

高铁三水铝石型铝土矿的烧结特性

朱忠平, 黄柱成, 姜 涛, 李光辉, 庄剑鸣

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 以 Al_2O_3 含量为 26.35%, 总 Fe 含量为 31.22%, 铝硅比为 3.17 的某高铁三水铝石型铝土矿为原料, 研究了碱度、焦粉用量、混合料水分等对烧结矿质量指标的影响。结果表明: 烧结矿碱度增加时, 其转鼓强度和成品率下降, 烧结矿自粉化程度加重; 焦粉用量增加时, 烧结矿转鼓强度和成品率提高; 当混合料水分为 9.0%、焦粉用量为 8.0%、烧结矿碱度为 4 时, 烧结矿转鼓强度为 69.1%, 成品率为 81.2%, 垂直烧结速度为 30 mm/min, 利用系数为 $1.2 \text{ t}(\text{h}\cdot\text{m}^2)$; 烧结矿碱度为 4 时, 样品存放 2 天粉化率为 5%, 烧结矿平均粒度由 22.2 mm 减小到 21.9 mm, 延长存放时间, 烧结矿自粉化率增大, 平均粒度显著减小。该烧结矿的冶金性能能基本满足高炉冶炼的要求。

关键词: 高铁三水铝石型铝土矿; 烧结特性; 超高碱度; 综合利用

中图分类号: TF 521; TF 821

文献标识码: A

Sintering properties of high iron gibbsite-type bauxite ores

ZHU Zhong-ping, HUANG Zhu-cheng, JIANG Tao, LI Guang-hui, ZHUANG Jian-ming

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The influences of basicity, coke dosage and moisture on sintering performance were studied respectively by using a sample with 26.35% Al_2O_3 , 31.22% Fe, and mass ratio of alumina to silica 3.17. The results show that the tumbling index and finished products efficiency increase with increasing coke dosage, while decrease with increasing basicity. Sinter spontaneous pulverization becomes severer as basicity increases. The tumbling index is 69.1%, finished products efficiency is 81.2%, sintering speed is 30 mm/min and productivity is $1.2 \text{ t}(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ under the conditions of moisture of 9.0%, coke dosage of 8.0% and basicity of 4. After being stored for 2 d, the spontaneous pulverization of the sinter reaches 5% and the average particle size decreases from 22.2 mm to 21.9 mm. The sinters spontaneous pulverization increases while the average particle size of sinters decreases with prolonging storage time. The metallurgical performance of sinters can meet the requirement of BF smelting.

Key words: high iron gibbsite-type bauxite; sintering property; super-high basicity; complex utilization

随着我国经济的快速发展, 对支持国民经济可持续发展的第一、第二大金属铁、铝的消耗也越来越大, 铁矿和铝土矿的资源供应量严重短缺^[1-3]。20 世纪 80 年代, 我国在广西等地发现大量高铁三水铝石型铝土矿, 资源储量超过 1.6 亿 t。该矿具有有价金属品种多(主要含铁、铝、钒、镓、锰、钛等)、铝铁含量较低(总

Fe 含量 24%~37%, Al_2O_3 含量 20%~37%)、铝硅比较低($A/S=2.6\sim5.4$)的特点。由于铁矿物与铝矿物嵌布粒度细, 相互胶结, 矿物的单体解离性能极差, 难以选别, 再由于其铝铁品位低, 未达到一般冶炼品位要求, 若以单一铁矿或铝土矿开发, 成本较高, 技术不可行, 因此在我国尚属于呆滞矿产资源^[4-7]。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0748)

收稿日期: 2006-12-24; 修订日期: 2007-04-11

通讯作者: 朱忠平, 博士研究生, 讲师; 电话: 0731-8879622; E-mail: zhuzp@mecil.csu.edu.cn

为了解决高铁三水铝石型铝土矿的综合利用问题, 国内外开展了大量的研究, 取得了一些进展, 特别是在综合利用工艺方面, 已基本形成“先选别, 后冶炼”、“先铝后铁”和“先铁后铝”这 3 种典型工艺。

