

炉役末期炉缸侵蚀的

在线治理

河南煜华科技有限公司

网 址 www.xinxingranqi.com

吴强国

2024年2月

目录/Contents

01 现有治理措施存在诸多缺点

02 隐形水侵蚀是象脚区独特的侵蚀因素

03 隐形水侵蚀过程

04 炉役末期象脚侵蚀的在线治理方法

05 该治理方法的优点

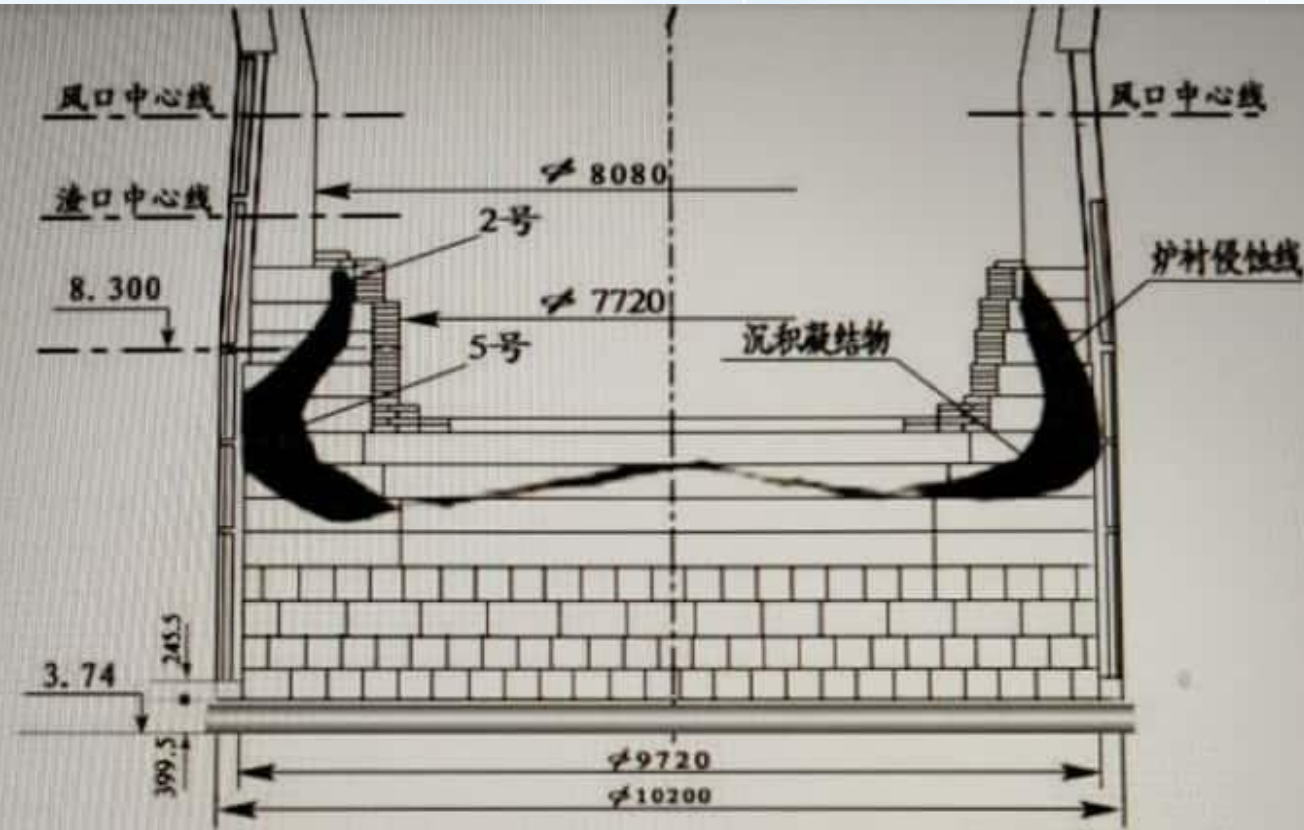
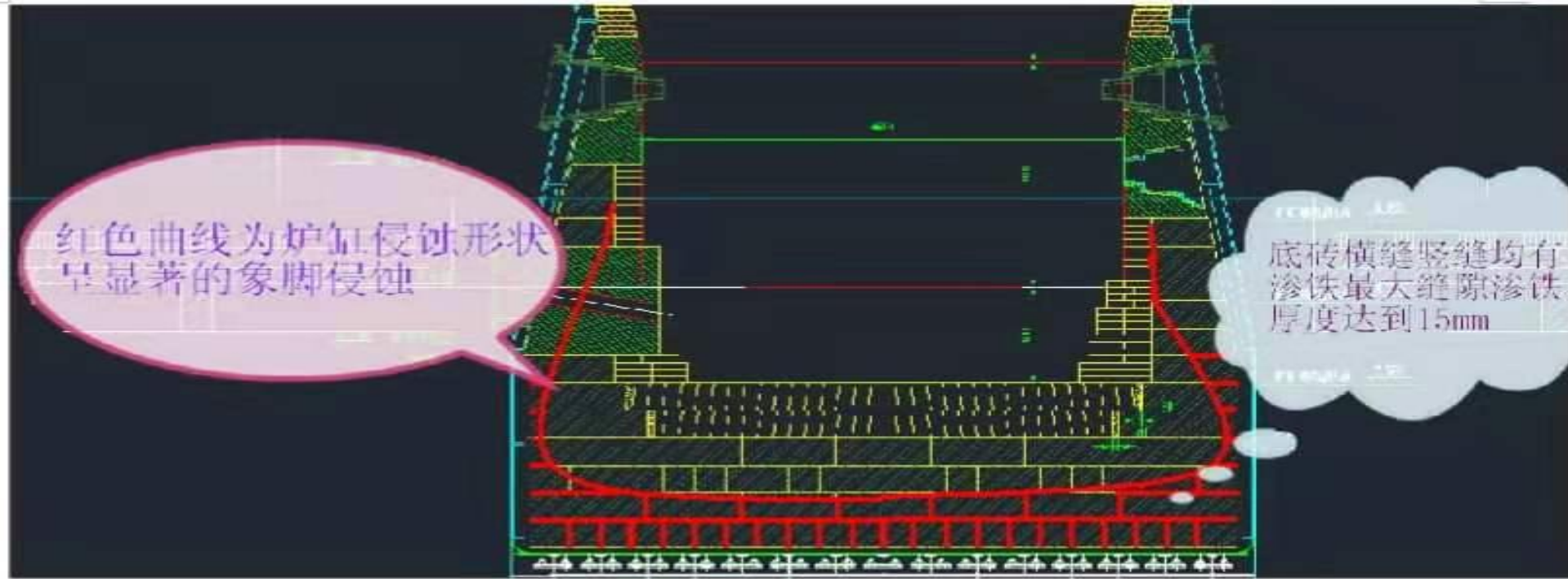


