

专论综述

高炉用耐火材料的发展概况

蔡国庆,王文学,刘成强,王希波,付卫

(山东耐材集团鲁耐窑业有限公司,山东 淄博 255200)

摘要:介绍了国内外高炉大型化的建设状况,分析了影响高炉寿命的关键部位及对耐材的要求和合理配置,重点介绍了高炉用耐火材料的研究发展状况和取得的成就。

关键词:大型高炉;长寿高效化;耐火材料发展;选材与配置

中图分类号:TQ175.7

文献标识码:A

文章编号:1004-4620(2011)05-0025-05

随着钢铁生产的高速发展,我国高炉炉衬用耐火材料取得了很大的进步,在生产技术、产品品种、质量水平方面,正逐步追赶世界先进水平,取代某些进口产品。延长高炉寿命是我国冶金工业的重要技术政策,炼铁和耐火材料工作者为此做出了很大的努力,并取得了显著的成效。

1 国内外高炉大型化建设状况

截止到2010年,全国重点钢铁企业共有1 000 m³以上高炉206座,其中4 000 m³以上高炉14座,3 000~3 999 m³以上高炉19座,2 000~2 999 m³高炉57座,1 000~1 999 m³高炉116座。宝钢4 966 m³高炉、曹妃甸5 500 m³、沙钢5 800 m³高炉的投产,标志着我国在世界特大型高炉领域占据了一席之地。目前世界上正常运行的5 500 m³以上高炉共14座,其技术装备比较见表1。

表1 世界5 500 m³以上高炉技术装备比较

国家	公司/炉号	有效容积/m ³	热风炉	风口/铁口数量
中国	沙钢2 [#]	5 800	PW-DME	40/3
日本	NSC大分1 [#]	5 775	NSC式	42/5
日本	NSC大分2 [#]	5 775	NSC式	42/5
俄罗斯	切列波维茨5 [#]	5 580	地德外燃	40/4
中国	首钢京唐1 [#]	5 576	BSK顶燃式	42/4
中国	首钢京唐2 [#]	5 576	BSK顶燃式	42/4
日本	NSC君津4 [#]	5 555	NSC式	42/4
德国	施韦尔根2 [#]	5 513	地德外燃	42/4
日本	JFE福山5 [#]	5 500	NSC式	
韩国	浦项阳光3 [#]	5 500	VIA式外燃	42/4

2 高炉用耐火材料质量水平及要求

2.1 炉底、炉缸用耐火材料

国内外高炉调查研究表明,绝大多数高炉是因

收稿日期:2011-08-08

作者简介:蔡国庆,男,1965年生,1988年毕业于西安冶金建筑学院硅酸盐工程专业。现为山东耐材材料集团有限公司首席专家、技术中心副主任、山东耐材集团鲁耐窑业有限公司副经理,高级工程师,从事耐火材料技术研究及管理工作。

为炉底、炉缸侵蚀严重而被迫停炉,因此,高炉设计非常重视炉底、炉缸设计的合理性,基本措施包括三个方面:一是增加死铁层深度,以延缓炉缸铁水流动对炉底、炉缸的侵蚀;二是改善炉缸耐材质量,提高炉缸的导热能力、抗压强度、抗铁水侵蚀;三是加强炉底、炉缸冷却强度与冷却效果。

2.1.1 高炉炭砖

高炉炭砖有半石墨炭砖、微孔炭砖、超微孔炭砖、石墨砖和模压小炭砖等。国内高炉工作者曾对国内外同类炭砖产品进行了使用性能的对比试验,半石墨炭砖因高炉大型化已淡出使用,下面介绍对各种炭砖的质量比较情况。国外、国内各牌号炭砖指标分别见表2、表3。

1)微孔炭砖。普通微孔炭砖中,日本的BC-7S和法国的AM-102炭砖可作为代表性的国际名牌产品,武钢5[#]高炉、宝钢1[#]和2[#]高炉都使用了该产品,使用效果好,高炉寿命都达到了10 a以上。该产品的特点是导热系数较高,微气孔指标先进,平均孔径0.10~0.13 μm,抗碱性优良。

