



# 长寿铜冷却壁的应用和优化

北京首钢股份有限公司、汕头华兴冶金设备股份有限公司

汇报人：陈名炯



# 目录

C O N T E N T S

01 前言

02 长寿铜冷却壁的操作维护

03 铜冷却壁的预防性优化加强

04 结论

# 1、前言

欧洲从上世纪70年代开始在炼铁高炉上研究和使用的铸铁冷却壁、钢冷却壁和铜冷却壁的技术方案。鉴于铜冷却壁的高热导率、抗热震性好、易形成稳定渣皮的优势，我国从2000年开始陆续在大中型高炉使用铜冷却壁，第一座使用国产铜冷却壁的是首钢2号高炉。目前，国内外使用铜冷却壁的高炉已达360多座，沙钢1号2号2500m<sup>3</sup>高炉（部分德国二手铜冷却壁修复+部分华兴新造铜冷却壁）使用寿命超过21年，**首钢股份1号2650m<sup>3</sup>高炉、2号2650m<sup>3</sup>高炉、3号4000m<sup>3</sup>高炉，使用时间分别达到19年、16年、13年**。此外，国内外很多不同炉容的高炉铜冷却壁使用至今已达10~15年，且大多处于稳定运行状态，可见在高炉的炉腹、炉腰和炉身下部区域使用铜冷却壁是延长高炉寿命的有效手段。

当前一些铜冷却壁未达到预期使用寿命，主要问题有炉腹段下底部损坏（铜冷却壁与铸铁壁衔接处）、铜壁热面规律性磨损（绝大部分是炉腹与炉腰交界位置）以及铜冷却壁长期累积热变形等。铜冷却壁发生损坏因素涉及到炉体设计和施工、原燃料条件和操作维护等，业界通过大量使用和研究已经持续对高炉的设计和施工进行针对性改进，而原燃料受制于业主客观条件，本文主要讲述铜冷却壁的操作维护和预防优化加强。

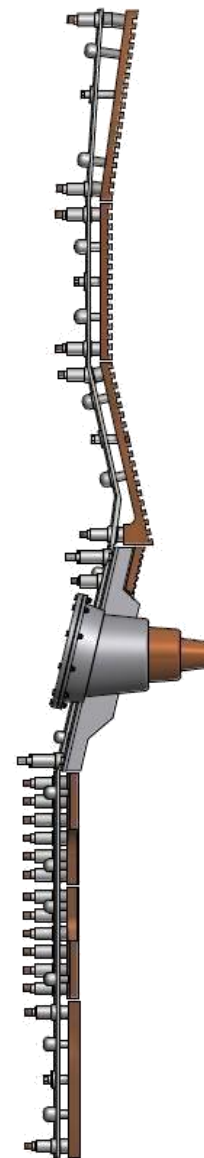


## 2、长寿铜冷却壁的操作维护

北京首钢股份有限公司（以下简称“首钢股份”）通过对1号2650m<sup>3</sup>高炉、2号2650m<sup>3</sup>高炉、3号4000m<sup>3</sup>高炉铜冷却壁的长期生产实践，积累了丰富的操作维护经验，主要包括以下7个方面：

**(1) 进水温度控制。**软水系统的进水温度对高炉冷却系统的正常工作具有重要影响，较低的进水温度有利于强化传热过程，保证铜冷却壁热面控制在安全温度以下，有助于保护性渣皮的稳定形成。同时，较低的冷却水温度还有利于抑制铜冷却壁内的膜态沸腾，控制冷却水中气泡的生产。首钢股份高炉铜冷却壁的进水温度控制在30～35℃。

**(2) 冷却水压力的控制。**软水系统内冷却水的压力升高，冷却水的沸腾温度就相应提高，从而提高冷却水工作温度对沸腾温度的欠热温度。首钢股份1号和2号高炉铜冷却壁供水压力为0.60MPa，供水温度低于35℃，系统的欠热温度达120℃；3号高炉铜冷却壁供水压力为0.75MPa，供水温度低于35℃，系统的欠热温度达130℃。足够的欠热温度，有效抑制了铜冷却壁内水泡的生成和累积。