已有的研究已初步证实“先铁后铝”中的“高炉冶炼—炉渣浸出提铝”工艺较适用于我国高铁三水铝石型铝土矿资源及地理位置特点^[6-7]。东北大学对这一工艺进行的研究表明, 通过严格控制渣条件, 可在炼铁高炉中实现铁铝的有效分离, 并获得炉渣中氧化铝浸出率大于 82% 的优良结果^[7-8]。

该工艺的关键技术主要在于铝铁矿石的烧结、高炉冶炼过程中的渣铁分离以及炉渣的冷却结晶, 在这三者中烧结矿制备又是实现高炉冶炼铁铝分离的基础。本文作者以某高铁三水铝石型铝土矿为原料, 研究高铁三水铝石型铝土矿的烧结特性及工艺技术, 以期为此类矿石的综合开发利用提供技术支撑。

1 实验

1.1 原料的物理化学性能

1) 高铁三水铝石型铝土矿

烧结实验所用高铁三水铝石型铝土矿的主要化学成分如表 1 所列。

表 1 高铁三水铝石的主要化学成分分析

Table 1 Main chemical composition of high iron gibbsite(mass fraction, %)

Fe _t ¹⁾	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	V	Ga	P	S	Ig
31.22	0.28	26.35	8.32	0.036	0.27	0.59	1.36	0.11	0.006 2	0.1	0.033	17.3

1) Total Fe content

表 2 焦粉工业分析及灰分主要化学成分分析

Table 2 Industrial analyses and main chemical composition of coke powder(mass fraction, %)

Ash					Volatile matter	Fixed carbon	S	Ig
Fe _t ¹⁾	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃				
1.11	7.6	0.93	0.15	4.89	1.59	83.22	0.54	84.83

1) Total Fe content

表 3 石灰石的主要化学成分

Table 3 Main chemical composition of limestone(mass fraction, %)

Fe _t ¹⁾	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	Ig
0.66	0.38	54.43	0.41	0.32	0.018	0.001 5	43.25

1) Total Fe content

由表 1 可知, 高铁三水铝石型铝土矿中铁和铝含量低, 铝硅比较低(A/S=3.17), 烧损大。虽然矿石中铁的品位远高于普通铝土矿, 但还没有达到合格铁矿的边界品位; 铝的品位也没有达到目前氧化铝经济生产工艺要求。

采用显微镜观察和 X 射线衍射分析(XRD)进行的工艺矿物学分析结果表明: 铝的赋存矿物主要为三水铝石, 其次为针赤铁矿中以类质同像存在, 再次为高岭石和一水硬铝石, 分别占矿石中总 Al₂O₃ 的 45.02%、23.68%、23.14%和 8.16%; 铁矿物主要为针赤铁矿, 占矿石中总铁的 98.60%; 硅矿物主要为铝硅酸盐, 占矿石中总硅的 96.51%, 少量以游离二氧化硅存在。

因此, 从单一的铝土矿或铁矿的角度来研究该高铁三水铝石型铝土矿均不能达到工业生产要求, 必须实现铁铝综合利用才有工业利用价值; 由于矿石中钒和镓的含量达到伴生组分的工业要求, 钒、镓的综合利用也需一并考虑。

2) 焦粉

实验燃料为焦粉, 焦粉粒度较粗, 其中粒径小于 3 mm 粒级占 65%, 焦粉工业分析及其灰分的主要化学成分分析列于表 2。

3) 石灰石

石灰石中粒径小于 3 mm 粒级占 70%, 其主要化学成分分析见表 3。

1.2 实验方法

将高铁三水铝石型铝土矿、焦粉、石灰石、返矿按一定比例组成混合料,配以适量水分,经一次混合后,在 $d\ 600\text{ mm}\times 1200\text{ mm}$ 圆筒混合机中二次混合制粒 3 min,然后在 $d\ 200\text{ mm}\times 640\text{ mm}$ 烧结杯中进行烧结实验。实验条件如下:点火温度 $1\ 050\sim 1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、点火时间 1.5 min、点火负压 5 kPa、烧结负压 10 kPa。烧结矿冷却后,经单齿辊破碎机破碎后,在 2 m 高落下装置中落下 3 次,然后进行 ISO 筛分指数和 1/2ISO 转鼓强度测定。烧结矿的冶金性能测定参照《铁矿石的还原性测定方法》(GB/T13241—91 标准方法)和《铁矿石低温粉化实验静态还原后使用冷转鼓方法》(GB/T13242—91 标准方法)。