图3 4炉沉积凝结核示意图

图3是依据1987拆炉结果绘制的。“炉缸和炉底交界处沉积了很厚一层亮的古铜色矿物”。“在炉缸侵蚀最严重的部位，钛沉积物最厚”。铁口西侧的炉缸部位，炭砖全部被蚀掉，仅剩下30mm左右的炭捣料，其上沉积了400mm的钛化物”（图4）。



底部碳砖及炉缸环砖缝隙均有渗铁情况，尤其是底部碳砖渗铁严重，层层碳砖被渗铁包裹与炉缸残铁形成一个整体。

侵蚀明显的起始位置是第八层炭砖，越往下侵蚀越严重，炉底的陶瓷杯垫完全侵蚀掉，炉缸的陶瓷杯已大部侵蚀掉，只有在13-16#风口、1-2#风口 有一部分陶瓷杯，但是1-2#风口该部位的 碳砖已全部侵蚀掉，陶瓷杯与炉壳之间是80-100mm厚的炭捣料层。



6、炉缸耐材结构分析

(1) 侧壁导热不宜过高



山东某高炉，大修开炉后指标欠佳，2022年年底扒炉时，在炉缸竟然发现2年前开炉时的碳化枕木，极为罕见！



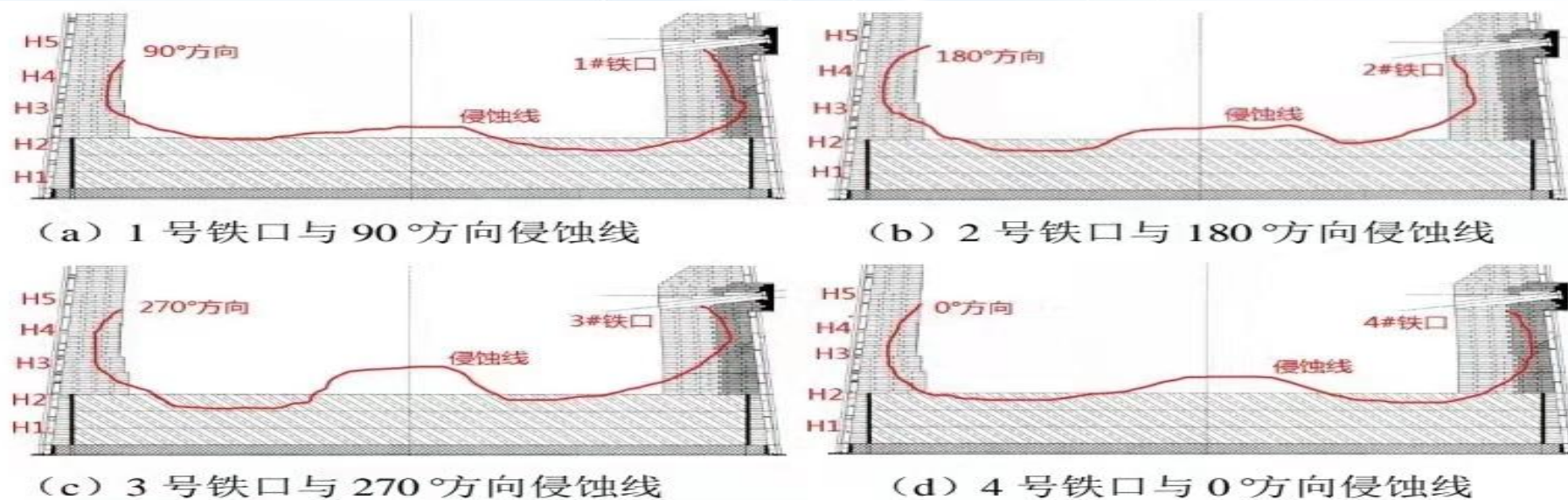


图 2.12 宝钢3号高炉主要剖面的侵蚀线





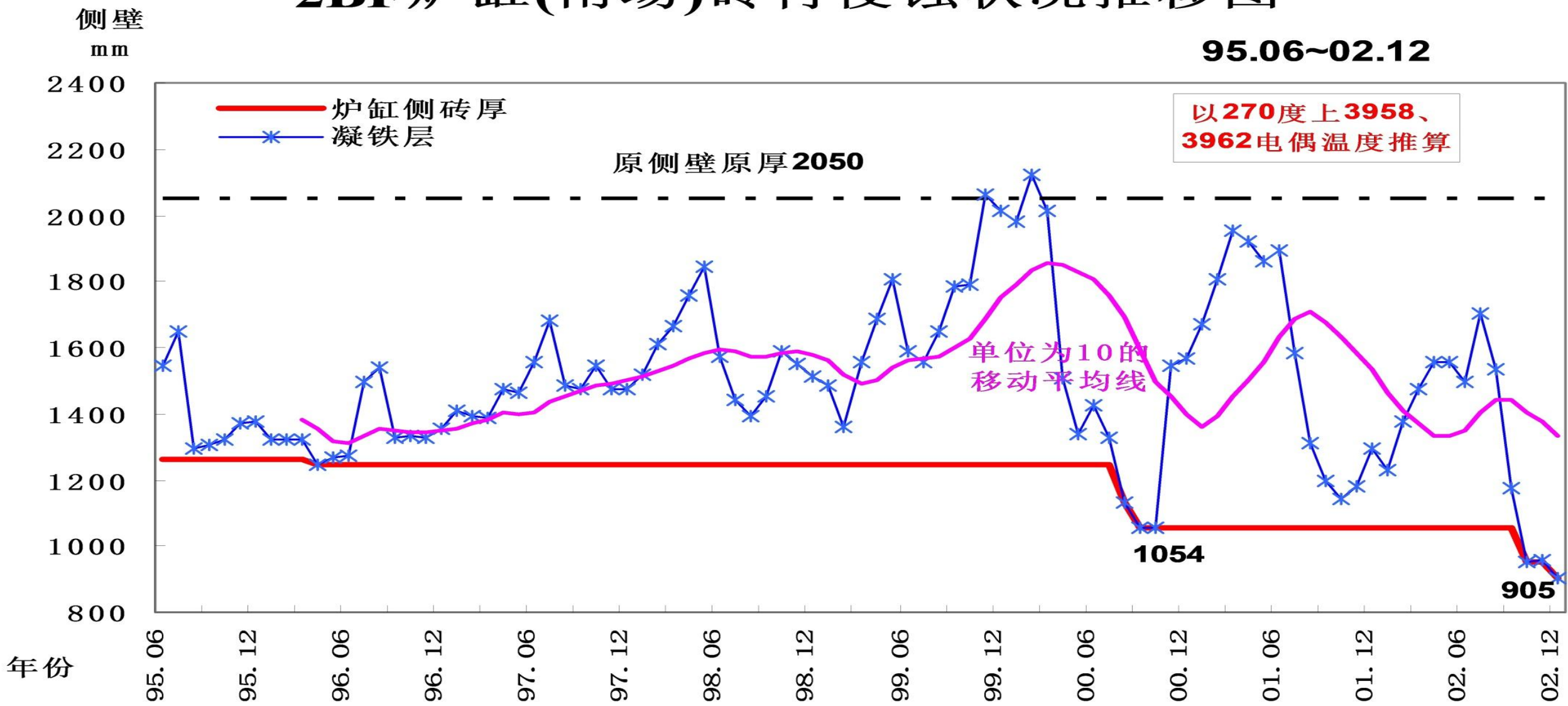


压浆

图 1 6.401m 碳砖残厚推移图

2BF炉缸(南场)砖衬侵蚀状况推移图

95.06~02.12



The image shows a cross-section of a material with distinct layers. The top layer is light-colored and granular. Below it is a dark, smooth layer. The bottom layer is a lighter, more uniform color. A white callout box with a pointer is positioned over the dark layer.

