8 t左右,因此需要专用的设备进行电镀。

1.1 结晶辊立式旋转镀镍技术

为了保证结晶辊镀层的质量与性能,采用立式旋转槽进行电镀,其设计思路是通过传动装置和支撑承重装置使结晶辊在电镀槽内垂直匀速转动,采用氨基磺酸镀镍体系对结晶辊实施全浸没式电镀。图3为本工厂的立式旋转电镀设备,该设备能保证结晶辊镀层的均匀性,有利于生产高质量结晶辊。

1.2 结晶辊卧式旋转镀铬技术

由于硬铬镀层有优良的物理特性,如其硬度可达1000 HV,其耐磨系数非常低,因此冶金行业有大量的工艺辊需要镀铬处理,为了增加使用寿命一般采用毛化镀铬技术。最早的结晶器铜板修复也是采用镀铬处理,但因为镀铬后结晶器铜板普遍存在裂



(a) 电镀中



(b) 电镀结束

图 3 结晶辊立式旋转镀镍

Fig.3 Vertical rotary nickel plating on crystallization roller

纹,逐渐被镀镍或镍合金取代。

因此在借鉴辊类和结晶器铜板镀铬技术的基础上,为了缓和裂纹情况,结晶辊表面镀铬采用双层铬进行处理。即先在结晶辊表面电镀一层硬度低、无裂纹的乳白铬,再在外层镀一层耐磨损的硬铬,其设计目的是为了缓和裂纹对结晶辊基体的影响。其中

乳白铬的镀层厚度控制在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以内,表面硬铬的厚度控制在 $15\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

图 4 为本工厂结晶辊镀铬的生产实例。镀铬结晶辊经上线后发现其使用寿命较镀镍大幅提高,但下线后发现其表面存在微裂纹,并且裂纹已经扩展至铜基体。



(a) 电镀中



(b) 电镀结束

图 4 结晶辊镀铬

Fig.4 Crystallization roll chromium plating

1.3 结晶辊镀镍+镀铬技术

为了减轻镀铬层对结晶辊基体的损伤,在结晶辊与镀铬层之间增加了镀镍层。为了消除镀镍层对传热的影响,一般控制镀镍层的厚度小于 0.3 mm 。

同时为了增大结晶辊的表面积,对镀镍后的结晶辊进行表面喷丸毛化处理。其主要工艺路线为:结晶辊磨削—镀镍—磨削—喷丸毛化—镀乳白铬—镀硬铬。

图5为结晶辊镀镍+镀铬后的表面形貌,通过Dino-Lite AM3111手持式电子放大镜观察后,可以看出结晶辊表面镀层均匀。经上线试验,发现该结

晶辊使用后与镀镍和镀铬相比,既增加了过钢量,又消除了对结晶辊基体的裂纹损伤。



(a) 宏观



(b) 微观(100×)

图5 镀镍+镀铬的结晶辊

Fig.5 Crystallization roll with nickel and chromium coating

2 结晶辊表面精密加工技术

2.1 辊型加工

结晶辊辊型直接决定了铸带的成形及质量,因此其加工精度要求极高,尤其是辊型及辊面形貌。在工业化的基础上,本文介绍了辊型加工及形貌加工的生产实际。

结晶辊在铸轧的过程中,辊面会产生热变形^[3],如图6所示,辊面产生一定的中凹情况,根据朱光明等^[3]的研究,结晶辊冷态加工时必须做反向辊型,即形成中凸情况。图7为宝钢-宁钢薄带连铸机组所采用的辊型尺寸,从图7可以看出,辊辊局部中凸0.2 mm,并且通过精密磨削加工后,设计辊型曲线与实测辊型曲线基本吻合。

2.2 纹理加工

根据周川^[5]、王成全^[6]等研究表明,结晶辊形貌主要有V形槽、喷丸毛化以及其他复合形貌。对于激光刻痕、电解、刻蚀等制作方法,因加工效率和成本问题,尚不能在工业化生产中使用。

2.2.1 V形槽加工

由于刀片的磨损,通过成形刀车削的方式达不到高精度的槽形^[7],特别是在镀镍层上加工。因此需采用滚压刀加工,其加工方式如图8所示。

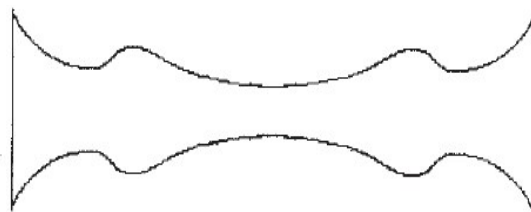
图6 双辊连铸坯截面形状示意图^[4]

