

炼钢转炉用耐火材料

——第二十七届国际耐火材料会议文集

耐火材料出版基金会

武汉钢铁学院耐火材料专业教研室

译 者 序

第二十七届国际耐火材料会议于一九八四年十月在联邦德国亚森(Aachen)召开,世界上十多个国家和地区的代表出席了会议。会议的中心议题为炼钢转炉用耐火材料,大会共宣读了二十八篇论文(此文集共收入二十五篇论文、三篇摘要),内容涉及炼钢转炉用耐火材料的各个方面,在一定程度上反映了当今世界上炼钢转炉用耐火材料的水平,对我国钢铁冶炼用耐火材料的生产使用有一定的参考、借鉴作用。故耐火材料出版基金会决定将此文集译成中文。

本文集中译本仅收入了其中的二十五篇论文由武汉钢铁学院无机非金属材料专业师生共同翻译,最后由柯昌明同志整理汇总。由于时间较紧,水平有限,译文中错误之处在所难免,还望读者不吝指正。

本书出版承耐火材料出版基金会资助,武汉钢铁学院教材科为此书的出版做了不少工作,谨表深切谢意。

武汉钢铁学院无机非金属材料专业
一九八六年十一月

目 录

译者序

适应不断变化的要求的镁质氧气转炉衬	H. Barthel, 等	(1)
炼钢转炉中白云石和镁质制品的应用	J. Fleischer, 等	(17)
BOF用耐火材料的发展动态——重点讨论热强度	D. J. Michael, 等	(33)
巴西 BOF用耐火材料	P. O. R. C. Brant, 等	(42)
转炉炉衬: 性能与经济的综合评估	J. Leveque, 等	(56)
顶底复吹转炉用耐火材料	M. Nakatani, 等	(73)
转炉炉衬: 经验与发展	J. de. Boer, 等	(91)
炭素材料和抗氧化剂对氧气转炉镁质耐火材料寿命的影响	H. Naefe, 等	(101)
AOD炉中白云石内衬的反应	M. H. Tikkanen, 等	(112)
MRP精炼炉用耐火材料寿命的优化	J. Fleischer, 等	(126)
不烧镁白云石炉衬在顶底复吹转炉中的实际性能	Kakogawa, A. Ohte, 等	(131)
烧结白云石——碳系统中的沥青结合砖	W. Langenfeld, 等	(146)
转炉中侵蚀严重部位所用的碳结合砖	G. Zoglmeir, 等	(154)
镁碳砖在氧气顶吹转炉出钢口的应用	H. Kyoden, 等	(163)
顶底复合吹炼用多孔透气塞的发展	M. Nishi, 等	(172)
采用激光技术准确控制内衬损耗	K. Nilsson, 等	(183)
$\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ 系渣对碱性耐火材料的腐蚀及 $\text{MgO}-\text{C}$ 砖 在 LD 转炉中的应用	K. Asano, 等	(198)
渣的组成及温度对转炉耐火材料抗侵蚀性能的影响	S. Tanaka, 等	(211)
转炉渣侵蚀后焦油结合和树脂结合的镁碳砖的研究(简介)	P. Dietrichs, 等	(222)
融盐相存在条件下, 由氧化物热压烧结制备的抗侵蚀耐火材料	J. Zborowski, 等	(225)
镁铝尖晶石原料特性和耐火性能	T. Jcarbone, 等	(233)
镁碳砖的抗氧化性	P. Velleut, 等	(247)
转炉炉衬的火焰喷补	C. Guenard, 等	(259)
BOF喷补料的实验评价	B. Brezny, 等	(269)
BOF用优质镁碳砖的研制	R. Uchimura, 等	(282)

适应不断变化的要求的镁质氧气转炉衬

H. Barthel, G. Buchebauer und E. Kalter, Leoben, Österreich

1. 引言

自从1952年奥地利联合钢铁股份公司 (Linz) 的一个转炉钢厂和1953年Alpine冶金公司 (Donawitz) 的一个转炉钢厂投产之后, 到今天吹氧炼钢在世界粗钢生产中已经占有很大比例。自1974年始, 世界整个钢产量中的50%以上是用吹氧方法生产的, 这充分说明了吹氧法对炼钢的重要性。

吹氧炼钢大工业规模推广之后, 它的多方面的不断发展对耐火材料的进一步发展也有重大影响。反之, 常常是开发了适用的耐火材料之后, 才使吹氧法工艺上的一些发展在技术上和经济上可行。所以镁质耐火炉衬材料的不断发展是与投入使用的吹氧法的许多发展紧密相关的。

有目的的开发耐火材料的前提条件是充分认识使用中的耐火材料所受到的负荷的基本情况及其受侵蚀破坏的原因。这样就有可能使产品的性能尽可能适合使用要求。

2. 吹氧工艺的进展

自从LD法大工业规模应用以来, 在设备技术和冶金方法技术方面都有了重大的发展 (图1和图2) [1]。

由于冶金和工艺技术方面的原因, 最初的LD转炉只使用于冶炼低磷生铁 ($P < 0.05\%$)。正是为了也能用吹氧工艺冶炼高磷生铁 (约含磷1.7%), 在五十年代后期发展了LDAC法, OLP法和Kaldo法, 补充了原来的LD法。Kaldo法后来也用于冶炼低磷生铁。虽然该法有许多冶金方面的优点, 但由于经济上的原因, 未能推广使用。今天已没有一个六十年代安装的Kaldo炉还在运行。

与LD法相比, LDAC法或OLP法主要是其特殊的吹氧技术使在较长的炉役时间内炉渣含FeO较高和温度较高, 以及炉气中氧气分压较高。这就使转炉衬受到更强烈的负荷, 因此耐火材料比消耗较高。Kaldo法时耐火材料消耗更高, 这主要是由于炉体旋转使炉衬受到一种特别高的热侵蚀负荷 [2]。

在六十年代, 原来的Thomas炉钢厂, 利用吹氧工艺的的优点, 采用炉底吹氧, 发展了OBM法。底吹是应用一两层壁的喷嘴 (环形间隙式喷嘴) 来实现的。这里纯氧气通过中心管吹入, 另一种气体, 如丙烷, 从中心管与外套管之间的环形间隙吹入, 这时由于烷烃气体的吸热裂解而使喷嘴冷却。与纯LD法相比, 底吹在冶金方面的优点主要是能使渣和金属熔池很好地混合, 而使金属熔池能更好地均匀化和达到平衡。

