烧结

铬渣对烧结矿矿相结构及冶金性能的影响

徐 菊，马国军，郑顶立，张 翔，海远浩
（武汉科技大学 a. 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室；
b. 钢铁冶金新工艺湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081）

摘要：铬渣中含有毒性很强的Cr(Ⅵ)和大量有价金属铁，将其作为烧结原料不仅可以利用还原性气氛还原铬渣中的Cr还可以回收其中的有价金属，实现铬渣的无害化和资源高效利用。为探索在烧结过程中铬渣配加对烧结矿冶金性能的影响，本文开展添加铬渣对烧结矿矿相、烧结参数及烧结矿转鼓强度、低温还原粉化和软熔性能的影响规律研究。研究结果表明：在烧结生产中需控制铬渣配入量为3%以下；随着铬渣配比的增加，烧结矿的产量、产率以及烧结速度降低；烧结矿中复合铁酸钙黏结相质量分数减少，硅酸盐黏结相增加，导致烧结矿的转鼓强度由54.93%下降到47.46%；烧结矿中赤铁矿晶粒 由粒状变为斑状以及骸晶状，使低温还原粉化指数由59.77%下降到52.46%，但当铬渣配比增加到9%时，矿相中出现了板状赤铁矿和针状复合铁酸钙的交织状结构，低温还原粉化指数增加到59.07%。由于铬渣中含有10%的Al_2O_3，生成的富铝渣会降低软化开始温度，增加软化区间，恶化料柱透气性。本文研究成果可为铬渣的综合利用提供理论基础。

关键词：铬渣；烧结；矿相结构；冶金性能
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0016－08
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.049

Effect of chromium residue on mineralogical structure and metallurgical properties of sinter ore

XU Ju, MA Guojun, ZHENG Dingli, ZHANG Xiang, HAI Yuanhao
(Wuhan University of Science and Technology a. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education; b. Hubei Provincial Key Laboratory for New Processes of Ironmaking and Steelmaking, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: Chromium residue contains highly toxic Cr(VI) and a large amount of valuable metal iron, which, using it as a sintering raw material, not only can Cr in chromium residue be reduced by using a reducing atmosphere, but also valuable metals can be recovered to realize the harmlessness of chromium residue and efficient use of resources. In order to explore the effect of chromium residue addition on the metallurgical properties of sinter during the sintering process, the influence of chromium residue addition on sinter ore mineragraphy, sintering parameters, sinter tumbler strength, low-temperature reduction pulverization and soft melting performance is studied. The results show that the amount of chromium residue in sintering production needs to be controlled to be less than 3%. With the increase of chromium residue ratio, the output, yield and sintering rate of sinter ore decrease too. The mass fraction of the composite calcium ferrite binder phase decreases and the silicate binder phase increases, resulting in the tumbler strength of the sinter decreasing from 54.93% to 47.46%. The grains of hematite in the sinter ore changes from granular to plaque and skeletal crystalline, which reduces the low-temperature

收稿日期：2022－2－28；**修回日期**：2022－03－25
基金项目：钢铁冶金新工艺湖北省重点实验室开放基金资助项目(KF－20－3)
作者简介：徐 菊(1995—)，女，硕士研究生，从事冶金资源综合利用方面研究。
通信作者：马国军(1975—)，男，博士，教授，从事冶金资源综合利用方面研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

reduction pulverization index from 59.77% to 52.46%, but when the chromium residue ratio increases to 9%, the interwoven structure of tabular hematite and needle-like composite calcium ferrite appears in the ore phase, and the low-temperature reduction pulverization index increases up to 59.07%. Since the chromium residue contains 10% Al_2O_3, the aluminum-rich residue generated will reduce the softening start temperature, increase the softening interval, and deteriorate the air permeability of the column. The results can provide a certain reference for comprehensive utilization of chromium residue.

