高炉炉缸热负荷界限确定方法及应用

东北大学 陈良玉

主 要 内 容

0、引言

1、炉缸结构的安全厚度

2、炉缸结构安全线与内衬测温点布置

3、基于炉缸炉底安全线的热负荷界限

4、炉缸侧壁测温盲区的侵蚀诊断

5、结论与讨论

0 引 言

高炉炉缸内衬减薄性烧穿是安全生产的大敌. 炉缸温度和热负荷是判断炉缸侵蚀状态和安全性的常用指标，仔细认真科学地认识它们对安全生产十分重要。其中，炉缸热负荷界限如何科学合理的确定呢？尤其是对测温盲区，没有内衬温度参考，热负荷成为唯一观察的炉缸安全的特征量(还有炉壳温度),显得很重要了。这是现场技术人员经常思考和需要确定的重要事项。

炉缸热负荷界限指标的相关因素：

(1)炉缸内衬的导热性能——导热系数

(2)冷却条件——冷却强度

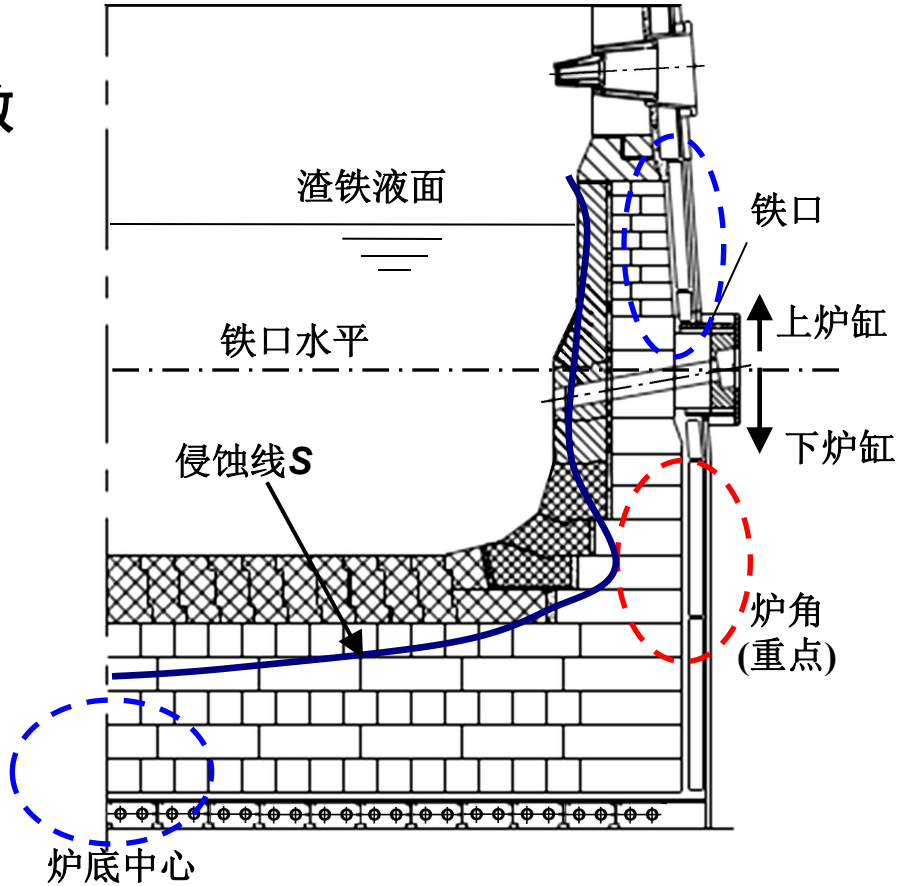
(3)侵蚀状态——常被忽略或未考虑

(或许复杂有难度)

重点部位：炉角区以及铁口水平以下

中小炉：第2、3段冷却壁

大炉：第2、3、4段冷却壁



1 炉缸结构的安全厚度

●炉缸炉底的内衬安全厚度的概念

炉缸内衬过薄烧穿，维持不烧穿的内衬厚度即为(最小)安全厚度

●炉缸减薄性烧穿的机制

(1) 内衬过薄，承受内压强度不足，破裂，热铁外窜，烧穿冷却壁和炉壳

(2)内衬过薄，热阻减小，冷却壁本体温度高，热稳定性不足，破裂，内衬受水激氧化而破裂，热铁外窜

●上述两个烧穿机制下的安全厚度有二：

(1) 内压(铁水静压+风压操作)下的内衬承载安全厚度

(2) 冷却壁本体热稳定性保护厚度

1 炉缸结构的安全厚度

●炉缸侧壁内衬安全厚度L_s

$$L_s = \max[L_p + L_0, L_T]$$

L_0为内衬热面变质厚度(渗铁层+脆化层的厚度),
与耐火砖材质、炉料、操作、位置等有关.

理论上,特定部位的L_s取L_p和L_T两值的大值.

实际上,多以L_p为主,炉缸冷却壁与内衬之间多有附加热阻,导致L_T减小.