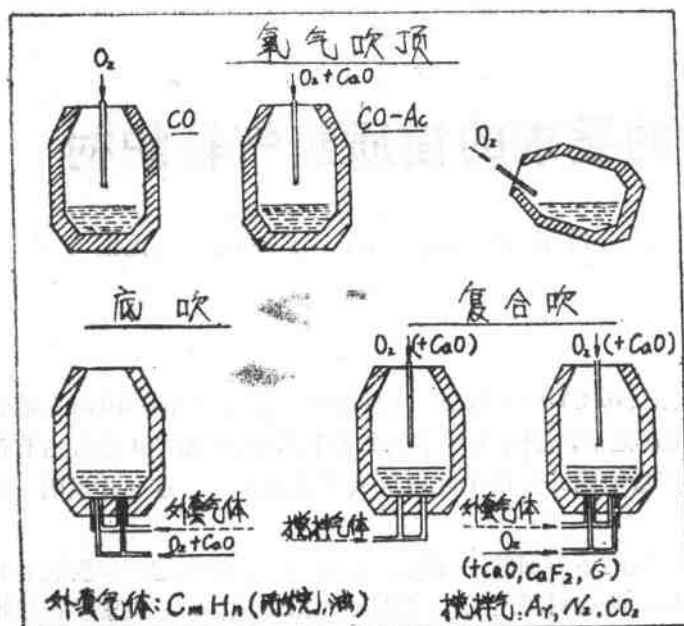


图1 吹氧炼钢转炉

在OBM法时，底部吹入氧气使得渣的FeO含量较小，特别是在冶炼高磷生铁时，与LDAC法相比情况更是如此，因此转炉衬受到较小的负荷。另一方面底吹时出现明显更高的底部侵蚀，主要是指OBM转炉底的喷嘴砖及其周围区域看成是衡量OBM转炉衬的寿命标准。只有使用特殊的高质量的镁碳砖品种才能使炉底达到与其它区域差不多的寿命。

集顶吹和底吹的优点，而尽可能排除其缺点的努力，使得在七十年代后期产生了第一个复合吹炼的装置。复吹工艺时，除了 O_2 从上部吹入外，通过炉底吹入其它气体，如Ar、 N_2 、 O_2 、 CO_2 或碳氧化合物气体，部分情况下这些气体与固体物质一起从底部吹入。由于炉底进入的气体产生了一个搅拌作用，这就使得熔体更好均化，使不平衡情况趋于平衡。

自八十年代初开始，各种底吹惰性气体和部分情况下也吹入少量氧气的工艺已经并正在世界范围急剧发展。在欧洲今天实际上没有一个顶吹钢厂不在应用众多复吹方法中的一种，没有一个工厂不在进行或计划进行试验。最近在Strassburg举行的1984年吹炼炼钢会议上详细地报导了当

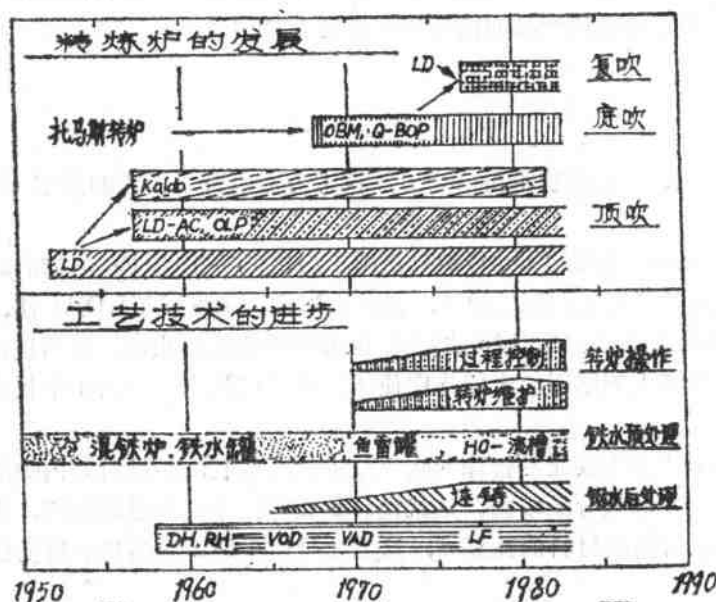


图2 吹氧炼钢进展

今世界上所应用的许多复吹工艺方法^[3]。

除了所述的各种吹炼工艺的发展之外，在工艺过程操作方面也完成了大量开发工作。现在已能用一动态操作过程模型和一个付氧枪，采用全自动的计算机控制吹炼过程，实现了操

作过程的重大进步。这样，由于更好地控制了转炉的运行方式，也使得耐火材料的消耗有所降低。

所有这些吹炼冶金的不同方法对耐火材料炉衬的蚀损作用也是有明显差别的。但转炉中耐火炉衬的蚀损不仅受转炉吹炼方法本身的影响，而且还受到转炉工艺之前的，为了铁水脱硫、脱硅和脱磷时所应用的铁水预处理方法的影响，以及受到在转炉工艺之后，钢水精炼的各种钢水后处理方法的影响。另外还应提及，为了使工艺合理，连铸工艺的应用在世界上增长迅速，现在工业化国家连铸钢已达到60~80%或更多。采用连铸工艺后，铸钢时间长，要求较高的转炉出钢温度，因而也使耐火材料内衬受到更强烈的蚀损。图2给出了氧气吹炼转炉生产方法发展阶段和一概括性一览，所有这些方法对转炉耐火衬的侵蚀都有直接或间接的影响。

3. 炉衬砖的发展情况

自大规模采用吹氧工艺以来，由于多方面的努力，在镁质砖方面取得了显著的进步。

五十年代所用的LD转炉衬的主要砖种一是沥青结合白云石砖，一是不含炭的烧成镁砖。白云石砖是以往欧洲主要应用的炼钢炉即托马斯炉炉衬。烧成镁砖以前是另两种炼钢方法，即平炉和电炉的熔池和渣线区的标准炉衬材料。烧成镁砖比焦油结合白云石砖更抗磨蚀和渣蚀，但在氧气转炉中使用时镁砖就不能发挥这一优点了，因为镁砖在不含炭素下，炉渣能渗透到砖体中几厘米的深处，因此在两次吹炼之间的温度交变负荷作用下而产生剥落。

把这两种砖的优点结合起来，即把焦油结合白云石砖或焦油结合镁砖对渣不润湿性和烧成镁砖的高抗渣侵蚀稳定性这两者结合起来，就发展了烧成焦油浸渍镁砖。后来改为烧成沥青浸渍镁砖^[1]。在六十年代初这种砖使吹氧转炉寿命大大提高。这时炉衬所受负荷越大，相对于廉价的白云石来讲，烧成油浸渍镁砖提高寿命的幅度也越大。所以，用低铁，尤其是低硼的天然镁砂制造的烧成油浸渍镁砖实际上成了所有Kaldo炉的标准炉衬材料。后来也在高负荷的LD转炉和LDAC转炉中用于砌筑整个炉衬，至少在超前蚀损区大量使用^[2]。

