

国外水泥回转窑用耐火材料

建材部技术情报标准研究所

目 录

一、水泥工业用耐火材料综述.....	(1)
二、耐火砖砌体的应力和应变.....	(17)
三、大型水泥回转窑耐火砖的损坏.....	(23)
四、水泥回转窑燃烧带耐火制品的机械性能.....	(26)
五、水泥回转窑内镁质窑衬材料的应力和损坏.....	(29)
六、煅烧白云石火砖在回转窑中的损坏问题.....	(34)
七、关于回转窑的无胶泥砌衬.....	(36)
八、整体水硬性胶结料及其在水泥回转窑上的应用.....	(39)
九、多筒冷却机水泥回转窑出料带和进料弯头处的 整体耐火窑衬.....	(44)
十、用耐磨的轻质耐火砖作水泥回转窑的工作窑衬.....	(46)
十一、水泥窑用耐碱隔热砖—国外有关资料综述.....	(50)
十二、水泥回转窑隔热耐火材料的砌筑和有效应用.....	(55)
十三、耐火材料工业对提高大型回转窑窑衬寿命的可能性.....	(58)
十四、回转窑煅烧块料制取镁砂和白云石砂的经验.....	(66)

水泥工业用耐火材料综述

本文综述了自1960年以来发表的水泥工业用耐火材料的技术资料。

一、水泥工业中耐火材料的寿命和单位消耗量

窑径增大后通常窑龄缩短，烧成带窑衬寿命也缩短（图1、2）。取决于窑径的窑衬寿命的简化公式为 $S = K \frac{1}{D^2}$ ，式中K为取决于窑工作情况的变量。窑内不同带中窑衬寿命变化很大（表4）。窑径对窑衬寿命的强烈影响主要因为直径加大的窑内强热度增加了（图2）。

不同类型的窑内各带砖耗（公斤/吨）可见表1和图2。值得注意的是悬浮预热器窑内砖耗随窑径而增加。

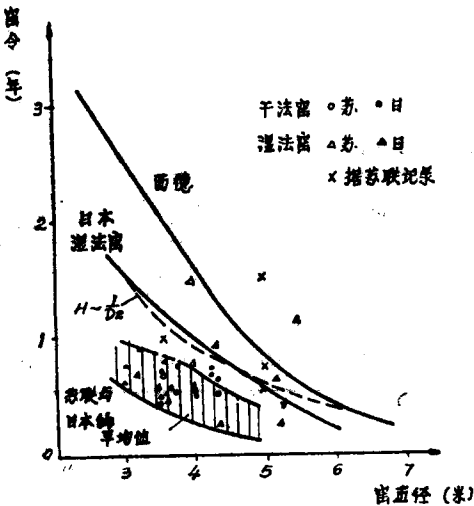


图1 烧成带窑衬寿命与窑直径的关系

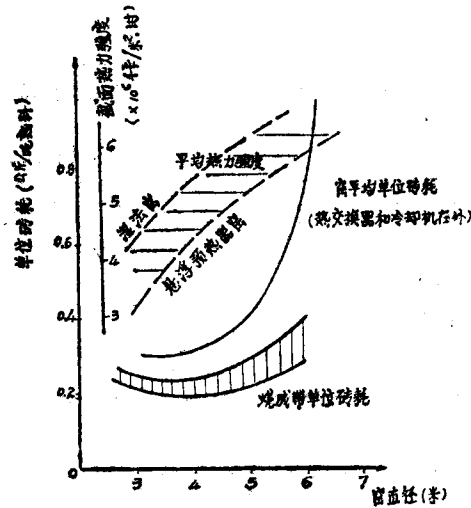


图2 单位砖耗热力强度与窑径的关系

但另一方面在一直径5.6米的大窑内烧成带砖耗也曾低到略超过0.1公斤/吨的情况。在对比单位负荷不一且窑衬体积密度和高度各异的回转窑时，可用新砌窑衬的表面积与所产熟料量之间的比值（厘米²/吨或米²/1000吨）来评定单位砖耗。

延长窑龄降低砖耗的一种可能办法是采用窑外分解，它与悬浮预热器窑产量相同时窑径可以减小。

窑龄除取决于耐火材料质量外还受窑的结构和操作因素的强烈影响。据苏联统计资料，只有33%的窑衬是正常耗损的，有45%的窑衬因制造砌筑方面以及设备工艺方面的错误而降低了使用寿命（表3）。

取决于窑型和窑径的单位砖耗						表 1
窑 型	窑 径 (米)					
	2.8~3.2	3.6~4.0	4.0~5.0	5.5	5.5~6.0*	
立 窑	0.1~0.3					
立 波 尔 窑	0.7~1.2	0.3~0.5				
湿 法 窑	0.8~1.2	0.5				
悬浮预热器窑		0.25~0.35	0.35~0.5	0.7	0.8~1.0	
全 苏 联 合 计	平 均 1.6					

* 原文为 5.5~5.0——译注

采用分解炉后延长窑龄的估计								表 2
	假定产量 (吨/天)	必须窑径 (米)	计算窑龄的 提 高		假定产量 (吨/天)	必须窑径 (米)	计算窑龄的 提 高	
只用预热器	2000	4.6	1	只用预热器	4000	5.8	1	
带窑外预分解炉		3.7	>1.56	带窑外预分解炉		4.6	>2.68	

注：估计时采用图1中增大窑径的湿法窑窑龄曲线。

苏联 1969 年 窑 衬 寿 命 分 析						表 3
窑 衬 损 坏 原 因	所 占 比 例 (%)	窑 衬 寿 命 (天)	窑 衬 损 坏 原 因	所 占 比 例 (%)	窑 衬 寿 命 (天)	
火砖砌筑不良	4.8	79	工艺和热工事故	31.4	98	
计划检修	16.3	210	正常耗损	33.1	245	
设备事故	12.9	119	本年度统计中未结束的窑龄	1.5	449	

二、水泥窑衬的负荷

图3系统指出了回转窑窑衬的不同负荷及各项因素的影响。在制造工艺过程的条件下这些负荷的种类和程度极为多样，所以为了理解窑衬的损坏过程并选择适当的砌衬方法，窑内各带的划分极为必要。表4指出了窑内各带内进行的过程和损坏因素的描绘以及各带的适当划分。由物料平衡和热平衡来确定窑的尺寸和各带长度的划分。

1.热负荷

回转窑内的温度分布可见图4。最高火焰温度达1700~1800℃(2000℃)。主要通过辐射传播的热使窑衬表面温度达1500℃(1900℃)。窑衬表面的真实温度随窑运转而变动，可由耐火材料

