



# 铜冷却壁的应用和优化

- 汕头华兴冶金设备股份有限公司
- 首钢水城钢铁（集团）有限责任公司



# CONTENT

## 目录

1 铜冷却壁的应用概况

3 铜冷却壁的优化设计

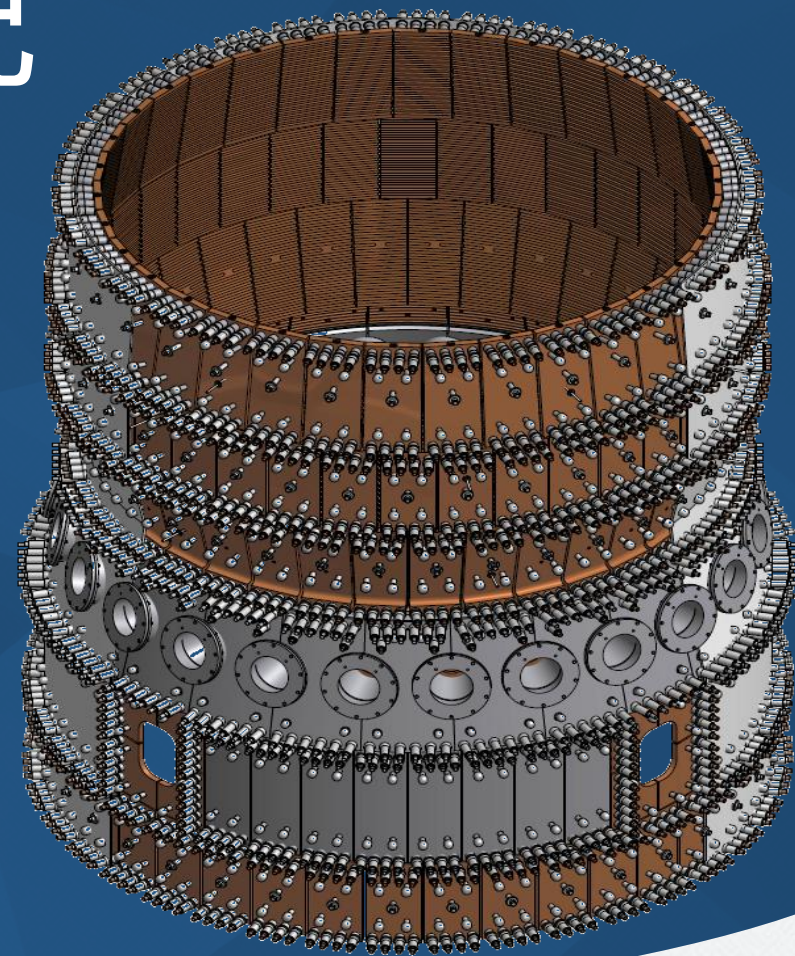
2 铜冷却壁的损坏分析

4 企业简介





# 1 铜冷却壁的应用概况





## 1.1 铜冷却壁的应用概述

- 上世纪70年代欧洲开始研究和使用的铜冷却壁，至90年代末，全球已有近60座高炉使用了铜冷却壁，国产铜冷却壁开始批量应用始于2001年，目前，国内外使用铜冷却壁的高炉超过400座（绝大部分为铜板钻孔工艺）。
- 目前，国内铜冷却壁使用寿命最长的为沙钢1号和2号2500m<sup>3</sup>高炉，两座高炉引进部分德国二手铜冷却壁进行修复并配套部分华兴新制造国产铜冷却壁同时使用，二手进口铜冷却壁已使用22年（含引进前使用时间），华兴新制造国产铜冷却壁也已使用17年，到目前为止尚无损坏。
- 很多不同炉容的高炉炉体铜冷却壁投产至今已达10~15年，都是零水道损坏继续服役中，国内外大量不同级别高炉长期生产实践证明，在高炉炉腹、炉腰和炉身下部使用铜冷却壁是延长高炉寿命的有效手段。当然，也有部分高炉由于综合原因导致铜冷却壁未达到预期使用寿命就出现损坏。



## 1.2 铜板钻孔冷却壁的应用案例



表1 部分不同级别高炉铜冷却壁使用案例

序号	高炉名称	开炉时间	使用时长	使用情况	目前状态
1	水钢3#高炉 ( 1350m <sup>3</sup> )	2004年9月	16年9个月	零水道损坏	继续服役中
2	水钢4#高炉 ( 2500m <sup>3</sup> )	2011年3月	10年3个月	零水道损坏	继续服役中
2	太钢3#高炉 ( 1800m <sup>3</sup> )	2007年7月	14年0个月	零水道损坏	继续服役中
3	首钢迁安1#高炉 ( 2650m <sup>3</sup> )	2004年10月	16年8个月	零水道损坏	继续服役中
4	首钢迁安2#高炉 ( 2650m <sup>3</sup> )	2007年1月	14年5个月	零水道损坏	继续服役中
5	首钢迁安3#高炉 ( 4000m <sup>3</sup> )	2010年1月	11年5个月	零水道损坏	继续服役中
6	武钢5#高炉 ( 3200m <sup>3</sup> )	2007年5月	13年3个月	零水道损坏	继续服役中
7	重钢1#高炉 ( 2500m <sup>3</sup> )	2010年10月	10年8个月	零水道损坏	继续服役中
8	重钢2#高炉 ( 2500m <sup>3</sup> )	2009年12月	11年6个月	零水道损坏	继续服役中



## 1.2 铜板钻孔冷却壁的应用案例

首钢水钢3#高炉检修 铜冷却壁（使用12年，图1-2）



图1



图2





## 1.2 铜板钻孔冷却壁的应用案例

首钢迁安3#高炉检修 铜冷却壁（使用10年，图3-4）

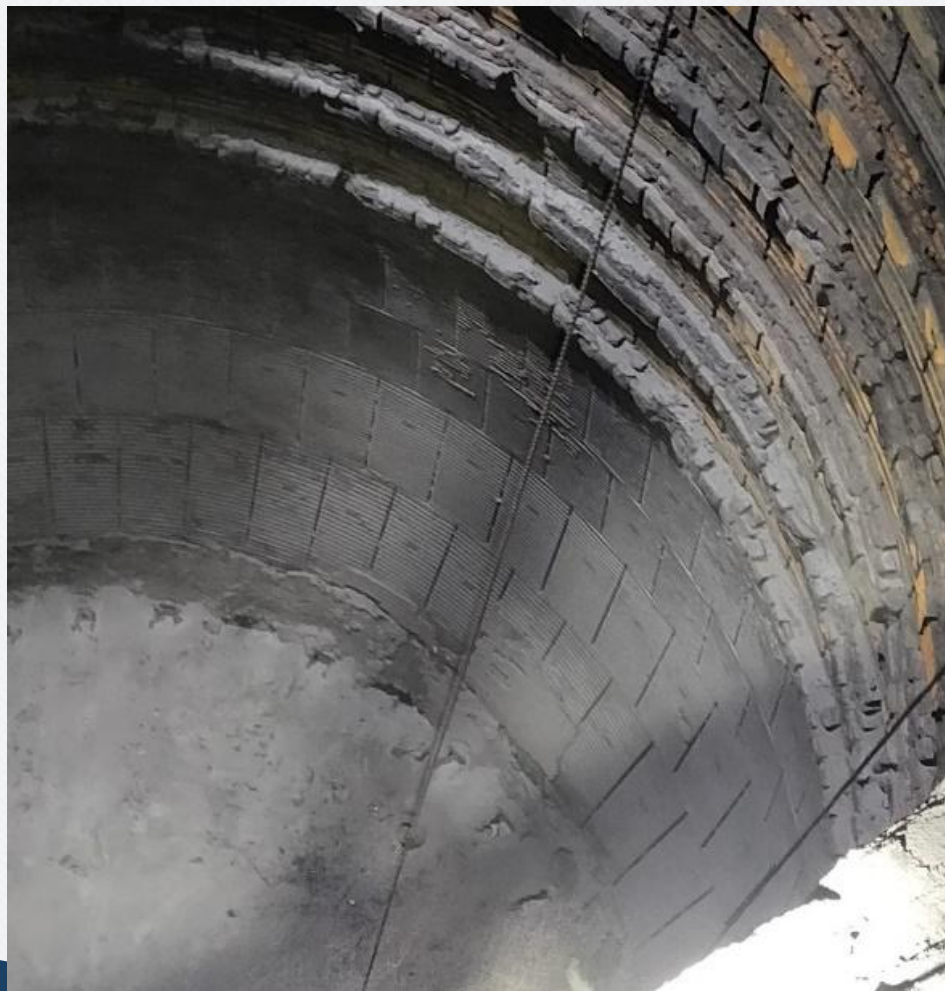


图3



图4





### 1.3 埋管铸造冷却壁的应用案例

- 理论分析埋入铜管与本体达到冶金结合，冷却效果模拟分析跟铜板冷却壁没区别。
- 实际使用不到半年就因冷却强度严重不足而烧损，埋入铜管与本体完全脱离。
- 某2580m<sup>3</sup>高炉2011年使用埋管铸造铜冷却壁损坏图片。