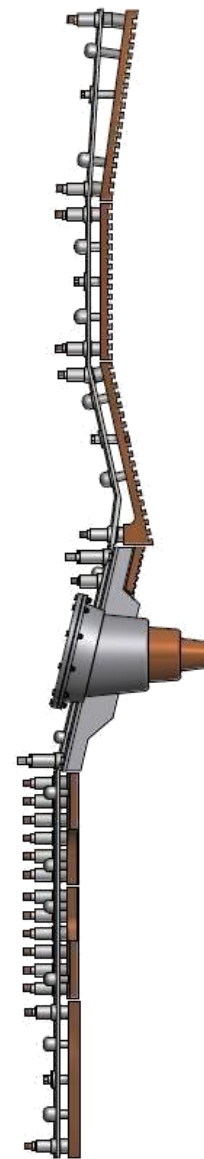




## 2、长寿铜冷却壁的操作维护

**(3) 冷却水量控制。**合理的冷却水量是实现铜冷却壁长寿的重要保障。只有冷却水量配置合理才能保证高炉铜冷却壁具有足够的换热能力，及时将炉内传导的热量充分转移，并将热面温度降低到合理水平，实现铜冷却壁安全稳定工作。首钢股份高炉铜冷却壁实际水速控制2.0m/s以上。

**(4) 边沿煤气流合理分布。**首钢股份高炉通过长期生产实践，逐步摸索形成了适应自身生产条件的装料制度。有别于新日铁、宝钢等大高炉普遍应用的“平台+漏斗”布料模式，首钢股份高炉以“打开中心、稳定边沿”为煤气调整原则，采用中心加焦、降低边沿焦炭负荷等方式，疏导和稳定边沿和中心两条煤气通路，不仅能够适应原燃料质量波动，而且通畅稳定的边缘煤气流还为铜壁热面形成稳定渣皮提供有利条件。



## 2、长寿铜冷却壁的操作维护

**(5) 有害元素控制技术。**理论分析和生产实践均表明，入炉有害元素含量增加，将导致铜冷却壁渣皮不稳定，频繁脱落，影响其使用寿命。首钢股份高炉曾因有害元素严重超标，导致炉喉出现结厚现象，并影响到边缘煤气分布甚至于炉况顺行，为此制定了入炉有害元素控制标准（如表1所示），定期对高炉锌负荷、碱负荷进行检测计算。对于新开发的料种，在进入生产流程配用之前做全分析，特别是新开发的“经济炉料”，重点掌握其有害元素的含量情况，评估和预判其影响程度，并加强配用过程管理。此外，对循环使用的固废资源制定退出流程的技术条件，炼铁干法灰等各种尘灰 $Zn > 2\%$ ，烧结电除尘灰等各种尘灰 $K_2O + Na_2O > 15\%$ 时，严禁返回流程再利用。