钢厂要求进一步提高炉衬寿命（这也是由于大量使用连铸工艺，要求提高出钢温度所引起的）。而烧成油浸渍砖的进一步提高质量却受到限制。一方面这是因为烧成镁砖的结构特性不能更多地改善，从而不能避免砖的间歇式的剥蚀破坏，另一方面只用沥青浸渍引入的炭素量有限，约2~2.5%残炭，而且难于再提高。

烧成沥青浸渍镁砖的这两个弱点可以为后来发展的焦油结合镁砖所克服。不烧的焦油或沥青结合镁砖一般是有柔性结构。另外采用添加固体炭素，多数是加炭黑，以及采用沥青再浸渍可使炭含量提高到约8%。再则，制造沥青结合的工艺技术得到了改进，并在生产过程中，这种砖已日臻完善。

从图4中可以看到这些发展对于砖体显微结构的影响。

由于沥青结合镁砖的这些重大的质量改进，现在它是最大量最广泛使用的氧气转炉镁质炉衬材料，至少在欧洲和美国是这样。在欧洲和美国不断发展沥青结合镁砖的同时，在日本成功地发展了高炭含量的砖，即镁炭砖。最初这一发展是为有水冷壁的电炉构思的。在与水冷壁接触处要求高热和高抗热震性的砖。镁炭砖成功地解决了这一问题。镁炭砖是由烧结镁砂或电熔镁砂和加入约8~25%这么相当高的石墨构成的，采用专门的沥青或树脂结合剂粘结。

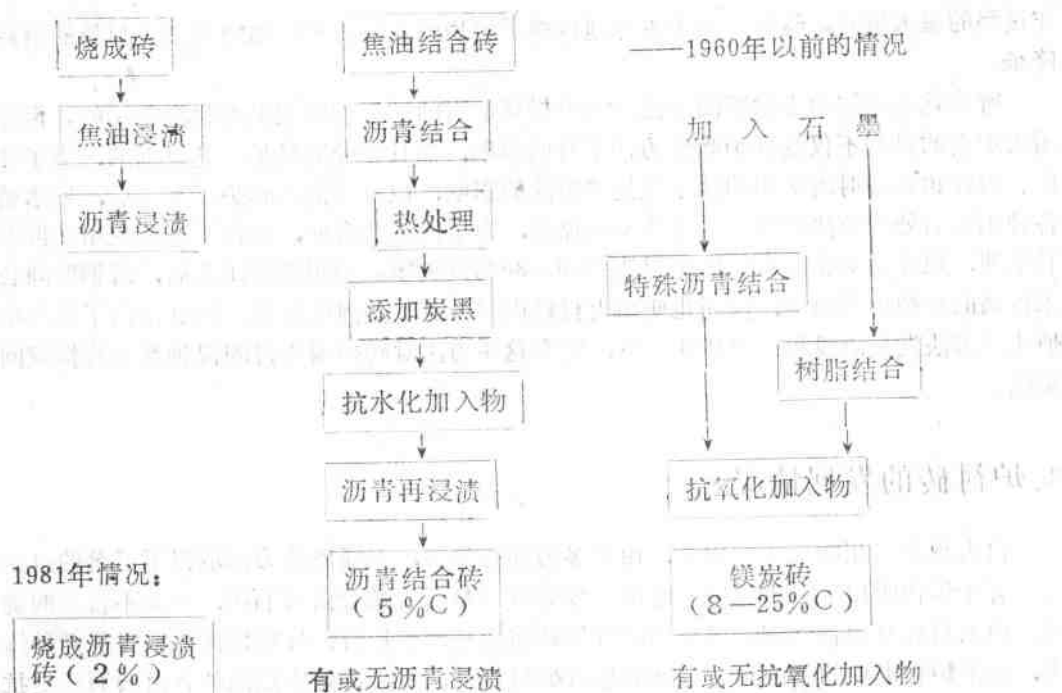
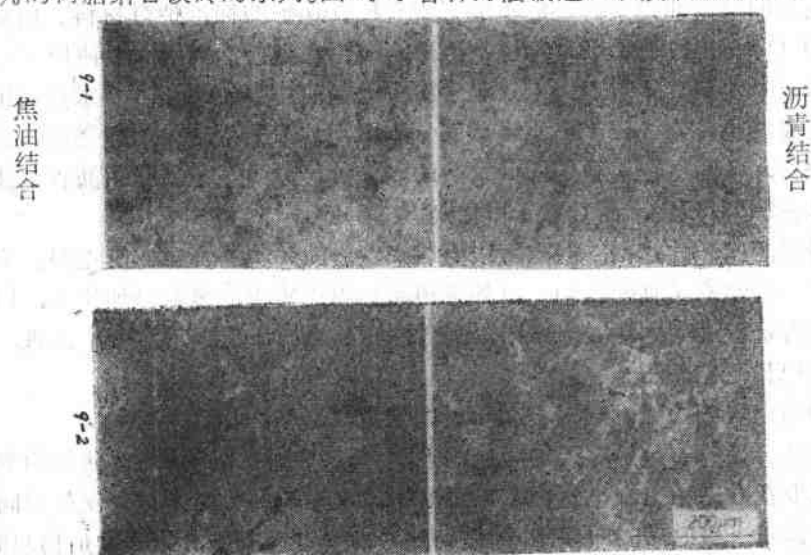


图3 含炭镁砖生产发展过程

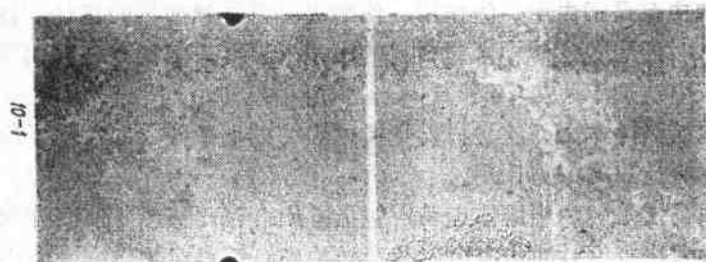
接着也是在日本，镁炭砖由于其特殊的性能，首先成功地使用于OMB转炉炉底。今天在日本镁炭砖已经是氧气转炉的主要炉衬材料，而在欧洲和美国镁炭砖的比例也在增加，但由于其价格太高，所以和以往一样，仍然只是有目的和与沥青镁砖比较，根据价格和效果的关系选择使用^[5, 6, 7]。

现在氧气转炉用镁质产品包括有含炭约2%的沥青浸渍烧成镁砖，沥青结合镁砖，以及最高含炭为25%的树脂结合镁砖的系列。图5示了各种方法制造的镁质制品炭化后的显微结构。