(a)炉缸侧壁内衬结构受内压的安全承载厚度L_p

对于耐火泥连接的砖 –泥砌体,

根据圆筒结构受内压作 用的结构强度条件 ：

$$L_p = r_e\left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_l}{\sigma_l + 2p}}\right)$$

r_e——内衬外缘半径;

σ_l——内衬的抗拉强度;

p——内衬热面压力,

$p = p_w + p_g$;

p_g——铁水自重压力,$p_g = \rho g h$;

p_w——风压.

●在炉缸直径和内压一定条件下,提高内衬材料的抗拉强度,可减小厚度L_p

●材料强度一定时,大高炉p,r_e大,故L_p大.

(2)炉缸冷却壁本体热稳定的内衬保护厚度L_T

由一维径向传热理论,炉缸内衬最小保护厚度

$$L_T = r_e[1-1/\exp(R_T)]$$

$$R_T = k_1\left(\frac{1150-T_C}{T_C-T_F}(R_{hy}+R_{\Sigma 3})-R_{\Sigma 2}\right)$$

r_s为热面半径,r_e为冷端半径,r_Y为冷却壁中面半径,r_C为冷却壁热面半径,k_1为内衬导热系数,k_2为填料导热系数, k_3为冷却壁导热系数, T_F为水温,T_C为冷却壁热稳定温度(铸铁300℃,铸钢400 ℃,铜150 ℃)

热阻：$R_{hy} = \dfrac{1}{r_y h_y}$;冷却壁热阻 $R_{\Sigma 3} = \dfrac{1}{k_3}\ln\dfrac{r_y}{r_c}$ + 附加热阻；

填料热阻 $R_{\Sigma 2} = \dfrac{1}{k_2}\ln\dfrac{r_c}{r_e}$ + 附加热阻

h_Y为冷却壁中面对流传热系数(水管排布结构,水速有关).

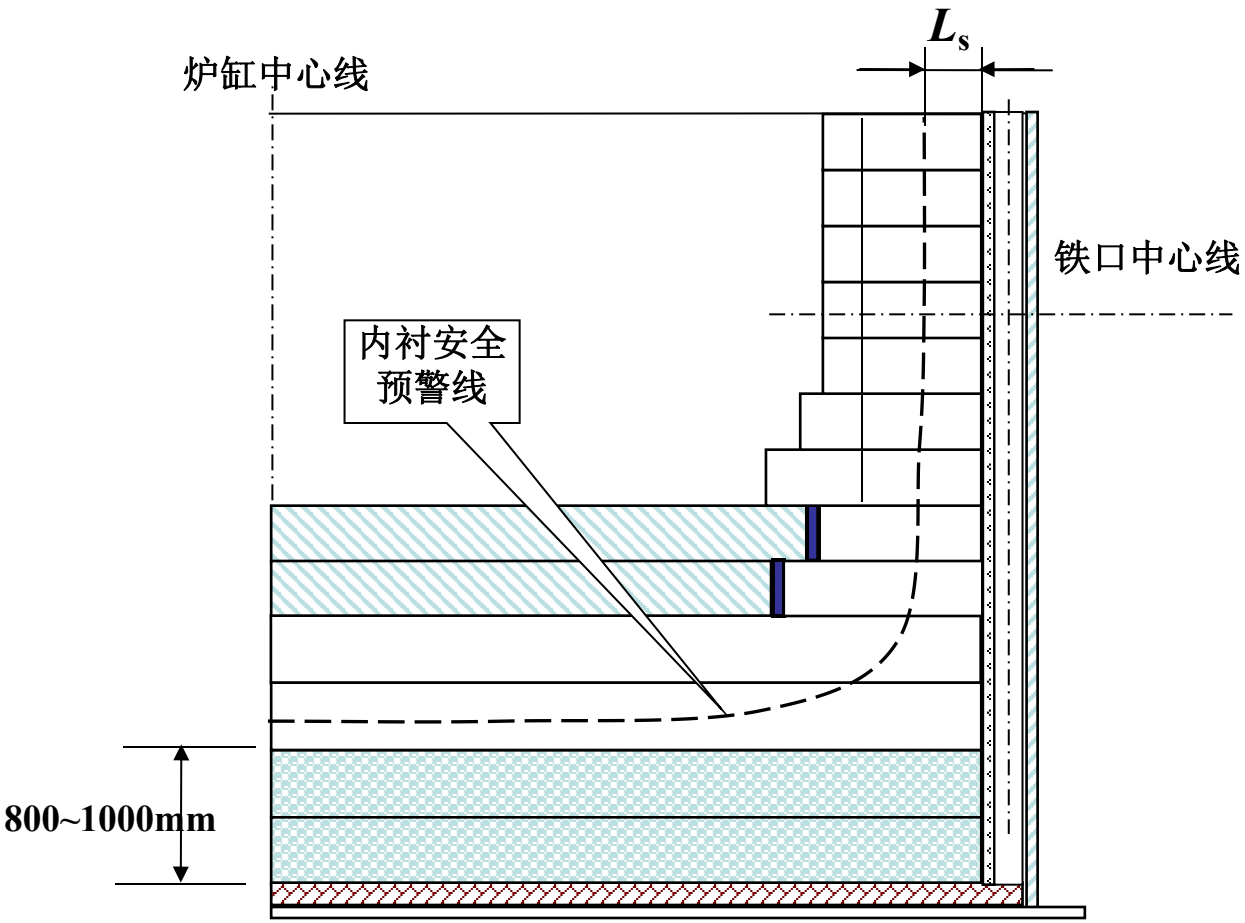
●炉缸直径和冷却壁结构一定, L_T正比于内衬导热系数, 反比于冷却强度.