2 结果与讨论

2.1 碱度对烧结性能的影响

图 1 所示为焦粉用量 8.0%、混合料水分 9.0%条件下,碱度对烧结矿质量指标的影响。

随着烧结矿的碱度提高,烧结矿各项指标均有所下降,其中转鼓强度和成品率的下降幅度较大(图 1),而对垂直烧结速度的影响较小(图 2)。与一般铁矿烧结相比,高铁三水铝石型铝土矿的垂直烧结速度快(大于 28 mm/min),利用系数较低($1.0\sim 1.3\text{ t/(h}\cdot\text{m}^2)$)。在碱度小于 3 时,成品率降低幅度较小。当碱度增加时,烧结矿中游离 CaO 及 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{C}_2\text{S})$ 的数量增加,游离 CaO 的存在将破坏烧结矿的强度,冷却到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时 C_2S 由 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 向 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 晶型转变,发生体积膨胀,使 C_2S 晶体粉碎,从而导致烧结矿粉化,因而烧结矿转鼓强度下降,成品率降低^[9-11]。

由于烧结的最终目的是要得到满足高炉需要的烧

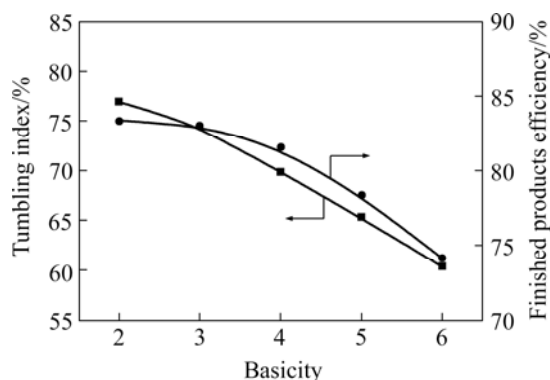


图 1 碱度对烧结矿转鼓强度与成品率的影响

Fig.1 Influence of basicity on sinter tumbling index and finished products efficiency of sintering ores

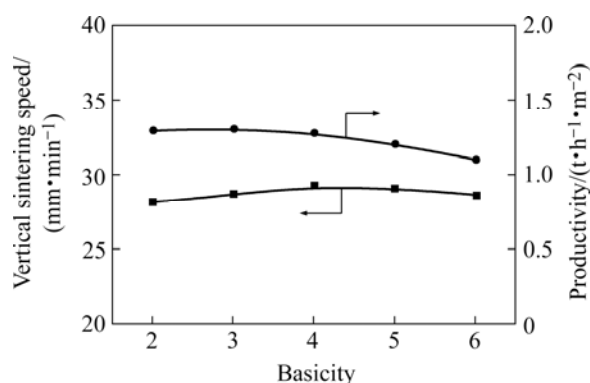


图 2 碱度对垂直烧结速度和利用系数的影响

Fig.2 Influence of basicity on vertical sintering speed and productivity

结矿,使铁铝在高炉冶炼过程中分离后,再由炉渣浸出提取氧化铝。如果不考虑炉渣中 MgO 和 TiO_2 等少量组分,则炉渣可简化为 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 三元系(图 3)^[12]。如图 3 所示,在所有的含铝矿物中,只有 $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}_{12}\text{A}_7)$ 能完全溶于碳酸钠溶液中,而 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$ 和 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{CA})$ 的溶解速度较慢, $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2(\text{C}_2\text{AS})$ 等矿物则完全不溶^[13-15]。