图5



图6

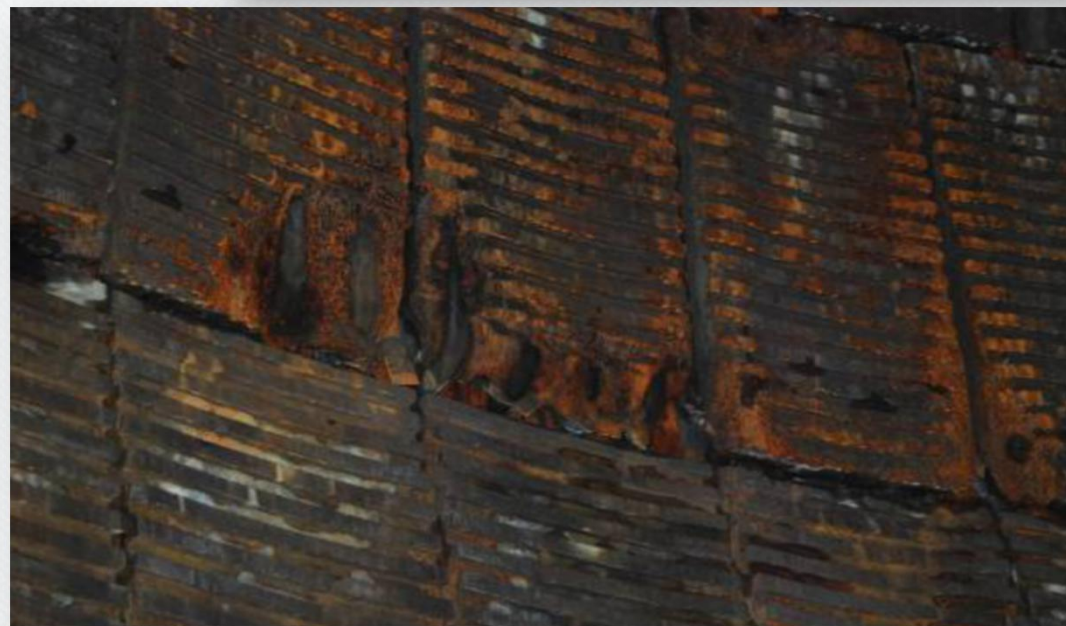


图7





# 2 铜冷却壁的损坏分析





## 2.1 铜冷却壁的损坏部位

部分高炉铜冷却壁由于综合原因，使用未达到预期寿命就出现损坏，其损坏的部位主要有：

- **水管漏水或断裂**

（水管硬连接、安装不当导致水管受到剪切、管壁太薄、焊接质量不好，见图8-9）

- **本体变形**

（影响变形的主要因素有材料、长度和厚度、产品和安装结构）

- **热面磨损**

（最常见的损坏形式，并且具有明显的区域性，不管是传统全铜冷却壁还是现有铜钢复合冷却壁，都存在同样的问题，见图10-12）



图8

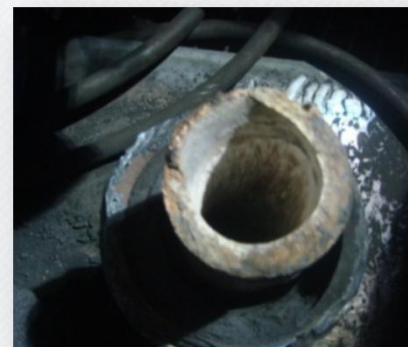


图9



图10



图11



图12



## 2.2 铜冷却壁损坏的主要原因

各高炉造成铜冷却壁损坏的原因不尽相同，可能只是某一个因素造成，也可能多个因素共同或互相影响造成。对此，部分专家及学者的原因分析有：

### 白国成等

- 大量耐火材料进入波纹管导致波纹管失效和水管受到炉壳剪切是造成铜冷却壁水管漏水或开裂的主要因素之一。

### 卢正东等

- 炉缸风口带铸铁冷却壁和炉腹铜冷却壁的衔接结构不合理，当炉役末期炉衬减薄后，高温煤气流容易从衔接部位窜入铜冷却壁冷面烧坏水管，并造成铜冷却壁损坏。

### 朱正林

- 采用开式工业水进行冷却，水道结垢很严重，厚度达1~3mm，造成冷却强度严重不足，铜冷却壁设计长度过长，共同造成铜冷却壁变形严重、水管开裂和热面损坏。



## 2.2 铜冷却壁损坏的主要原因

各高炉造成铜冷却壁损坏的原因不尽相同，可能只是某一个因素造成，也可能多个因素共同或互相影响造成。对此，部分专家及学者的原因分析有：

### 邓勇等

- 不合理炉型尺寸、冶炼强度与原燃料条件不相适应、**过度发展边沿气流**导致渣皮频繁脱落，是造成铜冷却壁热面机械磨损的主因。

### 朱仁良等

- 炉腹铜冷却壁，操作上如果长期保持中心气流过强，**软熔带根部过低**，铜冷却壁长期处于干区，易导致该区域铜冷却壁不耐冲刷磨损。

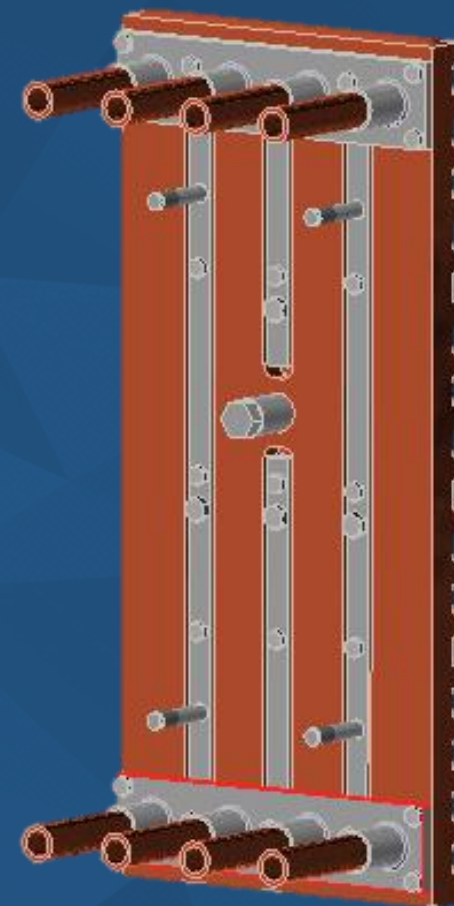
### 焦克新等

- **炉料**在下降过程中，发生物理化学反应，体积逐渐**膨胀**，产生较大的**炉墙压应力**，造成渣皮脱落和铜冷却壁磨损。





# 3 铜冷却壁优化设计



### 3 铜冷却壁的优化设计

针对铜冷却壁的上述问题，除了应从高炉设计、安装、操作维护等进行相应优化外，重要的是从预防角度出发，也须同步对铜冷却壁的进行优化设计，使铜冷却壁达到预期使用寿命。

#### 3.1 螺栓优化——安装结构

- 铜冷却壁的安装结构基本上为中部1个或2个定位销作为固定点，上下部共4个螺栓作为滑动点结构（见图13），螺栓安装结构有双垫片和单垫片两种，设计结构已经考虑到铜冷却壁在使用过程中的热胀滑动需要。