窑内各带划分、其特征以及带长的计算尺寸

表 4

窑机组范围		物料的变化	温度范围	窑衬的主要负荷	各带长度		窑衬寿命 (年)
					湿法窑	干法短窑	
预热器	炉篦子预热器	烘干、预热和部分分解(干扰性的结皮)	$\leq 800^{\circ}\text{C}$	粉尘研磨, 硫酸盐和氯化物侵蚀			
	悬浮预热器						
窑体	进 料 端	烘干或有机物燃烧	$\leq 800^{\circ}\text{C}$	研磨		0.5D	0.4~1
	烘干或预热带			研磨(特别有链幕时)	14~25D (窑长的1/4)	6D	2~12
	分 解 带	分解(部分干扰性的浮窑皮)	800~1200 $^{\circ}\text{C}$	研磨, 料粉侵蚀	7~12D*	2D	0.6~3
	过 渡 带	放热反应下形成铝酸钙和铁酸钙; 碱的挥发	1200~1400 $^{\circ}\text{C}$	很高的热负荷和机械负荷, 研磨, 渣化, 温度变换, 碱侵蚀(窑皮的保护作用)	(窑长的1/4)	4~6D	
	烧 成 带	烧结, 伴生15~25%熔融相, 挥发过程(部分干扰性的熟料圈)	1300~1650 $^{\circ}\text{C}$ (火焰 $\leq 1800^{\circ}\text{C}$)		4.5~6D (窑长的15%)	4D	见图 1
	冷 却 带	熟料固化	$\leq 1400^{\circ}\text{C}$	研磨	1~2D	0.5D	1~2
	挡 料 圈			冲击研磨			0.4~1
	窑 头			温度变换, 粉尘研磨			≤ 6
冷却机	炉篦式冷却机 多筒冷却机	熟料输送	$\leq 1300^{\circ}\text{C}$ 风 温 (200~700 $^{\circ}\text{C}$)	研磨、温度变换、碱侵蚀			

* 原文如此, 应该更长些。——译注。

的导热性来确定, 通过隔热或窑体冷却并首先通过窑皮的作用, 能使窑衬工作面上的温度梯度显著减低。窑体温度按窑型不同分别为250~400 $^{\circ}\text{C}$ 。

回转窑中, 内壁温度发生约200 $^{\circ}\text{C}$ 的周期性波动。不稳定的窑皮垮落时温度波动更为强烈。窑正常操作中在较薄的砖面层内(16~20毫米深)有温度波动(图5)。停窑时如冷却太快可能损坏窑衬。

2. 机械和热力学负荷

烘干带内滑动和滚动中的物料和链条能磨损窑衬。风速7~15米/秒的窑气所携带的料粒能造成侵蚀。悬浮预热器内有极强的侵蚀负荷。

窑的金属壳体并非完全刚性的。每一转中依轮带和托轮结构的不同, 特别在装轮带的区域内发生或大或小的变形, 在窑衬内导致压、拉和剪应力。火砖相互间持续出现的相对位移和局部出现的应力尖峰能导致开裂、剥落、断裂直至掉砖, 妨碍了保护性的稳定窑皮的形成。特别是烧成带内窑体外壳温度过高, 刚性逐渐地丧失至严重程度, 也即其椭圆率太大, 对窑衬造成的机械负荷也太大。Rosenblad和Erni测定了窑体的变形, 计算了其椭圆率。

托轮的椭圆率对烧成带窑衬寿命有显著影响, 可由轮带中动力负荷是主要损坏原因之一来得到证实。例如一个直径3.5米的窑的椭圆率由10~15毫米降到5毫米以内, 其烧成带单位砖耗也

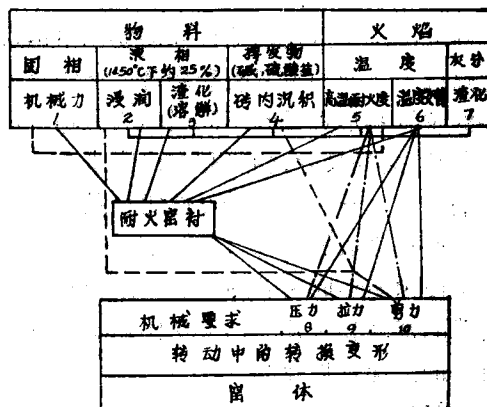


图 3 窑衬的负荷以及单项影响的相互作用

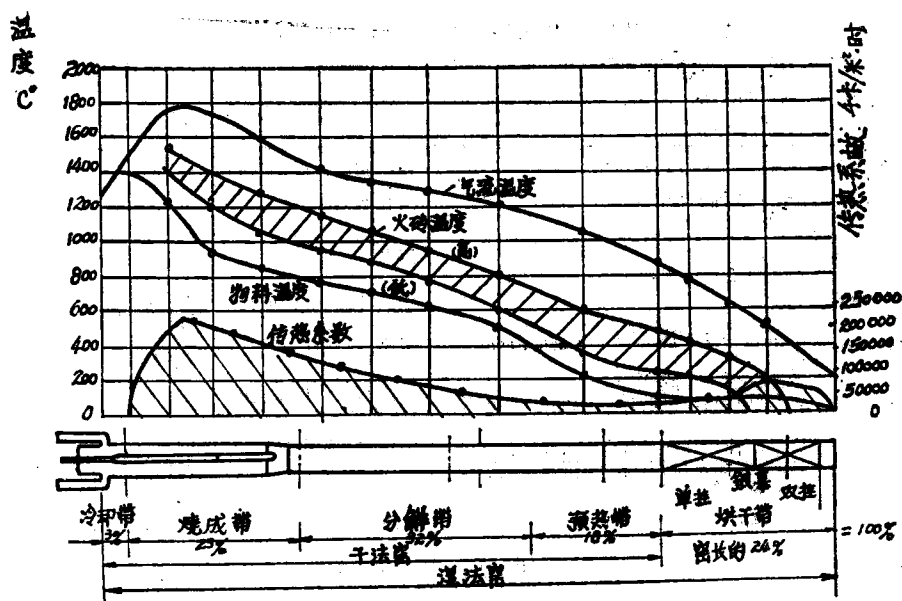


图4 水泥窑内温度分布

就下降了。计算指出，窑体刚度相当时，窑衬的不稳定性与 D^2 成比例，可以认为随着窑径的增大，烧成带窑衬寿命减短，约与 $D^2/1$ 成比例（图1）。新窑的最大椭圆率应低于（按窑径计算的）0.2%，一直容许的是0.3%。

加热或冷却中以及周期性温度变化中窑衬外产生热应力，能导致开裂和剥落。这些应力和开裂的位置和形式受到不同因素的影响，例如压力负荷、砖的尺寸、膨胀和容许膨胀率（决定于膨胀缝）、导热性、变形性能和温度变化速度、急冷和急热的部位。

化学侵蚀能形成新矿物，发生体积变化，导致砖缝的密合和张开。化学变化和浸润也使耐火材料的热稳定性变坏。

3. 化学侵蚀

物料或窑皮的组分通过熔化的方式渗入或移入耐火材料并导致化学、矿物和陶瓷工艺化合物的变化。

窑气除含粉料外主要含有碱、硫、氯和氟化物，通过窑料的燃料的反应挥发出来。冷却中这些化合物发生凝聚—氟化物完全沉降—沉积在尘核上，不再随窑气外逸，在窑系统内形成内部循环。硫酸盐和氯化物熔融物的富化和沉积，侵入窑衬并使之毁坏。