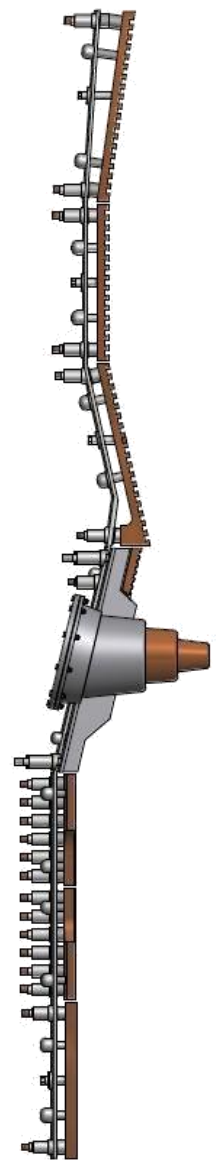


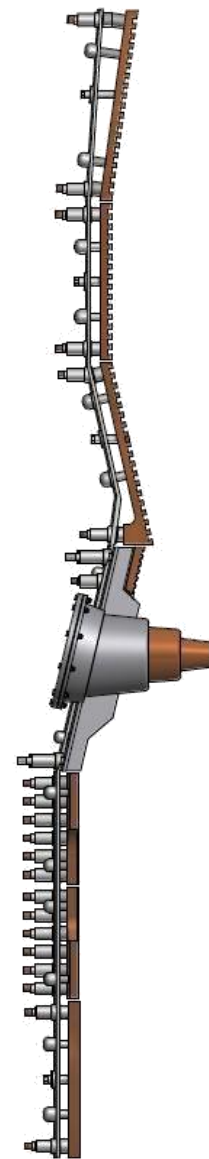
表1 首钢高炉入炉有害元素控制的技术标准及对高炉影响程度

档次	A档/安全	B档/关注	C档/危险
碱负荷 ( $K_2O + Na_2O$ ) , kg/t HM	$\leq 2.5$	2.5-4.5	$> 4.5$
锌负荷 (Zn) , g/t HM	$\leq 150$	150-350	$> 350$
铅负荷 (Pb) , g/t HM	$\leq 150$	150-250	$> 250$
对高炉危害程度	较小	较大	较大

## 2、长寿铜冷却壁的操作维护

**(6) 停送风期间水量调节。** 首钢股份高炉中长期停送风期间，为了保证铜冷却壁安全的同时，避免炉墙因冷却强度过高而出现过度粘结，影响高炉后期送风恢复，规定高炉24h停风或4天以内焖炉期间，2h后软水流量降至正常水量的25%-30%。送风之后，视铜冷却壁温度逐步恢复水量，目标是将铜冷却壁温度控制在100℃以内，每次提高水量以500m<sup>3</sup>/h为一个台阶。生产实践表明，上述操作制度达到预期效果，既保证铜冷却壁安全的操作，又有利于高炉恢复送风。

**(7) 降料面停炉过程的操作维护。** 高炉降料面停炉过程是对铜冷却壁的重大考验，在这期间炉内煤气紊乱，各部位温度变化剧烈。首钢股份高炉在多次降料面停炉实践中，总结归纳出铜冷却壁在降料面期间的温度变化规律，基于对降料面期间壁体温度变化规律的认识，精确控制降料面过程的风量水平，杜绝了炉内爆震，减轻了降料面过程对铜冷却壁的影响。此外，降料面期间铜冷却壁冷却水流量要求调至最高水平，在降料面期间密切注意铜冷却壁壁体温度，通过风量控制壁体温度不出现大面积超过150℃。





## 2、长寿铜冷却壁的操作维护

首钢股份长期生产实践表明，只要高炉操作维护措施得当，即使在炉内条件恶劣的降料面状态，也能保证铜冷却壁的安全可靠。首钢股份高炉铜冷却壁在十几年使用后基本完好，虽然检查发现铜壁热面筋肋有少量磨损，但未出现大面积磨损和变形现象，未发生损坏漏水现象，整体形貌较为完好。

