

高炉结构



冶金工业出版社

高 炉 结 构

〔苏〕Л.А.索罗金 著

刘泓 陈有成 丁斌彦 译

刘 泓 校

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书译自苏联冶金出版社出版的Л.А.Сорокин著的РАБОТА КОНСТРУКЦИЙ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ一书。该书是在第一版(1962年)的基础上的修订第二版。本版重新编写了其中第二、三、八、九、十、十二章。

本书分析了结构和工艺因素对高炉系统构件综合性能的影响,砌体磨损和钢结构破坏的原因;提出了关于计算方法、构造以及使用、监测和检修方面的建议。此外,书中还载有现代大型高炉的计算和合理设计等方面的系统而又概括的资料。

本书对从事设计、建筑、维修高炉系统结构工作的工程技术人员很有参考价值,也可供高炉生产操作的技术人员和大专院校的有关专业的师生参考。

翻译过程中,对原书个别地方做了删减。

本书由刘泓(第一~六章)、丁斌彦(第七、九、十、十一章)、陈有成(第八、十二章)合译,刘泓审校。

高 炉 结 构

〔苏〕Л.А.索罗金 著

刘泓 陈有成 丁斌彦 译

刘 泓 校

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 9 5/8 字数 255 千字

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷

印数00,001~2,300册

统一书号:15062·3950 定价1.20元

序 言

本书的第一版系统总结了1300~1700米³高炉结构的现场调查研究及对其应力状态理论研究的资料，并对炉皮及衬料引起侵蚀的原因进行了分析，而且据此对高炉综合体结构的计算方法，提高结构强度和耐久性方面提出了一系列的建议。

在本书第一版问世以来的十多年里，高炉的容积已由1000~1700米³增大到2700~5000米³，热风温度由800~900°C提高到1000~1100°C，炉顶压力由2个大气压增至4个大气压，高炉冶炼强度也提高了。

高风温和高风压必然促使高炉炉衬和炉皮的侵蚀加快。

这十几年来，高炉和热风炉的生产实践证明，构造的因素，以及结构制作，安装和使用上的一些缺点的影响增大，结果破坏了高炉系统结构的强度。

新型耐火材料的使用以及高炉综合体结构的发展，迫切需要对高炉结构作进一步认真细致的研究。

考虑到上述因素，这一时期对各地的26个大型高炉和200个以上的热风炉进行了调查研究。同时对一些2000~2700米³的高炉综合体结构进行了现场试验，也进行了旨在确定新型耐火材料的物理—力学性能实验室的试验，以及在两轴向力作用下钢材样品的试验。此外还考虑了在温度、压力因素影响下，计算收缩蠕变线膨胀系数和弹性模量为可变性的结构件中应力的方法。

本版对第一版进行了大量的修改和补充，其中第二、三、八、九、十、十二章完全重写。

本书以反映高炉综合体结构的发展，广泛实验理论的研究，现场调查研究自然状态下的试验资料为基础，并利用了苏联中央钢结构科学研究设计院等科研单位和苏联一些冶金工厂近十年来的文献资料。