国产的普通微孔炭砖,其主要性能指标和日本BC-7S炭砖、法国AM-102炭砖已很接近,很多高炉的使用效果较好,例如武钢4[#]高炉使用国内的普通微孔炭砖,寿命已达到了10 a。

2)超微孔炭砖。以日本的BC-8SR和德国的7RDN为代表,人们称之为超微孔炭砖。其主要特点是导热系数较高,平均孔径达到0.1 μm, <1 μm孔容积率>85%,其他性能也保持优良。兰州碳素厂和武钢技术中心合作,经过6 a的研究,现已研制成功这种超微孔炭砖,其性能达到了国外的实物质量水平,已用于武钢在建的3 200 m³高炉。

3)模压小炭砖。以美国NMA、NMD热模压小炭砖为代表的国际名牌产品在我国应用也比较多,使用效果较好。近年国内已有多家碳素厂生产模压小炭砖,但一般只达到普通微孔炭砖的水平。如600℃的导热系数仅12 W/(m·K)左右,低于美国的

表2 国外高炉用炭砖指标

牌号	炭砖					微孔、超微孔炭砖			
	美国UCAK		日本	法国 AM102	日本 C-12	日本			德国 7RDN
	NMA	NMD				BC-7S	BC-7	BC-8SR	
灰分/%	12.78	8.36		14.46	1.10	14.46			
体积密度/(g·cm ⁻³)	1.62	1.85	1.55	1.56	1.62	1.58	1.58	1.73	1.77
显气孔率/%	18.86	13.00	17.00	17.02	16.40	18.00	17.09	10.02	15.05
透气度(率)/mDa(%)	4.44(9)	-10.00	(23~35)	0.28(20)	200.00	5.98	5.96	0	0.99
耐压强度/MPa	29.93	34.20	32.30	29.44	31.48	46.58	46.58	31.95	44.25
氧化率(速度)/(mg·cm ⁻² ·h ⁻¹)	18.00		-126.80	8.09(1.0)	9.91	2.49	2.49	3.00	5.27
铁水溶蚀指数/%	28.18			13.64	27.96	15.79	15.79	31.17	19.42
抗碱性能/级	U	U	12.40	U	LC	U	U	U	U
平均孔径/μm	1.083			0.109	1.200	0.234	0.125	0.083	0.121
≤1 μm的孔容积比/%	53.40			78.67	39.55	76.00	78.45	88.20	76.08
室温	4.96	10.00	8.85	10(25℃)	20.26	7.55	7.55	13.91	12.00
300℃	11.30	14.40	11.80		24.50	11.30	11.30	17.70	18.95
热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)									
600℃	16.10		14.00		24.85	12.40	12.40	18.15	20.42
800℃	16.60		15.00					17.84	19.49
900℃	19.30	17.20	15.90				12.40		
1200℃	19.70	22.30							

表3 国内高炉用炭砖指标

指标	石墨 炭砖	微孔 炭砖	超微孔 炭砖	高导热 炭砖
固定碳/%	≥99			
灰分/%	≤0.5			
显气孔率/%	≤21	≤18	≤17	≤20
真气孔率/%	≤29			
体积密度/(g·cm ⁻³)	≥1.60	≥1.63	≥1.68	≥1.60
真密度/(g·cm ⁻³)		≥1.98	≥1.90	
常温耐压强度/MPa	≥23	≥36	≥38	≥30
常温抗折强度/MPa	≥8	≥9	≥9	≥8
室温				≥20
200℃	≥80			
热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)				
300℃		≥12	≥19	≥25
600℃				
800℃				
透气度/mDa		≤9	≤2	≤2
铁水溶蚀指数/%				≤32
抗碱性		U or LC	U	U or LC
平均孔径/μm		≤0.5	≤0.1	
≤1 μm的孔容积比/%		≥70	≥80	
抗碱性 原强度/MPa				
后强度/MPa				
强度变化率/%				
体积膨胀率/%				
外观				
评价				
使用部位	高炉 炉底	高炉炉 底炉缸	高炉炉 底炉缸	高炉 炉缸

热模压小炭砖。武钢技术中心和国内某耐火材料厂合作进行了模压小炭砖的研制,以电煅无烟煤为原料,以酚醛树脂为结合剂,用磨擦压砖机成型,经高温烧成,生产模压小炭砖,其产品性能已优于美国热压小炭砖。