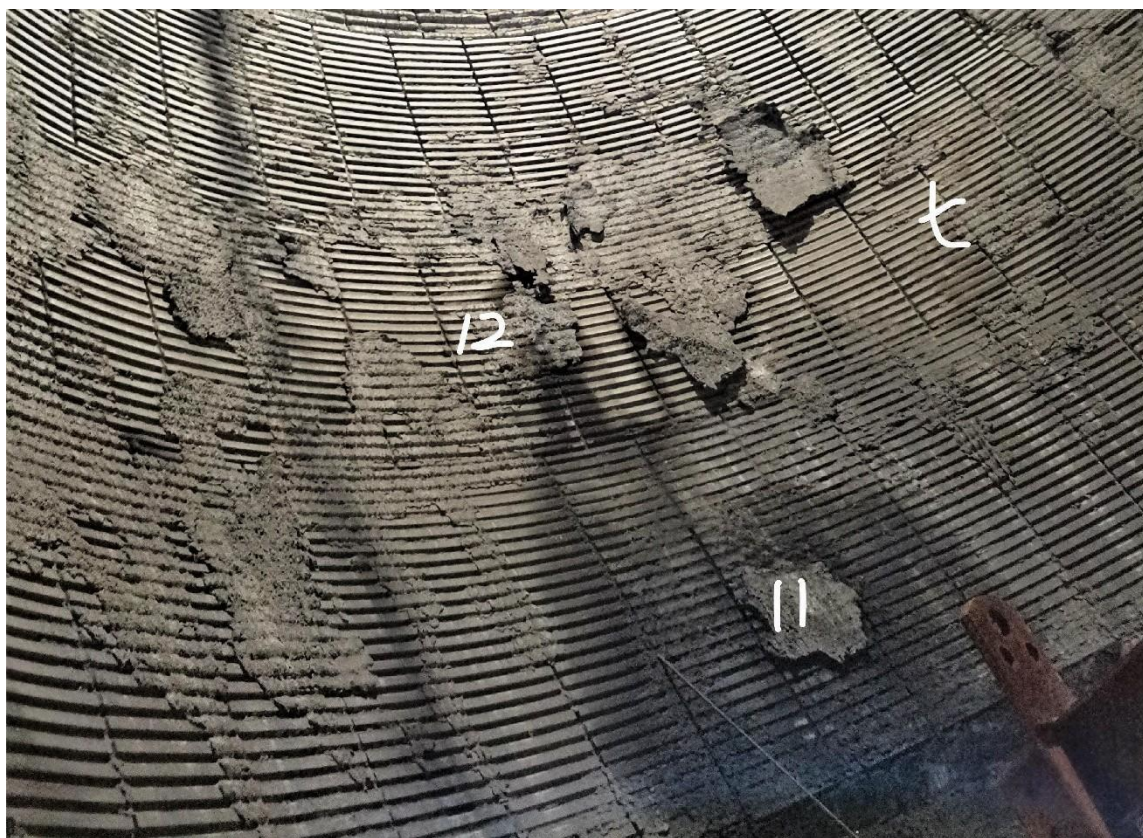


图1：首迁2号高炉铜壁（使用16年，拍摄2020年）

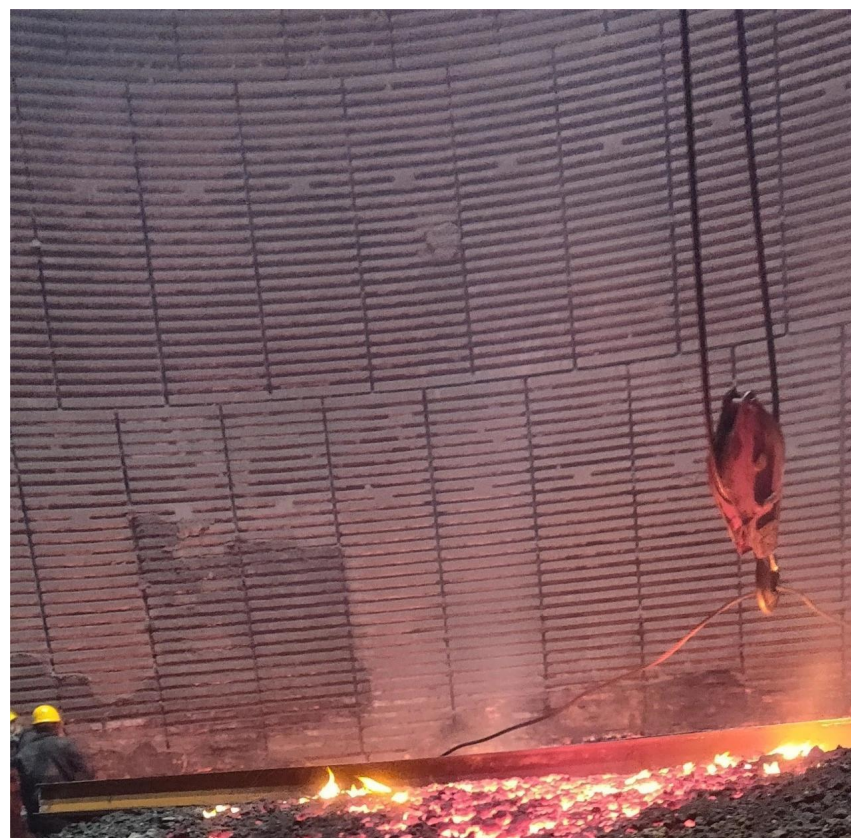


图2：首迁3号高炉铜壁（使用13年，拍摄2021年）

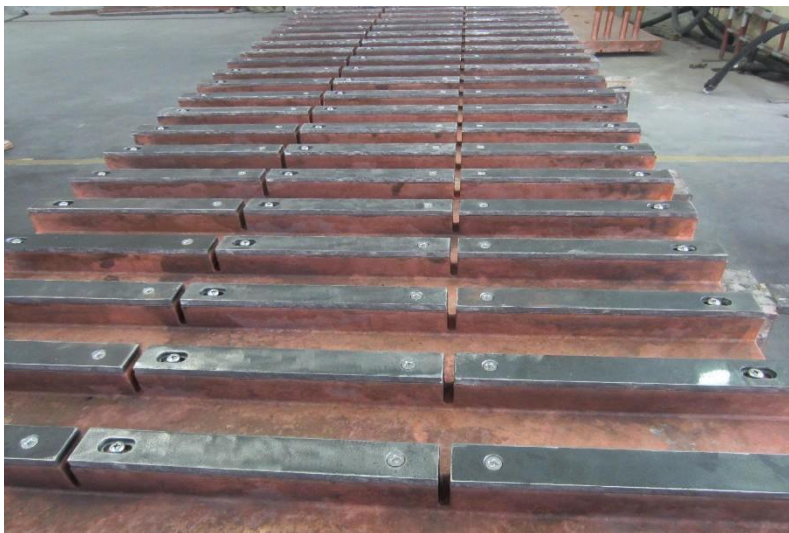


### 3、铜冷却壁的预防性优化加强

针对部分高炉铜冷却壁在长期使用后出现热面磨损和累积热变形的问题，除了应从高炉设计、铜冷却壁安装施工、日常操作和操作维护等进行优化外，也要从预防的角度出发，对铜冷却壁的结构进行优化设计，进一步延长其使用寿命，具体从以下两个方面进行优化预防加强：

#### (1) 热面镶嵌钢砖增强耐磨和强化挂渣。

铜冷却壁在热面耐火材料被侵蚀完后，主要是依靠形成稳定的渣皮来进行保护，减少炉料和煤气流的热冲击和机械磨损，因此进一步提高铜冷却壁的耐磨性和强化挂渣能力就显得尤为重要。目前，国内外对铜冷却壁热面结构的强化耐磨有几种常见结构形式：



第1种：在燕尾槽的槽肋**安装耐磨钢板**，用螺栓固定，增强耐磨



第2种：在燕尾槽的槽肋或槽底**安装抓钉**，强化挂渣，避免渣皮频繁脱落

### 3、铜冷却壁的预防性优化加强

#### (1) 热面镶嵌钢砖增强耐磨和强化挂渣。

国内外对铜冷却壁热面结构的强化耐磨有几种常见结构形式：第1-4种安装耐磨钢板或爪钉的结构**虽然对铜冷却壁的耐磨性和挂渣能力有所改进，但各自仍存在较为明显的短板。**