4. 挂窑皮和结圈

窑衬特别是烧成带窑衬的寿命在很大程度上取决于高温下及温度变换下化学影响所产生的保

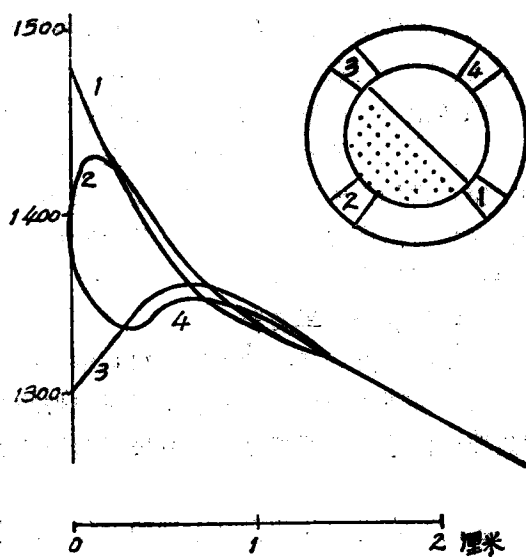


图5 运转中回转窑火砖内的温度降

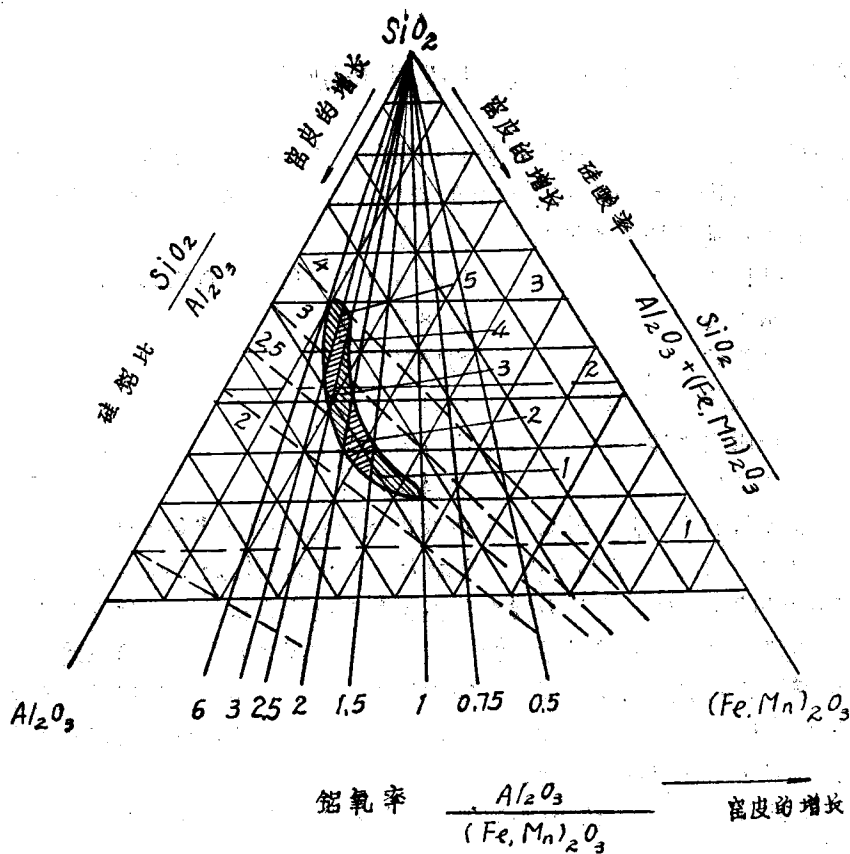


图6 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{O}_3$ 系中熟料的组成和窑皮的形成
各区窑皮：区1—极稳定 区2—坚实 区3—中等 区4—低劣 区5—极低劣

护性窑皮的形成和保持稳定。烧成带砖面上含熔融相的反应层（变质层）厚约5毫米。这个变质层是熟料和耐火材料间在高于约1280℃下形成的熔融粘滞物，窑皮的继续增长和发展就不再需要耐火材料的参予了。窑皮长度在悬浮预热器窑和立波尔窑内约为窑长的25~35%，在湿法窑内约10%。烧成带窑皮的正常厚度约0.2米。窑皮厚度超过约0.5米时就妨碍了窑的正常操作。80%以上的回转窑随时发生干扰性的结圈，如在分解带内为粉料圈（未烧结的圈，主要通过固体物料粘附而成），过渡带内的过渡态圈，后者在带的始端是烧结态圈，在末端是熟料圈。窑料的聚集在偶然情况下直至1米直径。在预热器内也有干扰性的粘附结皮（多数是在碱化合物的参予下形成的）。

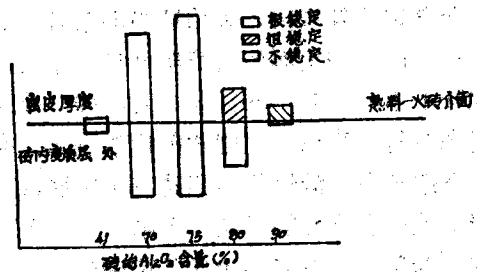


图7 带熟料的半工业试验中各种铝质砖内变质层深度和窑皮情况

关于窑皮的形成机理尚未完全搞清楚，它可以通过操作措施（如冷却窑体或把它隔热）予以制止，已有一系列资料发表。图6为取决于熟料组成的窑皮形成倾向的指示图。

结圈应重视消除，或定期地予以去除，或通过强烈的温度变化来处理掉。

三、水泥窑用耐火材料，及其质量和测试

水泥工业消耗的耐火材料，占耐火材料总产量的约4~6%。水泥生产成本中窑衬检修及其所耗工资约占2%。按Kunnecke和Wieland的资料，窑衬约占水泥总成本的1%。

西德水泥工业中目前消耗的各种耐火材料比率如下：

碱性砖	约70%（其中白云石砖约55%）
粘土砖	约8%
高铝砖	约10%
高强砖(SiC砖)	约1%
轻质耐火砖	约7%
散装料	约4%

碱性耐火制品是具有或不具特殊颗粒组成改进热稳定性的过烧耐火砖。它是含20%以内 Cr_2O_3 的一种几乎专用(于水泥窑)的耐火砖。窑能力的不断加强促进了高温煅烧的镁铬砖的采用，与硅酸盐结合的碱性砖相比较，它的方镁石和铬尖晶石晶体直接结合，使之具有高的热稳定性。如使用较纯的高品位的原料(电熔镁砂、镁石与铬矿石的预烧混合料)来制砖，可以预期有更好的使用效果。但镁铬砖的前途又受到掺或不掺少量铬矿石的 C_2S 结合的镁砖的竞争。为了改善窑皮的形成，在镁砖中掺入不同物质，如硅石、硅酸盐、含铁物质，近来也以磷酸或磷酸盐进行浸润，另一方面则发展了不挂窑皮的碱性砖。