应用符号

σ_r 、 σ_θ 、 σ_z ——炉缸壁及炉底处砌体的经向、环向及垂直应力，公斤力/厘米²（兆帕 $\times 10^{-1}$ ）；

E_{yn} ——粘土砖的弹塑性模量，公斤力/厘米²（兆帕 $\times 10^{-1}$ ）；

E_c ——钢的弹性模量，公斤力/厘米²（兆帕 $\times 10^{-1}$ ）；

$E_{\delta 1}$ ——混凝土弹性模量，公斤力/厘米²（兆帕 $\times 10^{-1}$ ）；

E_{δ} ——受压时混凝土塑弹性模量，公斤力/厘米²（兆帕）；

$E_{\delta p}$ ——受拉时混凝土弹塑性模量，公斤力/厘米²（兆帕）；

E_m ——粘土砖砌体的弹性模量，公斤力/厘米²（兆帕）；

λ ——受压时混凝土的塑性系数；

r_n ——混凝土受压时考虑其屈服点的相对全部塑性变形；

r_p ——混凝土受拉时的全部变形；

r_σ ——混凝土受压时的全部变形；

λ_p ——混凝土受拉时的塑性系数；

$\alpha_{\sigma p}$ ——混凝土热膨胀系数；

β ——考虑温度影响的系数；

R_σ ——混凝土的抗拉极限强度，公斤力/厘米²；

r_a ——由底板中心到环状钢筋轴心的距离，厘米；

φ_r ——计算裂缝开展的系数；

ψ ——考虑在裂缝之间受拉混凝土的工作影响系数；

F_a ——钢筋截面积，厘米²；

μ_c ——钢材泊松比；

r ——在壳体水平截面中炉皮及内衬层的半径, 厘米;
 R ——炉皮锥形表面与内衬层的半径(垂直于母线), 厘米;
 D ——炉皮直径, 厘米;
 δ ——炉皮厚度, 厘米;
 b_0 ——在砌体和冷却器之间的缝隙宽度, 厘米;
 a_0 ——炉底捣制(受压)部分半径, 炉缸壁受压部分厚度, 厘米;
 C_x ——冷却器厚度, 厘米;
 r ——炉底计算点的半径, 厘米;
 t_0 ——炉底砌体顶部中心的温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_r ——由轴线沿半径至 r 处炉底砌体温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_z ——沿轴线深 z 处炉底砌体的温度, $^{\circ}\text{C}$;
 P_r ——砌体对炉皮的径向压力, 兆帕;
 K ——炭捣料的变形率;
 K_0 ——炭捣料的变形率曲线参数, 1/兆帕;
 σ_x ——炉皮中的环向应力, 兆帕;
 σ_y ——炉皮中的径向应力, 兆帕;
 ΔR ——炉底径向变形的绝对值, 厘米;
 $\Delta_{x. n}$ ——砌底径向变形的绝对值, 厘米;
 Δ_n ——在压力 p 作用下, 炭捣料径向变形的绝对值, 厘米;
 $\Delta t_{x. n}$ ——炉缸、炉身砌体的受压区的平均温升, $^{\circ}\text{C}$;
 Δt_n ——炉皮温升, $^{\circ}\text{C}$;
 $K_{\text{тп}}$ ——炉皮及炉体的摩擦系数;
 a ——炉缸、炉身壁厚度, 厘米;
 H ——沿壳体母线分段长度, 厘米;
 $H_{i, z}$ ——由高炉下部(炉缸)至某一高度, 或由托圈(炉身)至某一计算截面的距离, 厘米。

目 录

序言

应用符号 V

引言 1

第一章 高炉的综合体结构 8

第一节 高炉炉皮和砌体的工作条件 8

第二节 高炉结构 11

第三节 高炉钢结构方案的比较 27

第四节 热风炉 29

第二章 高炉及热风炉的耐火内衬 31

第一节 概述 31

第二节 高炉耐火材料 32

第三节 热风炉耐火材料 35

第四节 热风管道耐火内衬 37

第三章 在冶炼过程中高炉综合体结构的工作状况 40

第一节 高炉 40

第二节 热风炉 47

第四章 高炉炉皮的试验 51

第一节 问题的提出 51

第二节 炉皮试验方法 53

第三节 整理试验数据的概率法 59

第四节 高炉炉皮试验 72

第五节 热风炉炉皮试验 81

第六节 金属试件双向受拉试验 83

第七节 钢板局部受热试验 86

第八节 炭捣、填充料及冷却器敛缝用材料的试验 89

第五章 影响结构应力状态及其损坏的因素 92

第一节 工艺因素 92

第二节 构造因素 95

第三节 耐火材料的物理性能 100

第四节	砌体中温度的分布	102
第六章	现行的计算炉衬壳体中应力的方法	108
第一节	温度体制	108
第二节	砌体与炉皮中的应力	109
第七章	单膨胀层高炉综合体结构壳体中的应力	132
第一节	炉底处的炉皮及砌体	132
第二节	炉缸处的炉皮及砌体	139
第三节	炉身处的炉皮及砌体	143
第四节	炉底、炉缸及炉身工作的第二阶段	144
第五节	计算炉皮温度应力的实用公式	146
第六节	热风炉的炉皮及砌体	152
第七节	炉皮与砌体层内的温度	156
第八节	地脚螺栓的计算	156
第九节	高炉及热风炉炉皮中开孔处的加固	157
第八章	单层或多层非均质耐火内衬壳体应力状态的研究	159
第一节	计算部分	159
第二节	基本前提和假定	160
第三节	薄环中的应力与变形之间的关系	162
第四节	有膨胀缝和炉皮的内衬壳体层的位移	165
第五节	沿热风炉高度炉皮经向应力的分布	168
第六节	双膨胀层的热风炉计算	171
第七节	单膨胀层的热风炉炉皮计算	177
第八节	高炉内衬和炉皮的计算	177
第九节	炉底砖衬和炉皮的应力状态	180
第十节	边缘应力	181
第十一节	局部压力产生的应力	191
第十二节	圆板中的温度应力	192
第十三节	孔洞周围的应力集中	194
第十四节	疲劳应力	196
第九章	使用和理论、试验研究资料的分析	201
第一节	调查及理论、试验研究的结果	201
第二节	耐火材料物理力学性能的修订	206