第3种：在槽肋同时**安装耐磨钢板和抓钉**，  
兼顾两者优点



第4种：在燕尾槽内**预装折弯成型的燕尾形状钢块**，并用耐火泥浆结合

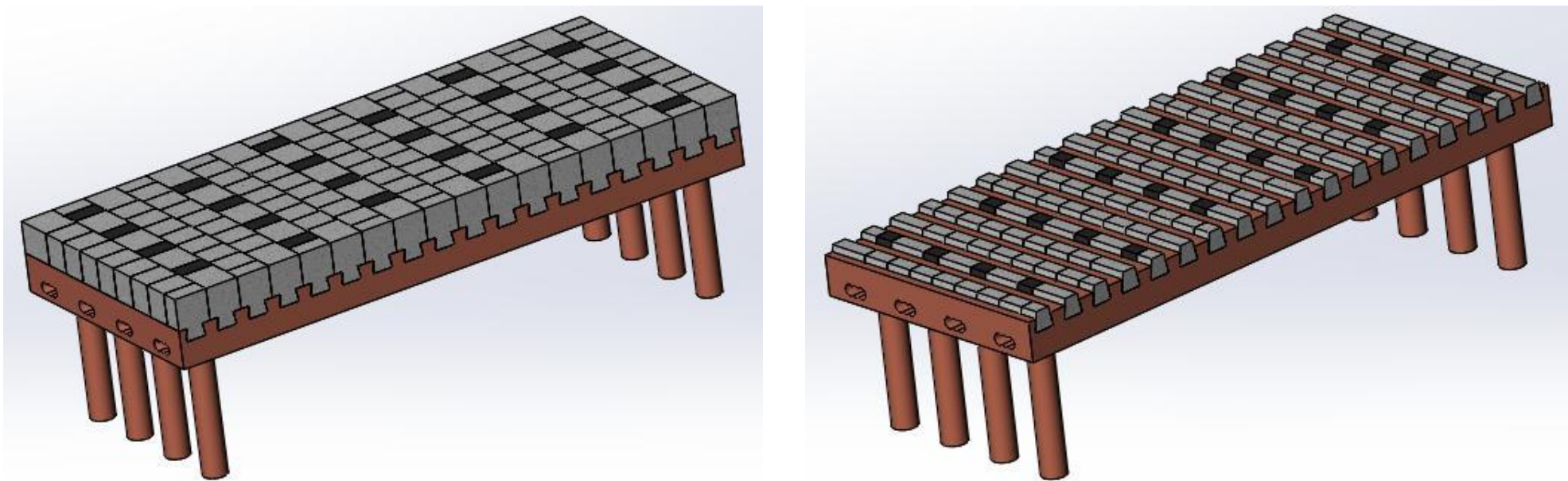


### 3、铜冷却壁的预防性优化加强

第5种结构形式（图7-图8）的钢砖材质可以是碳钢、铸铁或其他钢材，钢砖超出冷却壁热面的高度可以跟耐火砖的高度对齐（例如100-150mm），也可以根据渣皮的厚度设计（30-60mm），形式不限。

钢砖（材质可以根据不同部位需要设计）的主要优势在于：① 钢砖导热性远高于常规耐火砖（接近3倍）；② 钢砖的韧性和耐压强度远高于常规耐火砖，不易开裂；③ 钢砖硬度高于铜本体（约5倍），耐磨性能更优；④ 钢材质更加亲和铁水，容易形成稳定的渣皮层保护，同时有利于分割渣皮成小块，不易大面积脱落。

因此，在铜冷却壁热面**镶嵌钢砖对铜冷却壁本体冷却和镶砖的影响最小，制造简单，使用寿命更长。**



第5种：在燕尾槽内**镶嵌钢砖**，钢砖交叉散布于耐火砖之中（全覆盖或半覆盖）



### 3、铜冷却壁的预防性优化加强

目前，热面镶嵌钢砖已经应用于国内多座高炉。

高炉名称	使用部位	镶砖方式	露出热面高度
沙钢东区2500m³高炉	炉腹、炉腰、炉身下部	半覆盖钢砖	60mm
沙钢1号2500m³高炉	炉腹、炉腰、炉身下部	半覆盖钢砖	60mm
沙钢2号2500m³高炉	炉腹、炉腰、炉身下部	半覆盖钢砖	60mm
沙钢3号2500m³高炉	炉腹、炉腰、炉身下部	半覆盖钢砖	60mm
安阳1号2000m³高炉	炉腹	全覆盖钢砖	100mm
吉林建龙1号1800m³高炉	炉身下部	全覆盖钢砖	100mm
吉林建龙2号1800m³高炉	炉身下部	全覆盖钢砖	100mm
华西特钢2300m³高炉	炉腹	全覆盖钢砖	100mm
武钢6号3200m³高炉	炉腰、炉身下部	全覆盖钢砖	150mm
武钢8号3200m³高炉	炉腰	全覆盖钢砖	50mm
首钢京唐2号5500m³高炉	炉腰、炉身下部	半覆盖钢砖	60mm