(3)炉底内衬安全厚度L_s：

炉底内衬承载厚度应保有两层完整碳砖,防止铁水沿砖缝向下窜,危害炉底冷却系统等,砖层厚度一般400~600mm,炉底内衬安全厚度L_s=800~1200mm

2 炉缸结构安全线与内衬测温点布置

●炉缸结构安全线：依据各处的安全厚度光顺连接绘制



●基于安全预警线“冷端包围型”测温点布置基本方案

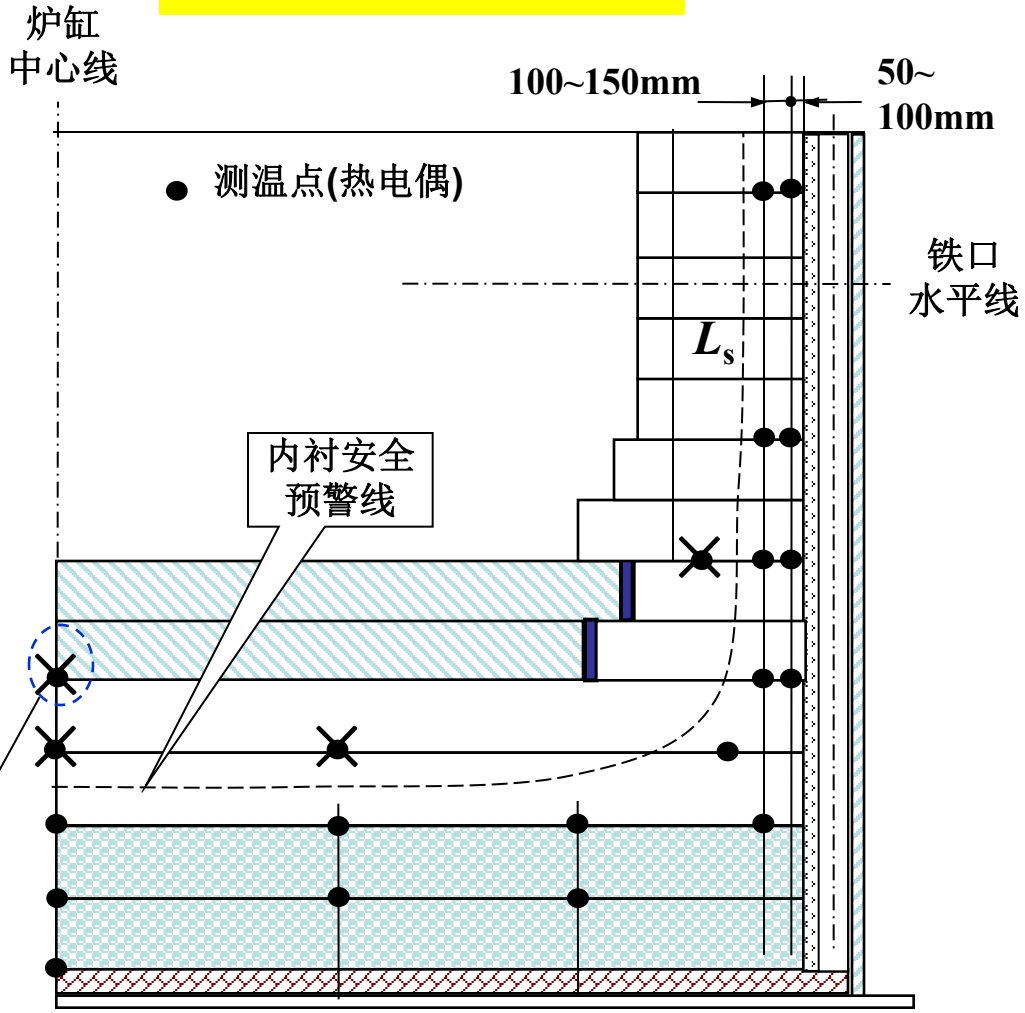
●内衬安全线为界,在其之外(靠冷端)在炉缸侧壁、炉角和炉底部位把测温点大致均匀地排布成包围形式,内衬安全警戒线之内不设测温点.

●优点:

(1)布点均匀合理,测温点数量较少.减少内衬机械损伤,降低设计、配置、调试费用.