第三节	内衬磨损和炉皮强度破坏的原因.....	210
第十章	设计、制作、安装和使用	221
第一节	对设计构造方面的建议.....	221
第二节	高炉综合体结构制作、安装和验收的要求.....	232
第十一章	冶炼含锌矿石的高炉特点	233
第一节	工艺和构造.....	233
第二节	高炉结构的使用情况.....	234
第三节	高炉炉皮中的应力.....	249
第四节	试验资料 and 理论研究的分析.....	254
第十二章	高炉炉皮及辅助设施的修理	259
第一节	高炉综合体结构的损坏.....	259
第二节	高炉综合体的炉皮修理.....	271
附录		282
参考文献		295

引 言

高炉生产潜力之一就是缩短停炉休风的时间，为此，就要求设计更为完善的炉皮和内衬的结构形式。致使高炉停产大修的原因是砌体的烧损、设备及炉皮的磨蚀（有时是正常的磨蚀），而砌体的烧损和炉皮的磨蚀又与结构、材料以及冶炼强化的程度有关。

高炉结构在不均匀的高温，煤气压力，铁水和融渣的化学作用下工作。在生产过程中，这些作用导致耐火砌体、胀缩层及炉皮变形，结果产生较大的应力，并在砌体内产生由于磨蚀的应力，这些对结构影响的程度首先取决于高炉结构的类型，结构尺寸大小及其材料。

高炉炉皮由圆筒和锥角形的壳体组成。内衬为耐火材料砌体，其中设置各种冷却器冷却。为了降低砌体在受热时传至炉皮的压力，在炉皮和砌体间留有间缝，用变形材料（炭捣或其他填料）填塞以适应砌体的膨胀，并将其传来的压力均匀地分布于炉皮上。同时应考虑到炭捣或塑性填料也是变形性小的，结果砌体的径向膨胀不尽能为填料变形抵消，导致产生了较大的炉皮应力。

在圆筒和锥形炉皮相交的部位易产生显著的边缘应力。同时，膨胀的内衬产生的压力，通过由内衬或冷却器组成的刚性模传至炉皮上。采用的砌体冷却系统并非是很成功的，砌体自身冷却较缓慢，不均匀，很快受到灼烧，使炉皮相应部位被烧红，结果砌体被烧坏，炉皮强度被破坏。

砌体烧坏的期限和形式大都与高炉冶炼强化程度（压力和风温），冷却形式有关，而炉皮的膨胀裂缝和烧红又与高炉综合体结构本身，建筑安装的质量和冶炼时的因素有关。例如，不管高炉冶炼强化如何（鼓风压力与温度的提高），第Ⅰ类高炉大修之

间的炉龄由于炉底都采用空气冷却，由6年（1950~1960年期间）增至10年（1960~1970年期间）；第Ⅱ类大修以后，由于没有采用有效的炉身结构，炉龄增加不多；第Ⅲ类大修以后，由于未更换炉顶结构，炉龄减少了3~4个月（图1）。