美国的热模压小炭砖的主要优点是导热系数较高,优于国产的普通微孔炭砖和普通模压小炭砖。另一优点是抗碱性优良,而这一性能国内产品也已能够达到。其缺点是不属于微气孔炭砖,平均孔径>1 μm、<1 μm孔容积率仅53.4%。国内开发的模压小炭砖主要性能已明显优于美国NMA热模压小炭砖:600℃的导热系数>20 W/(m·K);平均孔径0.237 μm,<1 μm孔容积率76.12%,是较好的微孔炭砖,铁水溶蚀指数仅14.22%。该研制产品已经首次用于武钢新建的7#高炉炉缸部位。

美国NMD是一种石墨炭砖,导热系数很高,有的高炉将它用作炉身冷却板之间的砖衬使用。

顺便指出,石墨砖一般用于炉底最下层,是利用其高导热性强化炉底冷却,在高炉炉役后期减缓铁水的侵蚀。但是如果炭捣料的导热系数很低,石墨砖也无法发挥高导热系数的作用,这种情况下还不如使用微孔炭砖,因为石墨砖的孔隙大、强度低、抗铁水溶蚀性能也差。

综上所述,经过近10a的努力,我国的炭砖生产技术和产品性能、质量水平,已逐渐赶上世界先进水平,可以满足长寿高炉的需要。

2.1.2 陶瓷杯用砖

目前国内高炉陶瓷杯用砖有复合棕刚玉砖、刚玉莫来石砖、塑性相结合棕刚玉砖、微孔刚玉砖、法国陶瓷杯砖(浇注块)等5种,复合棕刚玉砖的抗碱性较差,一般大型高炉已不采用。

陶瓷杯炉缸结构是法国首先开发的,是一种不经高温烧成的浇注块,我国有不少高炉采用,使用效果较好。其主要优点抗碱性优良,抗炉渣侵蚀性

较好,抗铁水熔蚀性很好,是微气孔砖,适用于炉缸砖衬。近年国内相继开发出多种陶瓷杯用砖,则都是高温烧成的。

国产微孔刚玉砖的各项性能均已达到或优于法国陶瓷杯砖,其中抗炉渣侵蚀性和耐压强度更

好。塑性相刚玉砖除微气孔指标较差外,其他性能都较好,是目前应用最多的一种。刚玉莫来石砖由于抗碱性和抗炉渣侵蚀性很差,不适合用于炉缸部位,但用于陶瓷杯底仍是适用的。陶瓷杯用耐火材料指标见表4。

表4 陶瓷杯用耐火材料指标

指标	冶标系列塑性相复合刚玉砖				冶标系列微孔刚玉砖		法国棕刚玉浇注块
	ZSG-1	ZSG-2	ZSG-3	ZSG-4	WGZ-80	WGZ-83	
(Al ₂ O ₃)/%	≥80	≥75	≥70	≥78	≥80	≥83	≥82.39
(SiC)/%	6~10	6~10	0~3	2~5			
(Si ₃ N ₄)/%	-	-	6~10	4~8			
(Fe ₂ O ₃)/%	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤0.86
(Si)/%	3~7	3~7	3~7	3~7			
体积密度/(g·cm ⁻³)	≥3	≥2.9	≥2.9	≥2.9	≥3.1	≥3.2	≥3.29
显气孔率/%	≤15	≤16	≤16	≤16	≤15	≤13	≤10
常温耐压强度/MPa	≥110	≥90	≥100	≥100	≥130	≥150	≥66.08
加热永久线变化 (1 500 °C × 2 h) /%	+0.1 ~ -0.2	+0.1 ~ -0.2	+0.1 ~ -0.2	+0.1 ~ -0.2			
荷重软化开始温度 (0.2 MPa) T _{0.2} / °C	≥1 680	≥1 660	≥1 680	≥1 660			
铁水溶蚀指数/%	≤2	≤3	≤1.5	≤2	≤1.5	≤1	≤0.53
抗渣性(溶蚀率)/%	≤10	≤12	≤10	≤10	≤10	≤8	
炉渣溶蚀率/%							2 ≤ 3.08
透气度/mDa					≤0.5	≤0.5	≤6.08
平均孔径/μm					≤0.5	≤0.3	≤0.175
小于1 μm的孔容积率/%					≥70	≥80	≥95.33
平均热膨胀系数 × 10 ⁶ (20 ~ 1 000 °C) / °C ⁻¹	5 ~ 8	5 ~ 8	5 ~ 8	5 ~ 8			
热导率/ 室温 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)							6.35
300 °C							4.93
600 °C							5.42
800 °C	3 ~ 5	3 ~ 5	3 ~ 5	3 ~ 5			
抗碱性 原强度/MPa							66.08
后强度/MPa							67.05
强度变化率/%							2.38
体积膨胀率/%							5.84
评价							优(U)
抗碱性(强度下降率)%	≤10	≤15	≤10	≤15	≤10	≤10	