(2)安全警戒线外布点,避免无谓“牺牲”,测温元件在低温区工作寿命更长,实现全程监测，冷端布置避免因元件保温管漏铁水

第1、2类热工测量条件



不必要且有害的测点

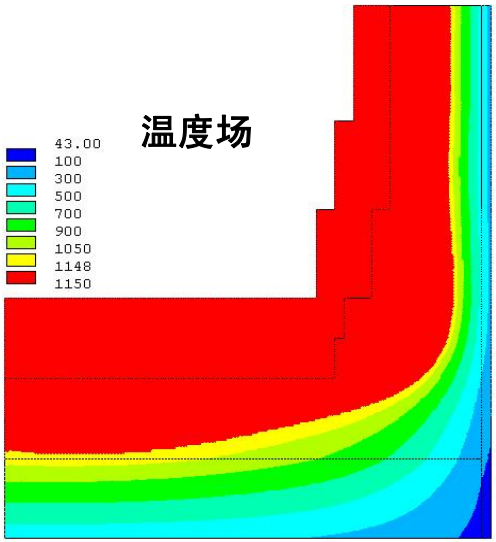
2007年第6届全国大高炉年会(本溪)提出并发表论文，已被业界广泛采用

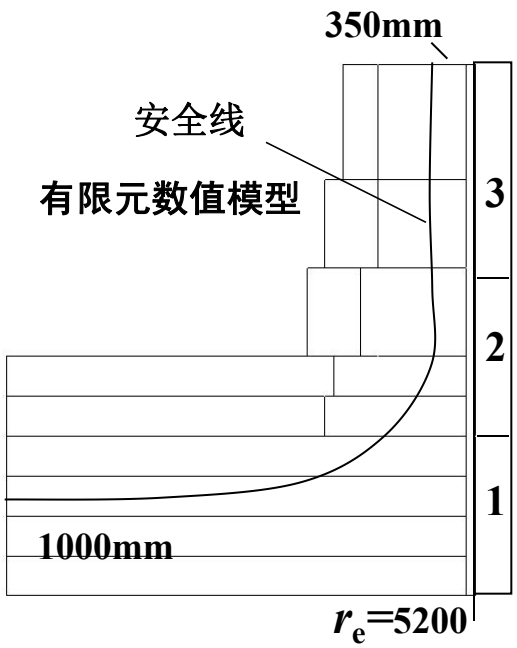
3 基于炉缸炉底安全线的热负荷界限值

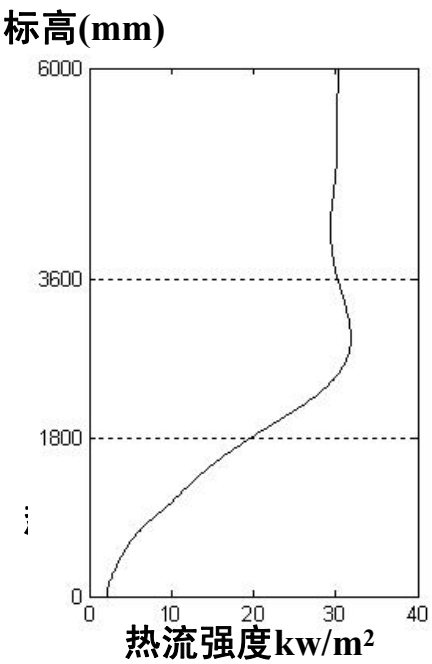
(1)炉缸设计阶段。因侵蚀未知，可用安全线计算热负荷，规划其界限值

测算取安全厚度
L_s=350mm
L_D=1000mm

参数 v_s= 2.0m/s h_c=163.03W/m²K h_D= 25.00W/m²K
T_F=30℃ k_1=10,15,20W/mK





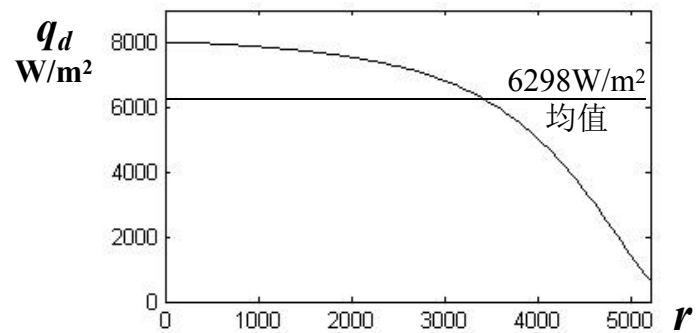


平均热流强度
kw/m²

1	9.02
2	29.37
3	30.30

k_1=15W/mK

注意到，炉缸侧壁的实际侵蚀形貌是不均匀的，按此，这个热负荷界限值应缩小使用，比如降低30%≈21kw/m²
可用吗?往下看！



炉底热流强度分布

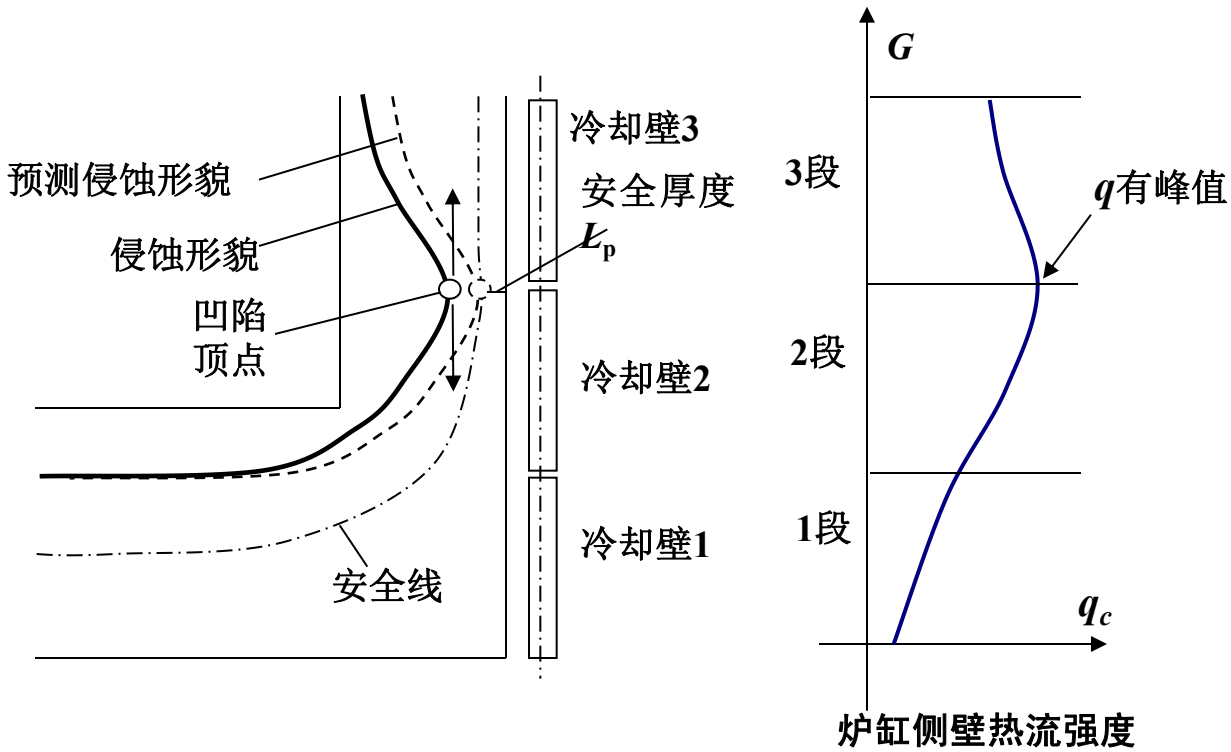