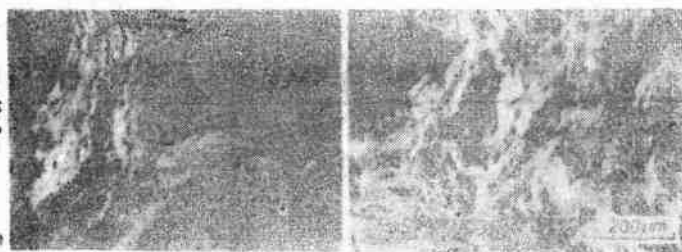
沥青结合，添加炭黑 沥青结合，添加抗水化剂和炭黑，沥青浸渍

图4 在炭化的沥青结合镁砖中炭结合的变化



烧成沥青浸渍镁砖 (2% C)

沥青结合并浸渍的镁砖 (5% C)



沥青结合镁炭砖 (10% C)

树脂结合镁炭砖, 添加抗氧化剂 A (20% C)

图5 各种方法制造的镁质制品炭化后的炭结构

很明显, 这些不同的砖种, 就其性能而言, 有的也是没有太大差别的, 为了能够根据要求, 有目的地选用最合适的砖种, 就必须了解砖的重要性能与其抗侵蚀性能之间的关系。

4. 蚀损与产品性能

所用产品应该具备的性能是由耐火炉衬在转炉中所受到的负荷 (即侵蚀条件) 得出的。这些负荷可以是化学作用、热作用和机械作用 (图6)。

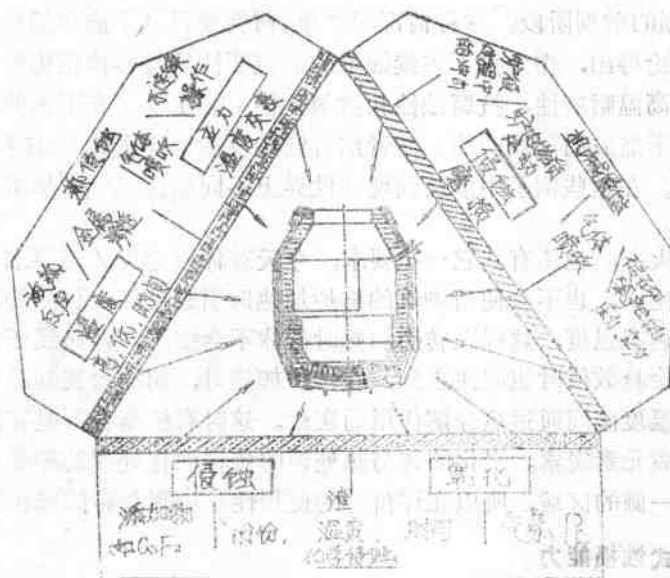


图6 吹氧转炉炉衬的负荷

• 化学侵蚀主要是指由于炉渣作用，使耐火材料连续溶解的侵蚀，特别是另外有腐蚀性的造渣材料加入时，也包括砖中炭素材料的氧化侵蚀，这既可以是由于炉气中高的氧气分压，也可以是渣中或炉子飞灰中高的FeO含量所引起的。

• 热侵蚀包括高温作用（这是材料交换过程的前提条件）以及由于冷热交变和温度降落（如炉底喷嘴）所造成的应力作用。

• 机械侵蚀首先是转炉中熔体运动，包括排出含有飞灰的气体的冲刷作用。另外还有加料，特别是加入大块废钢时冲击应力以及在转炉砌筑不良时炉衬所受到的应力。

转炉中的负荷，负荷所引起的侵蚀过程以及由此推导出的对耐火产品的要求，以因果关系示于表1中。这种关系的正确判断是成功地开发产品和使用产品的基本依据。

表1 负荷、蚀损和产品要求（主要性能）相互之间的关系

负 荷 (原因)	蚀 损 (作用)	产 品 要 求 (措施)
• 热和机械应力	不连续蚀损 (裂纹形成，砖体剥落)	• 结构韧性
• 侵蚀	连续地（砖体磨蚀）	• 高温强度（高温耐磨强度）
• 温度	通过物质交换过程（高	• 显微结构稳定性
• 外来元素侵蚀	温下）引起侵蚀的前期	• 抵抗外来元素侵蚀能力
• 氧化侵蚀	阶段	• 氧化和氧化还原稳定性

耐火材料本身的耗损既有主要是热应力引起的不连续蚀损，也有磨蚀引起的连续性蚀损。温度作用和侵蚀既可以是来自渣中的杂质元素，也可以是氧化作用引起的。它们是使砖体变弱，是引起蚀损的前期阶段。这种情况越严重，材料变得越不能承受应力和磨损侵蚀作用。

因此可以推论得出，作为抗不连续蚀损的最重要性能是砖体结构的韧性，而抗连续蚀损的最重要性质是高温耐磨性，抗腐蚀性和抗氧化性（表1）。在下面的章节中给出相应的试验标准，有适合于烧成油浸镁砖的，沥青结合镁砖及适合镁炭砖（有抗氧化剂和无抗氧化剂）的试验方法。在这些例子中涉及到现在世界上不同地区氧气转炉所采用的镁质炉衬材料的一些典型砖种。

另外，对耐火产品也还有其它一些要求，今天对优质耐火砖还要求它们既不会老化（如在存放中有些水化），也不会使新砌筑的转炉加热时引起破坏。例如沥青结合砖在500℃时应具有足够高的热态强度，这样在转炉加热时砖体不会变弱，就是属于这类要求。

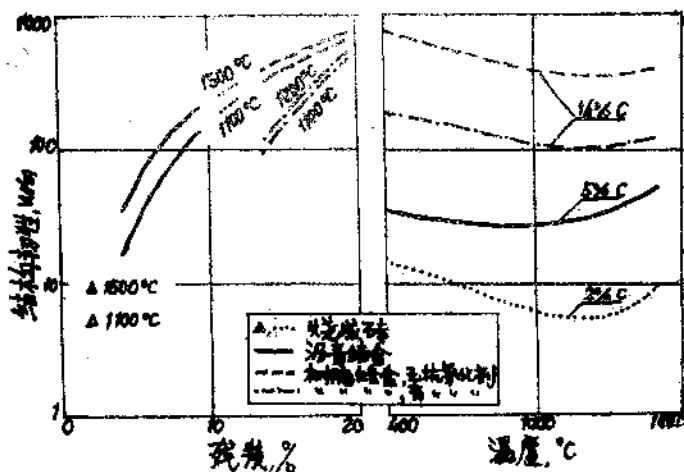
在评价砖的检验数值时也应注意到，在转炉加热时，制造含炭制品中所用的有机结合剂在300~700℃的温度区间通过热分解作用而炭化。这时有机结合剂是在隔绝空气和挥发组分裂解下蜕变和形成元素炭素。炭化的砖与热处理的砖和硬化处理的砖是不同的。因为蚀损是发生在炉体高温一侧的区域，所以在评价砖的使用性状中判断砖的炭化状态是很重要的。