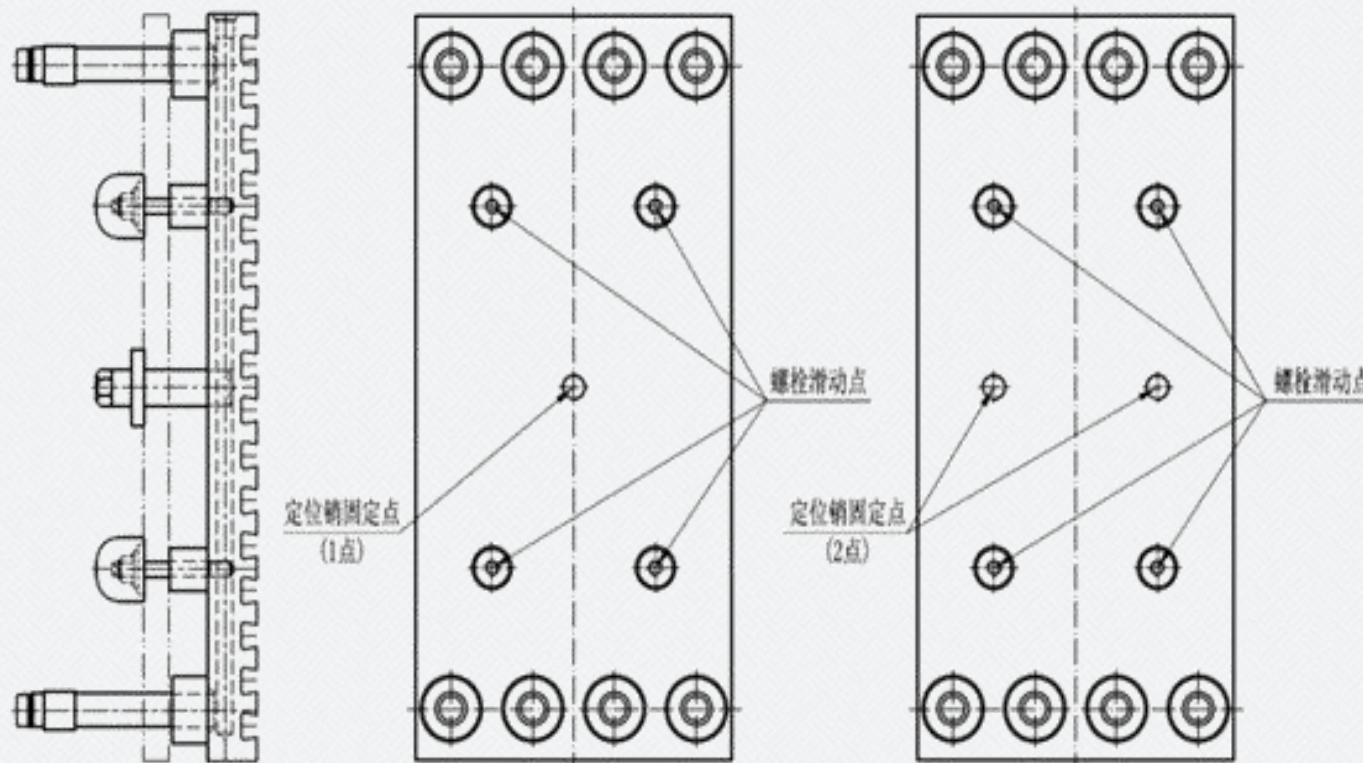


图13 铜冷却壁典型安装结构





### 3.1 螺栓优化——安装结构

- 由于一些设计或施工单位没有正确理解铜冷却壁安装结构，现场安装时把螺栓垫片全部焊死，限制了铜冷却壁在热胀时的滑动空间。正确的安装方式是：

螺栓**双垫片**结构：螺栓平垫片与螺栓斜垫片之间**不焊接**（如图14）；

螺栓**单垫片**结构：螺栓垫片与炉壳之间**不焊接**（如图15）；

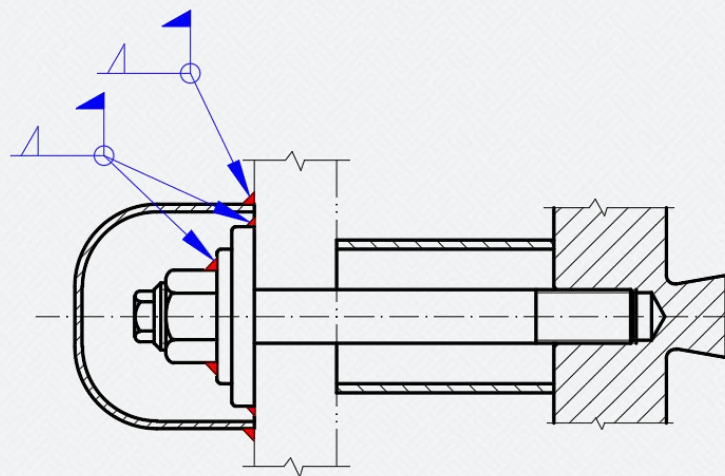


图14 螺栓**双垫片**结构

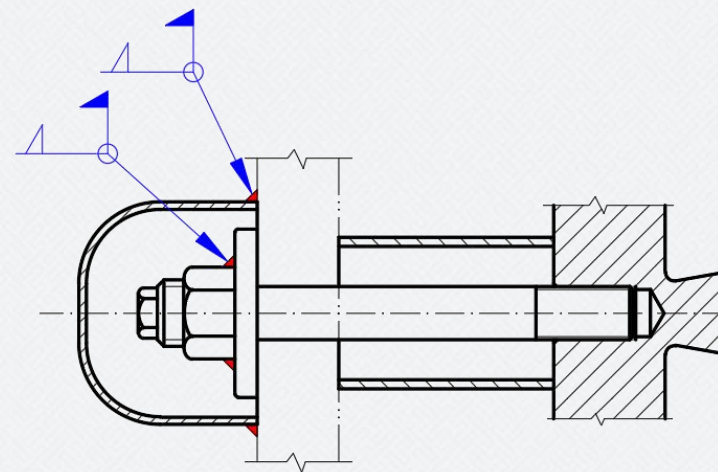


图15 螺栓**单垫片**结构





## 3.2 螺栓优化——约束位置

- 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，变形为向炉内延伸。
- 个别铜冷却壁项目变形较大，呈现“弓”形，主要是铜冷却壁固定螺栓位置不当所造成，即上下两排固定螺栓位置太过远离铜冷却壁两端，如图16。
- 图17 力学仿真也明显看出，铜冷却壁热面受力变形时，螺栓约束位置应力集中，由于受到螺栓的约束，上下两排螺栓之间部位几乎没有变形，螺栓外侧两端变形严重。
- 因此，螺栓位置应尽可能靠近铜冷却壁两端（中部有定位销的约束），建议螺栓和铜冷却壁上下端面的距离控制在300~400mm，如图18。个别铜冷却壁相对较长，应适当增加约束点。