炉底界限值不作调整

3 基于安全线的热负荷界限值

(2)炉缸服役阶段，按实际侵蚀形貌规划。

经精确侵蚀诊断，获得侵蚀形貌后，设定相似侵蚀形貌，作传热计算，按冷却壁位置提取热负荷。以侵蚀形貌凹陷点达到安全厚度时的热负荷作为界限。

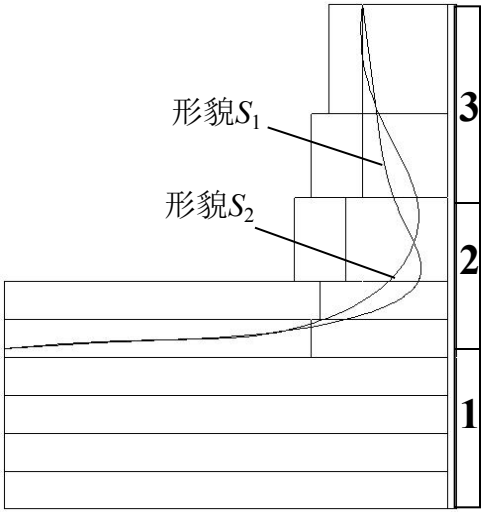
重点关心炉缸侧壁

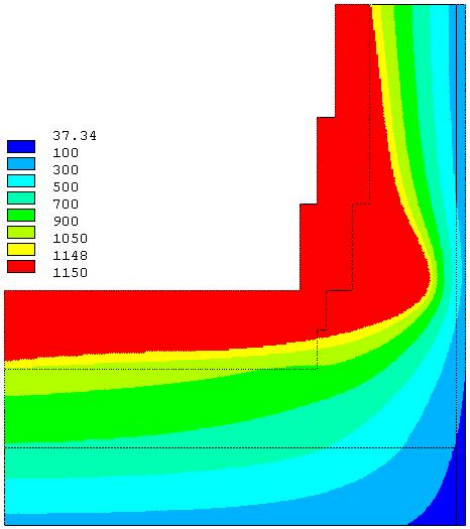


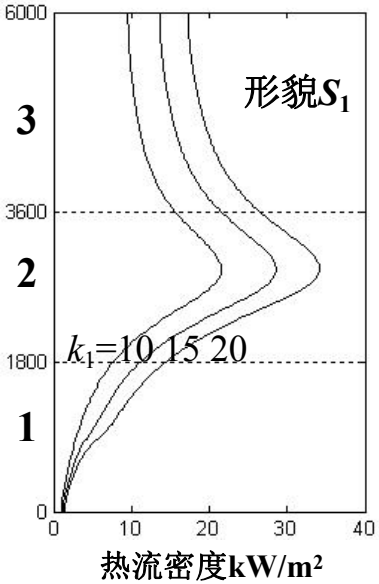
注意侵蚀凹陷与冷却壁的相对位置关系

●服役阶段——模型计算例

不同侵蚀形貌与冷却壁相对位置，热负荷的分布和均值有明显不同

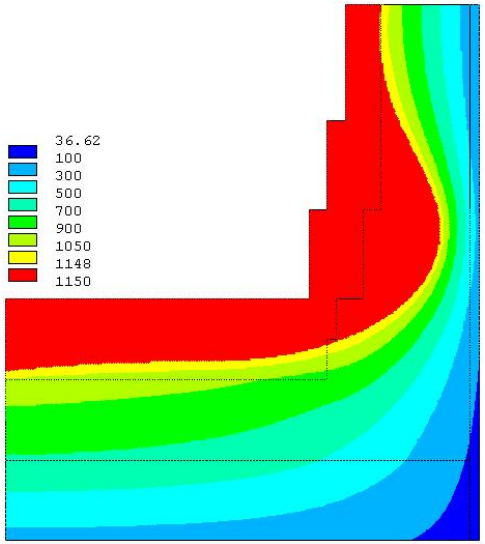


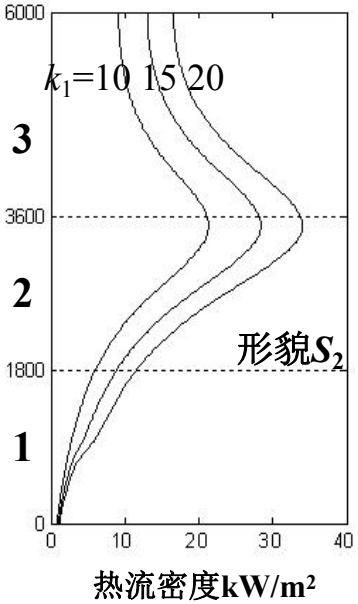




平均热流密度kW/m²

1	3.43	5.03	6.55
2	16.67	**22.61**	27.55
3	11.37	16.03	20.15
k_1	10	15	20





平均热流密度kW/m²

1	2.91	4.27	5.58
2	14.30	**19.59**	24.06
3	13.24	18.35	22.76
k_1	10	15	20