碳搗料层

观点：大部分炭砖 不是 被铁水侵蚀的

现有侵蚀理论过分夸大铁水环流的作用，过分强调高冶炼强度对于炉缸的侵蚀。

但诸多证据表明，大部分炭砖是在保护层存在的情况下被侵蚀的，与铁水环流没有关系。

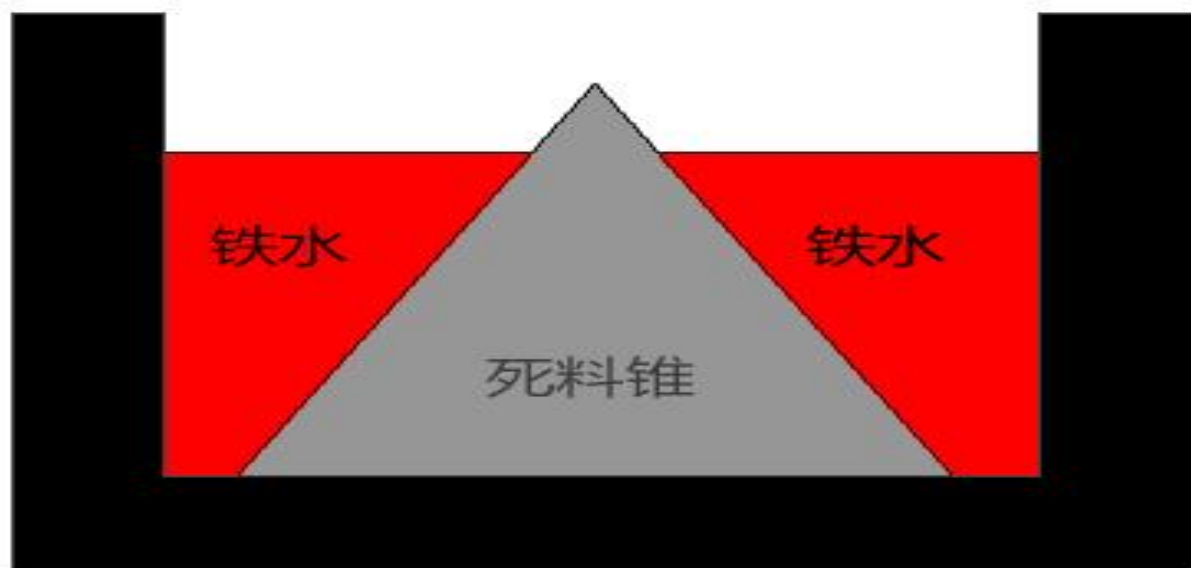
炉缸保护层极少发生完全融化和脱落。

保护层最多的破坏形式是不完全破坏：热面少部分融化，整体大部分升温软化，在铁水压力下外推，压实炭砖热面粉化层后重新加厚。

象脚区陶瓷杯短寿的原因是炭砖气化消失，陶瓷杯失去支撑，然后坍塌漂浮。

铁水环流理论对死料柱形态、位置的设想

环流理论将死焦堆设想成圆锥形且完全沉坐。死焦堆下部直径更大，象脚区铁水通道更窄，铁水流速更快，冲刷更严重。



死料堆**不可能**是**下大上小**的圆锥形

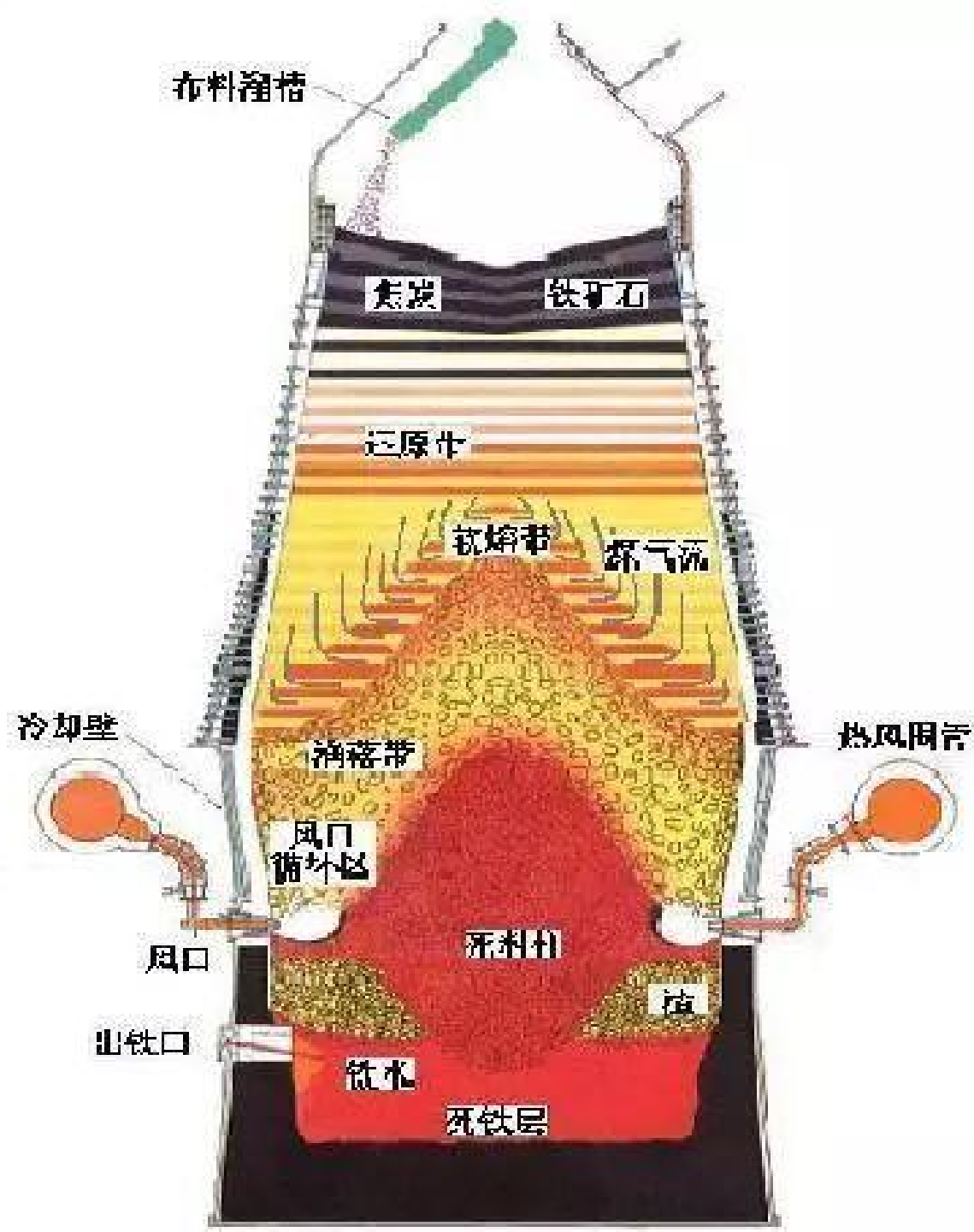
焦炭与铁水密度差别巨大；死焦堆的焦炭颗粒之间没有很强的结合力，死焦堆没有整体性。