4.1 抗间歇式蚀损能力

不连续蚀的特征是高温一侧砖体的无规则剥落和掉片。造成这种蚀损过程是因为砖内形

成了裂纹。形成裂纹的原因多数是热交变中的热应力，部分也可能是机械应力，如砖体砌筑不当，膨胀受阻时产生的机械应力。因此，要使耐火砖能够承受这种应力而不破坏，砖体具有足够高的结构韧性或高的吸收应力能力是很有必要的。

从图7中可以看出，随着炭素含量升高，相应地导热性增加，结构韧性也明显提高。特别是当采用粗晶体层片状石墨和有一定数量石墨，可能在砖体中形成一连贯的石墨基质时，韧性明显提高。与其它韧性命名相应的结构韧性（图7）受热膨胀和可变形性的影响。所以在其它条件相同时，降低可变形性就意味着结构韧性下降。砖烧成形成陶瓷结合而取代了炭素结合和镁炭砖中抗氧化剂的作用就属于可变形性下降而使结构韧性下降的情况。



$$\text{结构韧性} = k \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{v}$$

$$= k \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \phi$$

k = 正比因子

σ = 强度, N/mm^2

λ = 导热系数, W/mK

v = 形变模量, N/mm^2

α = 热膨胀系数, K^{-1}

ϕ = 扭曲变形 (还原气氛), 角度

图7 炭化后镁炭砖的结构韧性

在所研究的砖中，情况类似，都在约1000~1300°C的区间内出现结构韧性的最低值。结构韧性可以用不同的方法求得。主要是直接由急冷急热试验求得或用间接计算测得的物理参数求得。本工作中选用后一种算法来比较砖的性能。求得的参数，即导热性，热膨胀和抗扭变形，以及计算得到的在温度400~1500°C之间的结构韧性示于图8中。从中可以明显看出各个影响因素的作用。例如镁炭砖，包括加了抗氧化剂的镁炭砖的所有影响参数对提高结构韧性来讲，都比烧成沥青浸渍砖有利。这种判断方法的条件是要进行1500°C下还原气氛中的高温扭曲试验，检验仪器要与之相适应。

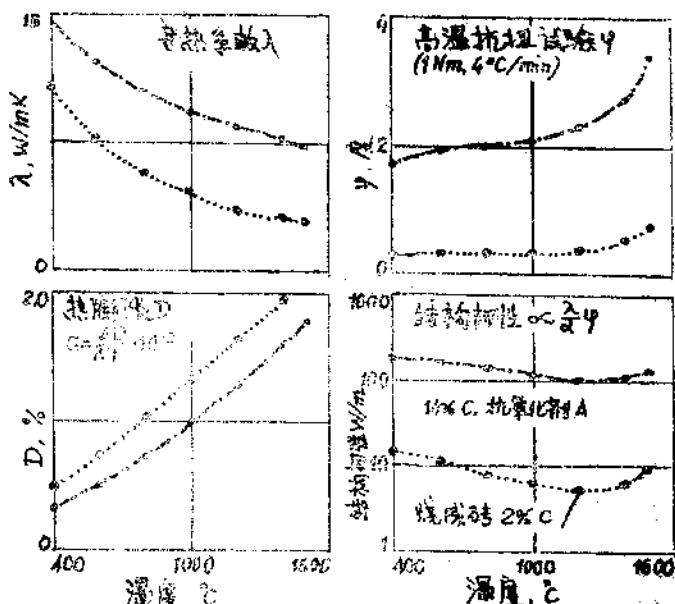


图8 计算含炭镁砖结构韧性的测量

4.2 抗连续蚀损能力

连续蚀损主要是侵蚀作用使高温侧很薄砖层均匀剥落。当然这种蚀损的尺度是与侵蚀有关的,侵蚀相应为蚀损的前期阶段。因此,砖的连续蚀损是指炭素氧化、渣渗透、氧化镁与杂质元素反应和反应层磨蚀等几个过程交互作用的过程。由于渣和炉气中氧的作用使高温一侧砖中炭素氧化,其主要的是渗透到砖中炭层,杂质元素是渗透到移进来的,最后是高温一侧反应层磨蚀。此外,渣在一定的条件下也可能存在砖中氧化物组分使炭素氧化的情况。

4.2.1 氧化和氧化还原稳定性

炭素在砖的蚀损中起着阻渣作用^{[1][2][3][4]}。炭素完全氧化越缓慢,就越能更好和更长时间地起到阻渣作用,这就是炭素氧化致密以重要原因所在。

4.2.1.1 氧化稳定性

含炭砖抗外部氧化作用的稳定性是由众多因素所决定的^{[1][2][3][4]},如炭素原料的品种和数量,结合炭的性能,砖的致密程度,以及抗氧化剂的品种和数量等。此外,操作条件的影响也是十分巨大的,如转炉渣的氧化铁含量,转炉炉气中的氧(分压)的粘附性和温度等等。

为了评价镁炭砖的氧化性能,将炭化以后的试砖在1100℃下的空气中灼烧并用砖中脱炭层的尺寸确定脱炭程度(图9)。在烧成油浸镁砖几乎完全氧化情况下,镁炭砖中随着含炭量升高,脱炭层深度下降。用加入抗氧化剂的方法可以进一步明显降低镁炭砖的脱炭程度。对镁炭砖的实际使用来讲,这意味着随着含炭量提高以及通过加入抗氧化剂,脱炭作用向砖内深入的速度下降。

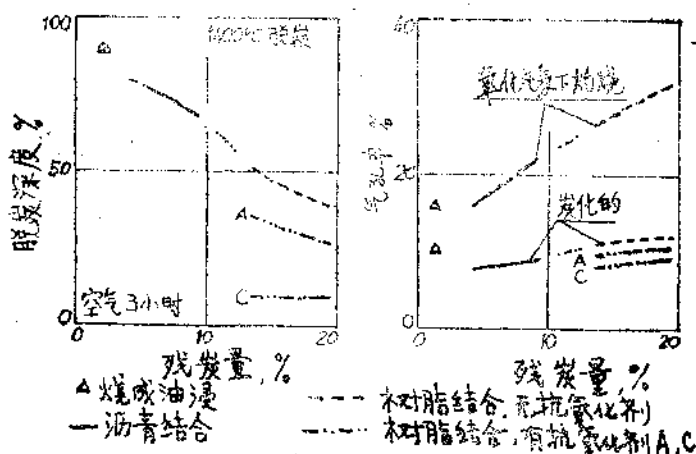


图9 评价含炭砖抗氧化性的性质

另外,如图9所示,随着砖中炭含量提高,砖中脱炭层中气孔率增大。因此其机械强度下降。这种脱炭层中气孔率的增大既促进了渣的化学侵蚀,也促进了炉内物质运动引起的砖中脱炭层的机械剥落。