图16  
固定螺栓位置不合理

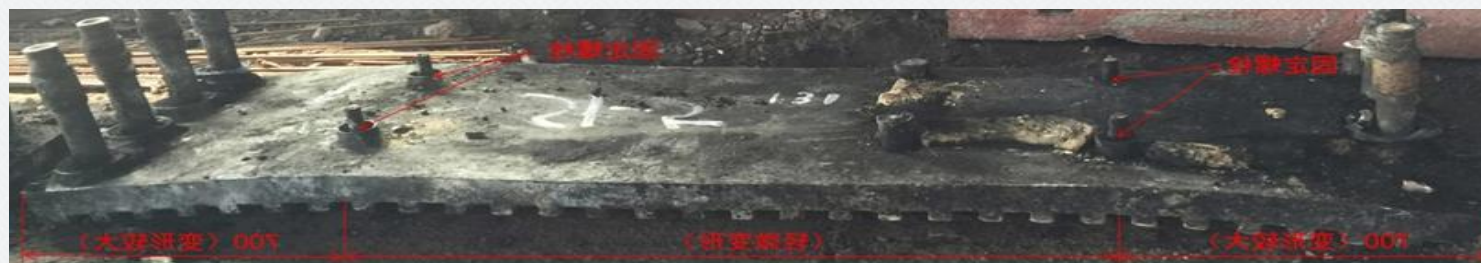


图18  
固定螺栓位置合理

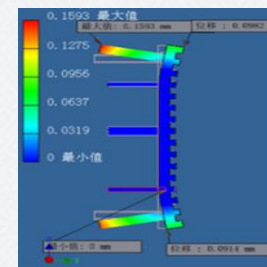
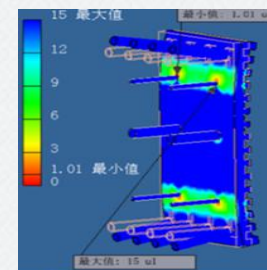
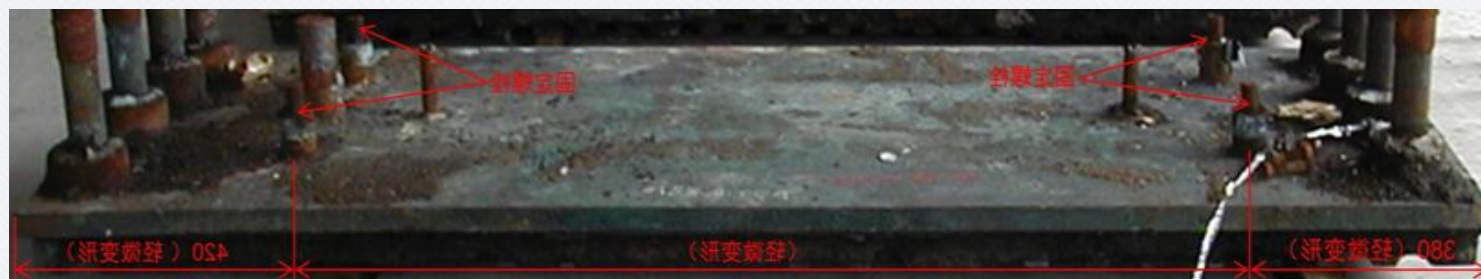


图17 力学仿真



### 3.3 水管部位密封改进

- 铜冷却壁水管炉壳开孔的密封结构为采用水管护套压紧橡胶垫圈起到密封作用（见图19）。
- 部分项目在压力灌浆时，由于密封不好，灌浆料流进水管护套和波纹管内部，导致波纹管失效和水管没有热胀空间（见图20-21），优化设计见图22-23。

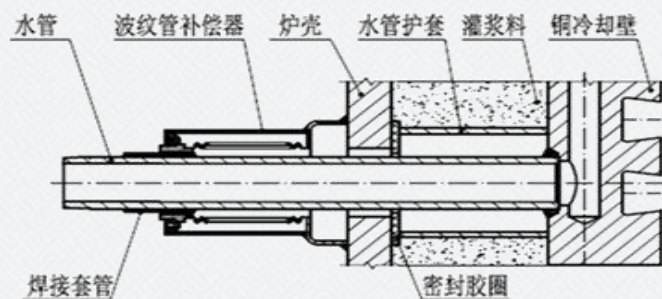


图19 设计结构

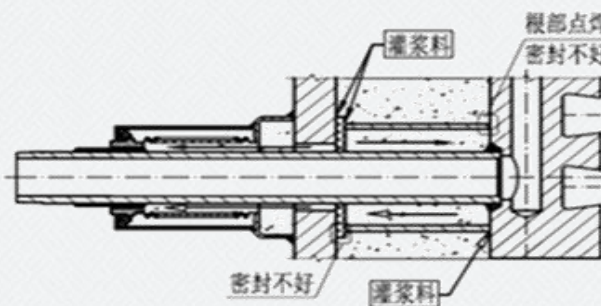
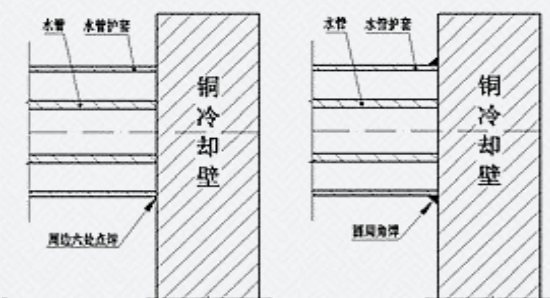


图20 密封异常结构



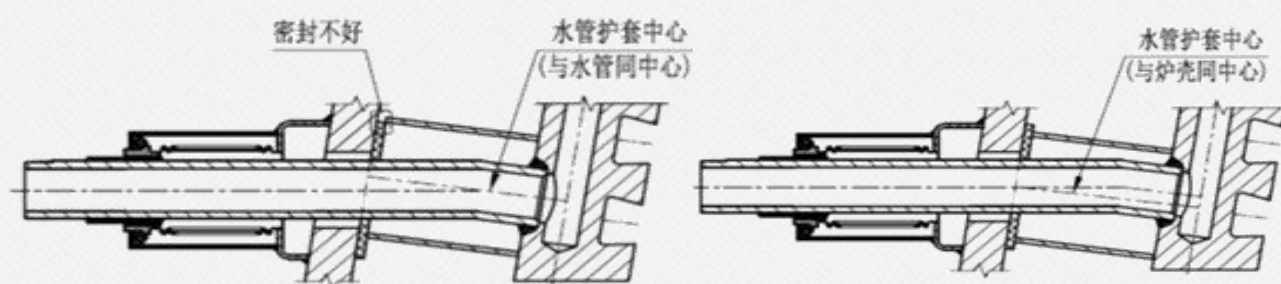
图21 密封异常案例



a)点焊

b)满焊

图22 水管护套焊接方式对比



a)常规结构

b)优化结构

图23 水管护套中心位置对比



### 3.4 水管结构优化

- 铜冷却壁水管一般采用 $\phi 75 \times 10$ 或 $\phi 80 \times 10$ 拉制铜管，大部分项目炉腹或炉身铜冷却壁水管设计为根部垂直铜冷却壁本体、另一边保持水平伸出炉壳，即水管采用弯管实现。
- 虽然铜冷却壁的水管为铜管，其塑性远胜钢管，但弯管时依然不可避免一侧拉伸使管壁变薄而降低强度，并且弯管部位可能存在弯管工艺缺陷，在长期使用过程受到热应力、甚至炉壳的固定约束而成为整根水管的薄弱位置。
- 为此，设计优化为**不采用弯管**，改为**直插**结构以排除质量风险（见图24）。

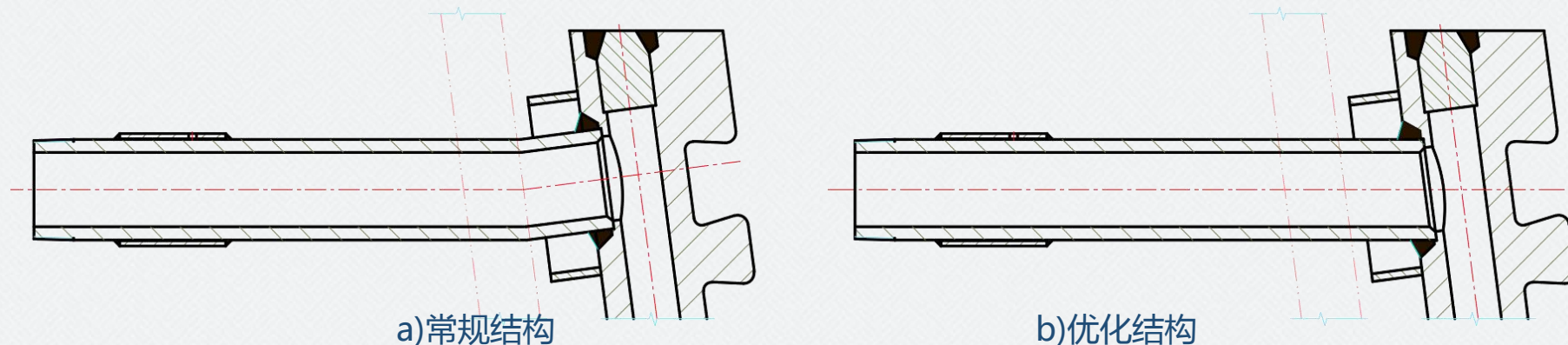


图24 水管结构对比





### 3.5 避免水管受到固定约束

- 铜冷却壁水管与炉壳之间的间隙一般设计为10mm左右，水管与炉壳通过波纹管进行弹性连接，设计结构满足铜冷却壁在正常使用过程中的位移需要。
- 由于部分项目实际综合安装误差较大，水管与炉壳的间隙没有符合设计要求，甚至接触到炉壳（见图25）。
- 水管长期受到炉壳开孔约束时，无论水管是铜管或者钢管，都会容易沿此位置发生屈服失效破损。
- 所以，除了铜冷却壁安装时严格监督水管与炉壳之间的间隙符合要求外，设计还要从预防异常、提高安全系数角度出发，适当加大水管的炉壳开孔直径（建议 $\phi 110 \sim 120\text{mm}$ ）。
- 另外，水管末端与外围水管的连接应采用软连接，避免水管末端长期受到固定约束。