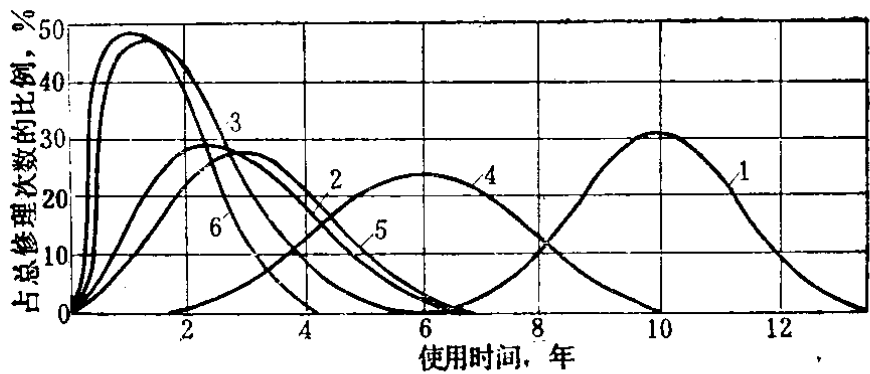


图 1 在大修之间高炉的使用期限
1~3—相应于1960~1970时Ⅰ~Ⅲ类高炉大修之间的期限；
4~6—相应于1950~1960时Ⅰ~Ⅲ类高炉大修之间的期限

各种不同高炉的休风时间，表明各种高炉结构牢固程度不一，必须进行研究和改进（图2）。

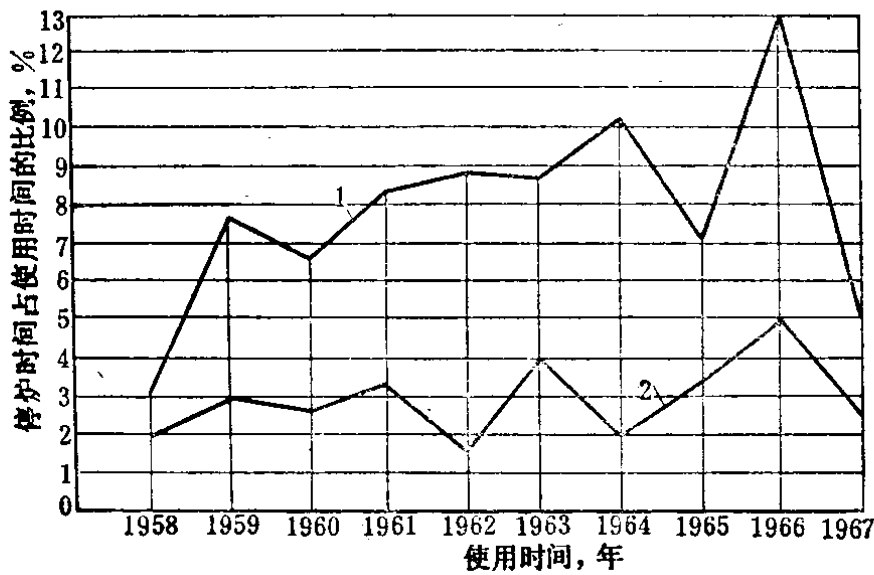


图 2 高炉的休风情况
1—最大的，2—最小的

由于冶炼时难于观测高炉和热风炉中的情况和取得足够的耐火砌体的物理特性数据，因此，不易弄清炉皮的破坏、砌体过早损蚀的原因。对耐火材料物理性能的研究，至今基本上是以个别的耐火砖样品或模型进行的。当然所取得的结果不符合实际情

况。

缺少铬炭或炭捣材料和冷却壁之间的填塞料变形程度的数据资料，以及炉皮中应力分布的实验数据，都妨碍了制订高炉结构的计算方法，结果使高炉的设计和施工都在未充分考虑砌体—炭捣—冷却器—炉皮系统在高温作用下引起的应力状态下进行。甚至某些设计规定上写明，高炉在何种复杂条件下工作，决定其中应力的数值是不可能的。对问题的这种提法势必只能在工艺的计算基础上决定砌体结构的形式和尺寸，而在决定炉皮结构和厚度时未能充分考虑砌体所起到的力的作用。

考虑到这些问题，苏联国家冶金工厂设计院与钢结构设计院于1954年制订了高炉车间钢结构设计、制作、焊接、安装技术条件，研究了设计中的一些问题，确定了负荷和某些尺寸。