均匀侵蚀和凹陷侵蚀的冷却壁热流密度比：

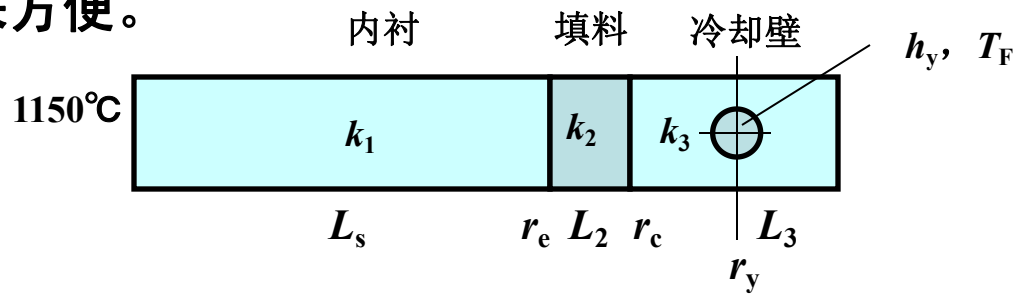
22.61/30.3=0.75

19.59/30.3=0.65

平均0.7，降低30%，工程可用。

●均匀侵蚀的侧壁热负荷一维传热计算

有了均匀侵蚀和凹陷侵蚀的折减比例，给工程上确定热负荷界限值(参考值)带来方便。



热流密度(平壁式)

$$q=\frac{1150-T_F}{\frac{1}{h_y}+\frac{L_s}{k_1}+\frac{L_2}{k_2}+\frac{L_3/2}{k_3}}=\frac{1150-T_F}{\frac{1}{h_e}+\frac{L_s}{k_1}}$$

$$h_y=f_{gy}h_G \qquad h_G=208.8+47.5v$$

$$f_{gy}=\frac{D_G N_G N}{2r_y}$$

D_G:水管内径，v:水速

N_G:单块冷却壁水头数

N:整周冷却壁块数

r_y:冷却壁中面半径

热负荷界限值 $q_{lim}=(0.65\sim0.75)q$

热流密度计算结果 kW/m²

导热系数k_1/(W/mK)		10	15	20
冷却条件 h_e/(W/m²K)	80 有填料	23.58	31.25	37.33
	160 顶砌	27.15	37.86	47.16