在铁水的强大浮力作用下，圆锥形死料堆下部外围的焦炭必然分散上浮，改变死焦堆的外形。（无法呈现圆锥形）（周期性置换过程中的形态变化）

下大上小的圆锥体根本无法稳定漂浮在铁水中，必然侧翻。环流理论的假设**不符合基本的浮力学原理。**（简单实验）

如果炉缸严重堆积，焦炭可能充满炉缸，呈圆柱形。

死料堆保持稳定的浮力学形态



一、现有治理措施及其缺点

现有治理措施是基于传统侵蚀理论。当炉缸侧壁温度升高时，考虑形成新的保护层、改善冷却效果、减轻铁水环流等，通常采取如下措施：

① 堵风口，降冶强

可以降低侧壁温度，但并没有真正抑制炭砖的继续侵蚀。

降低冶炼强度影响生产，也抬升炼铁成本 **降低冶强并未真正阻止侵蚀**

② 钛矿护炉

抑制侵蚀作用有限，严重影响高炉生产及后续环节的生产，抬升炼铁成本

③ 压浆

抑制侵蚀作用极其有限，容易破坏炉缸，造成重大事故

④ 强化冷却

有一定作用，但治标不治本

炉役末期炉缸的安全状况较差，侧壁温度升高后往往使高炉操作人员

进退两难！

因条件限制往往不能立即停炉，钛矿护炉造成高炉操作困难，压浆又往往造成安全隐患，强化冷却能力用尽。

堵风口，降冶强勉强维持生产也只是权宜之计。

对于炉役末期的高炉，找到既有效抑制炉缸侵蚀，又不影响高炉正常生产，安全可靠、简单易行的治理方法，具有较大的现实意义。

关键是挣脱铁水环流理论的束缚，找到炉缸侵蚀的主要因素，弄清侵蚀机理和侵蚀过程

二、隐形水侵蚀是象脚区**独特**的侵蚀因素

炉缸下部异常侵蚀，包括象脚状侵蚀、蒜头状、蘑菇状、宽脸型侵蚀，其侵蚀机理是一样的。

象脚区侵与炉缸中、下部其他区域相比，工况条件相似，耐材材质相近，传统侵蚀理论罗列的侵蚀因素也是共同存在的，但象脚区的侵蚀速度远远大于炉缸中下部其他区域。

象脚区一定存在 **独特** 的侵蚀因素，而且被炼铁届遗漏了。因此象脚侵蚀的治理长期徘徊不前，没有实质性的改善。