高炉冶炼高铁三水铝石型铝土矿烧结矿时,高炉炉渣主要成分为 C_2S 、 C_3A 、 CA 和 C_2AS ,也即炉渣的组成在四边形 $\text{C}_2\text{S-C}_3\text{A-CA-C}_2\text{AS}$ 内。但为了得到最有利于 Al_2O_3 浸出的矿物组成,炉渣的化学组成应位于三角形 $\text{C}_2\text{S-C}_3\text{A-CA}$ 内,且避开 C_2AS 的初晶区,而最佳炉渣成分为只含有 C_2S 和 C_{12}A_7 ,也即按 $\text{C}_2\text{S-C}_{12}\text{A}_7$ 线操作(图 3)。在 $\text{C}_2\text{S-C}_{12}\text{A}_7$ 线上,平衡时只存在两种物相,即 C_2S 和 C_{12}A_7 。由于 1 个 C_2S 分子中含有 2 个 CaO 分子和 1 个 SiO_2 分子,1 个 C_{12}A_7 分子中含有 12 个 CaO 分子和 7 个 Al_2O_3 分子,因此,平衡时混合物相中 CaO 的质量分数为:

$$w(\text{CaO}) = \frac{2 \times 56.0774}{60.0843} \times w(\text{SiO}_2) +$$

$$\frac{12 \times 56.0744}{7 \times 101.9631} \times w(\text{Al}_2\text{O}_3)$$

$$\text{即 } R = 1.87 + 0.94A/S$$

式中 $R = w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$,系数 1.87 为 C_2S 中 CaO 与 SiO_2 相对分子质量之比,0.94 为 C_{12}A_7 中 CaO 与 Al_2O_3 相对分子质量之比。

铝硅比(A/S)主要由原料条件确定, R 主要由熔剂确定。在现代高炉生产中,为降低焦耗,一般在烧结过程中添加溶剂,而在高炉中不再添加或只加入少量熔剂,因此,本实验烧结矿的碱度应为 4.85。考虑烧

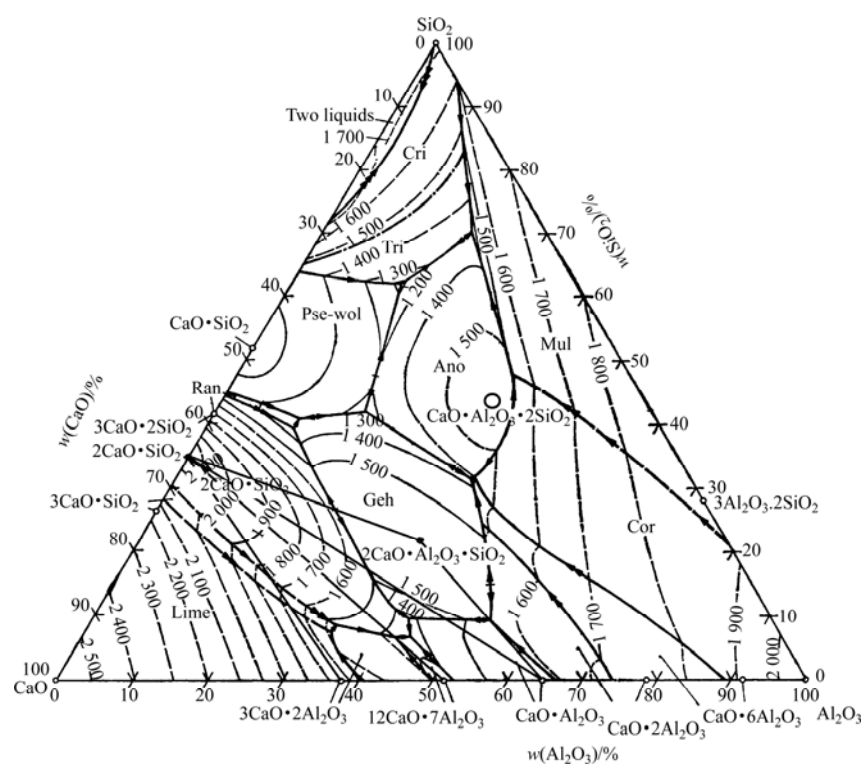


图 3 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 的相图

Fig.3 Ternary phase of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system(Ano: anorthite; Cor: corundum; Cri: cristobalite; Geh: gehlenite; Hat: Hatrurite; Mul: mullite; Pse-Wol: pseudo-wollastanite; Ran: rankinite; Tri: tridymite)