脱炭速度不仅由砖中已脱炭层中的开口气孔率所决定,而且还与炭化的砖体中氧化性气体可到达的开口气孔空间有关。图9中示出,在砖中含炭量一定时,通过添加抗氧化剂可使开口气孔率明显降低。

4.2.1.2 氧化还原稳定性

在相应的温度和氧(分)压情况下,砖中氧化物组分间会发生反应,特别是MgO和加入的

炭素之间会发生反应。这时所进行的反应汇总于图10, 这些反应受一系列因素的影响^[17, 18]。

反应中主要涉及方镁石, 镁砂中的硅酸盐相, 石墨中的脉石。反应时砖内形成的 SiO 和 Mg 蒸汽向高温一侧方向扩散, 这些蒸汽在越过它们的稳定区之后又被氧化。图10中也示出了一实验室抗渣试验所形成的相的序列。其特点是形成一抗渗透的致密方镁石层, 与它相邻的是一新生成的硅酸盐相层, 以及该层中气孔率明显提高。在实验室试验中常常观察到致密的氧化镁层, 而在转炉的侵蚀条件下没有证实有致密氧化镁层, 所以也可以认为, 没有这种致密层减少渗透的作用^[17, 18]。

采用高 CaO/SiO_2 比的烧结镁砂或电熔镁砂, 或采用低 SiO_2 , 低 B_2O_3 , 大晶体和低气孔率的镁砂, 采用低灰分含量的或石墨, 以及高的砖体积密度, 则有可能减少这种氧化还原反应^[17, 18]。

这种氧化还原反应意味着镁炭砖在转炉实际使用中, 在温度高于 1650°C , 特别是高于 1700°C 时, 这种反应使高温侧的含炭砖体结构逐渐变弱, 强度下降和气孔率增大。

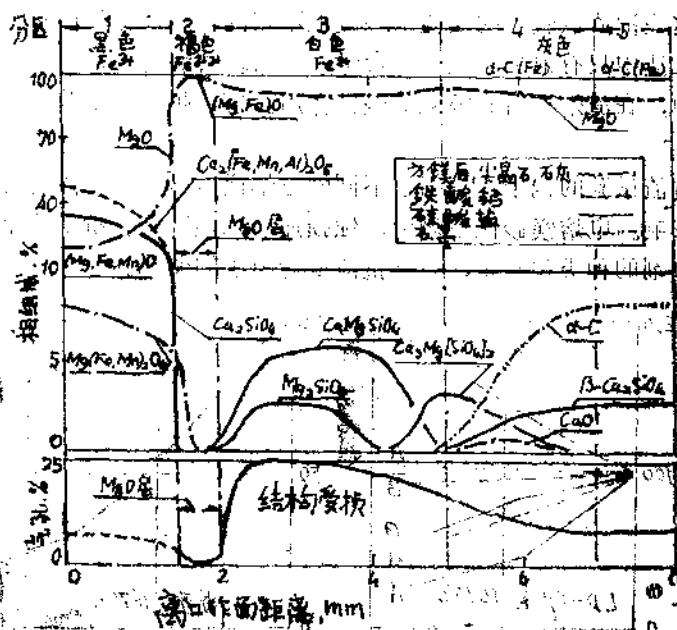


图10 用渗透图来表示镁炭砖中的氧化—还原反应 (实验室试验)

4.2.2 抗炉渣侵蚀稳定性

由于炭素的阻止渣渗透作用,炉渣侵蚀只限于高温侧的一薄层中。视砖中含炭区域前面的 CaO/SiO_2 比的大小,有两种机理对侵蚀起决定性作用。在 $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 2$ 时是还原效应,因此渗透进来的渣中的氧化铁还原成金属,并使渗透物的低共熔点大大提高。另一种是在 $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 2$ 时的不浸润效应,据此,炭素的不浸润性通过硅酸盐熔体阻止了渗透物的向内迁移[8/9/11]。

渣对砖中氧化物的熔解侵蚀主要是由烧结镁砂或电熔镁砂的性能所决定的。例如由杂质的数量和分布,方镁石晶体的大小和颗粒的密度以及加入物(如石墨)带入的或其氧化(如加抗氧化剂时)所形成的氧化物的种类和数量等决定。此外,渣的成分,渣的附着性和温度对砖中氧化物组分的溶解速度有着重大影响。

评价渣的作用可以有不同的方法。本研究工作中引用筒式回转炉、电弧炉和感应炉中的抗渣性实验结果。这些抗渣试验中的实验条件是很不相同的。电弧炉中进行抗渣试验时有很强的还原条件。因此渣中只有很少的氧化铁含量;在回转炉法时有很强的氧化条件。另外可以认为,回转炉法中,在渣熔化时有很强的侵蚀作用。感应炉中的试验结果处在电弧炉和回转炉的结果之间。

图11中列举了抗渣试验的例子,说明了不同的电熔镁砂含量及加入各种抗氧化剂时对镁炭砖侵蚀稳定性的影响。电熔镁砂比例增大,蚀损速度明显降低。抗氧化剂的作用在很大程度上受到所用抗氧化剂的种类和数量,以及抗渣试验方法的影响。

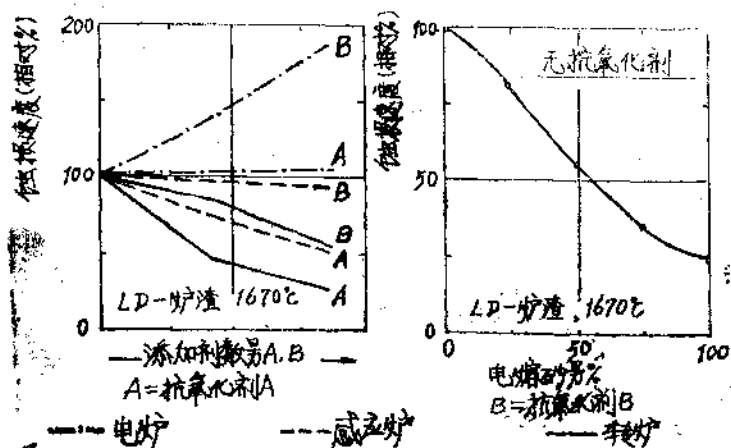
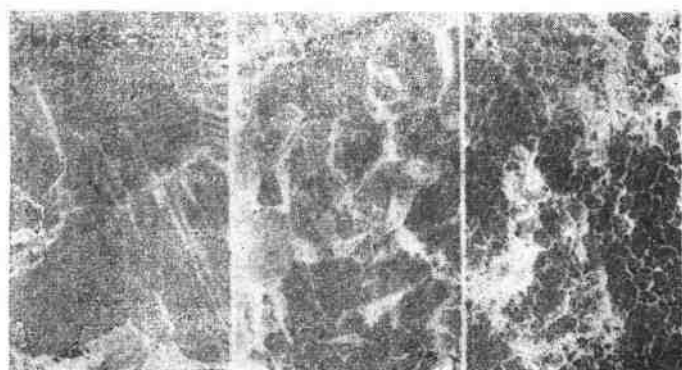