通过长期对比研究，认为隐形水侵蚀是炉缸象脚区**一种独特**的侵蚀因素。

隐形水的来源及侵蚀危害：

“隐形水”指炉壳与炭砖冷面之间存在的**冷凝水及渗漏水**。

- a. 高炉鼓风过程中从大气中带进的水蒸汽、
- b. 喷煤燃烧产生的水蒸汽、
- c. 冷却设备漏水产生的水蒸汽、
- d. 高炉上部煤气中含有大量的水蒸汽

上述水蒸汽通过串煤气到达炉壳与炭砖冷面之间温度较低的区域，在压力条

件下饱和、**冷凝、** 渐出。并**不断沉积到炉缸下部炭砖冷面**。

“**隐形水**”在高炉生产过程中**持续存在**，但高炉休风、停炉后即终止，因此停炉后入炉检查时不易发现。

“隐形水”在炉缸下部**冷面**不断沉积，水位逐步上升，并沿炭砖缝隙**自冷面向热面**渗透，逐步演变为高温水蒸汽。

炉底炭砖温度较低，不具备发生水煤气反应的温度条件，即使有水存在也不发生侵蚀；

当水位到达象脚区时，炭砖温度达到发生水煤气反应的要求，**自冷面向热面**渗透的**高温水蒸汽**与**高温炭砖**相遇，热面炭砖侵蚀就不可避免。

“隐形水”的产生是持续不断的，但在**单位时间内的数量是有限的**；来水随时被炭砖消耗，水位不会继续上升；水位固定在象脚区冷面，因此**主要侵蚀象脚区**。

隐形水侵蚀象脚区炭砖，造成热面炭砖的气化消失，引发**陶瓷杯坍塌**，或者引发**凝铁层周期性减薄、破坏**

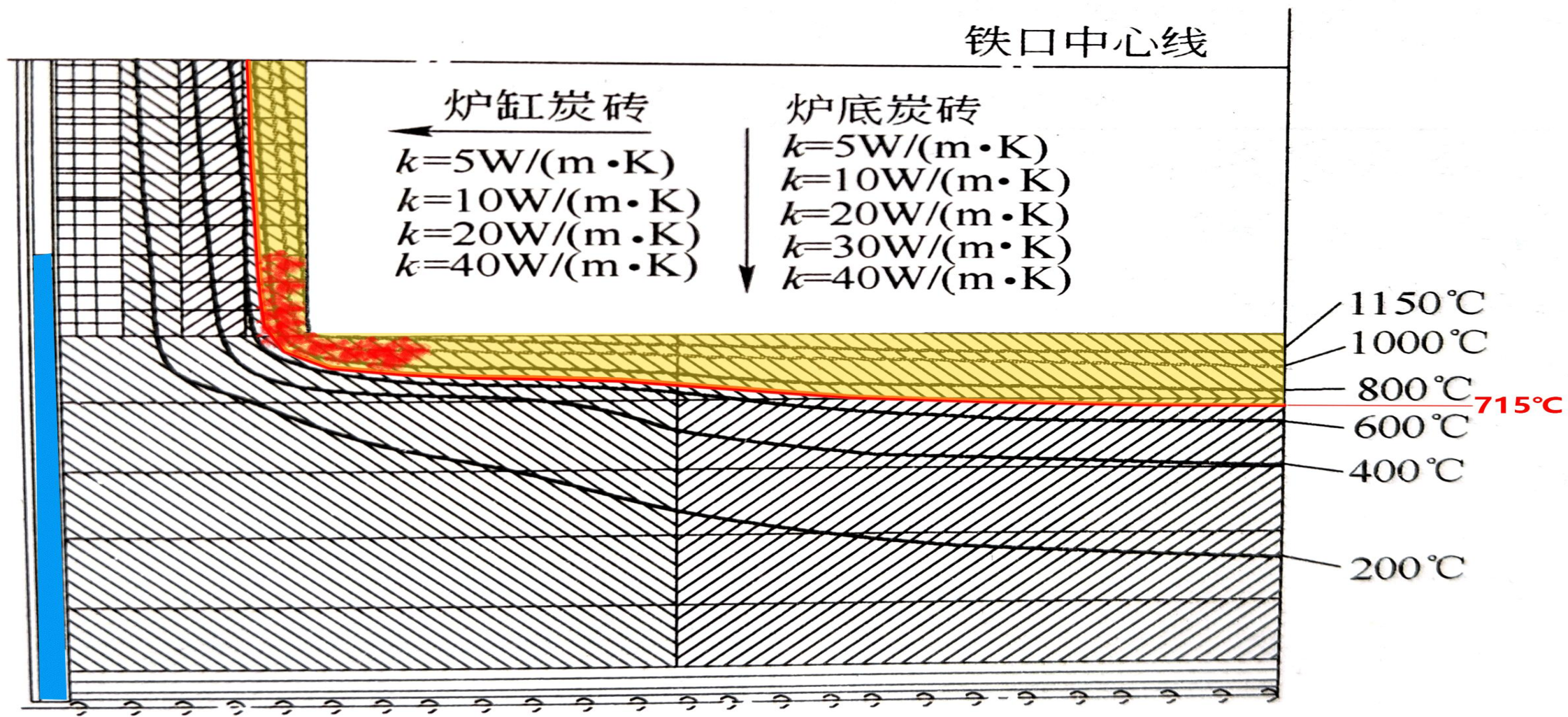


图 3-58 炭砖导热系数自热面至冷面逐渐增大的温度场分布

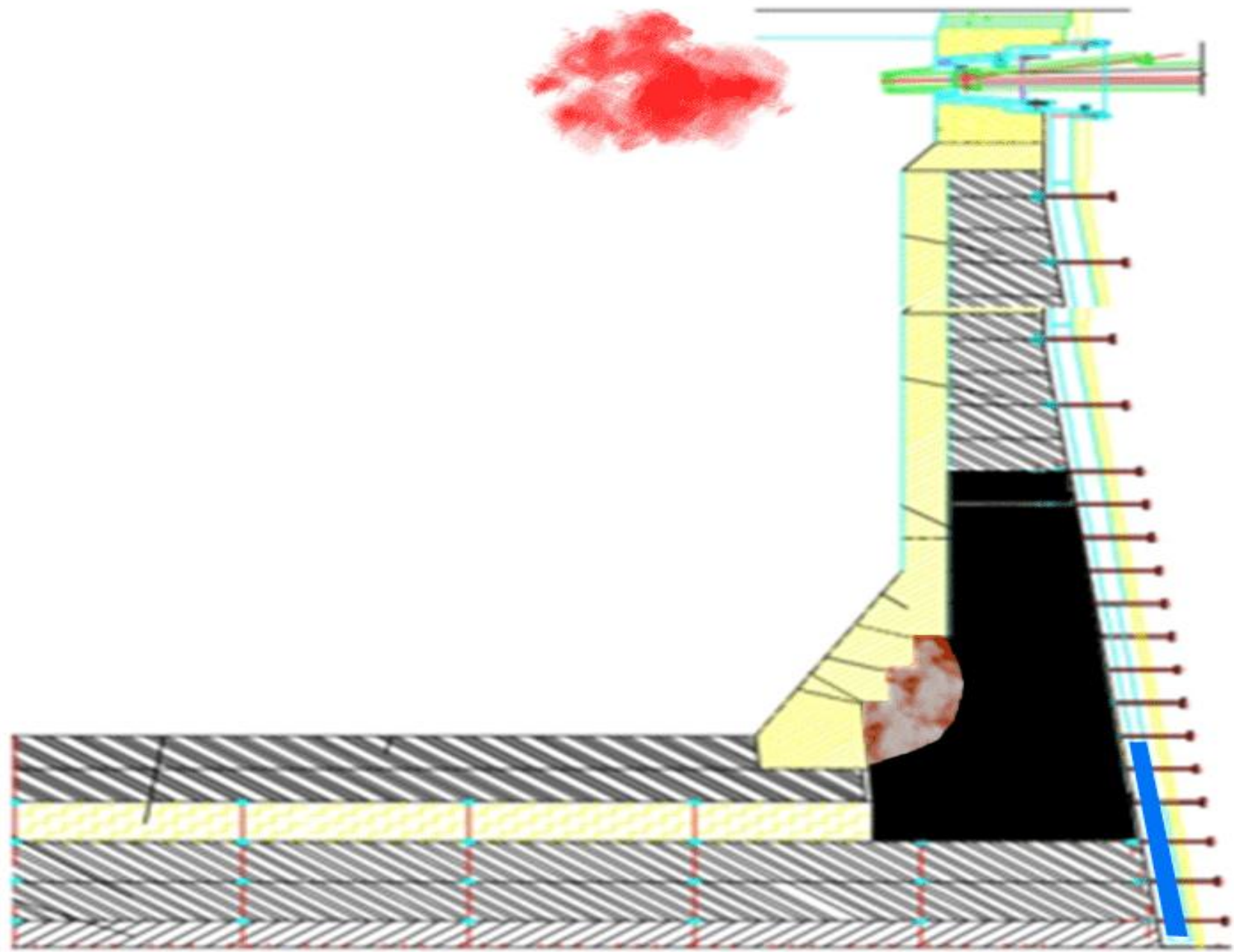
三、 隐形水侵蚀象脚区炭砖过程描述

高炉普遍存在串气情况，而且无法根治。串气产生的冷凝水沿炉壳内壁逐步渗透到炉缸下部冷面，通过炉缸缝隙自炭砖冷面向炭砖热面渗透，在 120°C 区域变成高压蒸汽，逐步向炭砖热面渗透，在 720°C 以上区域与炭砖发生反应，侵蚀炭砖。