结燃料和熔剂以及高炉焦粉对碱度和 A/S 的影响, 因此下面的实验取烧结矿碱度 4.0 和 5.0。由图 1 可知, 烧结矿转鼓强度可达到 65%, 能满足高炉冶炼的要求。

2.2 焦粉用量对烧结性能的影响

图 4 和 5 所示为当碱度为 4.0、混合料水分为 9.0% 时, 焦粉用量对烧结矿质量的影响关系图。

增加焦粉用量可提高烧结矿的转鼓强度和成品率

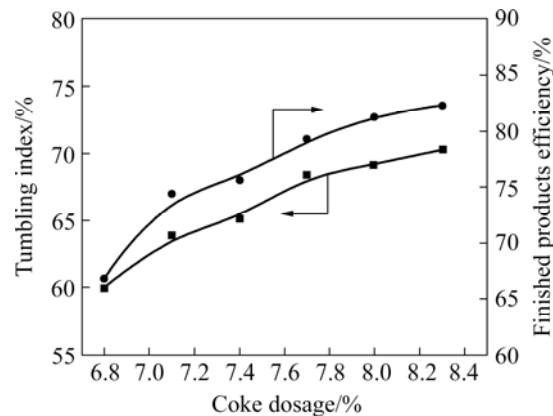


图 4 焦粉用量对烧结矿转鼓强度和成品率的影响

Fig.4 Influence of coke dosage on sinter tumbling index and finished products efficiency

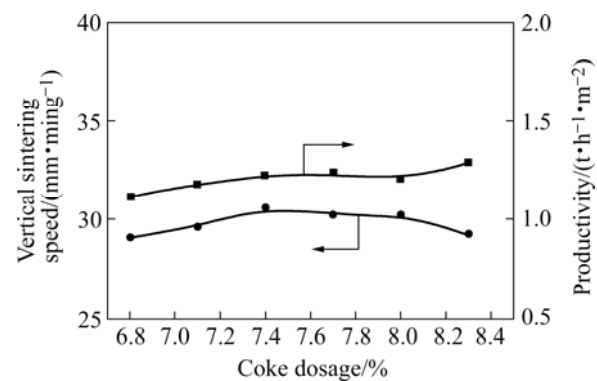


图 5 焦粉用量对垂直烧结速度和利用系数的影响

Fig.5 Influence of coke dosage on vertical sintering speed and productivity

(见图 4), 但对垂直烧结速度和利用系数影响较小(见图 5)。焦粉用量为 7.7% 以上时, 烧结矿的成品率达到 80%, 转鼓强度超过 65%。由于高铁三水铝石型铝土矿矿石中的三水铝石及针赤铁矿吸附大量水分, 在烧结过程中受热脱除结晶水和游离水时吸收大量热量, 同时由于超高碱度烧结所添加的大量石灰石分解吸收热量, 因此, 实验烧结过程中焦粉用量偏高。在实验焦粉用量范围内, 垂直烧结速度较高, 达到 28~30 mm/min, 利用系数较低, 为 1.0~1.3 t/(h·m²)。焦粉用

量增加到 7.7% 以上后, 转鼓强度增加不明显。

2.3 混合料水分对烧结性能的影响

图 6 和 7 所示为在碱度 4.0、焦粉用量 8.0% 条件下, 混合料水分对烧结矿质量的影响。

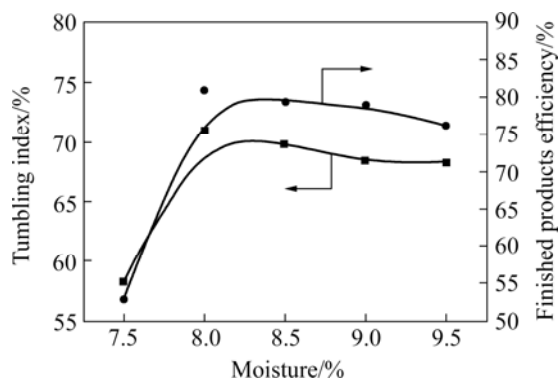


图 6 混合料水分对转鼓强度和成品率的影响

Fig.6 Influence of moisture on sintering tumbling index and finished products efficiency