Fig.6 Schematic diagram of section shape of double-roll continuous casting billet

通过调整进刀量和机床转速,在表1的滚压工艺参数下,分别在硬度为HV180~220和HV300~400的材料表面进行滚压试验。通过Surftest SJ-210对表面粗糙度进行测量,以Rv评定沟槽深度,结果显示,全辊面四千多条纹理沟槽深度均匀一致,误差小于5 μm。图9为通过Dino-Lite AM3111手持式电子放大镜观察的形貌。

2.2.2 喷丸毛化

结晶辊喷丸毛化技术主要通过喷钢丸毛化在辊面上加工出不连续,随机分布的凹凸形貌。其工作原理为:砂或钢丸等,在以压缩空气为动力的作用下形成高速射流束,使丸粒获得相当的动能,并以高速喷射到需处理的工件表面,使得工件外表面的浅层

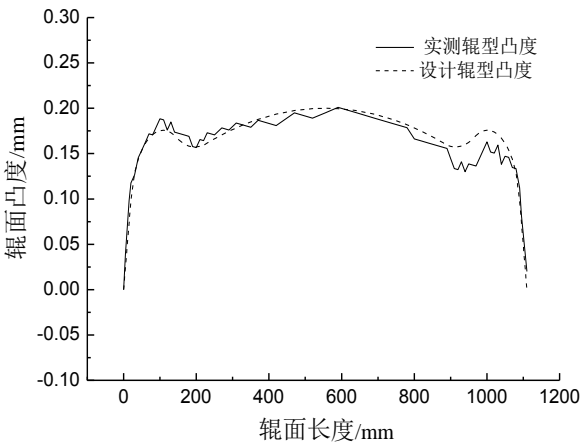


图 7 结晶辊辊型的设计和实测

Fig.7 Design and measurement of crystallization roll shape

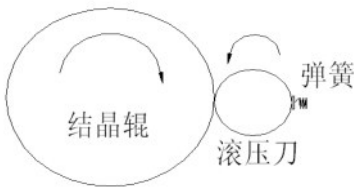


图 8 纹理加工示意图

Fig.8 Schematic diagram of texture processing

表 1 滚压参数

Tab.1 Parameters of roll extrusion

试样	基体硬度/ HV	纹理深度/ μm	X 进刀量/mm	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
			高速钢刀	
1	180~220	30	0.06	50
2	300~340	30	0.09	40

外表发生塑性变形,从而达到毛化工件表面的目的。

表 2 粗糙度数据

Tab.2 Data of roughness

序号	压缩空气压力/ MPa	枪距/mm	工件转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	行走速度/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	粗糙度		
					$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_{pc}/(\text{个}\cdot\text{cm}^{-1})$
1	0.5	700	15	340	5.8	26.0	38
2	0.5	600	15	340	7.0	31.0	35
3	0.5	450	15	220	10.1	52.4	20
4	0.5	400	15	280	9.5	48.2	30



图 9 滚压纹理放大照片(200×)

Fig.9 Texture zoom photos after roll extrusion(200×)

丸粒对工件表面的冲击作用,可使工件表面获得一定的清洁度和不同的粗糙度,同时还可以使工件表面的机械性能得到强化。

国外对薄带连铸结晶辊辊面喷丸的处理方法有很多,如美国专利 U7159641B2^[8]采用喷丸处理的方法对结晶辊表面进行毛化处理,处理成平均直径 0.3 mm,深 10~50 μm 的凹坑。根据周川等^[5]的研究表明,辊面粗糙度增大能提高传热,但是当粗糙度过大,气隙热阻增加反而影响传热。

本节汇总了生产过程中枪距、工件转速和行走速度对表面形貌的影响,并通过粗糙度仪 Surftest SJ-210 对表面粗糙度进行测量,以粗糙度 R_a ,微观不平度高度 R_z 对凹坑形貌的高度进行评价,峰值密度 R_{pc} 对凹坑的分布量进行评价。

