

轧钢加热炉滑轨综合使用性能的研究与实践

黄细阳^{1,2} 吴春京¹

(北京科技大学)¹ (首钢第一线材厂)²

摘要 以首钢第一线材厂无水冷加热炉的改造设计为背景,对新型无水冷滑轨材质选型和结构设计进行了充分的论述,实践证明了滑轨改进方案的有效性。

关键词 加热炉 滑轨 改进

The Study on the Comprehensive Characteristics of the Slide Rail of Steel Rolling Heating Furnace and Its Application

HUANG Xiyang^{1,2} WU Chunjing¹

(University of Science and Technology Beijing)¹ (Shougang No.1 Wire Rod Plant)²

Abstract Under the background of the transformation design of no-water-cooling heating furnace of Shougang No.1 WireRod Plant, the material selection and structure design of the new type no-water-cooling slide rail is fully studied in this paper. It is proved that the improvement program of the slide rail is successful in the practice.

Key Words heating furnace, slide rail, improvement

目前,加热炉滑轨技术的发展主要体现在2个方面:一方面是采用在炉底管上焊接耐热合金材料结构,并配套对滑轨承托结构进行改进,通过减少炉底管数量,采取将炉底管冷却方式由水冷改为汽化冷却等措施以尽可能降低炉内热量损失,这在当前加热炉中应用较为普遍;另一方面是采用在耐火砖基墙上设置无水冷滑轨结构,即无水冷加热炉。无水冷加热炉取消水冷后具有良好的钢坯加热质量及简洁的加热炉系统配置,加之10%~15%的节能效果,是一种有发展前途的节能环保炉型。无水冷加热炉中的无水冷滑轨材质经历了碳化硅、棕刚玉、锆刚玉和铬刚玉等的发展过程,无水冷滑轨有助于解决坯料加热黑印问题,同时也使加热炉的结构更为简洁,但受材料性能的影响,无水冷滑轨还不能适应现代轧钢企业高强度生产的需要,主要应用于使用断面尺寸为130 mm×130 mm以下坯型的小型轧钢厂,炉底强度在300~400 kg/(m²·h),使用寿命

较短,目前国内只有少数几家轧钢企业还在采用该技术。继续深入开展加热炉全无水冷滑轨技术的研究,彻底解决坯料加热黑印问题,有效提高全无水冷滑轨综合使用性能和适应轧钢企业炉底强度在800~1 000 kg/(m²·h)的生产要求,是推动加热炉滑轨技术水平持续进步的动力。

1 研究内容及研究方案

传统无水冷加热炉滑轨主要由碳化硅、棕刚玉、锆刚玉或铬刚玉等陶瓷滑轨组成,其大多采用烧成或电熔的莫来石和锆刚玉质产品,但烧成的产品气孔多,耐磨性能差;而熔铸产品尽管表面致密、耐磨,但内部缩孔问题无法解决,且均一性差。随着表面致密层的磨损,各项性能急剧下降,寿命锐减^[1]。另外,使用陶瓷滑轨还存在以下问题:一是滑轨的硬度高、耐磨性好,但抗冲击性差、易碎裂,使用周期短;二是陶瓷滑

轨的成本高, 滑轨笨重, 不利于检修。

全无水冷滑轨由金属轨体和耐火材料底座组成。金属轨体与耐火材料底座依靠 1 个固定支柱和 1 个滑动支柱相联接, 金属轨体前后各有 1 个错位接头, 2 个金属轨体通过错位接头搭接而形成连续滑道, 钢坯在滑道上完成运动过程。全无水冷滑轨原材料为 QB408Z。

在一般情况下, 全无水冷滑轨使用半年后进行检修时轨体均存在一定程度烧损或碳化情况, 耐火材料底座也存在不同程度的裂纹。全无水冷滑轨的优点如下:

- 1) 能明显减轻坯料加热黑印。
- 2) 使用寿命高于陶瓷滑轨, 检修施工方便。
- 3) 节能效果明显, 节能率一般为 10% ~ 15%, 综合经济效益较好。

全无水冷滑轨的缺点如下:

- 1) 抗热冲击负荷小, 只能适应断面尺寸为 130 mm × 130 mm 以下坯型。

- 2) 与水冷滑轨相比, 检修周期短、成本高。

对全无水冷滑轨材质分析和滑轨结构分析进行研究的内容如下:

1) 滑轨材质分析。全无水冷滑轨的主要使用温度与滑轨材质性能相匹配, 可以保证加热炉的正常使用周期, 并且可以使滑轨的使用成本控制在最低, 从而实现无水冷加热炉效率和效益的最大化。

2) 滑轨结构分析。耐热钢滑轨与耐火材料底座间相互配合的一致性, 在保证滑轨整体使用寿命的同时, 又要最大限度地降低滑轨对被加热坯料的遮蔽。

全无水冷滑轨研究方案流程如图 1 所示。

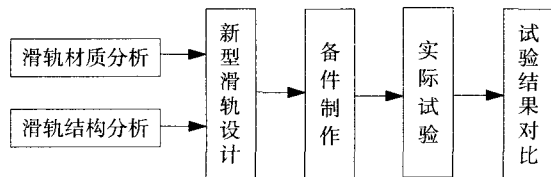


图 1 全无水冷滑轨研究方案流程

试验方案如下:

1) 通过对耐热钢材质的分析、研究, 选用新型 ISW-15 材质制作滑轨, 并将新型 ISW-15 材质滑轨与原 QB408 材质滑轨放入无水冷加热炉均热段中相同工况部位进行对比。

2) 通过对滑轨与耐火材料底座组合结构的完善, 增大滑轨的高温热负荷性能, 验证滑轨从承压厚度由 130 mm 以下增大到 150 mm 的使用稳定性和使用周期。

2 对比研究

2.1 滑轨材质研究

钢与合金在高温下与氧反应, 在表面生成氧化膜。氧化膜最里层与铁接触的部分为 FeO, 由于 FeO 中空位较多, 氧原子易向内扩散与铁离子结合, 因此, 为提高铁的抗氧化性, 首先要防止 FeO 出现, 最好能形成含有合金元素的、结构致密的并与钢件牢固结合的氧化膜^[2], 在铁中加入铬、铝和硅等元素可提高生成 FeO 的温度。

在高温下, 由于耐热材料的破坏主要是晶界优先氧化所造成的, 而加入少量碱土金属或稀土金属后, 晶界优先氧化的现象几乎完全消失, 因而可在钢中加入少量碱土金属或稀土金属, 特别是在高于 1 000 °C 时相当有效。

在高温下, 耐热材料长时间受力必然要发生形变, 因而对耐热材料的基本要求之一是在高温下要有足够的强度 (如持久强度和疲劳强度)。另外, 由于钢件表面与高温空气和高温燃气等接触就可能发生氧化或遭受腐蚀, 因而要求耐热材料在高温下必须具有足够的化学稳定性。

综上所述, 热滑轨材质所需基本性能如下^[3]:

- 1) 抗压强度高、耐磨损和耐腐蚀性能好。
- 2) 抗氧化性和抗硫化性能优良。
- 3) 熔点高, 耐熔渣腐蚀和抗结瘤性能好。

ISW-15 合金钢是 Cr-Ni-W-Mo-Nb 型奥氏体耐热钢, 工作温度可达 1 250 °C 以上, 是耐热钢中有效工作温度最高的合金。为使合金同时具有高熔点、耐熔渣腐蚀和抗结瘤性能, 对合金中各元素的化学成分进行精确设计和控制。合金中碳和铬是形成各类碳化物强化相的关键元素, 但若碳含量较高则将显著降低合金熔点和抗氧化性能, 若铬含量过高则使合金变脆, 并造成显微组织不稳定, 故 ISW-15 合金将碳含量限制在低水平, 将铬含量控制在 20% ~ 25%。为稳定合金的基体相为奥氏体相, 添加的镍和其他稳定元素应满足相应比例关系, 并保持一定含量。添加钨和

钼可使铸态组织的树枝晶干和树枝晶间同时获得足够强化；当钼含量适量时，大部分钼形成在极高温下仍十分稳定的 NbC 相，并以最佳形貌分布在合金内（NbC 相是合金的主要强化相。另一部分钼则以原子形式固溶在枝晶间和晶界上，对合金具有进一步强化作用）。为改善合金高温氧化层的组织和增强氧化膜与合金基体间的粘附力，提高合金高温抗氧化和抗硫化性能，添加适量的稀土元素是必要的，但是合金的性能对稀土元素的含量极为敏感。合金中稀土元素的含量又明显依赖于合金滑轨的制造工艺参数，因此采取有效措施，控制稀土元素在合金中的实际含量对获得性能优良的 ISW-15 滑轨十分重要。