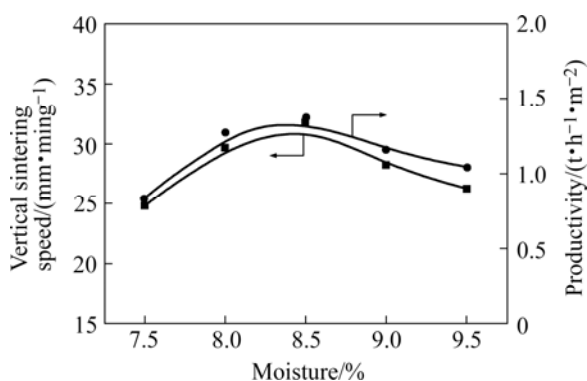


图 7 混合料水分对垂直烧结速度和利用系数的影响

Fig.7 Influence of moisture on vertical sintering speed and productivity

由图 6 和 7 可知, 烧结混合料的适宜水分含量在 8.0%~9.0% 之间, 此时烧结矿各项指标较好, 烧结矿转鼓强度大于 68%, 成品率大于 77%, 垂直烧结速度大于 28 mm/min, 利用系数大于 1.0 t/(h·m²)。混合料水分小于 8.0% 时, 烧结矿各项指标均很差, 在 7.5% 时, 利用系数为 0.8 t/(h·m²), 转鼓强度不到 60%, 成品率小于 55%。

2.4 烧结矿的自粉化性能

由于烧结碱度高, 烧结矿中还含有较多的游离 CaO。CaO 在吸收空气中水分后生成 Ca(OH)₂, 体积发生膨胀, 从而导致烧结矿粉化。为了了解超高碱度条件下高铁三水铝石型铝土矿烧结矿的自粉化性能,

取焦粉用量 8.0%、混合料水分 9.0%、碱度从 2.0 到 6.0 的烧结矿各 20 kg 进行自粉化实验。将烧结矿敞置于室内, 每隔一定时间在标准筛分指数测定装置上进行筛分, 取粒径大于 5 mm 的烧结矿占总质量的比值作为成品率来考查自粉化效果, 结果如图 8 所示。烧结矿自粉化时, 伴随着粒度变小, 图 9 所示为烧结矿平均粒度与存放时间的曲线。