Key words: chromium residue; sintering; mineralogical structure; metallurgical properties

铬渣是在制造铬盐过程中产生的固体废弃物，是公认的危险固体废弃物之一[1]。1.0%~2.0%的铬酸钙和0.5%~1.0%的水溶性六价铬是铬渣的主要有害成分，其长期堆积或填埋会对土壤、水源等造成污染，严重危害生态环境及人身体健康。目前，铬渣的处理技术分为无害化处理和综合利用技术。无害化处理主要是在铬渣中加入还原剂将 Cr(Ⅵ)还原成 Cr(Ⅲ)，如还原法和微波法等；综合利用技术主要是采用物理方法将铬渣中的有害成分包裹，隔绝铬渣与外界的接触，如制备微晶玻璃、建筑材料和耐火材料等[2-3]。其中较为成功的技术之一是将铬渣作为烧结矿生产的原料[4]。

近年来，我国部分钢铁企业已开展了铬渣烧结炼铁的生产实践。党俊[5]和王宏军等[6]进行了将铬渣配入烧结的试验，结果表明：铬渣粒度呈两极分化，板结的大颗粒无法满足烧结生产对熔剂粒度的要求，而细颗粒加水润湿后易于团聚。随着铬渣配比的提高，制粒效果变差。同时，烧结矿的转鼓指数、低温还原粉化和还原性降低，软化开始温度、软化区间变化不大，但熔融区间增宽。王东等[7]和李玮等[8]分别在实践生产中配入铬渣，发现铬渣本身为高温焙烧后再经浸出工艺而形成的废渣，其活性远不如石灰石，烧结矿质量会随铬渣配比的增加呈下降趋势。由此可见，配加铬渣对烧结矿冶金性能的影响较为显著。WANG 等[9]的研究表明，烧结矿的冶金性能与物相组成和矿相结构密切相关，但目前关于铬渣添加对烧结矿中物相组成及矿相结构的研究还少见报道。

本文通过烧结杯试验研究铬渣对烧结矿转鼓强度、低温还原粉化和软熔滴落性能的影响规律，借助金相显微镜、X 射线衍射(XRD)和带有能谱仪的扫描电子显微镜(SEM-EDS)探究铬渣对烧结矿物相组成及矿相结构的影响，揭示铬渣配比对烧结矿转鼓强度、低温还原粉化和软熔性能的影响机理，旨在为铬渣在烧结炼铁工艺中的应用提供理论基础与试验依据。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

铬渣来自国内某生产铬盐的化工企业，铁矿石和其他原材料均来自国内某钢铁企业。试验主要原料的化学成分如表 1、2 所示。

表 1　原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of raw materials　%

原料名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cr_2O_3
含铁精矿	7.04	4.75	87.53	0.30	0.37	—
生石灰	1.30	0.87	0.36	72.42	1.30	0.07
石灰石	1.35	1.14	0.95	41.67	10.52	0.05
铬渣	4.44	10.08	51.13	5.71	8.50	7.74

表 2　煤粉的化学成分(质量分数)

Table 2　Chemical composition of pulverized coal　%

固定碳	挥发分	灰分						
		Fe_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	ZnO	其他
84.04	5.32	0.38	0.61	0.098	4.66	4.19	0.008	0.694

1.2　试验过程

烧结杯试验烧结基准试验的原料配比为 81.5%铁矿石、8%石灰石、5%生石灰和 5.5%煤粉，在基准试验上分别配加 3%、6%和 9%的铬渣进行对比，探究铬渣配比对烧结矿矿相结构及冶金性能的影响。试验原料配比如表 3 所示，试验流程如图 1 所示。将造粒后约 25 kg 的烧结原料装入直径为 200 mm、高度为 500 mm 烧结杯中并

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

点火；点火温度约为 1 100 ℃，点火时间为 90 s，点火负压为 5.0 kPa，烧结负压为 10.0 kPa。所得烧结矿经破碎后从 2 m 高处落下 3 次，并被筛分成 >40、(25,40]、(16,25]、(10,16]、(6.3,10]、≤6.3 mm 6 种尺寸。

表 3 烧结杯试验配料方案(质量分数)

Table 3 Experimental ore matching schemes of sintering pot test %

试验方案	铁矿石	石灰石	生石灰	煤粉	铬渣
1	81.5	8	5	5.5	0
2	78.5	8	5	5.5	3
3	75.5	8	5	5.5	6
4	72.5	8	5	5.5	9