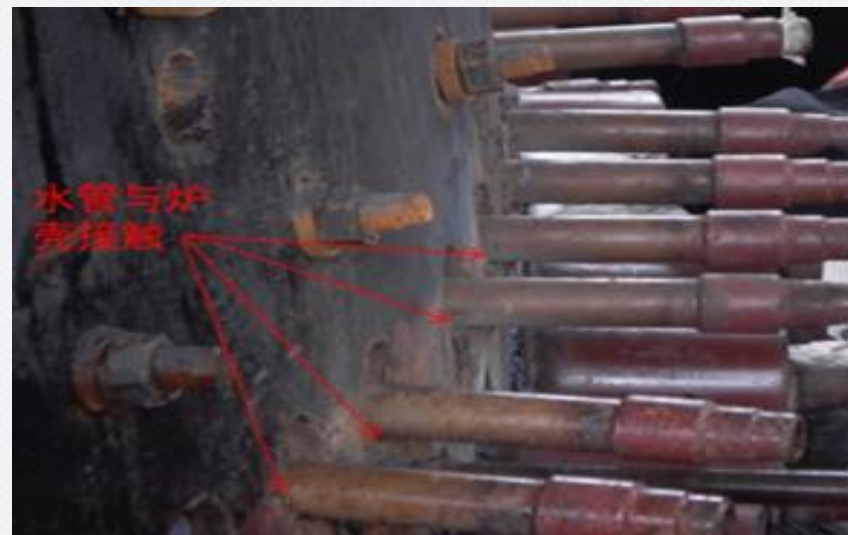


图25 水管接触炉壳





### 3.6 热面安装挂渣件及耐磨板



在不增加铜冷却壁本体厚度的和保持现有结构设计条件下，为了进一步提高铜冷却壁的耐磨性和挂渣能力，目前**国内外已有四种**不同的优化设计案例如下：

- 图26为槽肋安装耐磨钢板，采用沉头螺栓固定（其中一点固定一点滑动）；
- 图27为槽肋、槽内安装不锈钢抓钉；
- 图28为槽肋同时安装耐磨钢板和不锈钢抓钉；
- 图29为槽内安装燕尾形耐磨钢块，钢块采用钢板折弯成型，用耐火泥与本体结合。



图26（钢块-槽肋）



图27（抓钉-槽内）



图28（钢块加抓钉-槽肋）

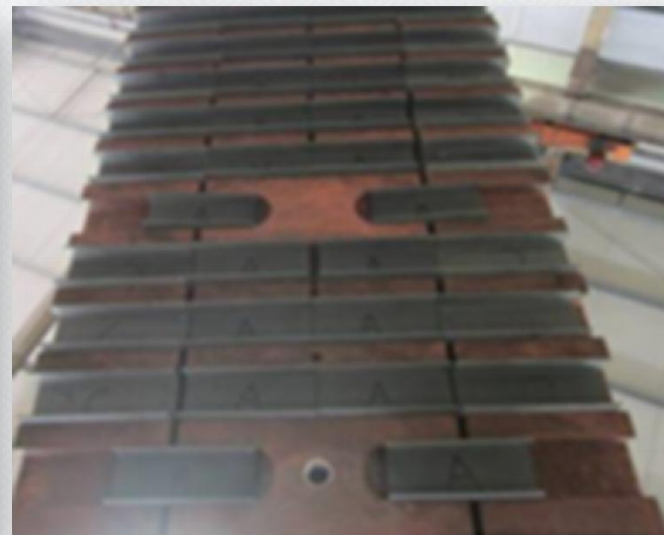


图29（燕尾形钢块-槽内）



### 3.6 热面安装挂渣件及耐磨板

在不增加铜冷却壁本体厚度的和保持现有结构设计条件下，为了进一步提高铜冷却壁的耐磨性和挂渣能力，目前国内外已有四种不同的优化设计案例如下：

结构	耐磨性	强化挂渣	冷却影响	镶砖影响	使用寿命
图26	较差	较差	较大	较小	较短
图27	较好	较好	较小	最大	较长
图28	较好	较好	较大	较大	较长
图29	较好	较差	较大	较大	较长



图26（钢块-槽肋）

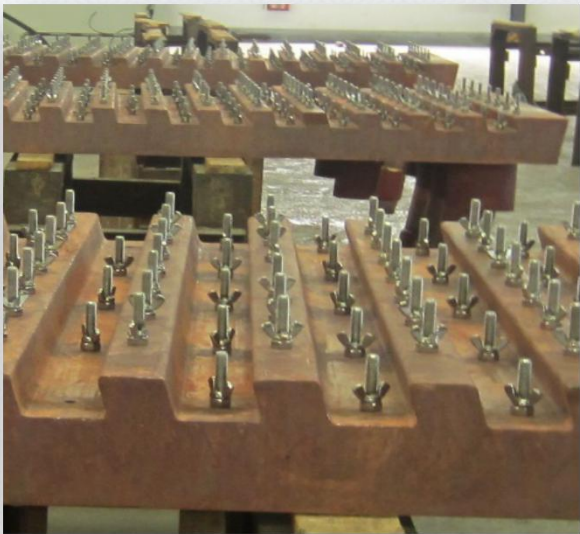


图27（抓钉-槽内）



图28（钢块加抓钉-槽肋）

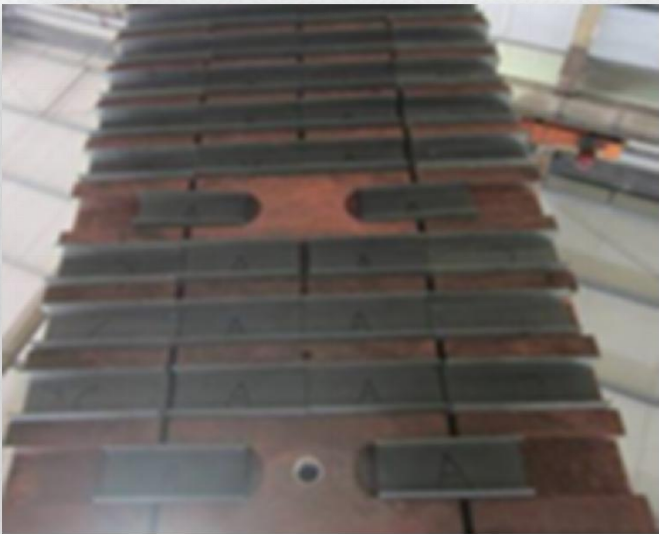


图29（燕尾形钢块-槽内）



### 3.7 热面镶嵌钢砖



汕头华兴冶金设备股份有限公司  
首钢水城钢铁(集团)有限责任公司

针对铜冷却壁热面磨损问题，迫切需要一种耐磨性和强化挂渣更好、冷却和镶砖影响小、使用寿命更长的铜冷却壁热面结构设计。对此，我们研发了热面镶嵌钢砖优化结构，钢砖材质可以是中碳钢、球墨铸铁或其他钢材，钢砖交叉错开散布于耐火砖之中，目前已应用于安阳1号2000m<sup>3</sup>高炉、沙钢2500m<sup>3</sup>高炉、华西特钢2300m<sup>3</sup>高炉、昆钢2500m<sup>3</sup>高炉、吉林建龙1800m<sup>3</sup>高炉等多座高炉（见图30-33）。



图30 安阳1号



图31 吉林建龙2号



图32 华西2300m<sup>3</sup>



图33 沙钢2500m<sup>3</sup>





### 3.7.1 钢砖结构特点

- 钢砖采用单块铸造成型，铸造后不再加工，材料有一定的韧性和塑性，强度较高（屈服强度 $\sigma_S \geq 270\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\sigma_b \geq 500\text{MPa}$ ）。
- 钢砖结构尺寸可根据铜冷却壁**全覆盖或半覆盖**镶砖需要同步设计，钢砖热面也可以设置凹槽以进一步强化挂渣，全覆盖和半覆盖的钢砖截面、分布示例见图34-35。