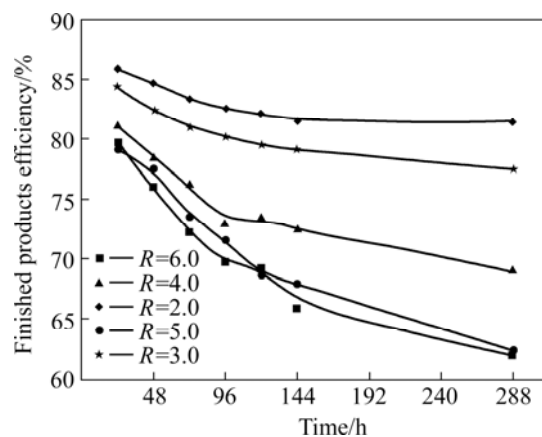


图 8 烧结矿成品率与存放时间的关系

Fig.8 Relationship between storage time and sinter finished products efficiency

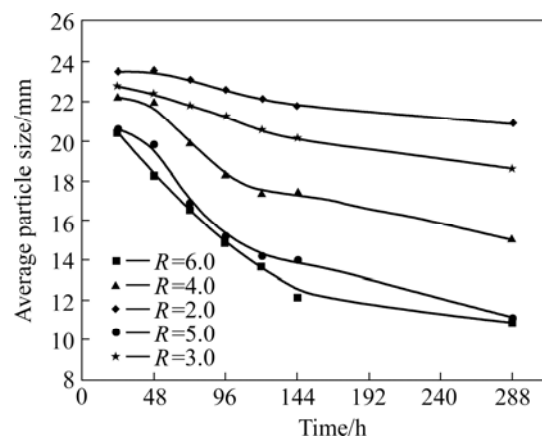


图 9 烧结矿平均粒度与存放时间的关系

Fig.9 Relationship between storage time and sinter average particle size

由以上实验结果可以得出如下结论: 1) 烧结矿碱度越高, 成品率越低, 平均粒度越小, 烧结矿自然粉化越严重; 2) 当烧结矿碱度一定时, 随着时间的延长, 烧结矿自然粉化加重; 3) 当碱度为 4 时, 48 h(2 d) 后自然粉化率约为 5%, 随后迅速增加, 288 h(11 d) 后达到 12%, 平均粒度由 22 mm 下降到 15 mm。因此高铁三水铝石烧结矿储存时间不宜过长, 48 h 内不会产生

表 4 烧结矿主要化学成分分析

Table 4 Main chemical composition of sintering product(mass fraction, %)

$\text{Fe}_t^{1)}$	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P	Mn
23.42	7.25	36.26	0.49	20.09	0.002	0.073	0.43

1) Total Fe content

表 5 烧结矿的冶金性能

Table 5 Metallurgical properties of high iron gibbsite-type bauxite sinter

Low temperature reduction degradation index /%			Reduction index/%	Melt property					
$\text{RDI}_{+6.3\text{ mm}}$	$\text{RDI}_{+3.15\text{ mm}}$	$\text{RDI}_{-0.5\text{ mm}}$		$t_s/^\circ\text{C}$	$t_M/^\circ\text{C}$	$t_D/^\circ\text{C}$	$t_D-t_s/^\circ\text{C}$	$t_D-t_M/^\circ\text{C}$	$\Delta p_{\max}/\text{kPa}$
97.24	97.84	1.18	66.32	1 165	1 222	1 259	94	37	7.76

严重的自粉化现象。

2.5 烧结矿的冶金性能

研究了焦粉用量为 8.0%，混合料水分含量为 9.0%，碱度为 5.0 条件下烧结矿的冶金性能。烧结矿的主要化学成分列于表4，冶金性能检测结果列于表5。

由表 5 可以看出，高铁三水铝石型铝土矿烧结矿的软化开始温度较高，且软熔区间窄(94 ℃)。软熔温度高可以保持较多的气-固相间的稳定操作，软熔区间窄可以保持较窄的软熔带，有利于煤气运动。而滴下温度较低，与熔融开始温度接近，且熔滴区间窄(< 40 ℃)。从高炉操作要求来看，较高的熔滴温度和更窄的熔滴区间更有利于实际操作。在普通烧结矿冶炼过程中，较低的滴下温度有可能影响高炉料柱的透气性。但是，由表 4 可知，高铁三水铝石型铝土矿烧结矿高炉冶炼的渣铁比相当高($\omega(\text{SiO}_2+\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\omega(\text{Fe})=2.7$)，考虑到高炉焦粉灰份的影响，渣铁比将远高于此值，因此较低的熔滴温度将有可能有利于造渣。烧结矿的冶金性能结果表明，高铁三水铝石型铝土矿烧结矿可以满足一般中小型高炉对冶炼炉料冶金性能的要求。

3 结论

1) 高铁三水铝石型铝土矿铝硅比低，烧损大，堆密度小。与一般铁矿烧结相比，烧结焦粉用量大，混合料水分高，转鼓强度较好，垂直烧结速度快，但成品率和利用系数偏低。

2) 由于烧结矿碱度高，烧结矿中存在游离 CaO 和 C_2S ， CaO 在空气中吸收水分生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，发生

体积膨胀，且 C_2S 在冷却过程中由 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 与 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 转变引发体积膨胀，因此，高铁三水铝石型铝土矿烧结矿易发生自粉化，不宜存放过久。

3) 超高碱度烧结矿的熔化、滴落温度低，软熔区间窄，能基本满足高炉冶炼要求。

REFERENCES

[1] 张家增. 中国铝工业发展历程与发展趋势[C]//中国有色金属学会第五届学术年会论文集. 2003, 8: 40–42.
ZHANG Jia-zeng. The historical developmental course and future developmental trend of China's aluminum industry[C]//The 5th annual conference of Institute of Nonferrous Metal of China, 2003, 8: 40–42.