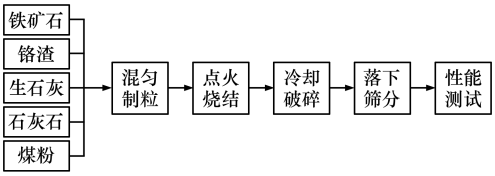


图 1 烧结杯试验流程

Fig. 1 Sintering pot experiment flow chart

1.3 分析测试方法

烧结矿产量、烧结速度以及产率分别按式(1)~(3)计算。

$$y = M/M_S \tag{1}$$

$$v = H/t \tag{2}$$

$$P = M_S \times y/(A \times t) \tag{3}$$

式中：y 为烧结矿的产量,%；M_S 为烧结原料的质量，t；M 为烧结矿的质量，t；v 为烧结速度，mm/min；H 为烧结矿料层高度，mm；t 为烧结时间，min；P 为产率，t/(m²·h)；A 为烧结杯的横截面积，m²。

烧结矿冶金性能测试包括转鼓强度、低温还原粉化和软熔性能。烧结矿的转鼓强度根据《烧结矿和球团矿 转鼓强度的测定方法》(YB/T 5166—1993)进行测定；低温还原粉化试验根据《铁矿石低温粉化试验静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)进行测定；软熔性能试验荷重为 1 kg/cm²，温度制度如图 2 所示。

采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)分析铬渣的粒径，使用金相显微镜、X 射线衍射和带能谱仪的扫描电子显微镜(SEM-EDS)观察和分析铬渣和烧结矿的物相组成和矿相结构。

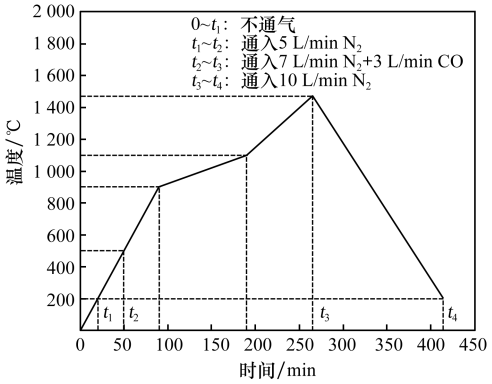


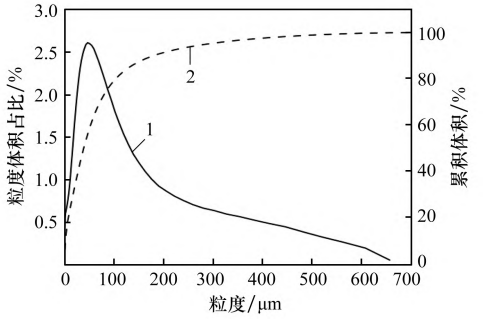
图 2 软熔试验温度制度

Fig. 2 Softening test temperature system

2 结果与讨论

2.1 铬渣的表征

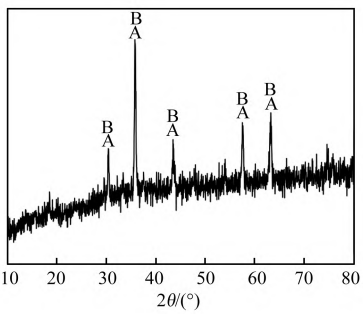
铬渣的粒度分布如图 3 所示。由图 3 可知，其粒度主要为 10~200 μm。铬渣的 XRD 图谱和 SEM-EDS 结果分别如图 4、5 所示。由图 4、5 可知，铬渣的主要物相组成有 $MgFeAlO_4$ 和 $(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$ 以及含 Si、Ca、Al 和 Na 等元