在总结生产经验的基础上，曾试图对一系列高炉结构作出计算的论据，例如曾提出高炉炉皮厚度 δ 按下式计算^[15]：

$$\delta = kD \text{ 毫米}$$

式中 k ——与计算炉皮的位置有关的系数，炉子下部取2.7，炉身取2.0及2.2（第一层），热风炉取1.6；

D ——炉皮直径，米。

计算出的结果要求以基本负荷、临时负荷以及4个大气压的风压的总和（认为这些条件符合高炉最繁重的操作制度）加以验算。

后来，随着一些高炉炉皮上裂缝的出现，苏联黑色冶金工业部作出决定，其中包括制定炉皮的计算方法。

在有效容积为1033、1386、1513米³一系列的标准高炉设计中炉皮厚度列于表1。

热风炉炉皮用BCr3cn钢^①，在燃烧嘴和热风阀区厚度取24毫米，其它部位取14毫米。

这种设计方法限制了采用高强度钢，因而要进行专门的实验

① BCr3cn为B₃号镇静钢。——译者注

和理论上的研究，以便在其基础上合理地设计高炉钢结构。

在1950~1960年间，钢结构设计研究院对生产中高炉炉皮进行了试验。在这些试验的基础上制定了炉皮的计算方法，而且在对高炉和热风炉结构研究中不是孤立地只研究炉皮，而是在互相联系中同时弄清炉皮、砌体、冷却器损蚀的原因〔74〕。

表 1 标准高炉炉皮厚度，毫米

部 位	有 效 容 积，米 ³		
	1033	1386	1513
炉 底	32	36	36
炉 缸	30	36	36
风 口 区	30	32	32
炉腰、炉腹	28	30	30
炉身			
下弦带	28	30	30
上弦带	28	28	28
炉顶	28	28	28
其它部位	32	24	24
托 圈	32	36	36

计算的方法是在考虑砌体—膨胀层—炉皮成为一个体系共同工作的基础上制定的，而且利用了耐火材料的物理—力学性能实验中取得的数据。计算是当作具有一个膨胀层，双轴向应力作用下进行的。

以后一个阶段（1960~1970年），标志着高炉的容积和强化冶炼的程度进一步扩大。风温提高到1200℃，要求在热风炉中采用较高耐火度的砌体材料——硅砖，以致改变了结构本身，开始采用带双膨胀层的多层砌体。

随着高炉综合体结构应力的提高，产生了关于结构的制作和安装公差问题，要求重新对结构进行严格审查。在一系列的情况下，钢结构制作，特别是安装公差的加大，都破坏了设计的几何形状，招致较低的焊接质量，使高炉综合体中某些结构丧失本身的承载力。

有鉴于此，以及考虑随着风温提高到 1200°C 时热风炉的改建，曾将热风炉炉皮的厚度加到20毫米。

这段时期，为了保证高炉结构的安全度和使用寿命，必须制定这种结构的计算方法和对高炉综合体设计、制作、安装、使用维修方面的规定，因而对大型高炉进行了进一步的实验及理论上的研究。

1960~1972年在研究高炉综合体结构问题的状态、调研与试验的过程中曾进行了大量的工作，其中包括对60个高炉和200个热风炉的调查研究，对7个高炉综合体进行了现场试验。并在试验过程中取得了50,000个以上的数据，收集了大量的统计资料，对耐火砖进行了试验室中的力学试验。

调研与试验的结果分析表明，在高炉与热风炉的炉皮中不论在环向或垂直方向都产生了大量的拉应力。大家知道双轴向的拉力降低炉皮的可变形程度，并促使炉皮遭到脆性破坏。在炉缸与炉底中，这些应力有时会超过屈服极限（如在平常的弹性模量情况下变形相对地转化成应力的话）。炉身炉皮的应力有时也超过屈服强度。炉皮的破坏通常开始于应力集中之处（转折处、翘曲处、开洞处等）。

在高炉综合体使用的过程中，在高温和高风压作用的情况下，高炉砌体产生破坏（烧毁），热风炉顶部砌体变形或改变其几何形状。而高炉炉皮也就改变其应力状态。通常此时总的应力状态有所降低，而局部应力却急剧增加。

在高炉综合体中热风炉是一个主要的构筑物，其使用上的牢固程度与整个综合体的工作有重要关系。热风炉是圆柱钢壳结构，内有耐火内衬，它的温度作用决定了钢炉皮中应力的数值，热风炉结构承受高温和煤气压力的作用。温度与风压荷载周期性地出现。

随着高炉有效容积及强化冶炼程度的增大，炉温及风压相继升高，热风炉结构本身也有所改变。代替以前采用的耐火材料——A与B型粘土砖，在高温区开始采用提高强度及耐火性能

的材料——高铝砖BFO-45及BFO-65。目前的趋向是采用耐高温、致密的硅砖。

正如生产实践所表明的，以往采用的填料（硅藻土、石屑、矿渣、石棉）被风力吹出砌体和炉皮之间，使炽热煤气直接透到炉皮，把炉皮烧红。为了避免这种现象，曾提出以垫层填塞接缝，用喷枪喷涂的方法。