通过表 2 分析可以发现,控制不同的枪距和行走速度,粗糙度变化很大,根据宝钢—宁钢薄带连铸传热模型的要求,在生产实际中要严格控制 $R_a=8\sim 10\ \mu\text{m}$, $R_z=50\pm 5\ \mu\text{m}$, $R_{pc}=30\pm 5\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。结晶辊经喷丸毛化后通过 Dino-Lite AM3111 手持式电子放大镜观察其表面形貌,如图 10 可以看出,经过喷丸毛化,辊面的微观形貌均匀一致。

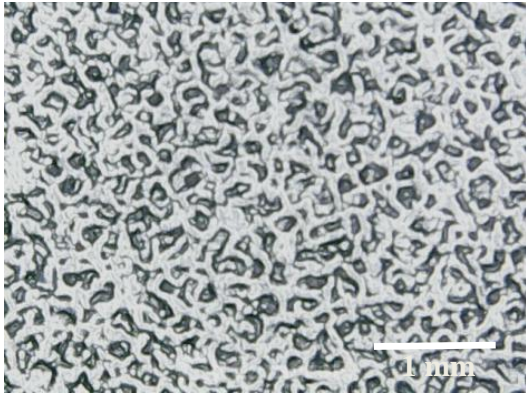


图10 结晶辊喷丸之后的表面形貌 (200×)

Fig.10 Surface morphology of crystallization roll after shot blasting (200×)

3 结论

结晶辊表面处理技术是双辊薄带连铸技术实现产业化成功的关键,本文概括论述了宝钢—宁钢生产线结晶辊工业化生产实际,并在实际工业化生产中得出以下结论:

(1)结晶辊表面需要进行表面处理,否则将严重影响结晶辊的整体寿命,通过工业化试验,应选用镀镍+铬镀层,并需严格控制镀层厚度,该工艺既能保护铜基体又不影响传热效率。

(2)滚压V形槽形貌和喷丸毛化形貌,在实际使用时,均可以获得优良的表面形貌,但因镀层的选型,在生产实际中以喷丸毛化为主。

(3)采用磨削方式可以得到高精度的曲线辊型,为了抵消其工作状态的热变形,在冷态加工时应进行反向加工,即将辊面加工成中凸形式,通过高精度磨削,可以完全制造符合理论要求的辊型。

参考文献

[1] 王定武. 薄钢带连铸技术的新进展[J]. 冶金管理, 2016

(10): 47-49.

Wang D W. New progress in continuous casting technology of thin steel strip[J]. China Steel Focus, 2016(10): 47-49 (in Chinese).

[2] 朱光明, 常征. 双辊薄带连铸结晶辊热变形研究[J]. 铸造技术, 2011(8): 1132-1134.

Zhu G M, Chang Z. Research on hot roller profile in twin roll continuous strip casting[J]. Foundry Technology, 2011(8): 1132-1134 (in Chinese).

[3] 朱光明. 宝钢双辊薄带连铸结晶辊热辊型研究及集成仿真系统开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2006: 1-66.

[4] 方园, 崔健, 于艳, 等. 宝钢薄带连铸技术发展回顾与展望[J]. 宝钢技术, 2009(S1): 83-89.

Fang Y, Cui J, Yu Y, et al. Review and prospect of bao steel's strip casting technology [J]. Baosteel Technology, 2009(S1): 83-89 (in Chinese).

[5] 周川, 于艳, 方园, 等. 薄带连铸结晶辊表面形貌对界面传热的影响[J]. 机械工程材料, 2012(3): 14-17.

Zhou C, Yu Y, Fang Y, et al. Effects of surface texture of strip continuous casting rollers on interfacial heat transfer [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012(3): 14-17 (in Chinese).

[6] 王成全, 于艳, 方园. 薄带连铸结晶辊表面处理形貌研究进展[J]. 世界钢铁, 2013(2): 27-31.

Wang C Q, Yu Y, Fang Y. Evolution of casting roller surface texture research in strip casting process[J]. World Iron & Steel, 2013(2): 27-31 (in Chinese).

[7] Buxmann K, Bolliger M, Ivan G, et al. Mould with roughened surface for casting metals[P]. American, US 4250950, 1981-02-17.

[8] Yamamura H, Hamada N, Izu T, et al. Cooling drum for thin slab continuous casting, processing method and apparatus thereof, and thin slab and continuous casting method thereof[P]. American, US 7159641B2, 2007-01-09.