按此式 $q_{lim}=(0.65\sim0.75)q$ 估计热负荷界限值。

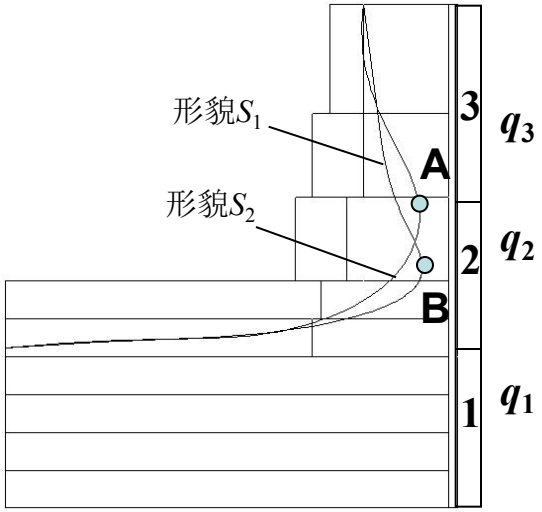
4 炉缸侧壁测温盲区的侵蚀诊断

(1)通过前面的第2、3段冷却壁对应的凹陷侵蚀，通过传热计算得到了热流密度分布、冷却壁热负荷

(2)若实测了冷却壁的热负荷，且符合前述的冷却壁热负荷规律，构造适当的计算方法把侵蚀形貌反解出来——侵蚀诊断

(3)情形1——高度方向——轴截面二维模型

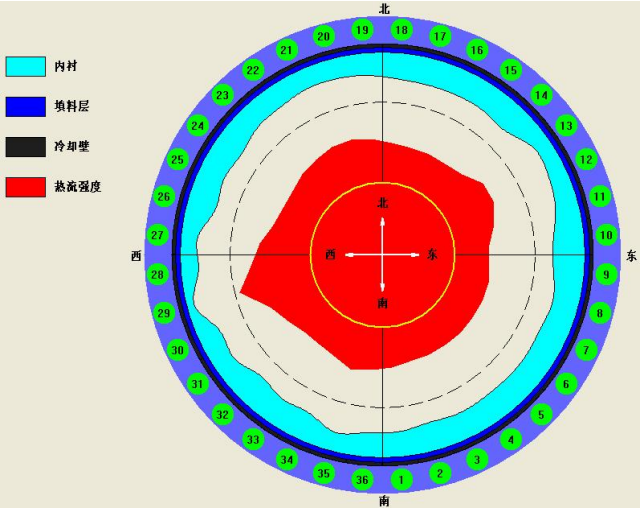
- 若q_3、q_2较大、q_1小
- 从最危险原则，侵蚀形貌的凹陷处介于A、B之间
- 建立传热模型，调整形貌边界S(包括凹陷点AB)，使得热负荷的模型值、实测值接近，确定边界S，进而得到剩余厚度。
- 计算结构安全系数，评估安全性。



4 炉缸侧壁测温盲区的侵蚀诊断

(4)情形2——周向方向——横截面二维模型

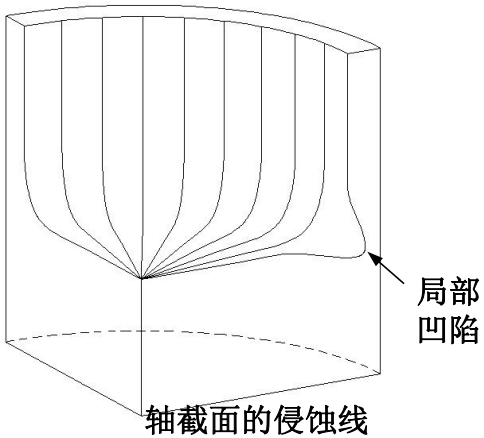
2008年酒钢宏兴2号高炉，横截面2D侵蚀诊断，延长寿命4年多，停炉解剖验证。

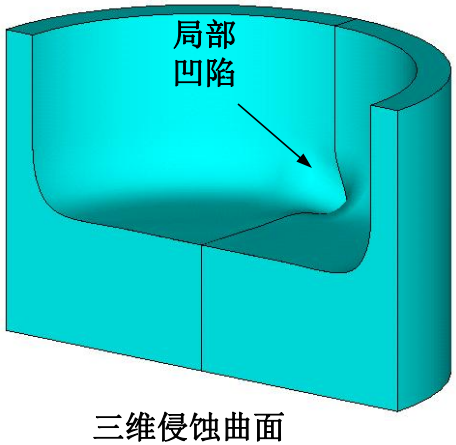


●内衬测温盲区侵蚀方法：炉缸侵蚀诊断的唯一可行的“最后”手段

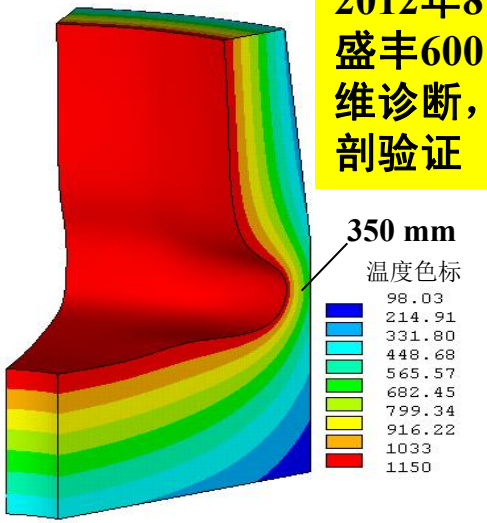
因为炉役后期测温盲区不可补插电偶，而热负荷总能测量.

(5)情形3——三维模型





2012年8月承德盛丰600高炉三维诊断，停炉解剖验证



4 炉缸侧壁测温盲区的侵蚀诊断

实例：莱钢3号750m³高炉(第一代炉役)

●莱钢3号高炉，2002年9月开炉投产。炉底第1~4层为半石墨质焙烧碳块，第5层为微孔铝碳砖，第6~7层为复合棕刚玉砖，炉缸侧壁为微孔碳砖。炉底强制风冷。

● 2007年5月炉缸水温差升高速率加快，炉底温度也伴随升高。炉缸2段、3段18号冷却壁单根水管水温差达到0.3℃、0.27℃。 炉底找平层中心温度5月初为322℃，月底升高49℃达371℃，到9月18日升高到394℃。此后进入护炉操作，一年后停炉大修。