ISW-15 合金的密度为 7.9 g/cm^3 、熔点为 1450°C ，其高温性能见表 1。

表 1 ISW-15 合金的高温性能

温度/ $^\circ\text{C}$	高温拉伸性能		高温压缩强度/ MPa	抗高温氧化性能/%
	$\Sigma b/\text{MPa}$	$\delta/\%$		
800	240	21		
900	180	24		
1 000	120	28	2.0	0.31
1 100	65	34	1.6	0.70
1 200	36	32	0.9	1.52
1 300			0.3	2.30

注：1) Σb 为高温拉伸强度， δ 为断面收缩率。

2) 抗高温氧化性能为动态循环氧化失重。

嵌入式全无水冷却滑轨制作的新型加热炉，综合应用了国内权威钢铁研究机构的耐热钢研制技术，具体内容包括：

- 1) 采用真空中频感应炉冶炼及微合金化手段，极大地提高了合金的洁净度。
- 2) 采用真空熔模精密铸造工艺，使铸件的显微组织特别是强化相的析出得到最佳控制。

2.2 滑轨结构研究

在设计滑轨结构时应充分考虑滑轨的传热和材质 2 方面的因素，并找出滑轨的最佳高度。按截面形状可将滑轨分为矩形半热滑轨和梯形半热滑轨 2 种。从传热和材质的选取角度考虑，应该优先采用梯形半热滑轨^[4]。

新型全无水冷却滑轨结构由轨体和耐火材料底座组成，该结构综合利用了耐热钢和耐火材料的使用性能，并将其合理地结合在一起，最大限度地发挥各自优势，其滑轨结构如图 2 所示。

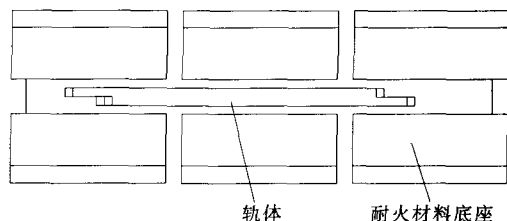


图 2 新型全无水冷却滑轨结构示意图

3 应用结果评估

3.1 生产能力测定

新型全无水冷却滑轨生产能力测定条件如下：

加热炉冷装设计加热能力：70 t/h。

生产条件：坯料尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 5\,800 \text{ mm}$ ，低碳钢，出炉温度为 $1\,150^\circ\text{C}$ ，燃料为重油（低发热值为 $1.68 \times 10^5 \text{ kJ}$ ），压力为 0.3 MPa 。

测试条件：测试对象为加热炉。连续试验 6 h，其中 3 h 在连续稳定生产条件下达到保证额定生产能力即为合格。连续生产测试的 3 h 内因轧线原因耽误的时间不得超过 15 min。因轧线原因引起的故障时间从测试时间中扣除。

利用轧制 $\phi 8 \text{ mm}$ 普碳钢品种时对加热炉的生产能力进行测试。在 3 h 内 252 根钢坯出加热炉，折算重量为 256.54 t、生产能力为 85.51 t/h，达到设计要求，能实现年产线材 60 万 t 扩容改造的总体目标。1 个检修周期后的加热炉炉内工况良好（见图 3）。