图9：沙钢2500高炉



图10：吉林建龙2号高炉

### 3、铜冷却壁的预防性优化加强

#### (2) 本体加强结构增强抗变形能力。

铜冷却壁在长期使用中的累积热变形主要是高度方向的变形，当铜冷却壁与炉壳之间的耐材保持时，铜冷却壁变形为向炉内延伸，呈现“弓”形，变形较大位置为铜冷却壁上下两排固定螺栓外侧部位（如图11），造成这个部位变形较大的因素主要是由铜冷却壁安装结构所决定（如图12）。铜冷却壁的安装结构基本上为中部一个或两个定位销作为固定点，上下部各2个共4个螺栓滑动点，由于铜冷却壁在使用过程中的应力集中部位在上下两排固定螺栓约束位置，水管部位虽然安装有波纹补偿器并固定在炉壳上，但波纹补偿器主要作用是吸收变形，即水管部位为弹性约束，在长期热应力作用下，造成铜冷却壁上下水管部位变形较大。

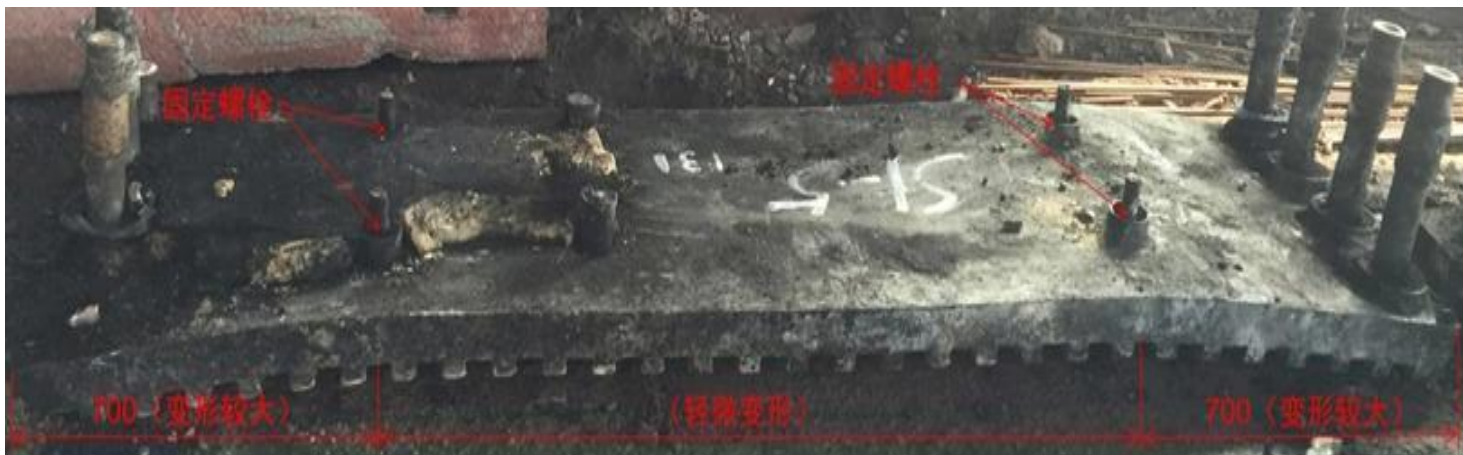


图11：铜冷却壁的累计热变形

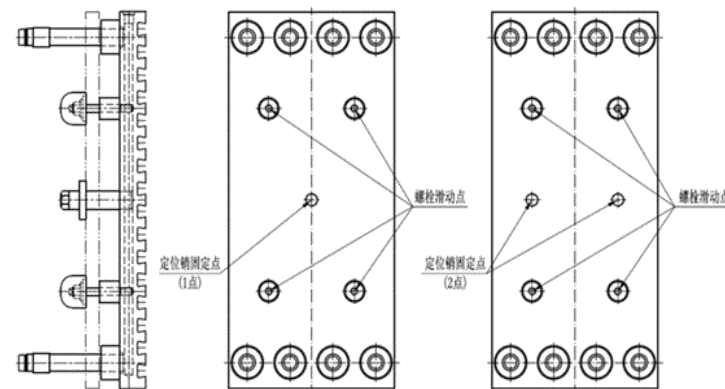


图12：铜冷却壁的典型安装结构

### 3、铜冷却壁的预防性优化加强

#### (2) 本体加强结构增强抗变形能力。

由于变形无法消除，只能通过约束减小变形或使变形更均匀，因此铜冷却壁预防变形的优化设计主要从以下两个方面考虑：

一是螺栓位置的设置应尽量靠近铜冷却壁两端（距离上下端面300-400mm），中间有定位销的约束，如个别铜冷却壁的长度较长，应适当增加约束点。