[2] 顾松青. 我国的铝土矿资源和高效低耗的氧化铝生产技术[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 91–97.
GU Song-qing. Alumina production technology with high efficiency and low consumption from Chinese bauxite resource[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 91–97.

[3] 侯宗林, 蔡立军. 中国铁矿资源与钢铁工业可持续发展[J]. 天津冶金, 2005, 131(6): 14–16.
HOU Zhong-ling, CAI Li-jun. Everlasting development of Chinese iron ore resources and iron and steel industry[J]. Tianjin Metallurgy, 2005, 131(6): 14–16.

[4] 陈世益, 周芳. 广西高铁低品位三水铝土矿的开发利用研究[J]. 矿物岩石地球通报, 1997, 16(7): 26–27.
CHEN Shi-yi, ZHOU Fang. Study on development utilization of high iron low grade gibbsite in Guangxi[J]. Minerals Rock Bull, 1997, 16(7): 26–27.

[5] 黄彦林, 赵军伟. 我国三水铝土矿资源的综合利用研究[J]. 中国矿业, 2000, 9(5): 39–41.
HUANG Yan-lin, ZHAO Jun-wei. Study on multipurpose

- utilization of gibbsite in China[J]. China Mining Magazine, 2000, 9(5): 39–41.
- [6] 唐向琪, 陈谦德. 贵港式三水铝石矿综合利用方案比较[J]. 轻金属, 1995(2): 1–6.
- TANG Xiang-qi, CHEN Qian-de. Scheme comparison of Guigang gibbsite multipurpose utilization[J]. Light Metals, 1995, (2): 1–6.
- [7] 李殷泰, 毕诗文, 段振瀛, 杨毅宏, 张敬东. 关于广西贵港三水铝石型铝土矿综合利用工艺方案的探讨[J]. 轻金属, 1992(9): 6–14.
- LI Yin-tai, BI Shi-wen, DAN Zheng-yin, YANG Yi-hong, ZHANG Jin-dong. Study on multipurpose utilization technology of gibbsite-bauxite in Guangxi[J]. Light Metals, 1992(9): 6–14.
- [8] 佟志芳, 毕诗文, 于海燕, 吴玉胜. 微波作用下铝酸钙炉渣非等温浸出动力学[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 357–362.
- TONG Zhi-fang, BI Shi-wen, YU Hai-yan, WU Yu-sheng. Leaching kinetics of non-constant temperature process of calcium aluminate slag under microwave radiation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(2): 357–362.
- [9] 傅菊英, 姜涛, 朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996, 2.
- FU Ju-ying, JIANG Tao, ZHU De-qing. Sintering and palletizing[M]. Changsha: Central South University Technology Press, 1996, 2.
- [10] Fukuda K, Takeda A, Yoshida H. Remelting reaction of α - Ca_2SiO_4 solid solution confirmed in Ca_2SiO_4 - $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ pseudobinary system[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(4): 1185–1189.
- [11] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- YANG Chong-yu. Alumina production technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [12] Levin E M, Robbins C R. Phase diagrams for ceramists[M]. American: The American Ceramic Society, 1969: 120–700.
- [13] LIU Gui-hua, LI Xiao-bin, PENG Zhi-hong, ZHOU Qiu-sheng. Behavior of calcium silicate in leaching process[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(1): 213–216.
- [14] Atalay S, Adiguzel H I, Atalay F. Infrared absorption study of Fe_2O_3 - CaO - SiO_2 glass ceramics[J]. Mater Sci Eng A, 2001, A304/306: 796–799.
- [15] Nakamoto M, Lee J, Tanaka T. A model for estimation of viscosity of molten silicate slag[J]. ISIJ International, 2005, 45(5): 651–656.

(编辑 龙怀中)