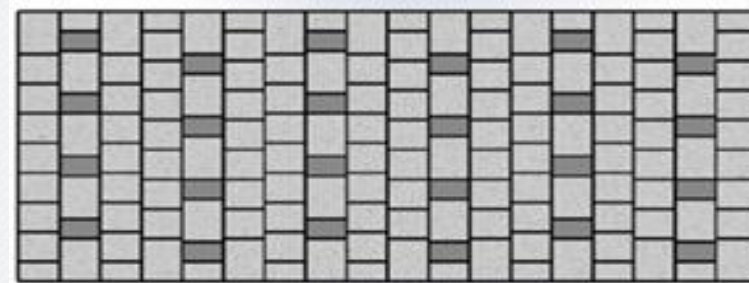
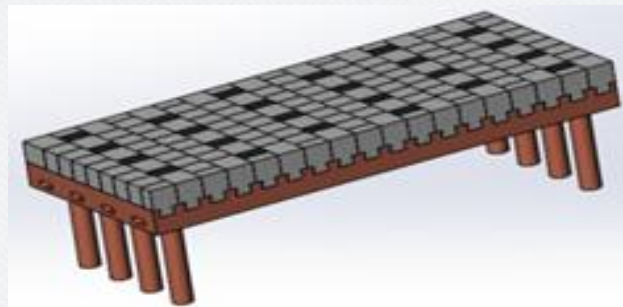
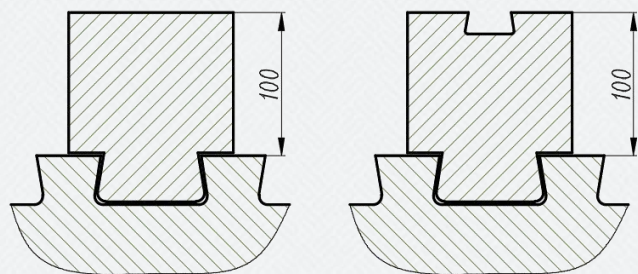


图34 全覆盖镶砖

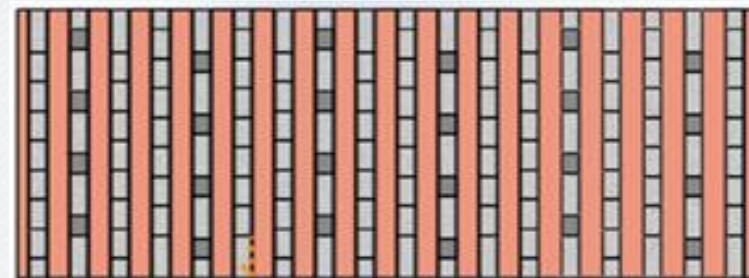
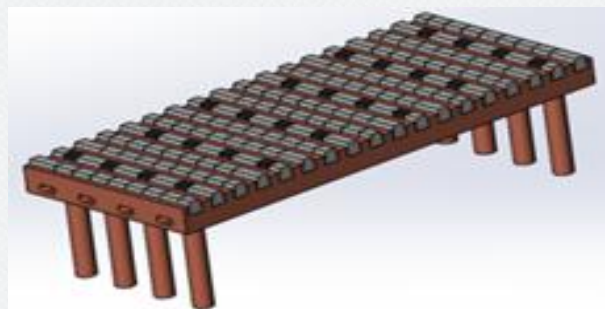
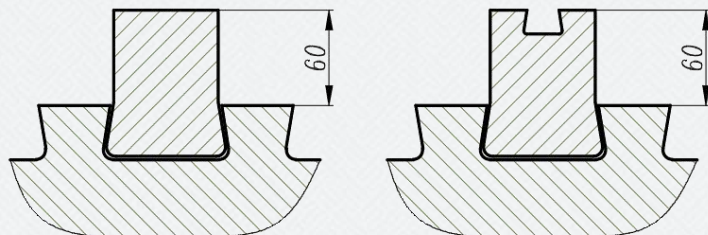


图35 半覆盖镶砖





## 3.7.2 钢砖主要优势

1. 钢砖**导热能力远高于**常规耐火砖（接近3倍），钢砖热面温度相应远低于耐火砖，约**低400℃**（见图36），温度越低,越容易形成渣皮，更**有利挂渣**形成保护。
2. 钢砖**韧性和耐压强度**也远高于耐火砖，不像耐火砖容易受到炉内热冲击和化学侵蚀等的影响而开裂损坏，使用寿命更长。
3. 钢砖**硬度**远高于铜壁本体（约5倍），耐磨性能更好，延长铜壁使用寿命，同时块状钢砖起到强化挂渣作用并对**渣皮形成分割和支撑**，小块渣皮掉落对炉况影响更小。
4. 由于现有热面优化结构的耐磨钢片比较薄（厚度8~10mm）、抓钉直径小，使用时间短；钢砖不但**使用寿命长**，并且钢砖为块状散布于耐火砖之间，对铜冷却壁利用高导热**形成保护渣皮**的这一主要作用的影响**最小**，另外，也**不会提高铜冷却壁镶砖的难度和成本**。

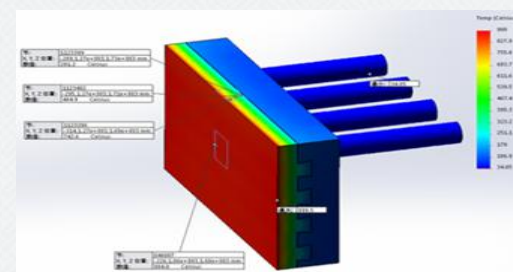


工作1.5年（镶嵌全覆盖砖）

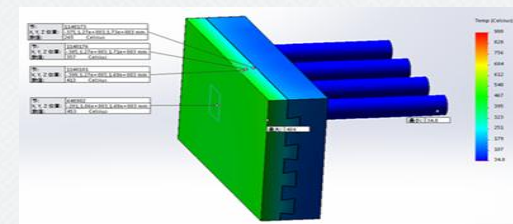


工作2.8年（充填浇注料）

图36 温度模拟对比



耐火砖温度模拟



钢砖温度模拟





## 4.8 铜冷却壁——综合最优化设计

结合前述针对水管结构、本体强度、耐磨和挂渣的各种局部结构改进，我们提出一种综合最优设计的方案。

### 4.8.1 优化结构特点

#### (1) 本体强度优化

- 本体冷面设计有纵向凹槽。
- 冷面凹槽里包夹有纵向加强钢条，钢条通过螺栓和焊接与本体复合成整体。
- 本体冷面或热面槽内可设置横向加强钢条，横向钢条与纵向钢条通过螺栓紧固成整体加强框架。
- 冷却水道包含在铜本体内，确保冷却效果不变。