二是针对铜冷却壁本体的强度相对较低，采用钢条进行加强。具体实施是在本体冷面的水道中间加工纵向凹槽，冷面凹槽里安装**纵向加强钢条**，钢条通过螺栓和焊接与本体紧固成整体（如图13），其他结构设计 with 常规铜冷却壁保持相同。

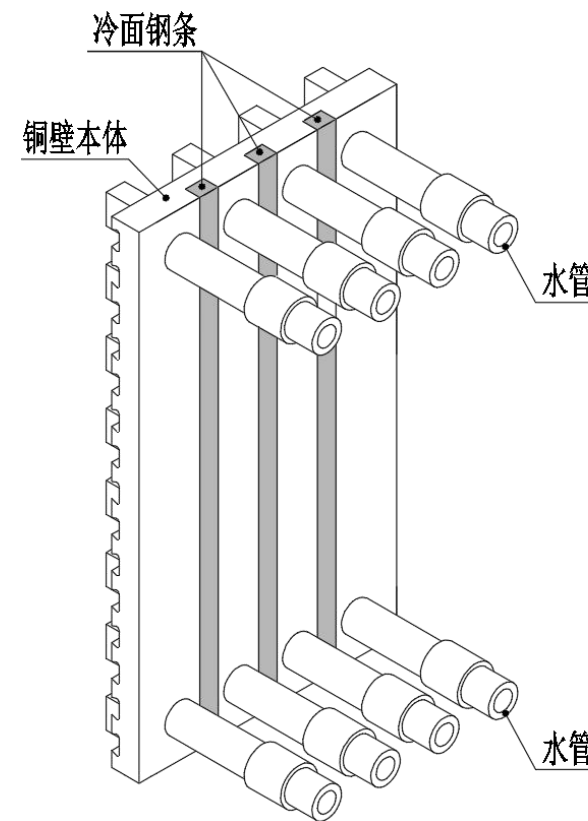


图13：铜冷却壁的加强结构



### 3、铜冷却壁的预防性优化加强

#### (2) 本体加强结构增强抗变形能力。

加强型铜冷却壁通过冷面凹槽中的钢条与本体形成强化整体，大幅提高本体强度减小变形，特别是上下两排固定螺栓外侧部位，加强钢条已延伸到这一部位，有效约束该位置的变形，加强型铜冷却壁的安全系数是常规铜冷却壁的1.74倍（针对常规铜冷却壁和加强型铜冷却壁两种不同结构的力学仿真模拟，在相同的边界条件和受力情况下进行对比），最重要的是加强型铜冷却壁的冷却强度保持不变。目前，**加强型铜冷却壁已经在广西盛隆、首钢京唐、酒钢及国外部分高炉中应用。**



## 4、结语

(1) 通过首钢股份三座高炉生产实践采用水温、水量、水压、有害元素和边沿煤气流等操作措施，并对中长期停送风期间以及降料面停炉过程等特殊时段进行专门维护，有效保障了铜冷却壁长期稳定安全顺行，三座高炉的各项经济技术指标保持在国内领先水平。

(2) 铜冷却壁通过采用热面镶嵌钢砖、本体加强等预防优化设计，能够大幅度提高铜冷却壁的耐磨性、挂渣性能和抗变形能力，有效应对异常工况条件下使用。

(3) 以上表明，高炉铜冷却壁只要设计合理、使用维护得当，铜冷却壁完全能够在保障高炉高水平稳定顺行的基础上达到一代炉役以上的长寿目标。





**感谢您的聆听，期待与您  
真诚合作！**