炉底的温度较低，无法发生水煤气反应。炉缸冷面也是如此

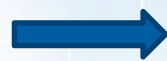
象脚区具备水煤气反应的温度条件，冷凝水到达象脚区将侵蚀炭砖。

沉积到炉缸下部的冷凝水是持续不断的，但在单位时间内的数量是有限的。象脚区的水煤气反应是连续的，冷凝水水位维持在象脚区位置，因此主要侵蚀象脚区。



侵蚀过程图示

风口串煤气



冷却壁前后降温析出冷凝水

设备渗漏水



冷凝水在炉缸下部冷面沉积



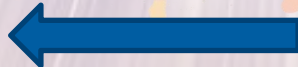
冷凝水水位上升到象脚区



象脚区冷凝水自炭砖冷面向热面渗透



炭砖热面气化、粉化



不是炉内沉积、带压、CO₂

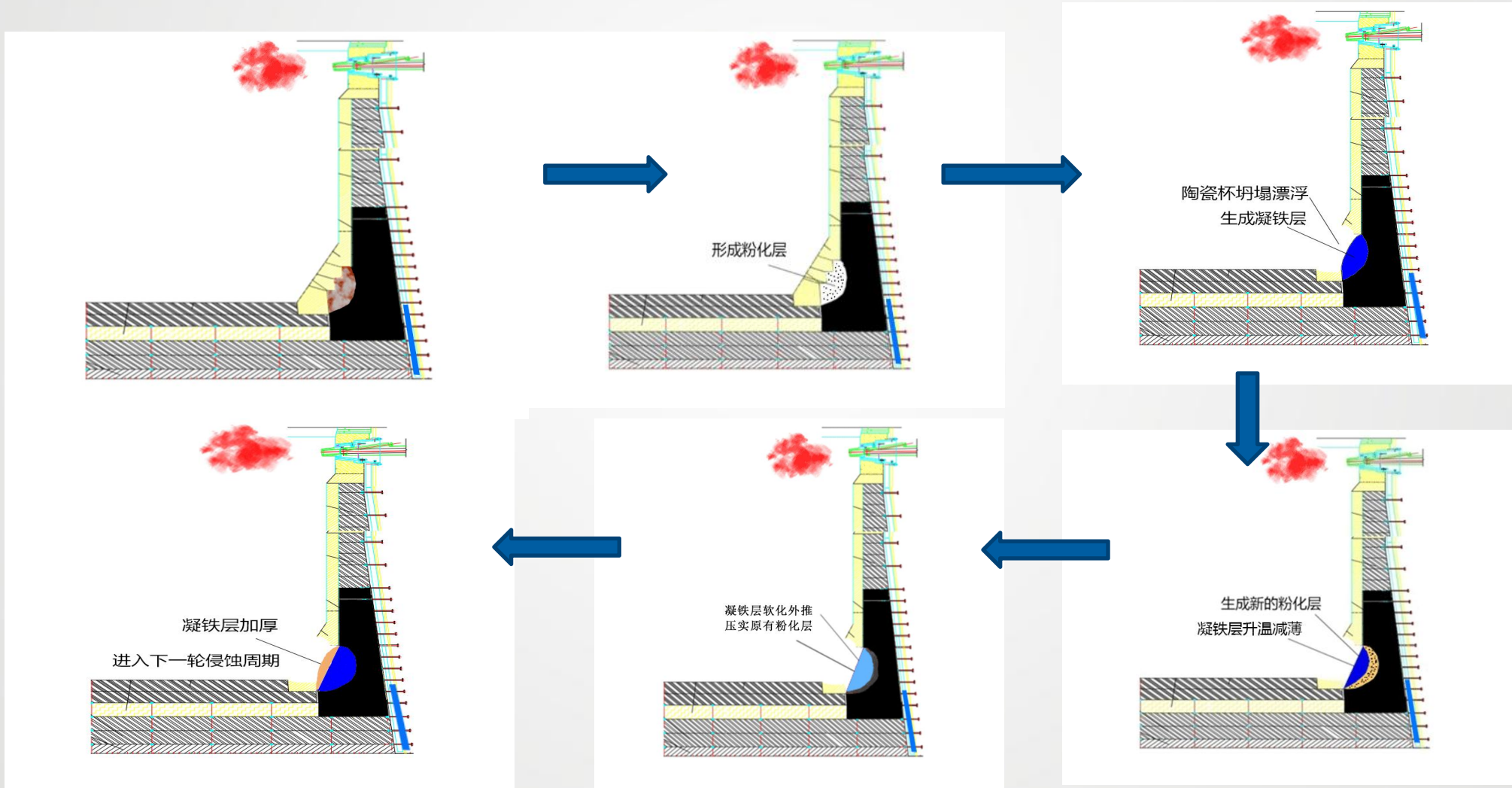
1、凝铁层升温、软化、塑性变形、外推、二次加厚

2、凝铁层裂缝、填充、二次加厚

3、凝铁层脱落

3.1 凝铁层生成与消失过程示意

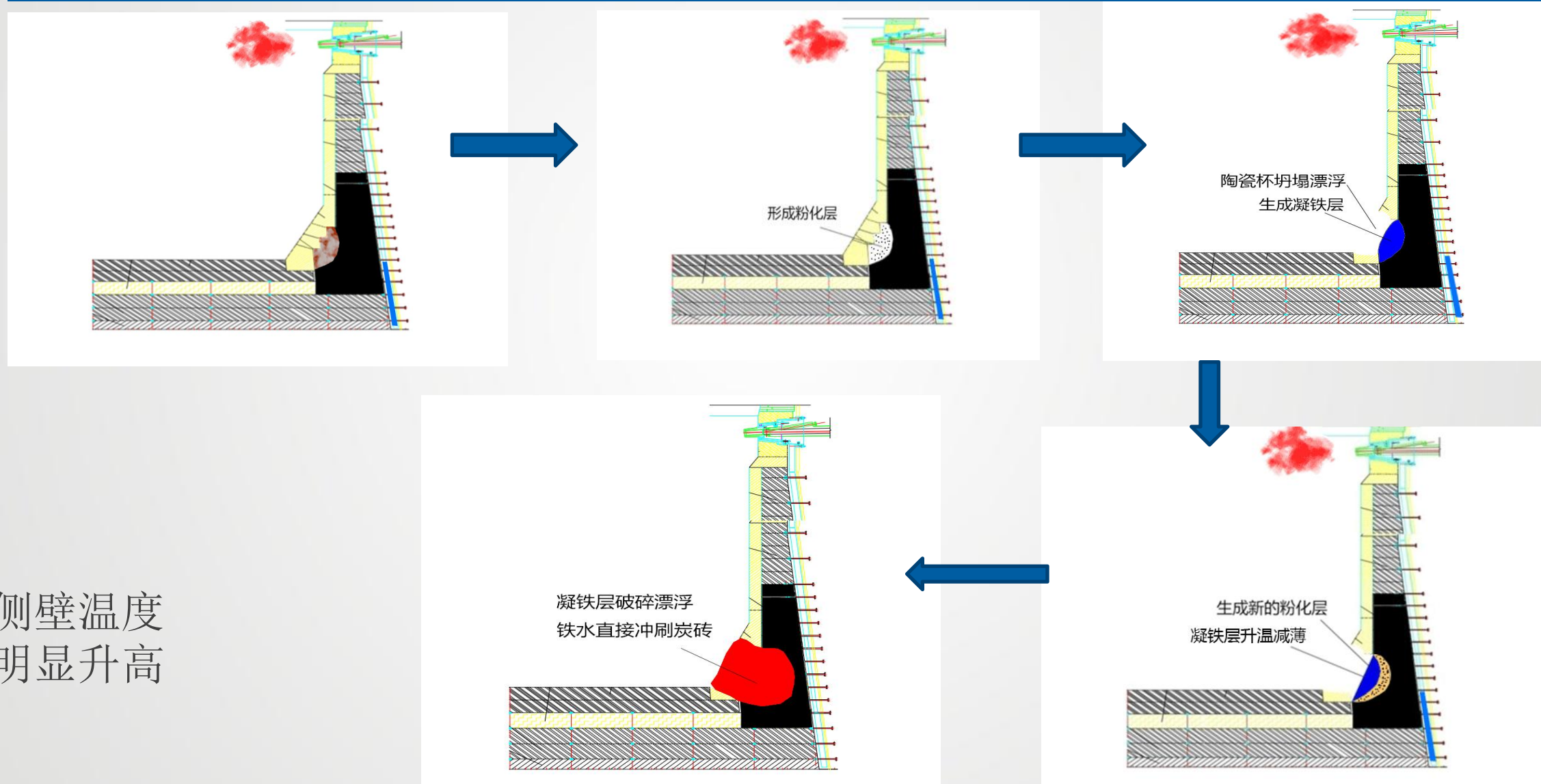
① 生成→减薄→软化外推 →加厚



侧壁温度及热流强度

无错反反应

② 生成→减薄→碎！！→脱落（较少发生 钛矿护炉后更容易发生）



侧壁温度
明显升高

3.2 隐形水侵蚀对凝铁层的破坏形式是随机的

凝铁层以裂缝形式破坏或者以软化后外推的形式破坏时后果较轻，环炭温度及热流强度等监测数据没有明显反应；

凝铁层以漂浮形式破坏时，铁水将冲刷、熔蚀炭砖，监测数据会升高。

凝铁层的破坏形式是随机的、不可控的。（与凝铁层成分相关）

炭砖侵蚀造成凝铁层破坏，然后再生成新的凝铁层。不是原来认为的凝铁层破坏了才发生炭砖侵蚀。

在保护层存在的情况下，象脚区炭砖热面发生持续的侵蚀！

冶炼强度提高，隐形水产量大幅增加，造成炉缸侵蚀加剧。跟环流关系不大！

3.3 隐形水侵蚀的特点

① 隐蔽性及误导性

隐形水侵蚀是在保护层存在的情况下发生的，侧壁温度及热流强度无法及时、准确地产生反应。往往是侧壁温度较低、受控，热流强度不高，给高炉操作人员产生误导；

② 定位性

宏观而言，隐形水侵蚀卡在炉缸象脚区（宽脸型侵蚀区）；