1—粒度体积占比；2—累积粒度体积。

图 3 铬渣的粒度

Fig. 3 The particle size of chromium slag

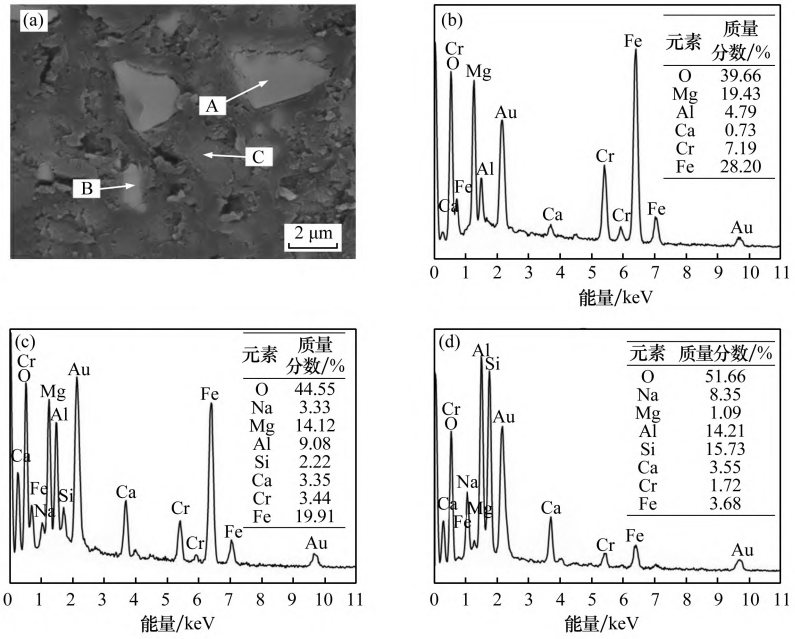


A—$MgFeAlO_4$；B—$(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$。

图 4 铬渣的 XRD

Fig. 4 XRD of chromium slag

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）铬渣 SEM 图；（b）图(a)中点 A 的 EDS 图谱；（c）图(a)中点 B 的 EDS 图谱；（d）图(a)中点 C 的 EDS 图谱

A—$(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$；B—$MgFeAlO_4$；C—基体。

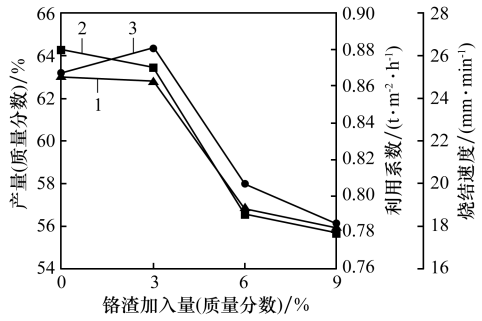
图 5　铬渣的 SEM-EDS 图谱

Fig. 5　SEM-EDS of chromium slag

素的基体相。

2.2　铬渣配比对烧结工艺参数的影响

铬渣对烧结矿产量、烧结速度和产率的影响如图 6 所示。由图 6 可知：当铬渣配比从 0 增加到 9% 时，烧结矿的产量从 63.02% 降低至 55.96%；烧结速度先增加后减小，在铬渣配比为 3% 时烧结速度达最大为 26.40 mm/min；产率从 0.88 t/(m^2·h)降低至 0.78 t/(m^2·h)。这是由于铬渣粒度较细，随着铬渣配比的增加，在加水造球阶段，粉料遇水聚集严重，不能形成理想的制粒核心，制粒效果整体变差，在烧结过程中，部分粉料会随着尾气排入除尘布袋，减少烧结矿的产量，未被抽走的粉料会恶化烧结料层的透气性，增加烧结时间，降低烧结速度[6]。



1—产量；2—产率；3—烧结速度。

图 6　铬渣配比对烧结参数的影响

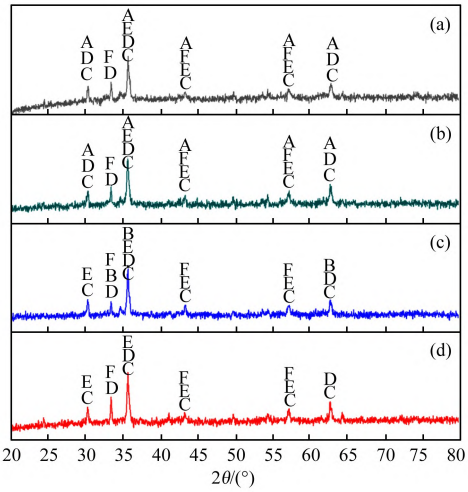
Fig. 6　Effect of chromium slag ratios on sintering parameters

2.3　铬渣配比对烧结矿矿相的影响

烧结矿的 XRD 图谱如图 7 所示。由图 7 可知，未加入铬渣时，烧结矿的主要物相组成为赤铁矿、磁铁矿、复合铁酸钙(SFCA)和硅酸盐；当铬渣配比为 3% 时，出现了新的铁铬尖晶石相；当铬渣配比为 6% 和 9% 时，铁铬尖晶石($FeCr_2O_4$)衍射峰消失，出现了铬铁矿[$(Fe,Mg)(Cr,Fe)_2O_4$]衍射峰。这是由于铬渣中含有 8.50% 的 MgO，随着铬渣配比的增加，配入的 MgO 质量分数也随之增加，在烧结过程中 Mg^{2+} 扩散迁移到铁铬尖晶石的晶格中，取代 Fe^{2+} 并占据铁铬尖晶石晶格中 Fe^{2+} 空位，形成铬铁矿$(Fe,Mg)(Cr,Fe)_2O_4$[11]。同时，由表 1 可知，铬渣中含有较多的脉石成分，随着铬渣配比的增加，黏结相铁酸钙的衍射峰减弱，硅酸盐衍射峰增强。