#### (2) 耐磨和挂渣优化

- 燕尾槽里安装有点阵式钢砖。

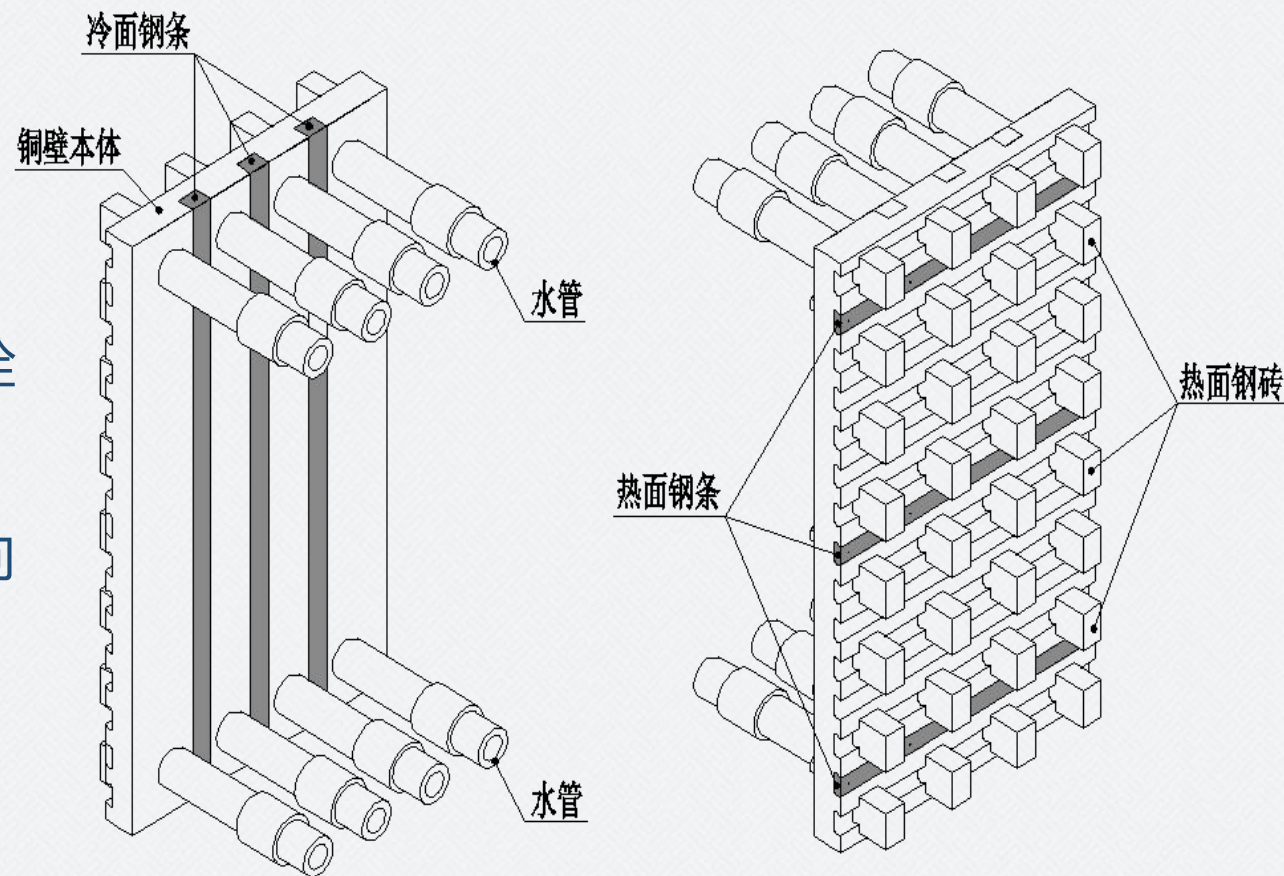


图37





### (3) 水管结构优化

- 常规结构：水管与本体焊接固定（见图38）。
- 优化结构：在常规水管基础上增加**加强保护钢板**和**保护钢管**（穿过炉壳），作用是一方面保护水管**抗剪切**能力，另一方面加强水管的**抗拉伸**能力，减少铜冷却壁本体变形后对水管造成的损坏（见图39）。
- 破坏性试验：在相同破坏性拉力的条件下，常规结构水管根部先出现间隙，优化结构保持不变（见图40）。



图40（常规结构）



（优化结构）

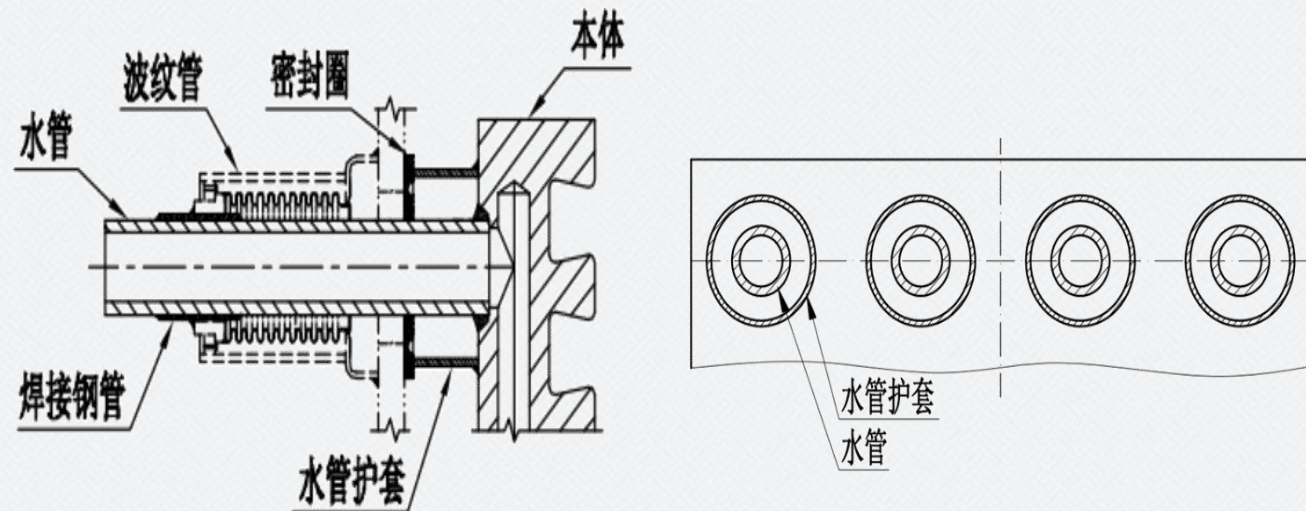


图38 常规结构水管部位

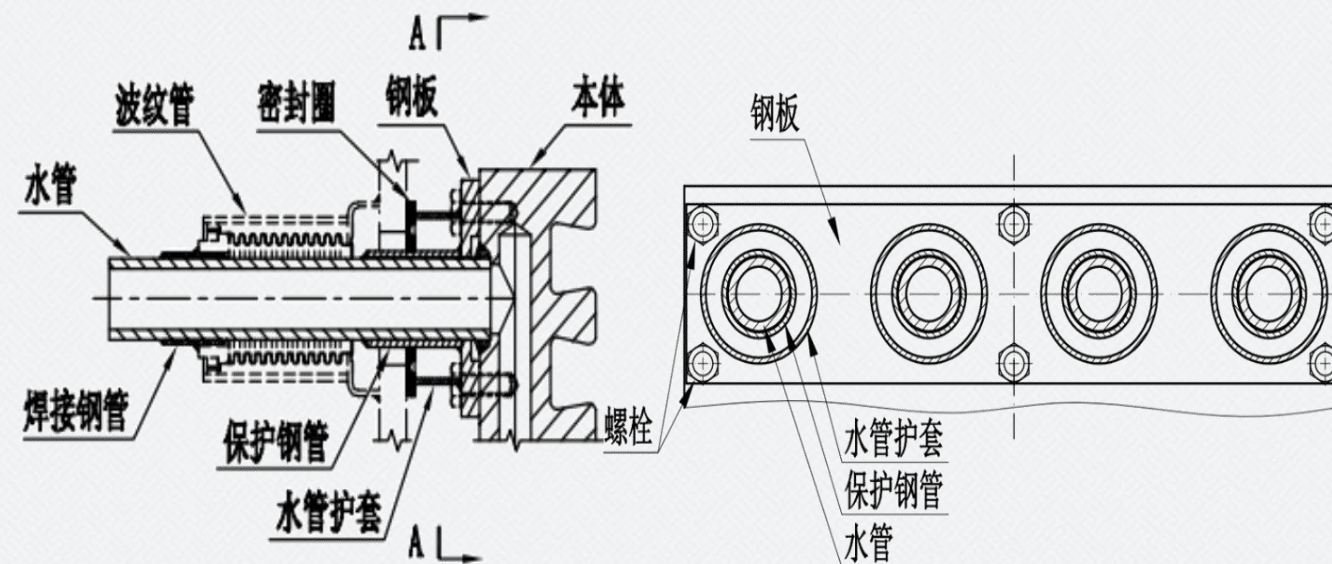


图39 优化结构水管部位



## 4.8.2 力学仿真

下面为“常规铜冷却壁”（图41）和“优化铜冷却壁”（图42）两种不同结构的力学仿真模型，边界条件同为热面耐火材料被完全侵蚀掉的情况下，炉壳与冷却壁之间的耐火材料保持，给冷却壁施加使其变形的外力（20万N）。模拟结果优化铜冷却壁**安全系数**是常规铜冷却壁的**1.74倍**（图43-46）。