微观而言，炉缸下部哪里缝隙多，隐形水更容易到达，那里的侵蚀就更严重；哪里串煤气情况更严重，其下部的侵蚀就更快；
铁口是串煤气的出口，铁口周围缝隙最多，因此铁口下部侵蚀往往最严重

③ 持续性

高炉送风开炉以后，隐形水就持续产生，持续不断侵蚀象脚区炭砖。冶强越高，隐形水产生越多，侵蚀速度越快。

四、 炉役末期象脚侵蚀的在线治理

4.1 抑制隐形水侵蚀的通用措施

结合隐形水的产生、流向、侵蚀机理及侵蚀过程，防治隐形水侵蚀的途径如下：

1) 减少隐形水产量：

采取措施抑制风口串煤气量，减少冷凝水的来源；

采取措施，减少冷却设备渗水、漏水；

2) 抑制隐形水的传输：

采取措施抑制隐形水从冷却壁前后向炉缸下部沉积；

采取措施抑制隐形水自炉缸炭砖冷面向热面的渗透；

3) 设法及时排出炉缸下部沉积的冷凝水（也包括设备的渗漏水）；由于频繁压浆，炉缸下部的冷凝水常常难以排出；隐形水在向下流动的同时，也沿水平方向流向炭砖热面；仅仅**依靠炉底排水对抑制象脚侵蚀的效果比较有限**；

炉役末期冷却壁前后温度升高，炉底往往只能排出蒸汽，难以有效消除水害；抑制隐形水侵蚀需要采取其他合理措施；

4) 提高炉缸炭砖的抗水氧化性能；

5) 新建及大修的高炉，采用预防隐形水侵蚀的技术措施；

6) 在役高炉应及时采取在线治理措施，抑制象脚侵蚀。炉役初期采取在线治理措施，可以保护陶瓷杯不坍塌；炉役中、后期采取在线治理措施，可以有效保护炭砖，延长高炉寿命。

4.2、炉役末期象脚侵蚀的在线治理

炉役末期，象脚区残余炭砖厚度较小，炭砖冷面、冷却壁热面区域温度较高。

如果温度达到 100°C 以上，上部产生的隐形水到达象脚区将二次气化，难以继续沉积到炉底，因此炉底排水失去大部分作用，但水蒸气仍然继续侵蚀象脚区炭砖。

基于隐形水侵蚀的机理、侵蚀过程及炉役末期炉缸的实际状况，研发出针对性的在线治理方法：

炭砖保护剂在线注入



在高炉正常生产过程中（或者短暂休风的情况下），以较低的压力（0.7MPa）从象脚区压浆孔对冷却壁热面区域注入流动极佳的炭砖保护剂，保护剂呈还原性，其物理、化学特性可以阻断隐形水的破坏，可以抑制炭砖的进一步侵蚀。