图11 镁炭砖(含C14%)抗渣侵蚀性

另外,所引用的抗渣试验结果也支持了对生产镁炭砖所用烧结镁砂和电熔镁砂质量的评价。

要使烧结镁砂有高的抗渣性,除了成分和体积密度之外,方镁石晶体的大小和颗粒表面的活性,以及次要相的分布是很重要的。特种镁砂原料,经过高温烧成,可以制成具有反应惰性的烧结镁砂,性能接近电熔镁砂(图12)。

另外,由抗渣试验得到,渣中氧化铁活性升高(炉气中氧气分压升高。渣的氧化铁含量升高)以及出钢温度升高,特别是温度 $> 1700^{\circ}\text{C}$ 时,使得蚀损速度明显升高,并且砖的炭素含量越高,这种情况越明显。只有用高密度的镁炭砖时,在较高出钢温度和渣中铁含量高时这种砖种也才是有成效的。



质 量	标准砂	高纯砂	高 温 砂	电熔砂
MgO含量 %	96	99	97~98	96~99
体积密度 g/cm ³	3.34~3.45		3.40~3.45	3.50
晶体大小 D _m • μm	30~50		120~150	500

图12 制造含炭砖的镁砂质量

4.2.3 抗磨蚀能力

对抗磨蚀能力来讲，重要的是在高温下还是有强度和致密稳定的结构。另外重要的一点是，在使用条件下这种稳定结构要尽可能少地受转炉杂质元素的影响和少受砖体本身氧化还原反应而发生变化，或者说其结构强度尽可能慢地受这些转炉运行中不可避免地因素影响而降低。

评价高温抗磨损能力多数是间接地用高温和常温的抗弯或抗压强度来表示。在图13中示出了至今已分析过的砖种的抗磨损能力的例子。另外图中包括了炭化后的立方体试块 (a=50mm) 在回转炉中，1200℃空气中的抗磨损试验和室温下的 Jourdain 抗磨损试验。

这两种方法之间有差异的原因在于，高温回转炉中试验是在氧化气氛下进行的。正是因为随着炭含量升高，炭素完全燃尽速率减小，也因为只有脱炭的砖层才真正是易于磨损，所以磨蚀的速度随着炭量

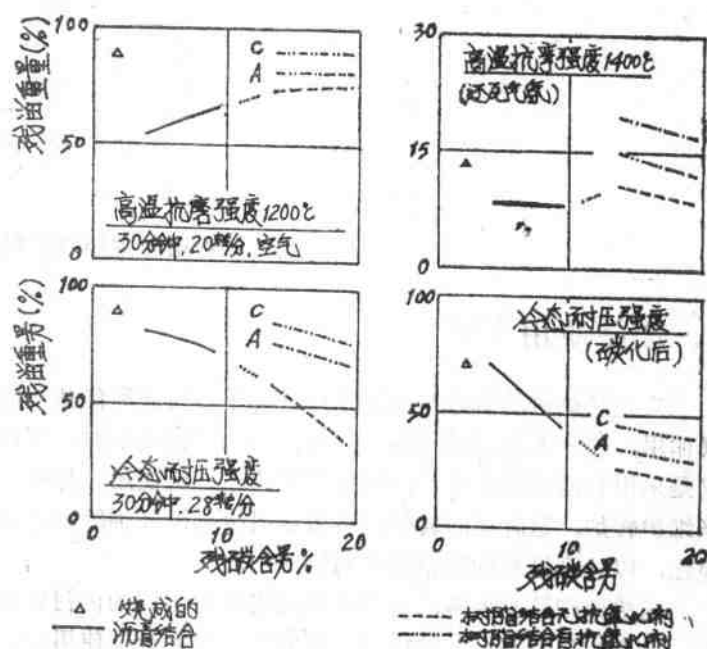


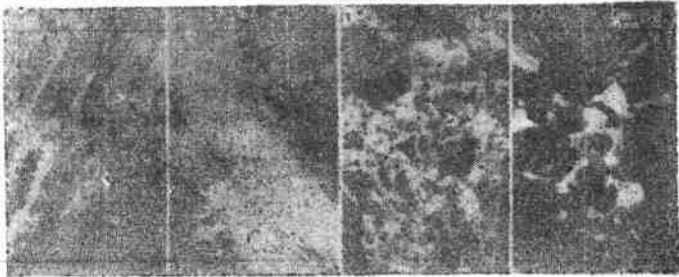
图13 评价抗磨蚀能力的含炭砖的性质

增加而下降。Jourdain 试验给出了没有附加氧化下也适用于高温的结构强度。所以这两种方法相互补充而使试验完备。

4.3 砖性能的评价

如果把砖的重要性能综合起来，则它们是抗不连续性侵蚀的结构韧性和抗连续性侵蚀的高温磨蚀强度，氧化稳定性和抗化学侵蚀能力。图14中给出了四种现行吹氧转炉中使用镁质砖的这些性能的评价，还给出了这些砖中炭素结构的典型断面。

由此可以看出各种砖的长处和短处，有抗氧化剂的镁炭砖具有最均衡的性能，这时氧化稳定性与化学侵蚀稳定性的关系取决于抗氧化剂种类和数量。高的氧化稳定性的长处一般是和低的抗化学侵蚀联系在一起的。与此相反，烧成油浸砖的各性能差别最大。



特 性	沥青浸渍烧成镁砖	沥青结合镁砖	标准镁炭砖	有抗氧化剂 A、C 的镁炭砖
残 炭	2%	5%	14%	12%
结构韧性				
高温磨蚀强度				
抗氧化性				
抗化学侵蚀性				

图例说明：① = 很低，② = 低，③ = 中等，④ = 高，⑤ = 很高

图14 氧气转炉用砖主要性能特征描述

图14 氧气转炉用砖主要性能特征描述

5. 产品使用举例

吹氧转炉衬的良好效果不是通过各单项措施所能达到的，而是要求许多因素相互协调共同作用，这一方面是运行操作过程，另一方面是炉衬。所以要使转炉经济效益好，重要的不仅是采用合适的耐火材料，而且要正确地砌筑使用。另外，还要通过正确的造渣操作和喷补来维护转炉。这时高的转炉经济效益很少是以高炉龄来达到，而多数是使炉衬尽可能均匀地侵蚀，以达到最低的吨钢耐火材料费用。

正确地砌筑耐火砖，首要的是要考虑对不同的内衬侵蚀情况，采用局部炉衬不一样来平衡。其目的是使整个转炉内衬尽可能均匀和完全地使用完。这时依据转炉吹炼后，采用诸如激光残存厚度测量得到的炉衬蚀损后的轮廓，对蚀损情况不同的区域，采用不同的砖种来平