为了减少镁尖晶石(含铬矿石组分的镁砖)的导热性，苏联采纳了把砖的气孔率提高到26%以上的建议。

新的胶结剂(磷酸盐)的发展，重新出现了化学结合的镁砖和镁铬砖。

当镁砖没有重大好处时可使用廉价优质的烧结白云石砖，由于它的水化作用采取焦油浸润。镁橄榄石砖的耐碱性优良。

不烧的刚玉尖晶石砖和铝钛砖，尖晶石砖各具特性。炼镍废渣制的砖以及掺以25%镁砂的波特兰水泥熟料砖，在1000℃以内具有很强的耐磨性。

在高铝砖领域内，采用适当的结合剂制成贫熔剂制品使具适当的结构来满足热机械负荷的要求，这种制品的发展使其重要性日益增长。高铝砖的品质强烈地取决于所使用的原料。水泥工业中实际上不采用高于80% Al_2O_3 的砖。除了一直使用的硅线石砖、刚玉砖和高铝砖外又出现了合成莫来石砖和烧结氧化铝砖的优质制品。磷酸盐胶结的70% Al_2O_3 砖的使用也有报道。

贫熔剂高温煅烧的高铝砖有了发展，约含45% Al_2O_3 ，总气孔率8~12%，含碱低于0.5%。水泥工业中有这样的看法，即趋于制造 Al_2O_3 含量较低，气孔率较小的砖。用磷酸盐来浸润或用作表面涂层可以改善粘土砖的耐碱性。

在特定的耐磨部位可用SiC砖，当然这种砖对氧化和部分地对碱侵蚀敏感。

水泥工业用致密耐火砖的品质载于表5。

有各种隔热异型制品可作水泥窑的隔热砖，也可砌筑窑的进料端。特别要提到微孔釉面抗碱轻质耐火砖，含 Al_2O_3 10~23%（煅烧砖或化学结合砖），气孔率约50%，以及用刚玉空心球制的轻质耐火砖，后者可用于1600℃下。用致密的粘土质或高铝质材料与隔热材料（轻质耐火材料或火山灰质材料）复合制成的双层砖（锯齿形砖）是一种特殊的进展，陶瓷纤维及由其制成的垫

水泥工业用致密火砖的品质(见1964年8月《钢铁材料报》910—64号)

表 5

	酸性粘土 $10 \leq A < 30$ $S < 85$	粘土砖 $30 \leq A$ < 45	高 铝	砖	镁 砖			锆镁砖 $55 \leq M$ < 80	铬镁砖 $25 \leq M$ < 55	镁橄榄石 砖	白云石 砖	高 强	刚 玉	碳化硅砖	
					低 铁	高 铁	特 种 (Verbb T w R)							60% SiC	90% SiC
Al_2O_3	18~30	30~45	~50	~80	<1	<2	≤ 8	4~11	<22	1~10	0.8~1.1	3.2~4.3	75		
SiO_2			1~2		0.8~3.5	<2.5	<2.5	1~3.5	<6	35~40	0.7~1	7.1~9.0			
Fe_2O_3	1.5~2.5	0.5~2.5			0.6~2.5	3.5~10	≤ 12	5~12	7~15	5~12	~1	6.5~8			
Cr_2O_3					<1	<1	≤ 8.5	6~20	15~35	1.5~10		6.4~8.2			
CaO	<1	<1	0.2		0.8~3	<4	<3	1~3	<2.5	0.2~1.5	~60	13.8~18.3	0~5		
MqO			0.2		92~96	<80	77~92	55~80	25~55	45~60	~37	53~63	10~15		
$K_2O + Na_2O$	<3	0.5~3	0.5~1.5												
密度(克/厘米 ³)	1.9~2.2	1.8~2.45	2.2~2.8	2.7~3.0	2.8~3.1	2.7~3.0	2.7~3.0	2.9~3.05	2.8~3.2	2.6~2.8	2.75	2.8~2.9	2.7~3.0	~2.4	~2.7
显气孔率(%)	10~26	8~30	17~20	15~25	16~22							18~22	14~16		15~22
总气孔率(%)		10~30	19~22	20~25	16~22	18~24	16~25	16~23	17~24	16~23	16~22	20~24			
抗压强度 (公斤/厘米 ²)					>400	>400	200~800	200~500	150~500	>250	400~600		300~500		>500
膨胀率 (1000℃·%)	0.65	0.6	0.6~0.7	0.5~0.6	0.65~0.7	1.2~1.5	1.1~1.5	1.1~1.3	1~1.1	~1	1~1.3	1.4	~1	0.5~0.6	
热导率(1000℃· 千卡/米·度·时)		1.2	1.2~1.5	1.5~2.2	2.5~3.5	2.5~3.5	1.8~2.6	2~3	1.5~2.5	1.6~2	~2.3	2.9	1.3~1.6	~5	~9

表 6

隔 热 砖 的 品 质

	微孔酸性粉质砖	粘土轻质砖	高 铝 轻 质 砖		陶瓷纤维棉及板材	火山灰质及 硅 藻 土 砖	硅 酸 钙 板
			60~70A	90A(空心球)			
使用温度(℃)	1200	1200~1400	1500~1600	1650~1800	1250	900~1100	800~1000
密度(克/厘米 ³)	1.25~1.3	0.5~1.35	0.5~1.2	1.3~1.6	0.5~2.2	0.45~0.9	0.2~0.3
热导率(1000℃·千卡/米·度·时)	~0.45	0.35~0.55	0.35~0.75	0.6~0.9	0.25~0.15	0.15~0.25	$\leq 600^\circ$ 0.12
抗压强度(公斤/厘米 ²)	70~150	20~150	20~100	55~100		7~70	10~13

层和板材通常应用于1260℃以内，以及用于1000℃内的硅酸钙板材均有其意义。隔热技术的发展是制作大型板材和砌块，并降低成本。表6为隔热制品的特性。

即使不成型的致密材料和隔热耐火砖以及隔热制品有重大增加（在西德耐火材料产量的35%），砌筑技术也有改进，但捣打料、耐火混凝土、喷射、补炉料等品种的制品在水泥工业中的应用至今还是微不足道的；它们限于低温带内，大部分用于窑的静止部位。散料的制成品比市场上现有制品有较好的外貌。表7为散装料的特性标记。

散装耐火材料的区分标志

表 7

(摘自 1973 年 10 月《钢铁材料报》916 号)

标志的位置	标志内容	说明、举例
第一号位置	制品的标志	如整体结构及修补用料、补炉用料、备用料
第二号位置	交货时状态	如干料、备加水的干料、湿料
第三号位置	胶结剂品种	如陶瓷胶结的、水硬性的
第四号位置	加工处理方法	如投掷、喷射、捣打
第五、六号位置	主要原料组分(给出名字)	如刚玉、高铝、熔融镁砂、铬矿石、碳化硅、碳质及各种混合料、轻质高铝、空心球
第七、八号位置	混合料中主要化学成分的含量	如 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 ZrO_2 、 C
第九、十号位置	容重	吨/米 ³ ，九号位置在逗号前，十号在逗号后
第十一号位置	使用温度范围	试验后通知，暂记符号为 OO