除碳砖品种外,还要重视碳素捣打料和泥浆的选择。如果采用导热系数很低的碳素捣打料[1~3 W/(m·K)],即使炭砖导热系数很高,但由于碳捣料相当于绝热层,因而散热仍然不畅,炉缸炉底温度必然很高,影响强化冷却的效果。

2.2 炉腹、炉身和炉腰用砖

炉腹、炉腰和炉身中下部,炉衬的工作条件相近,主要侵蚀原因是炉渣侵蚀、碱金属侵蚀、炉料和渣铁的冲刷、磨损等。这些部位的炉衬发展趋势是,主要靠强化冷却形成渣壁保持正常生产,砖衬仅留有很薄的镶砖,耐火材料的用量很小。比较典型的设计如武钢1[#]高炉的铜冷却壁薄炉衬结构。这一区域选用耐火砖的原则是,抗炉渣侵蚀性能好,

抗碱性较好,导热系数较高,强度要高。在成渣带以下可选用Si₃N₄结合SiC砖、赛隆结合刚玉砖或赛隆结合SiC砖。炉身中部无渣区可选用烧成微孔铝炭砖。炉身上部可用磷酸浸渍粘土砖。这几种砖的强度很高,抗碱侵蚀性和抗炉渣侵蚀性很好,导热系数也高,适用于砌筑炉身到炉腹区域。炉腹、炉身和炉腰用砖指标如表5所示。

3 我国大型高炉耐火材料应用发展情况

3.1 宝钢高炉内衬耐火材料的配置发展情况

宝钢炉底、炉缸结构主要考虑了以下3种典型形式:1)大块炭砖结构。1[#]和2[#]高炉第一代均采用了大块炭砖结构,炭砖具有优良的抗渣铁侵蚀能

表5 炉腹、炉身和炉腰用砖指标

指标	Si ₃ N ₄ 结合SiC砖		赛隆结合		烧成微孔铝碳砖	
	DTZ-1	DTZ-2	刚玉砖	碳化硅砖	WLT-1	WLT-2
(SiC)/%	≥72	≥70		≥71		
(Al ₂ O ₃)/%			≥80	≥5	≥65	≥60
(Si ₃ N ₄)/%	≥21	≥20				
(N)/%			≥5	≥5.5		
(Fe ₂ O ₃)/%	1.5	2	≤0.7	≤0.7		
TFel/%					≤1.5	≤1.5
(C)/%					≥11	≥11
体积密度/(g·cm ⁻³)	≥2.62	≥2.58	≥3.15	≥2.65	≥2.85	≥2.65
显气孔率/%	≤17	≤19	≤15	≤16	≤16	≤17
常温耐压强度/MPa	≥150	≥147	≥135	≥150	≥70	≥60
常温抗折强度/MPa	≥43	≥39.2				
高温抗折强度(1 400 ℃)/MPa			≥22	≥45		
铁水溶蚀指数/%					≤2	≤3
透气度/mDa					≤0.5	≤2.0
平均孔径/μm					≤0.5	≤1
≤1 μm的孔容积/%					≥80	≥70
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)(0~800 ℃)					≥13	≥13
抗碱性(强度下降率)/%					≤10	≤10
抗熔碱性(K ₂ CO ₃ 930 ℃×3 h×2次)/%			0~+5.0	±5.0		