不同铬渣配比的烧结矿矿相结构和能谱分析分别如图 8 和表 4 所示。在没有添加铬渣时，可以看出，烧结矿的主要矿相有粒状的铁氧化物、针状和板状结构的复合铁酸钙以及充斥在晶粒之

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



铬渣配比/%：(a) 9；(b) 6；(c) 3；(d) 0

A—铬铁矿；B—铁铬尖晶石；C—磁铁矿；D—赤铁矿；E—硅酸盐；F—SFCA。

图 7 不同铬渣配比烧结矿的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD patterns of sinter ore with different chromium slag ratios

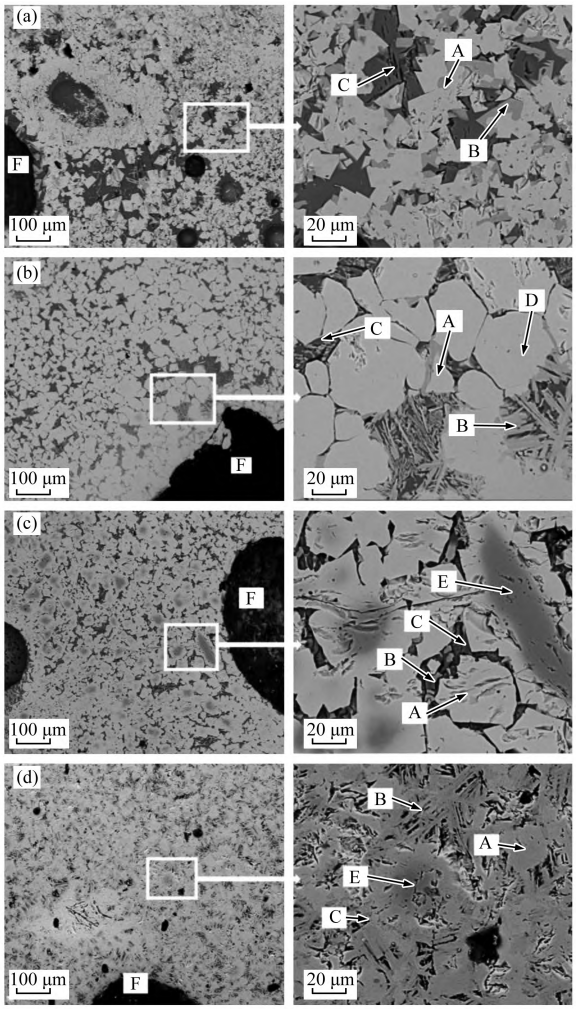
间的硅酸盐，铁矿相与黏结相之间分布较为均匀[图 8(a)]。

当配加 3% 铬渣时，烧结矿出现了铁铬尖晶石相(表 4 中物相 D)，且其晶粒尺寸比铁氧化物晶粒尺寸大，铁氧化后的晶粒呈斑状和分布在孔洞周围的骸晶状，黏结相复合铁酸钙和硅酸盐呈不规则形状分布在铁铬尖晶石与铁氧化物之间[图 8(b)]。当铬渣配比为 6% 和 9% 时，烧结矿中铬铁尖晶石相消失，铬铁矿出现(表 4 中物相 E)，其被铁氧化物包裹，铁氧化物主要为斑状结构，其在孔洞周围出现了骸晶状结构，黏结相是硅酸盐和少量的板状复合铁酸钙充斥在晶粒之间，矿化不完全[图 8(c)、8(d)]；此外，当铬渣配比增加到 9% 时，黏结相存在部分针状的复合铁酸钙和硅酸盐相，针状复合铁酸钙和铁矿晶粒形成交织结构。由表 4 可知，铬渣中的 Cr 元素不会存在于黏结相中，而是与铁氧化物形成铁铬尖晶石或是被铁氧化物包裹的铬铁矿。