举例： 0013 01 60 23 00

 0 = 致密耐火混凝土

 0 = 干料交货，待加水

 1 = 水硬化

 3 = 施工方法：倾注（浇注）

 01 = 主要原料组分：莫来石

 60 = 01的含量：60—65% Al_2O_3

 23 = 容重：2.3吨/米³

 00 = 首先必须写出，待试验确定使用范围

水泥工业用散装料的制品的品质见表8。散装料制品仍在全面发展。其趋势是为了克服陶瓷结合形成前的强度丧失，用多加胶结剂来补偿。也采用捣打料和耐火混凝土预制构件以求生产的合理化并降低成本。用喷射法来新制和修补砌衬可使成本低廉。

整体内衬的结构和品质不能与烧砖砌体相对比。通过热膨胀和收缩的联合测定可确定在烘干煅烧过程中的变化特性。温度降会造成炉墙内明显的品质降，因为在其中形成很高的机械和热应力。整体内衬的寿命主要取决于其结构（炉墙厚度，锚栓的设备和选用）以及成型方法。

大多数损坏因素的作用使耐火材料的寿命不能充分发挥。应注意到在使用条件下耐火窑衬品质的一部分重要变化。通过标准化的试验方法所测定的多数品质可以据以把各类耐火制品进行分类并有规律地进行控制。在西德耐火材料制造商协会（PRE）中摆着革拟统一的分类法和试验法的任务。1972年将提供迄今已出版的推荐材料连同国际推荐材料与规范。

原料及其制备中不可避免地使耐火制品的品质发生波动。在取样中以及通过运用统计分析方法的测试价值中都应考虑包括试验方法的误差的情况。应从经济的观点及统计的考虑只对2~3种特征性的和判断规律性的重要品质进行控制测试。

水泥工业中使用散装料制品的品质

表 8

品 种 牌 号	化 学 成 分 (%)				使用温度 界限 (℃)	冷压强度 (公斤/厘米 ²)		容 重 (吨/米 ³)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O + K ₂ O		110°	1000°	
耐火混凝土 170	0.5	95.0	3.7	痕 迹	1700	600	500	2.75
	33.0 (包括 ZrO ₂)	57.0	7.0 (包括 MgO)	1.5	1500	800	600	2.90
	5.0	54.0 (包括 Fe ₂ O ₃)	39.0	0.5	1200	900	500	2.55
	56.8	35.0	3.8	3.0	1350	300	250	1.90
	49.5	25.0	18.0	2.5	1200	300	120	1.85
耐火轻质混凝土 135/1.3	40.5	41.0 (包括 Fe ₂ O ₃)	13.0	2.2	1350	100	75	1.30
	120/0.9	39.0	20.0 (包括 MgO)	1.5	1200	30	20	0.90
	110/0.5	26.0	35.0 (包括 MgO)	2.0	1100	15	10	0.50
塑性捣打料 135	62.0	32.0	0.5	2.5	1350	80	250	2.20
	165	19.5	77.0	0.3	1650	50	250	2.75
非塑性捣打料 170	3.7	90.5	0.3	0.3	1700	250	700	3.15
耐火胶泥 135	75.2	18.7	0.2	3.6	1350	—	—	—
	150	50.8	43.0	0.2	1500	—	—	—
	165	MgO 800	—	—	1650	—	—	—
	155	400	25.0	—	1550	—	—	—

作为适用于水泥窑的耐火材料的重要品质是优良的热稳定性和变形性质，优良的抗热震性和抗渣性，尺寸的准确性，体积稳定性以及对窑料的耐磨性，挂窑皮性能和导热性。

在新的时代内人们首先开始理解窑与砌体结构对耐火窑衬的热机械性能的强烈影响，也即开裂和剥落。迄今认为砖体的热态稳定性以及可变形性（可塑性）优良时在热—机械负荷下使用性能也好。

关于耐火砖挂窑皮性能的评价和窑皮的粘附机理已有一系列文章发表。作为试验方法有坩埚抗渣性试验法，铺设水泥试片，对水泥熔融物的浸润性能的评定，在拉力、剪刀或弯曲应力下的热粘附试验，以及在小隧道窑内进行的半工业试验。辅助的岩相和化学研究提供了关于结构变化和浸润的启示，也即与水泥熟料相接触中耐火料发生的渣化。

熟料窑皮的粘附牢度主要取决于砖内所形成熔融相的数量和粘度以及熟料和耐火材料间反应的状况和熟料成分（图 5）及其碱含量。粘附强度与温度间的关系通常在 1050~1250℃ 间达到最大值。

铝硅酸盐制品的窑皮的形成可通过 S/A 比值来调整；粘土砖通过强烈反应但只形成极少量的窑皮，Al₂O₃ 含量超过 90% 时熟料与火砖间不起反应。含 Al₂O₃ 70~80% 的砖可形成满意的窑皮。碱性砖的反应和粘结窑皮的趋势是微弱的。砖内含 C₂S 和 C₂F 较高时有利于反应和结窑皮。高温煅烧镁铬砖具有高抗蚀性的优点；白云石砖象镁铬砖一样可粘挂大量

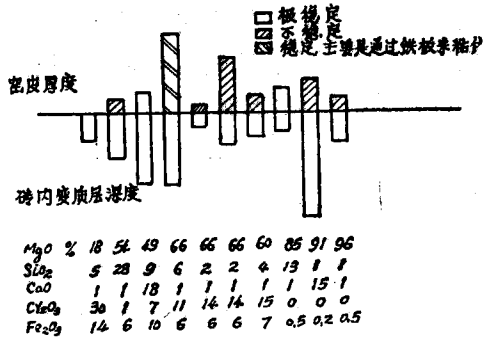


图 8 带熟料的半工业试验中各种碱性砖内变质层深度和窑皮情况

满意的窑皮。含铬矿石多的火砖（提高了熔融相的含量）和镁橄榄石砖易受强烈的化学侵蚀并易剥落。烧白水泥熟料（熔融相很少）一般形成很差的窑皮，当使用90% Al_2O_3 的高铝砖、镁尖晶石煅烧砖和贫熔剂白云石砖时都是这样。砌砖中引入铁板可改善窑皮的形成。

图7和图8指出1450℃下各种铝硅酸盐制品和碱性制品的窑皮量和变质层深度。表9指出最近发表的在一定温度下熟料在现行的和新型的不同碱性砖上的粘附强度的数值。由表可知，按窑皮的形成和温度要求，耐火材料工业将提供相适应的砖型。另一方面存在着一定温度下火砖—熟料接触带内相隔离因而最后影响窑皮形成的可能性。冷却中 C_2S 的变型造成窑皮破碎(后述)。