力、抗碱侵蚀能力、耐铁水渗透能力,还具有很高的导热能力。本结构能够适应高炉长寿要求,但存在炭砖环裂的隐患。2)“陶瓷杯”结构。1#高炉第二代炉役采用了炭砖加陶瓷杯结构,国内和欧洲一些高炉也采用此类型炉缸结构。陶瓷材料的保温性能较好,炉缸热损失小,耐铁水冲刷能力强,有利于节能、降硅和稳定操作。但据1#高炉的使用实践来看,陶瓷杯在2~3 a内就有局部被侵蚀的现象。3)热压小块炭砖结构。3#高炉采用热压小块炭砖结构。小块炭砖具有很强的耐铁水渗透性和耐炉渣侵蚀性,并具有较高的导热性,在炉缸、炉底容易形成稳定

的渣铁凝固层,保护砌体不被侵蚀,有利于提高炉缸寿命。根据3#高炉的成功实践,4#高炉选用了热压小块炭砖结构。该结构先是在水冷炉底板上以碳素浇注料找平,厚度约80 mm。此后依次是底层CBY大块石墨砖、2-4层D级大块炭砖、两层陶瓷垫,整体炉底厚度占炉缸直径比例22.0%,属于薄炉底型结构。宝钢高炉内衬耐火材料的配置发展情况见表6。

3.2 首钢京唐钢铁厂5 500 m³高炉炉体结构状况
首钢京唐钢铁厂5 500 m³高炉设计以高效、长寿、低耗、稳定顺行为宗旨,高炉一代炉役设计寿命

表6 宝钢高炉内衬耐火材料的配置发展情况

部位	1#BF(第一代)	1#BF(第二代)	2#BF	3#BF	4#BF
炉底	石墨炭化硅砖 普通炭砖	普通炭砖 微孔炭砖 两层陶瓷杯底	高导热炭砖 普通炭砖 微孔炭砖	石墨炭化硅砖 D级普通炭砖	石墨砖 D级炭砖 塑性结合刚玉砖
侧壁	普通炭砖	微孔炭砖 普通炭砖 陶瓷杯壁	微孔炭砖 普通炭砖	热压小块炭砖NMA	热压炭块 致密粘土砖 碳素泥浆 粘土泥浆
炉缸					
铁口区	硅线石砖	大块超微孔炭砖	Al ₂ O ₃ -SiC-C	热压小块炭砖NMD	热压炭块
风口区	硅线石砖	刚玉质浇注料	自结合SiC砖	D级普通炭砖	硅线石组合砖
炉腹	刚玉砖	Sialon结合 刚玉砖	刚玉砖	嵌铸β-Al ₂ O ₃ 结合SiC砖 冷却壁	石墨砖
炉腰	刚玉砖	Sialon结合 碳化硅砖	刚玉砖	嵌铸Si ₃ N ₄ 结合 SiC砖冷却壁	石墨砖 碳化硅砖
炉身下部	刚玉砖	Sialon结合 碳化硅砖	刚玉砖	嵌铸Si ₃ N ₄ 结合 SiC砖冷却壁	石墨砖 Sialon结合碳化硅砖
炉身中部	刚玉砖 粘土砖	Si ₃ N ₄ 结合SiC砖	刚玉砖 粘土砖	嵌铸堇青石结合 硅线石砖冷却壁	石墨砖 Sialon结合碳化硅砖
炉身上部	致密粘土砖	硅线石砖	致密粘土砖		Sialon结合碳化硅砖
炉喉钢砖下部	硅线石砖	水冷板	水冷板	水冷板	

25 a, 一代炉役单位炉容达到2万 t/m³, 焦比290 kg/t、煤比200 kg/t、燃料比小于490 kg/t, 技术经济指标居世界前列。高炉本体结构采用无过热冷却体系+无应力砌体结构技术相结合, 炉缸炉底采用高导优质炭砖+陶瓷垫综合炉缸炉底技术, 炉底炉缸“象脚状”侵蚀区域、铁口区域、炉腹、炉腰、炉身下部采用铜冷却壁技术, 炉体采用全冷却结构(包括炉喉钢砖), 炉腹以上采用砖壁一体化炉衬结构技术, 高炉冷却采用纯水密闭循环冷却技术。同时采用水冷固定测温、炉顶高温摄像、炉身静压(压差)测量、炉底在线测温监控、贯流式长寿风口等先进设备和检测技术实时跟踪分析高炉侵蚀运行情况, 为高炉专家系统提供基础保障。