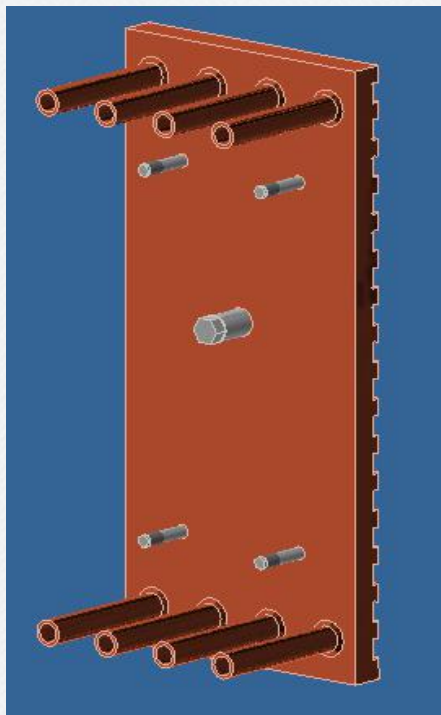


图41

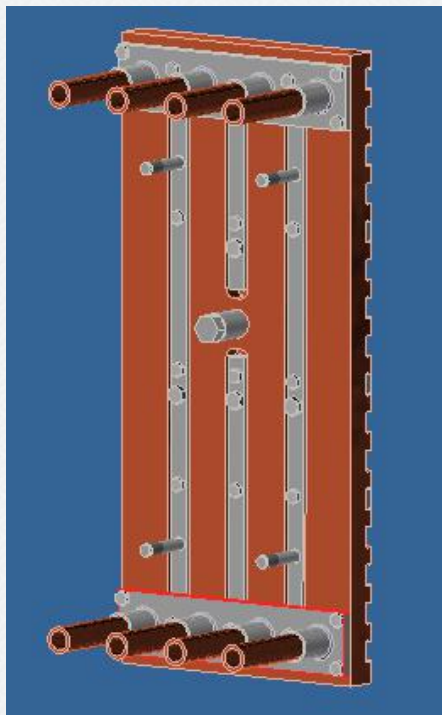
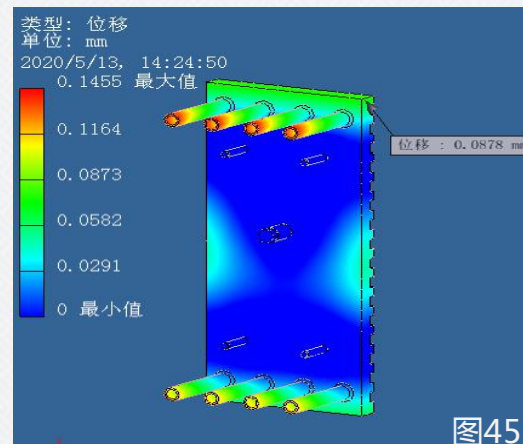
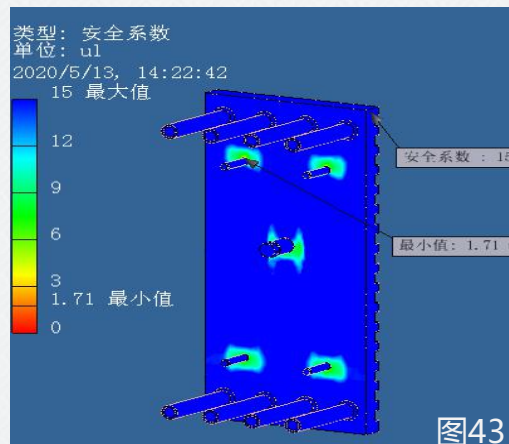
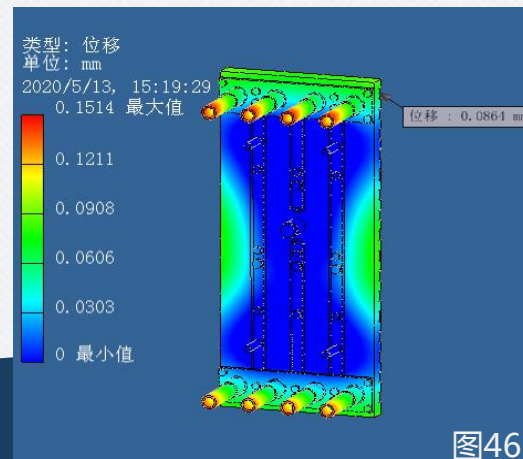
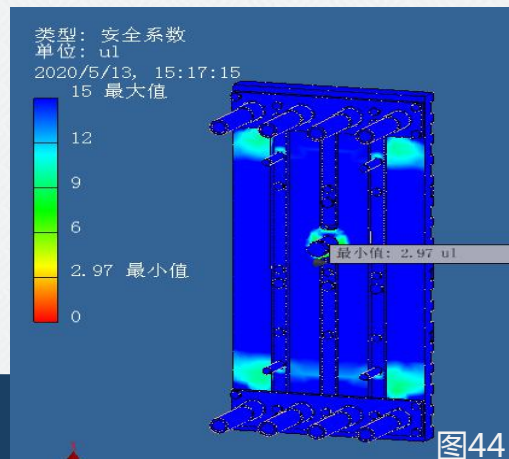


图42



常规铜冷却壁



优化铜冷却壁





4.8.3 主要优势

类别	综合最优设计	常规铜冷却壁
冷却强度	等同常规铜冷却壁	强
本体强度	本体冷面凹槽中的钢条与铜本体形成强化本体，冷热面钢条联接形成稳固框架，大幅提高整体强度（1.74倍）	没有优化
耐磨及强化挂渣	安装了点阵式钢砖，预防在炉况不稳条件下，提高冷却壁热面的挂渣和耐磨性能	没有优化
水管结构	水管结构进行加强，在减小水管及水管焊缝受到剪切和弯曲应力基础上，大幅提高水管的轴向拉伸强度，杜绝水管及焊缝在长期异常工况下出现漏水或拉裂的问题。	没有优化
材料成本	得益于整体强度大幅提高，在保证冷却效果和延长使用寿命的同时，结合热面钢砖的应用，本体厚度可以减薄，最高节约铜材30%以上。	受到强度的制约，本体厚度设计一般不小于120mm





#### 4.8.4 产品照片

以上优化加强结构铜冷却壁—  
经推出，得到中冶南方、中冶赛迪  
等国内外工程公司和业主的高度赞  
同，并在一些高炉大修改造项目开  
始部分应用。



图47

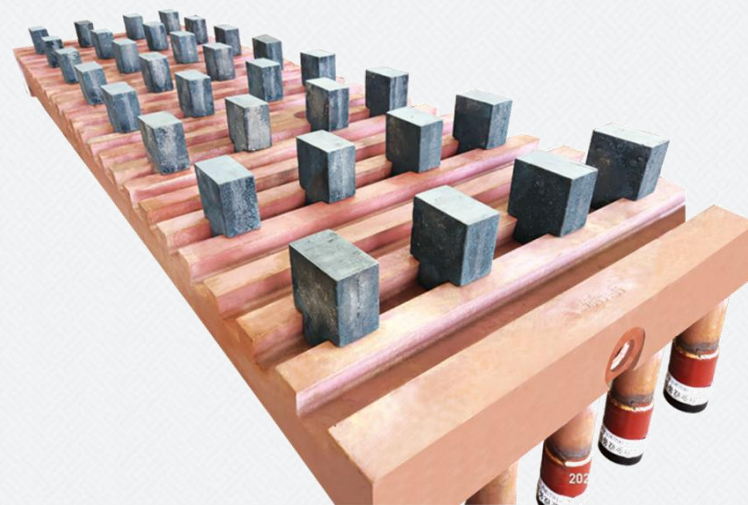


图48





# 4 企业简介



汕头华兴冶金设备股份有限公司  
首钢水城钢铁(集团)有限责任公司

## 4.1 企业概况



- 汕头华兴冶金设备股份有限公司于2000年创建，董事长为余京鹏先生。
- 公司于2016年4月挂牌新三板，目前正在准备创业板上市。
- 总部位于汕头市，拥有汕头和潮州两大研发生产基地。
- 专注于高炉、电炉及有色行业铜冷却设备，精密铜件的研发、生产与销售。





## 4.2 行业领先的科研能力

- 汕头华兴是国家高新技术企业、国家知识产权示范企业、广东省铜合金材料院士工作站，拥有省级工程技术研究中心、省级企业技术中心。
- 系列铜冷却壁产品荣获国家科学技术进步二等奖、广东省科技进步二等奖、中国专利金奖等。
- 主持**铜冷却壁国家标准（GB/T 31048-2014）**的制订，该标准已于2015年10月实施。公司现拥有专利94个，其中发明专利11个。
- 针对部分高炉铜冷却壁在长期使用后，由于综合原因出现的问题，针对性开展研发创新，满足不同客户需求，被国内外各大工程技术公司广泛采用，**引领铜冷却壁技术进步**。



## 4.3 市场占有率领先

2001年，华兴股份研发和供货**第一个国产铜冷却壁项目**（首钢1号高炉），截止2021年6月，华兴股份为宝钢、武钢、鞍钢、首钢等国内外**290多座高炉提供8万多吨铜冷却壁**，市场占有率全球第一。







# Thanks!

感谢观看，期待下次合作！