2.4 铬渣配比对烧结矿冶金性能的影响

2.4.1 铬渣配比对烧结矿转鼓强度的影响

铬渣配比对烧结矿转鼓强度的影响如图 9 所示。由图 9 可知，随着铬渣配比的增加，转鼓强度由54.93% 下降至47.46%，在铬渣配比为9%



铬渣配比/%：(a) 0；(b) 3；(c) 6；(d) 9

A—铁氧化物；B—复合铁酸钙；C—硅酸盐；D—铁铬尖晶石；E—铬铁矿；F—孔洞。

图 8 扫描电镜下不同铬渣配比的烧结矿矿相结构

Fig. 8 Mineralogical structures of sinter ore with different chromium slag ratios under SEM

表 4 不同铬渣配比烧结矿中物相的原子比(原子百分比)

Table 4 Atomic ratios of phases in sinter ore with different chromium slag ratios %

位置	物相	O	Ca	Si	Fe	Mg	Al	Cr
图 8(a)	A	52.5	—	—	41.9	—	—	—
	B	54.4	7.8	3.7	27.9	—	2.6	—
	C	58.8	18.1	13.1	5.1	—	1.9	—
图 8(b)	A	32.1	—	—	55.4	4.2	—	—
	B	30.5	10.0	4.9	28.4	1.9	4.6	—
	C	22.2	25.0	17.0	10.1	1.7	2.1	—
	D	20.3	—	—	35.5	2.0	—	3.6

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4(续)

位置	物相	O	Ca	Si	Fe	Mg	Al	Cr
图 8(c)	A	51.9	—	—	40.3	—	—	—
	B	55.4	12.3	6.6	17.7	—	2.9	—
	C	53.0	14.3	11.2	2.9	—	5.7	—
	E	56.8	—	—	15.0	8.6	5.5	6.2
图 8(d)	A	29.9	—	—	43.2	5.4	—	—
	B	24.3	7.8	1.3	24.2	—	2.2	—
	C	28.3	28.0	12.1	7.1	—	—	—
	E	28.1	—	—	32.5	6.6	3.4	5.6

时转鼓强度最低。由于影响烧结矿固结强度的主要因素是黏结相的强度，由图 8 可知，随着铬渣配比的增加，烧结矿中的铁氧化物晶粒逐渐增大，形成连晶结构，复合铁酸钙质量分数不断减少，硅酸盐黏结相逐渐增加且充斥在铁氧化物晶粒之间，导致黏结强度不高，烧结矿转鼓强度降低[11]。王宏军等[6]在铬渣加入烧结实践过程中也得出铬渣质量分数的增加会导致转鼓强度的降低，并指出强度降低的原因是铬渣中脉石成分较多，在烧结过程中容易形成硅酸盐，这与本文研究结果类似。

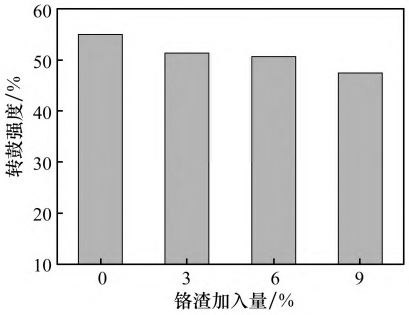


图 9　铬渣配比对烧结矿转鼓强度的影响

Fig. 9　Effect of chromium slag ratios on tumbler strength of sinter ore

2.4.2　铬渣配比对烧结矿低温还原粉化的影响

铬渣配比对烧结矿低温还原粉化指数的影响如图 10 所示。由图 10 可知，低温还原粉化指数(>3.15 mm)先降低后增加，在铬渣配比为 6% 时低温还原粉化指数最低(52.46%)；当铬渣配比增加到 9% 时，低温还原粉化指数增加到 59.07%。烧结矿中赤铁矿还原为磁铁矿是低温条件下的主要反应，在 Fe_2O_3 还原为 Fe_3O_4 过程中会发生晶型转变，体膨胀率达到 20%，这会使烧结矿在还原过程中产生裂纹及微孔[12-13]。不同赤铁矿矿相结构对低温还原粉化的影响也不同。分布在孔隙周围的骸晶状赤铁矿[图 8(b)、(c)]，在还原过程中会导致该结构断裂，造成烧结矿周围出现裂缝且会向内部延伸，还原性气体随着裂缝进入烧结矿内部，造成内部结构的破裂，故当烧结矿中存在骸晶状赤铁矿时，会降低低温还原粉化指数；针状复合铁酸钙和粒状赤铁矿会形成交织结构[图 8(d)]，交织结构具有较强的稳定性，会增加烧结矿的低温还原粉化指数；硅酸盐相的增加也会降低低温还原粉化指数[11]。因此，随着铬渣配比的增加，烧结矿的低温还原粉化指数呈现先降低后增加的趋势。