模型技术：

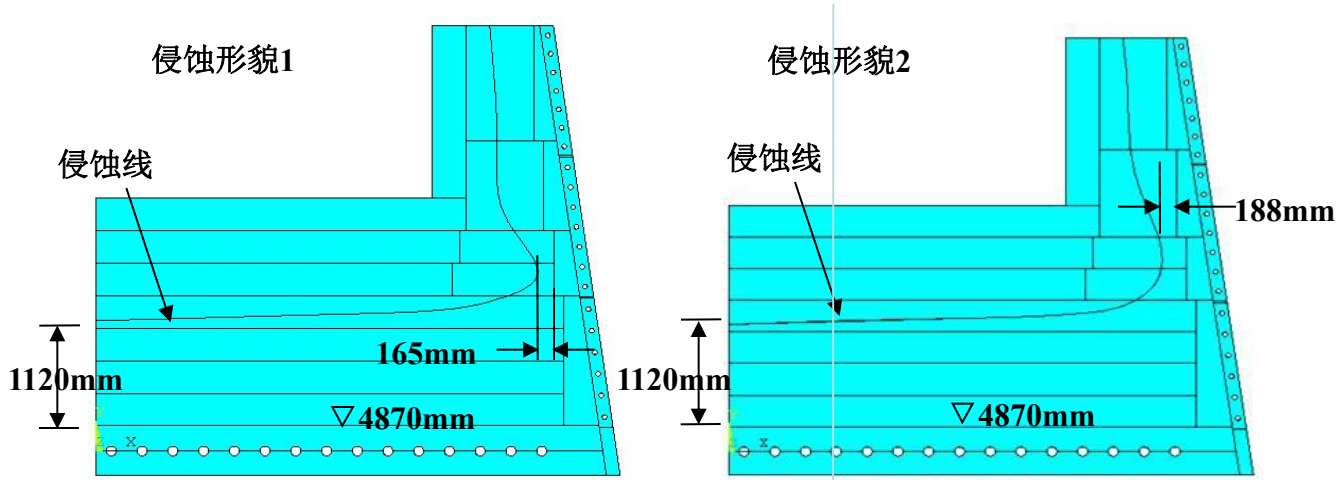
●实测炉缸冷却壁热流量

●确定相关计算参数和边界条件

●模型：

2D-Z-IV型(炉底II型，炉缸III型)组合模型

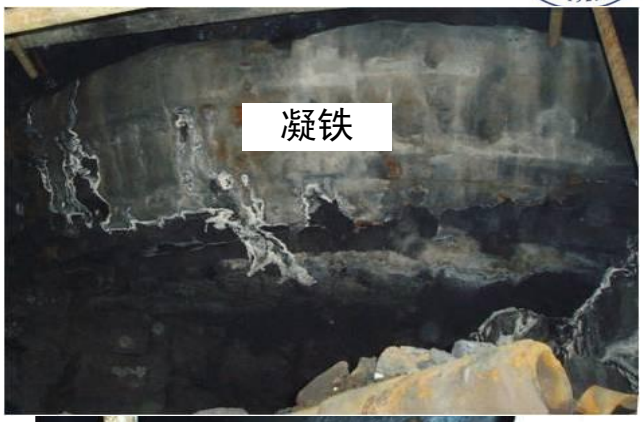
●炉缸部位使用最危险原则确定侵蚀边界

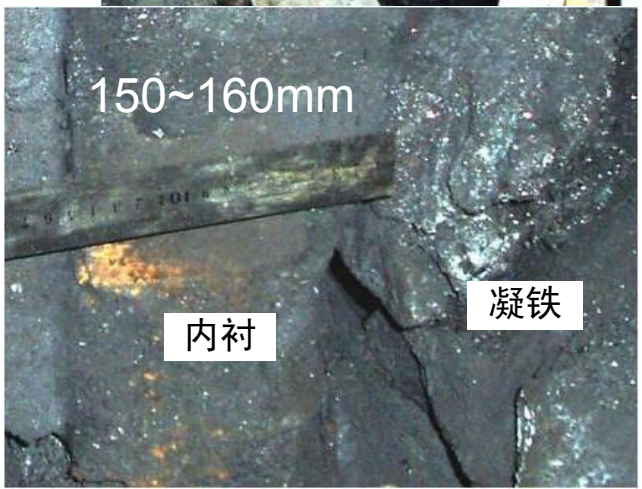


侵蚀形貌的计算结果-两个

4 炉缸侧壁测温盲区的侵蚀诊断

莱钢3号高炉
2008年6月1日
停炉并解剖,
诊断结果与
实剖一致





高炉
停炉解剖
整体情况

5 结论与讨论

(1)按炉缸炉底安全线，计算热负荷界限具有合理性。

设计阶段，可用一维传热计算获得热负荷后再经折算降低可作为界限值。文中给出了计算方法，根据数据作了论证和推论。

(2)服役中，准确确定热负荷界限的方法是，在准确侵蚀计算的基础上，作侵蚀形貌相似逼近安全厚度传热计算，可获得热负荷界限。

要注意或查明侵蚀形貌与冷却壁的相互位置。

(3)测温盲区，利用分段、分片冷却壁的热负荷，可用多维模型反解侵蚀，是一种测温盲区尤其是炉役后期的唯一可行的“最后”方法与手段。已为许多工程实例所验证。

(4)根据安全线，冷端包围型，布置内衬测温点，具有合理性

2007年第7届大高炉年会(本溪)提出，后为行业采用成主流设计方案。

报告完毕！

谢 谢 ！