炭砖保护剂350℃以下呈液态，密度比水小，流动性好，在较低的压力下（0.7MPa）即可以进入炉底及环炭内部的气隙内。

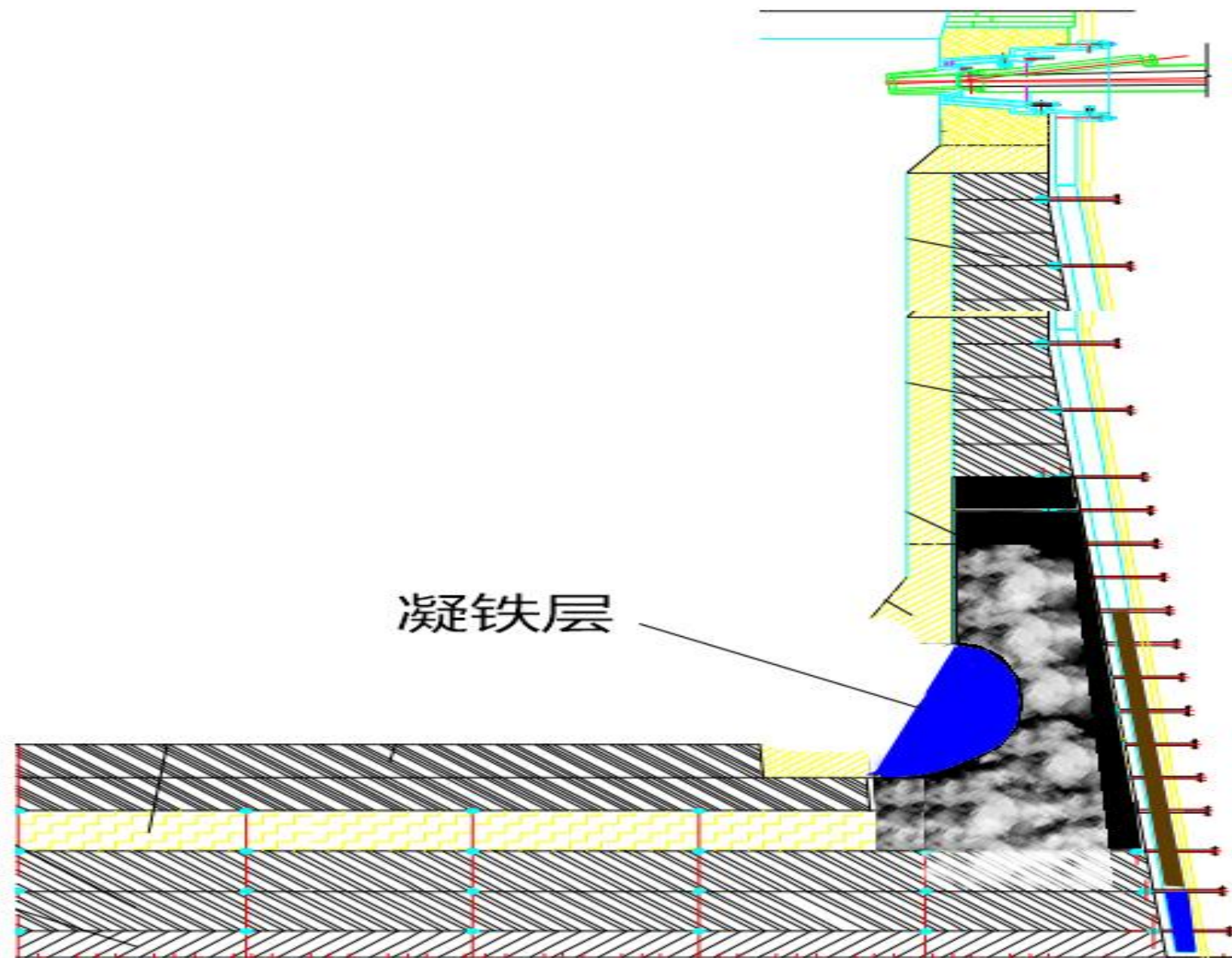
液态保护剂的导热系数是气隙内煤气导热系数的十倍左右，气隙内充满液态保护剂后将显著改善传热条件，提升冷却效果，起到类似压浆的作用。

在低温区域（ 350°C 以下），保护剂以液态形式长期存在。由于密度比水小，高炉生产过程中产生的隐形水将穿过液态保护剂下沉到炉底，象脚区炭砖冷面的气隙内保持液态保护剂。炉底排水时保护剂仍然保存在炉缸冷面气隙内。

在高温区域，保护剂气化后形成保护性气氛。气态保护剂的密度是水蒸气的8倍左右，能够有效隔绝、水蒸汽自炭砖冷面向热面传输，并呈现还原性，能够抑制水蒸汽对于炭砖的侵蚀；

气态保护剂在 700°C 以上区域逐步裂解、析炭，填充高温区砖缝及炭砖热面气隙，改善环炭系统的传热。

基于炉役末期炉缸的实际安全状况和运行情况，以较低的压力在象脚区注入流动性极好的炭砖保护剂，形成液态、气态共同作用的保护性气氛，可以有效阻断水及水蒸汽对于残炭的继续侵蚀，并一定程度改善传热条件。



五、炭砖保护剂在线治理炉缸侵蚀的优点

- ① 采用炭砖保护剂治理炉缸侵蚀成本低廉，易于实施。
- ② 可以替代钛矿护炉、压浆等治理措施。
- ③ 可以在线实施治理，不影响高炉正常生产。
- ④ 相对于钛矿护炉等措施，炭砖保护剂在线治理对高炉炉况及高炉操作不产生负面影响。
- ⑤ 相对于压浆措施，炭砖保护剂加注压力低，介质流动性非常好，不会造成局部压力过高，不会损害炉缸残余炭砖。
- ⑥ 可以大幅延长炉缸寿命，为计划大修争取充裕的时间
- ⑦ 避免钛矿护炉等其他治理措施造成的炼铁成本抬升。

五、炭砖保护剂在线治理炉缸侵蚀的优点

- ① 采用炭砖保护剂治理炉缸侵蚀成本低廉，易于实施。
- ② 可以替代钛矿护炉、压浆等治理措施。
- ③ 可以在线实施治理，不影响高炉正常生产。
- ④ 相对于钛矿护炉等措施，炭砖保护剂在线治理对高炉炉况及高炉操作不产生负面影响。
- ⑤ 相对于压浆措施，炭砖保护剂加注压力低，介质流动性非常好，不会造成局部压力过高，不会损害炉缸残余炭砖。
- ⑥ 可以大幅延长炉缸寿命，为计划大修争取充裕的时间
- ⑦ 避免钛矿护炉等其他治理措施造成的炼铁成本抬升。

五、炭砖保护剂在线治理炉缸侵蚀的优点

- ① 采用炭砖保护剂治理炉缸侵蚀成本低廉，易于实施。
- ② 可以替代钛矿护炉、压浆等治理措施。
- ③ 可以在线实施治理，不影响高炉正常生产。
- ④ 相对于钛矿护炉等措施，炭砖保护剂在线治理对高炉炉况及高炉操作不产生负面影响。
- ⑤ 相对于压浆措施，炭砖保护剂加注压力低，介质流动性非常好，不会造成局部压力过高，不会损害炉缸残余炭砖。
- ⑥ 可以大幅延长炉缸寿命，为计划大修争取充裕的时间
- ⑦ 避免钛矿护炉等其他治理措施造成的炼铁成本抬升。

挣脱铁水环流理论的束缚，象脚侵蚀、侧壁高温、炉缸短寿等问题有可能迎刃而解！

祝愿炼铁人能够摆脱象脚侵蚀问题的折磨，
工作变得轻松一些！

A series of colorful silhouettes of runners in various colors (purple, blue, orange, red) running towards the right, positioned at the bottom of the slide. The background features a large, stylized image of a blast furnace or industrial machinery with a grid pattern overlaid.

河南煜华科技有限公司



THANK YOU

感谢倾听 欢迎指正 期待交流

汇报人：吴强国

网 址 www.xinxingranqi.com