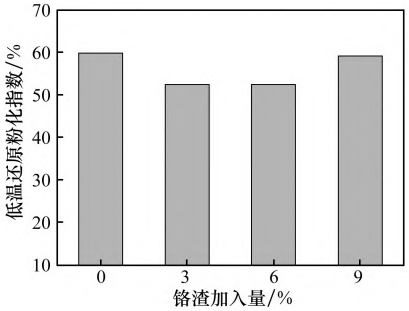
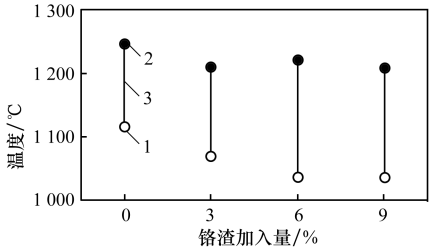


图 10　铬渣配比对烧结矿低温还原粉化的影响

Fig. 10　Effect of chromium slag ratios on low-temperature reduction pulverization index of sinter ore

2.4.3　铬渣配比对烧结矿软熔性能的影响

铬渣配比对烧结矿软化开始温度(T_{10})和软化终了温度(T_{40})的影响如图 11 所示。由图 11 可知，当 T_{10} 由 1 117.9 ℃下降至 1 039 ℃时，T_{40} 由 1 248.3 ℃下降至 1 208.3 ℃，软化区间($\Delta T = T_{40} - T_{10}$)呈增加趋势，由 130.4 ℃增加到 180.5 ℃。烧结矿的软熔性能与烧结过程中生成的低熔点化合物有关[14]，随着铬渣配比的增加，烧结矿的软化开始温度呈降低趋势，软化区间呈增加趋势。这是因为铬渣中含有10% 的 Al_2O_3，随着铬渣配比的增



1—软化开始温度；2—软化终了温度；3—软化区间。

图 11　铬渣配比对烧结矿软熔性能的影响

Fig. 11　Effect of chromium slag ratios on softening performance of sinter ore

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加，烧结原料中的 Al_2O_3 质量分数增多，烧结矿黏结相中 Al 质量分数也会增加，在荷重软化过程中，由于 Al_2O_3 会与 SiO_2、CaO 和 FeO 等生成熔点较低的富铝渣相，所以导致开始软化温度降低；同时，在荷重作用下，生成的富铝渣相黏度较高，从烧结矿内部流出时，会封闭烧结矿气孔，使烧结矿的透气性降低，软化区间增长[6,15-16]。

3 结 论

（1）铬渣粒度分布为 10～200 μm，主要物相为 $MgFeAlO_4$ 和 $(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$ 及基体相。

（2）随着烧结原料中铬渣配比的增加，在造球阶段易出现较多的粉料，恶化烧结层的透气性以及烧结时液相的流动性，降低烧结速度与产量。

（3）当铬渣配比为3%时，烧结矿中出现铁铬尖晶石，铬渣配比为6 %和9 %时，镁离子扩散至铁铬尖晶石晶格中，铁铬尖晶石转变为铬铁矿。随着铬渣配入的增加，铁氧化物晶粒逐渐增大，由粒状变为斑状，在孔洞周围存在骸晶状赤铁矿；且复合铁酸钙相会减少，硅酸盐相增加，矿化不完全；当铬渣配比增加到9 %时，黏结相存在部分针状的复合铁酸钙和铁氧化物晶粒形成交织结构。

（4）随着铬渣配比的增加至9 %，烧结矿的转鼓强度由 54.93% 下降到了 47.46%，呈下降趋势；低温还原粉化指数（>3.15 mm）由 59.77% 下降到 52.46% 后又增加到了 59.07%，呈先降低后增加；T_{10} 和 T_{40} 呈下降趋势，软化区间（$\Delta T = T_{40} - T_{10}$）呈增加趋势，由 130.4 ℃增加到 180.5 ℃。综合分析在烧结生产中需控制铬渣配入量在3%以下。

参考文献：

[1] 白志鹏，韩旸，裘著革．室内空气污染与防治[M]．北京：化学工业出版社，2006.
BAI Zhipeng，HAN Yang，XI Zhuge. Indoor air pollution and prevention[M]. Beijing：Chemical Industry Press，2006.