至1958年，热风炉炉皮采用BCr3cп钢，厚14~16毫米。以后推广使用了有较高计算强度和冲击韧性的14Г2、15XCHД等低合金钢。高炉采用低合金钢得以用先进方法施工——卷板法安装。

为适应高炉冶炼的进一步强化，提高了对高炉钢结构制作和安装精度的要求。因为制作和安装的缺陷（几何形变及焊缝的断折）都将使应力集中，促使热风炉炉皮破坏。例如对用12Г2钢制成的27个大型高炉的热风炉炉皮的调查研究表明，有些部位安装时未遵守技术条件，超过了国家规范中的公差，其中包括当板厚10~12毫米时在垂直焊缝中断裂达10~20毫米，焊缝的翘曲达5~6毫米，缺口等。

考虑上述情况，以及面临大型高炉所属热风炉的扩建，曾决定新建和改建的热风炉炉皮厚度不得小于20毫米。与此相适应，苏联国家钢结构设计科研院曾制定“高炉辅属热风炉炉皮的计算和钢材型号的选择”的规定^[75]，于1968年作为正式文件批准施行。该规定中指出新建热风炉应用低合金钢（10Г2CT或09Г2C）制作。热风炉炉皮的计算及其制作钢号的选择，都是考虑了内衬材料的物理、力学特性——砌体的弹性模量、摩擦系数后进行的，这些数据是在以实验室的试验为基础，并参考现有资料而取得的，并对钢材的工作条件系数取 $m=0.55$ ，炉皮保证厚度取 $\delta=20$ 毫米。

为了继续提高风温和风压，以及在热风炉的高温区采用具有两个膨胀层的新型耐火材料，提出了以下课题：进行新的实验与理论研究，弄清砌体及炉皮破坏的原因，制定多层衬料及炉皮的算法，编制对构造措施的建议。

苏联东部的高炉(库兹涅茨克钢铁公司、下塔吉尔钢铁公司)用含锌矿石进行冶炼。在炉内 900°C 以上的区域, 锌通过时转化为气体状态, 渗透于炉身的耐火砌体中, 以金属锌及氧化锌存在。使炉身砌体的经向及竖向均发生膨胀, 致使炉皮严重变形或断裂。

为消除锌的这一有害作用, 下塔吉尔钢铁公司采用了薄壁的炉身砌体, 以加肋冷却壁进行冷却。这一措施减少了锌在砌体中的沉积, 但冷却壁抗高温作用却显得较差。

近十年理论综合研究实验的结果表明, 苏联中央钢结构设计研究院基本上解决了上述任务, 并系统地反映于本书内。

第一章 高炉的综合体结构

第一节 高炉炉皮和砌体的工作条件

近代高炉是竖炉型的炉子（图3），内部形式由耐火材料砌成，用冷却器进行冷却，外部包以钢炉皮，炉型根据工艺要求而定。

高炉沿高度分为以下区段：炉缸、炉腹、炉腰、炉身与炉顶。

在冶炼的高炉内有两种不断运动的物体。一种是炉料（焦炭，矿石，烧结矿和石灰石），缓慢下降，并逐渐被加热；另一种是焦炭燃烧产生的煤气。煤气以高速度上升，温度由1600降至200~400℃，不均匀地分布在炉子的各个截面内，沿炉壁（炉周通道）流通，砌体受煤气强烈的灼烧而损蚀。

炉身下部的铁水与矿渣向下渗到块状炉料之间，部分沿炉壁流下。

焦炭在炉缸风口区燃烧，一直深入炉内约1.5~2米处，这一区域是最高温度区，达1800~1900℃。

高炉内同时存有的炉料和熔炼的成品都压向炉壁，并冲刷炉壁，产生化学作用并灼烧砌体。炉身温度在400~1000℃之间，而炉缸则达1400~1500℃（图4）。

在机械、热工及化学作用下，炉身砌体遭到破坏。炉皮局部烧红，破坏高炉正常的工作。料崩时，滑料动力的冲击破坏炉腹与炉缸的砌体。

特别是在炉底和炉缸的砌体上作用着较大的荷载。炉底砌体受到铁水的冲刷，经常处于不断灼热及铁水压力作用下。铁水浸入砖缝，使其产生塑性变形，结果炉底砌体及炉缸壁很快破坏，炉底形成坑洞被铁水填满。当高炉工作制度改变时，这些铁水可