碱性与水泥石间热态抗折强度——水泥窑皮试验 (数值单位: 牛顿/毫米²) 表 9

试验温度 (℃)	满意的窑皮			窑皮很少		新型砖、磷酸 盐胶结镁铬砖
	镁 砖 (富铁、掺粘土)	镁 砖 (贫铁、掺粘土)	镁 铬 砖	镁 铬 砖 (C/S 高)	电 熔 镁 砂 砖 (富 铁)	
900	16.4	3.0	1.8	0.8	2.2	0.4
1050	12.4	3.9	4.9	1.1	0.4	0.8
1100	5.7	4.2	2.2	2.5	0.4	2.9
1150	5.4	4.4	1.2	2.2	n. b.	2.2
1200	1.0	4.7	0.0	0.4	0	0
1250	0.3	0.7	0.0	0.1	0.1	0.1

五、选用耐火材料的注意之处，砖的尺寸和砌筑方法

耐火窑衬的选择要考虑到寿命、经济效果、砌筑和检修，可靠性，以及对水泥质量（也即白水泥）的影响。采用大型设备后在停工的背景下促使耐火材料费用增加。所选用耐火材料的品质必须在经常操作条件下适应窑各部分的要求。选择的规范应出之于经常操作条件下的详尽的知识以及对已损坏的砖的性能试验和研究。应注意到操作工艺及结构的影响对耐火制品的使用状态有强烈作用，可以在各砖种内进行品质的区分。

砌窑用砖的适当尺寸的问题曾经多年讨论。与更大的窑的发展有关且采用干法砌筑，可用 $\pi/8$ —分配的大砖，统一尺寸为VDZ—牌号WE6的火砖。按目前规定碱性砖、粘土砖和高铝砖有两个统一尺寸的系列(表10)。通过细沟和缺口来标志火砖的近火焰面，其相对的背面带开槽和滑键借以增大锚固效果，这在大型窑的烧成带内被证明是成功的措施。

窑内砌衬方法的选择是要求不受拘束且有自由的窑的横断面。在大窑内用胶结法砌砖和栈桥模板法是重要的，干铺火砖中要求使用尺寸精确的砖并预留膨胀缝。碱性砖，多数的白云石砖用铁板镶嵌干铺，窑衬的烧结首先在铁板附近超过1000℃时发生。用胶泥砌筑中在室温下先拌好耐火胶泥和粘结剂(水玻璃)。

散装料用浇注或喷射方法筑衬首先获得成功，在苏联和西德，耐火混凝土砌块或板材已用于砌筑窑衬。

双层窑衬已愈来愈少，通过砖的径向由轴向咬合可以获得坚实的配合。隔热问题仍然悬而未决，它虽可节省燃料，但对操作条件来说还要相互权衡。曾有建议采用成型的棋盘式布置的窑衬和工作面上带空隙的砖以求改善挂窑皮性能。把陶瓷和化学结合或水硬性结合的碱性砖交替组合砌筑应使窑衬内的应力较好地抵消。

为了迅速并安全地拆除已用过的衬砖应设有适当的设备。

水泥窑用耐火砖的统一尺寸

表 10

中间楔长 = 71.5 毫米

牌 号	尺 寸 (毫米)				体 积 (分米³)
	a	b	h	l	
B 216	78	65	160	198	2.27
B 416	75	68			
16	85	80			
B 218	78	65	180		2.61
B 318	76.5	66.5			
B 418	75	68			
B 518	74.5	68.5			
B 618	74	69			
18	85	80			
B 220	78	65	200		2.94
B 320	76.5	66.5			
B 420	75	68			
B 520	74.5	68.5			
B 620	74	69			
20	85	80			
B 222	78	65	220	2.83	
B 322	76.5	66.5			
B 422	75	68			
B 522	74.5	68.5			
B 622	74	69			
22	85	80			
B 325	78	65	250	3.27	
B 425	76.5	66.5			
B 525	75	68			
B 625	74.5	68.5			
B 725	74	69			
25	85	80			

上部楔长 = 103 毫米

牌 号	尺 寸 (毫米)				体 积 (分米³)
	a	b	h	l	
216	103	86	180	198	2.99
316		92			3.09
416		94.5			3.13
516		96.5			3.16
16	85	80	180	198	2.61
218	103	84			3.33
318		90.5			3.45
418		93.5			3.50
518		95.5			3.54
618	103	97	200*	198	3.56
18		80			2.94
220		82			3.66
320		89			3.80
420		92.5	220	198	3.87
520		94.7			3.91
620		96.2			3.94
720		97			3.96
820	103	97.8	220	198	3.98
20		80			3.27
322		88			4.16
422		91.5	250	198	4.24
522	103	94			4.29
622		95.5			4.32
722		96.5			4.35
822	103	97.3	250	198	4.36
22		80			3.59
425		90			4.78
525		92.7	250	198	4.84
625	103	94.5			4.89
725		95.5			4.91
825		96.5			4.94
25	85	80			4.08

* 原文缺。——译注。

六、水泥窑各部位窑衬的简单展望

1. 悬浮预热器、(立波尔窑)炉篦子预热器、管道

悬浮预热器的砌筑主要采用粘土砖，并以火山灰质粘土砖或隔热砌块配以隔热垫来砌筑垫层。顶盖、管道溜槽内喜用干法成型的粘土砖，因为它有高度精确的尺寸。由于承受沉积碱熔融物的强烈侵蚀，规定采用酸性致密粘土砖，这种情况下也建议采用釉面耐火轻质砖，磷酸盐浸润粘土砖或含 $Al_2O_3 > 60\%$ 、但也含铬的浇注或捣打料。用火砖和捣打料及(或)耐火混凝土的复合窑衬有了增加，所以散装料制品达到窑衬总量的约10%。炉口、孔和通道长期使用整体衬里。在工作室的通道和进口愈来愈多地使用喷射料，当周期性地形成干扰性结皮时，排除结皮中窑衬必然受损。溜槽入口的拱脚砖(Widerlager)用高铝砖筑成。大型装置中的膨胀缝用陶瓷纤维来充填。

炉篦子预热器主要用粘土砖或酸性粘土砖以及隔热层筑成。拱顶用耐火轻质砖，也用整体材料。主要用水硬性胶结剂进行喷补是可靠的。除耐火混凝土外也用化学胶结的捣打料。

烟道是砌成的，最近也用致密耐火混凝土，配以隔热砌块或隔热喷射混凝土整体筑成。

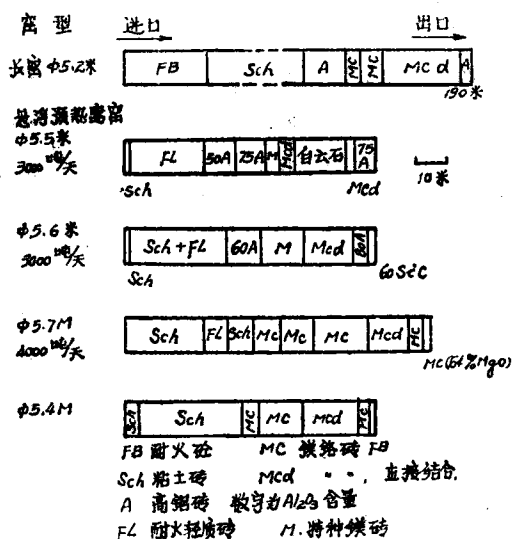


图9 水泥窑内砌衬举例

2. 回转窑窑体

图9为窑体砌筑示意图。

① 进料端、干燥和预热带

耐磨粘土砖或酸性粘土砖，耐火较质砖及耐磨耐火混凝土或耐火混凝土砌块都可以使用。此外进料端和长窑的链条带有耐磨要求。陶瓷砌筑物如提升砖及挡料圈等是由复杂的干压或捣打粘土质材料制成，抗热震性很好。