衡。在必要时，还可以用不同的砖体厚度来平衡。

图15举例示出了一复吹的LD—LDE转炉的综合砌筑炉衬。该炉衬中应用了本文中所提及的所有砖种。烧成沥青浸渍砖用于炉口封口处一圈；镁炭砖（有抗氧化剂和无抗氧化剂的）用于取样时的渣线位置的耳轴面，以及喷嘴周围；不同MgO含量的沥青结合镁砖用于转炉其它区域。

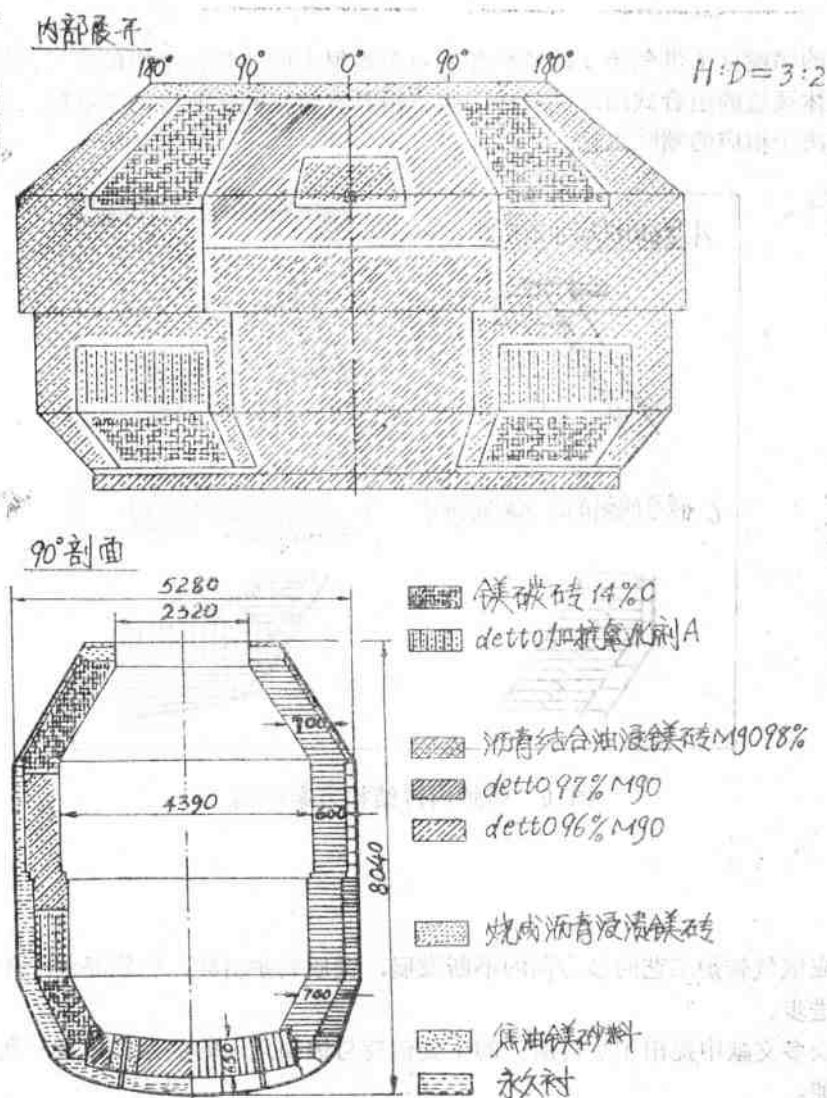


图15 120 TLD—LDE转炉镁质砖衬各段的砌筑

采用合适的结构也属于正确砌筑之列。图16中是这方面的一些例子。图中给出了炉口至炉底的各个位置的结构情况。为了在炉口维护时不损坏炉衬，所以炉口封口处有意采用竖砌拱式结构。立砌与平砌拱结构相比，具有更好的抗破坏能力及能砌筑得更紧密（图16A）。

一个特别容易出问题的位置是出钢口，这里有一种结构已证明是适用的，这种结构中考虑了流动定律，可避免产生紊流。其特点是有一圆弧形的喷嘴形进口，以及从进口到出口的

通道横截面是逐渐变小的。这样就使得钢水向出口流动过程中不会脱离通道壁，所以不会有紊流出现（图16B）。

在底吹或复吹转炉中，炉底和底锥体部位的蚀损增大。因此特别推荐在底锥处不采用阶梯形砌砖，而采用斜角砖。另外在内衬厚度大时，要采用咬合的两圈砌体（图16C）。在紧接着的向炉底过渡的区域，采用竖拱结构砌筑炉底和锥体之间的接缝处也是有好处的（图16D）。

炉底内的喷嘴区（供气砖）的结构差别可以是很大的。目前采用的有管式供气砖。有在接缝处有气体通道的组合式扇形供气砖，也有用具有特别高透气度的多孔砖。选用那种喷嘴结构主要取决于相应的喷吹工艺。

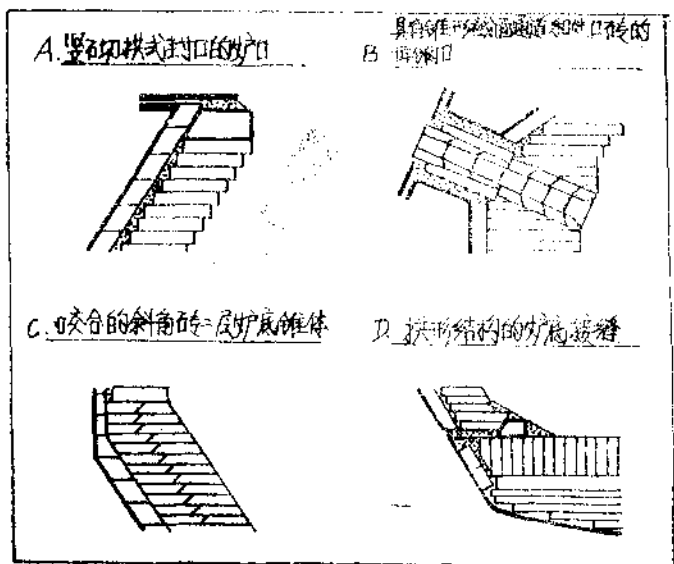


图16 转炉内衬结构方案举例

6· 综述

为了适应氧气转炉工艺的多方面的不断发展，镁质转炉衬砖，特别是近十年来，取得了令人瞩目的进步。

本文从众多文献中提出了炉衬所受的主要负荷与蚀损之间的关系。以及一些镁质转炉衬砖的重要性能。

耐火材料生产者的任务在于，在掌握和考虑这些认识的前提下，提出一种与氧气转炉钢厂的目标相应的，最经济的炉衬方案。文中也列举了几个这方面的使用例子。

汪厚植 译
李楠 校