4 结 语

我国不同钢铁企业的高炉容积相差很大, 应照炉容大小正确选用不同等级的耐火材料, 几百立方米的小高炉完全没有必要从国外购买高档炭砖和陶瓷杯砖。近年来国产高炉炉衬用耐火材料已有很大进步, 例如炭砖从普通炭砖、自焙炭砖发展到半石墨炭砖、微孔炭砖, 进而到超微孔炭砖, 每进一步质量都有大幅度提高。在高炉建设中, 合理地选用国产耐火材料满足长寿高炉的要求是可行的, 这不仅降低高炉建设投资, 也对促进和发展国产耐火材料工业具有深远意义。

Development Situation of the Refractories for Blast Furnace

CAI Guo-qing, WANG Wen-xue, LIU Cheng-qiang, WANG Xi-bo, FU Wei

(Shandong Refractories Group Lunai Kiln Refractories Co., Ltd., Zibo255200, China)

Abstract: This article introduces the construction status of large-scale blast furnace both at home and abroad. It analyzes the key position affecting blast furnace life and set up a claim to the refractories and its reasonable configuration. The study and development situation and achievements of refractories for blast furnace are mainly introduced.

Key words: large-scale blast furnace; longevity and efficiency; development of refractory materials; material selection; configuration

(上接第24页)针, 实现了高炉长期稳定顺行和经济技术指标上水平。为石横特钢炼铁技术的整体进步以及十二五发展规划目标的实现奠定了基础。

参考文献:

[1] 项中庸, 王筱留. 高炉设计-炼铁工艺设计理论与实践[M]. 北

京: 冶金工业出版社, 2009.

[2] 魏朱贵. 济南庚辰钢铁2号高炉降低燃料比实践[J]. 炼铁交流, 2010(5): 25-26.

[3] 刘云彩. 高炉布料规律[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.

Iron Making Technology Progress of Shiheng Special Steel's No.3 BF

DONG Cheng-guo, WANG Meng, CHEN Yan-bo

(The Iron Making Plant of Shiheng Special Steel Group Corporation, Feicheng 271612, China)

Abstract: This article introduced ironmaking technology progress of Shiheng Special Steel's No.3 BF in last two years. Through strict quality control of raw material and fuel, refining equipment management, optimizing the BF process and operation management, regular alkali discharge and selecting reasonable blast system and charging system and suitable thermal system and slag-making system, the BF realized high efficient and stable smooth operation for a long time. The economic and technical indexes improved continuously, the utilization coefficient is 2.97 t/(m³·d), comprehensive coke ratio is 488.45 kg/t and the ratio of coal is 39.18 kg/t.

Key words: blast furnace; technology progress; raw material and fuel; operation system

山东金属学会医疗卫生学术委员会召开企业医院管理研讨会

山东金属学会医疗卫生学术委员会2011年9月23日在青岛召开了企业医院管理研讨会, 9个会员单位的29名代表参加了这次会议。

这次会议的主要议程是结合当前经济形势, 研讨企业医院医疗卫生改革与发展经验做法交流; 医院管理、人才培养、医疗医技水平提高、职业危害防治等专题研讨; 与会代表参观了青钢医院和医院管理现场。会上, 济钢医院孙鲁民院长就济钢医院管理、改革、发展的情况做了重点发言, 青

钢医院李强院长就青钢医院近年来企业参加社会医保情况, 职工健康查体情况等进行了详细的介绍, 张刚医院、金岭铁矿医院、山耐医院、冶金机械厂和王村铝土矿医院等单位代表也作了交流发言。主任委员严庆峰先生结合多年来的医院管理实践, 做了医院管理的8点工作提示, 实事求是地提出了很好的工作意见, 受到各位与会者的关注。另外, 会议还对明年的学会工作进行了讨论, 并提出明年的会议内容和承办单位由济钢医院担当。(王永忠)

学会动态