② 分解带

这个窑段内化学和热负荷都不大，各种品质的粘土砖，煅烧或化学结合的耐火轻质砖可以采用。在其研磨较烈、温度较高的部件可用含 Al_2O_3 50~60%的高铝砖。耐火轻质砖的寿命与粘土砖相比为2.5:5到3:5。

③ 过渡带

以刚玉和矾土为基础含 Al_2O_3 50~80%的高铝砖、白云石砖以及镁砖，用粘土质料作垫层可用于本带。有特殊要求时规定使用不粘挂窑皮的碱性砖和尖晶石砖。

④ 烧成带

可用碱性煅烧砖如镁砖、镁铬砖、铬镁砖或烧结白云石砖，个别情况下也用化学结合镶套镁砖。当碱侵蚀强烈(形成铬酸碱熔融物)时推荐使用无铬镁砖。苏联窑烧成带内

58.5%为铬镁砖($\geq 15\% Cr_2O_3$, $> 42\% MgO$, 24~25%显气孔率);

34.0%为镁铬砖(8~13% Cr_2O_3 , $> 60\% MgO$);

7.5%为方镁石尖晶石砖(10~17% Cr_2O_3 , 17~20%显气孔率)或高温煅烧的镁铬砖。

⑤冷却带和出料端

耐磨抗热震的粘土砖、高铝砖 ($65\sim 80\% \text{Al}_2\text{O}_3$) 及镁铬砖可以采用。出料口圈由60%碳化硅砖、耐火混凝土或捣打料筑成。钢板保护外罩受高温及碱侵蚀可由捣打料或陶瓷纤维板来隔离,或用冷却筒来风冷却。可用喷补料热补。

⑥窑头、燃烧喷嘴、燃烧室

窑头主要用硬质粘土砖及高铝材料 ($65\sim 80\% \text{Al}_2\text{O}_3$) 制的异形筑成,有隔热垫。观察孔、测量孔和其他检测孔周围采用耐火混凝土。窑门上也是这样。采用耐火轻质混凝土也可达到隔热的效果。窑头的完整装置可用捣打料、新近也用喷射料筑成。在 500°C 以上温度下可用陶瓷锚固砖制的网状骨架或铆钉来铆定。

喷嘴几乎全用高铝捣打料或浇注混凝土预制成扇形件再砌成。

燃烧室用粘土砖或高铝砖筑成。用塑性料捣打制成燃烧室并用喷射方法修补已经成功。

⑦熟料溜子和冷却机

熟料溜子用硬质粘土砖或含 Al_2O_3 直至84%的砖筑成。多筒冷却机用耐剥落耐磨粘土砖、硅线石砖和莫来石砖筑成如图10。SiC扬料砖带易受碱侵蚀而损坏。也已多次使用化学胶结捣打料及高铝耐火混凝土作衬里。此外弯头和出料拱的制作可用散料。

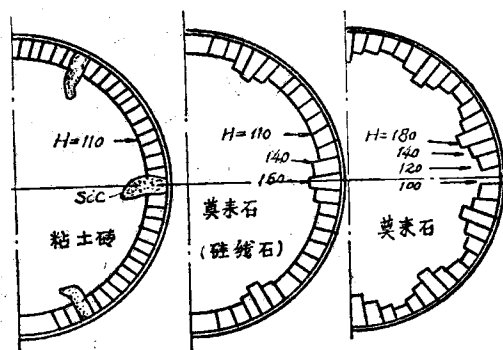


图10 多筒冷却机内窑衬举例 (钢板至钢板直径1800毫米)

3. 立窑

预热带用粘土砖及高铝砖,烧成带内用高铝砖及碱性砖(白云石砖、镁铬砖),冷却带用酸性及普通粘土砖砌筑。用高铝耐火混凝土捣打及喷射制作烧成带直至出料口已有报道。

七、烘窑、点火和停窑

烘窑1~3天,预热器预烘10天。烘后可以约50度/时的升温度达到使用温度。Fleischmann提出了墙厚150毫米和150~400毫米的整体装置的烘烤制度,在 150°C 下保温后以60度/时或30度/时的速度继续升温。

烧结白云石窑衬在烘窑(逸出焦油汽)及停窑(发生水化作用)中要采取特别措施。

八、水泥窑耐火材料在使用中和损毁的情况

预热器衬里受硫酸钾和氯化钾熔融物的强烈渗透。回转窑口的过渡区段内沉积如下成分的物料: $5\sim 30\% \text{K}_2\text{O}$, $1\% \text{Na}_2\text{O}$, $3\sim 38\% \text{SO}_3$, 和 $5\sim 24\% \text{Cl}_2$ 。通过与碱的反应在酸性粘土砖面上产生一层釉面层;在粘土和高铝砖内形成多量碱的供应点,生成体积强烈增长的长石置换物和 β -刚玉,造成窑衬砖的开裂、剥落和膨胀。硫酸盐也侵蚀铝硅酸盐制品。

铝硅酸盐制品与熟料相接触时的化学变化可见图11的A-C-S系图。在约 1300°C 以上在 C_2AS 、 CAS_2 、刚玉,和 C_2S 、铝酸钙及铁铝酸钙间形成一个比较窄的富含熔融相的反应区。反应

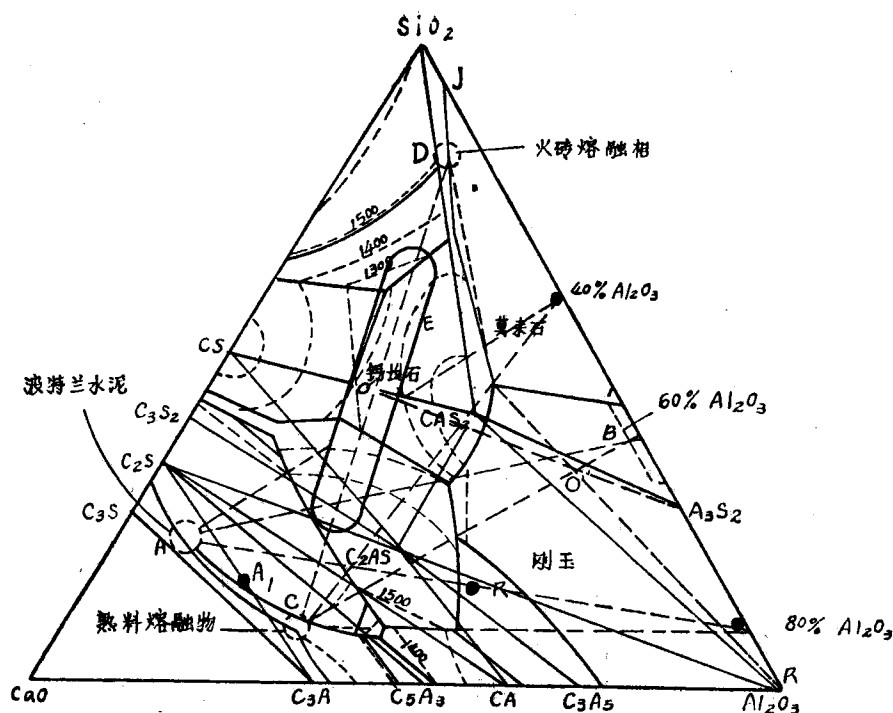


图11 在 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系中波特兰水泥熟料与铝质耐火砖间的反应
R 与80% Al_2O_3 砖的反应产物 A₁ 同一砖上的密皮