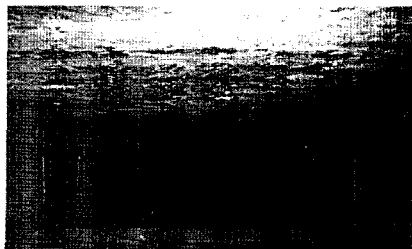


图 3 1 个检修周期后加热炉炉内工况

3.2 加热质量评估

加热质量指钢坯沿长度方向的头尾温差及滑轨的黑印温差的大小。线材加热炉保证指标为头尾温差及滑轨黑印温差均不大于 30°C 。

加热质量评估情况如下：

定义条件：将钢坯与四道无水冷却滑轨接触点相对于其左、右侧距离 200 mm 处的温差分别被

定义为滑轨黑印温差 A, B, C, D 。

测试条件: 测试对象为加热炉。连续试验 6 h, 其中 3 h 在连续稳定生产条件下达到保证额定生产能力即为合格。

在对加热炉进行生产能力测试的同时, 根据 1 号轧机后的温度测点显示对 10 根钢坯进行温差记录, 结果见表 2。

表 2 温差记录

钢坯序号	A	B	C	D	$t_{\text{头}} - t_{\text{尾}}$
1	15	16	12	19	21
2	11	12	16	13	22
3	12	9	11	14	23
4	16	13	12	16	27
5	8	9	10	11	20
6	16	19	13	17	22
7	21	20	19	22	26
8	14	18	15	17	23
9	10	9	11	8	18
10	13	8	10	13	19

注: 1) $A \sim D$ 为钢坯与四道冷滑轨接触点的滑轨黑印温差。

2) $t_{\text{头}}$ 和 $t_{\text{尾}}$ 分别为距离钢坯两端部 200 mm 处的温度。

由表 2 可见, 钢坯沿长度方向的头尾温差及滑轨的黑印温差符合不大于 30 ℃ 的要求。

3.3 滑轨氧化烧损测定

滑轨氧化烧损是加热炉滑轨改进质量的重要检验指标, 加热炉检修时应保证滑轨外观轮廓良好, 无明显烧损。

定义条件: 坯料尺寸为 150 mm × 150 mm × 5 800 mm, 钢种为低碳钢, 装炉温度为室温, 出炉温度为 $(1\ 150 \pm 10)^\circ\text{C}$, 燃料为重油 (低发热值为 40 128 kJ/kg)。

测试条件: 试验前对 4 根滑轨称量, 并将其放入炉中相同工况位置使用 1 个检修周期, 停炉后去除滑轨表面氧化物, 并用同一称量设备进行称量。滑轨氧化烧损率的计算式为:

$$\text{氧化烧损率} = (Q_1 - Q_2) / Q_1 \times 100\%$$

式中 Q_1 ——试验前滑轨重量, kg;

Q_2 ——试验后滑轨重量; kg。

ISW-15 和 QB408Z 滑轨氧化烧损测试结果见表 3。

由表 3 可见, 改进后滑轨氧化烧损率明显减少, 达到了材质强化的要求。

现场使用结果表明, 加热炉原用的 QB408Z

滑轨抗氧化性差, 氧化层成片状剥落, 滑轨两端发生严重烧损熔化, 滑轨上部明显磨损和压缩卷边变形; 而 ISW-15 滑轨抗氧化性优良, 氧化膜组织致密不脱落, 滑轨形状完整, 未发现有任何压缩变形和局部熔化烧损现象。ISW-15 和 QB408Z 滑轨使用结果对比见图 4。

表 3 ISW-15 和 QB408Z 滑轨氧化烧损测试结果

滑轨材质	Q_1/kg	Q_2/kg	氧化烧损率/%
ISW-15	41.20	40.82	0.92
QB408Z	41.20	40.52	1.65



图 4 ISW-15 和 QB408Z 滑轨使用情况对比

4 结 论

1) 通过对比改进前后新型嵌入式全无水冷却滑轨在无水冷却加热炉投产运行后的使用寿命、表面剥落情况和氧化情况, 证明新型全无水冷却滑轨的选材和结构设计合理, 滑轨改进方案有效。

2) 通过对全无水冷却滑轨加热炉的产量和钢坯加热温差等技术指标的综合测试与评定, 改进后的新型全无水冷却滑轨强度满足生产要求, 达到设计目标。

参 考 文 献

- 刘文龙. 浅谈无水冷却滑轨加热炉的应用. 节能技术, 1995 (4): 27-31
- 宋维锡. 金属学 (修订版). 北京: 冶金工业出版社, 1989
- 吴荣荣, 马华政. 高温合金在钢坯加热炉中的应用. 金属学报, 1999 (12): 1 259-1 261
- 冯明杰, 王恩刚, 赫冀成等. 加热炉半热滑轨的数值分析. 工业炉, 2005 (3): 1-3