区的熔点约 1400 °C。熔融相区的较高部位内妨碍了稳定窑皮的形成，所以在操作中窑皮时垮时长。

通过碱的侵蚀水泥熟料重迭地被侵蚀。在分解带内窑皮和沉积物含碱及硫酸盐很高。作为含钙的熔融物，碱侵入砖内很深，出现了凝聚胀松的开裂带；也有碱的刷蚀现象。

回转窑中周期性的温度变化使铝硅酸盐制品形成圆形莫来石晶体的形状。

烧成带内碱性砖的损坏主要由于化学和矿物的强烈变化使砖层剥落。损坏速度随使用时间的增长而减慢。在镁质耐火材料与熟料接触面上形成主要由 C_2S 组成的反应棱。也由从方镁石晶体形成的铁的析出物以及产生聚集结晶造成工作带的密实化和脆化；另一方面由于熟料熔融物的强

烈侵蚀，粘结相毁坏形成疏松的界面层。砖内形成了层状结构，已有的硅酸盐和铁酸盐熔融物向砖的冷端转移，由熟料侵入的铁铝酸盐熔融物在砖内形成（图12）。连铬尖晶石也被侵蚀的熔融物具如下成分：

50% CaO ，6% SiO_2 ，17% Al_2O_3 及 27% Fe_2O_3 在 1450 °C 时可熔入约 6% MgO 。

硫酸碱和氯化碱熔融物，从空气凝聚，深入砖内。这些熔融物甚至部分地侵入窑衬砖后面，也即隔热层内，还侵蚀窑体钢板。在裂纹和孔穴内沉积的淡黄色物质的熔化和再固化胀

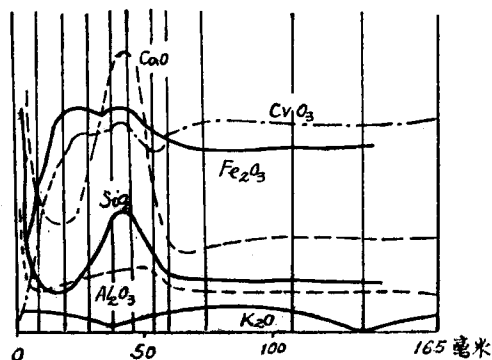
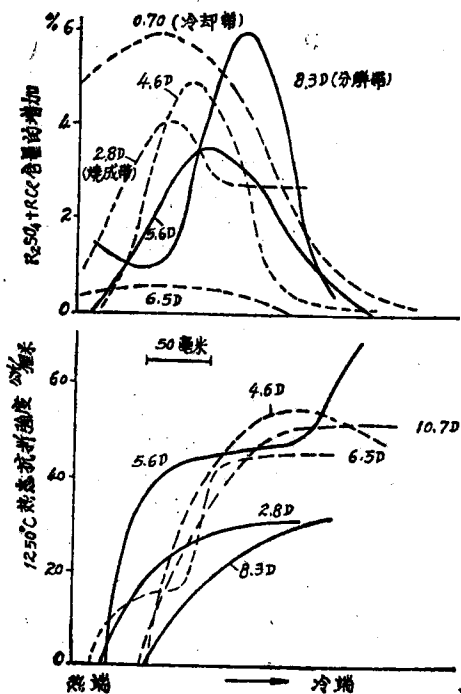


图12 水泥窑运转60天镁质砖内的化学变化

松了砖的结构。硫酸碱熔融物也溶解铬矿石并形成铬酸盐熔融物。接受碱化合物后碱性砖的热胀性显著增加。图13为一大型窑内使用过的镁铬砖的分带研究，砖内接受碱化合物后热端的热态抗折强度降低。

还原气氛下形成K-Fe的硫化物，在冷端砖层孔穴和裂缝内沉积，氧化气氛下也即停窑时硫的燃烧和因而引起了砖的膨胀，也形成 $MgSO_4$ 。

白云石砖中熔融物迁移造成的变化是微小的(图14)。反应边缘主要由 C_2S 晶体(通常是与CaO直接反应而成)和侵入砖内的铁酸钙熔融物所形成。可观察到方镁石和CaO晶体的重结晶。在窑气作用下白云石砖的中层和冷端富集了硫酸碱熔融物，形成 CaS 和 $CaCO_3$ ，产生大面积剥落的恶果。



砖 号	工 艺 节	镁 铬 砖 类 型	砌入月数
0.7D	冷却带始端	直接结合	5
2.8D	烧成带	直接结合	10.5
4.6D	过渡带	直接结合	5
5.6D	过度带	超高温煅烧直接结合	5
6.5D	过度带	直接结合	5
8.3D	分解带末端	半直接结合	10.5

图13 大型水泥窑内煅烧镁铬砖受 R_2SO_4 + RCl的影响情况

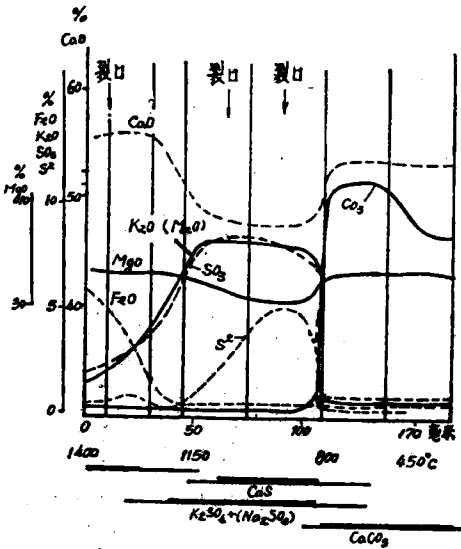


图14 立波尔窑(直径2.9米)内使用10个月后白云石砖内的化学变化

冷却至约850℃以下窑皮碎裂， C_2S 变形的强烈膨胀效应在碱性砖内出现反应带。应指出白云石砖和镁砖因水化(300℃以内)可能使质量受损。

【附件】

西德5.6/×90米新立波尔窑的窑衬

西德新投产的一台1.6/6×90米立波尔窑生产状况良好，与该厂的另一4.2/4.6×70米立波尔窑的有关指标如下：