[2] 夏元洵．化学物质毒性全书[M]．上海：上海科学技术文献出版社，1991.
XIA Yuanxun. Chemical toxicity encyclopedia[M]. Shanghai：Shanghai Science and Technology Literature Press，1991.

[3] 汤波．室内空气中的甲醛检测及控制[J]．环境科学与管理，2006，31(5)：68－70.
TANG Bo. The test and control of formaldehyde in house[J]. Environmental Science and Management，2006，3131(5)：68－70.

[4] 谷孝保，罗建中，陈敏．铬渣应用于烧结炼铁工艺的研究及实践[J]．环境工程，2004，22(4)：71－72.
GU Xiaobao，LUO Jianzhong，CHEN Min. Research and practice of chromium slag for sintering ironmaking technology[J]. Environmental Engineering，2004，22(4)：71－72.

[5] 党俊．铬渣烧结杯试验研究[J]．酒钢科技，2020(2)：14－18.
DANG Jun. The Experiment study on the chromium slag sintering pot[J]. Jiuquan Iron and Steel Science and Technology，2020(2)：14－18.

[6] 王宏军，马明．铬渣在酒钢烧结生产中的应用实践[J]．甘肃冶金，2014，36(6)：55－58.
WANG Hongjun，MA Ming. Application of chromium slag in JISCO sintering production[J]. Gansu Metallurgy，2014，36(6)：55－58.

[7] 王东，张艳，刘鹏，等．铬渣在青钢烧结生产中的应用[J]．河北冶金，2015(9)：75－79.
WANG Dong，ZHANG Yan，LIU Peng，et al. Application of chromium slag in sintering production of Qing steel[J]. Hebei Metallurgy，2015(9)：75－79.

[8] 李玮，金立宏．铬渣在济钢 120 m^2 烧结机生产上的应用[J]．冶金信息导刊，2007(3)：21－23.
LI Wei，JIN Lihong. The application of chromium dregs in the production of 120 m^2 sintering machine in Jinan steel[J]. Metallurgical Information Review，2007(3)：21－23.

[9] WANG Lijun，SEETHARAMAN S. Experimental studies on the oxidation states of chromium oxides in slag systems[J]. Metallurgical and Materials Transactions B，2010，41(5)：946－954.

[10] ZHOU Mi，YANG Songtao，JIANG Tao，et al. Influence of MgO in form of magnesite on properties and mineralogy of high chromium，vanadium，titanium magnetite sinters[J]. Ironmaking and Steelmaking，2015，42(4)：320－320.

[11] 薛方，徐东升，张俊杰，等．铁矿粉黏结相强度的微观分析及配矿方法探讨[J]．烧结球团，2020，45(5)：25－28；58.
XUE Fang，XU Dongsheng，ZHANG Junjie，et al. Microa-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

nalysis on bonding phase strength of iron ore powder and discussion on ore matching method[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):25 - 28;58.

[12] ZHOU Mi,YANG Songtao,JIANG Tao,et al. Influence of basicity on high-chromium vanadium-titanium magnetite sinter properties,productivity and mineralogy[J]. JOM,2015,67(5):1203 - 1213.

[13] 李建,毛晓明,彭新. 微观性能对烧结矿低温还原粉化的影响[J]. 钢铁,2018,53(8):15 - 20.
LI Jian, MAO Xiaoming, PENG Xin. Effect of micro-characteristics on reduction degradation index of sinter[J]. Iron and Steel,2018,53(8):15 - 20.

[14] 承强,张建良,邵久刚,等. 炼钢污泥对烧结矿矿相结构及冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2020,45(2):61 - 66.
CHENG Qiang,ZHANG Jianliang,SHAO Jiugang,et al. Influence of sludge generated by steelmaking on mineralogical structure and metallurgical performance of sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):61 - 66.

[15] 牛乐乐,刘征建,张建良,等. 铁矿粉矿物组成对烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁,2019,54(9):27 - 32;38.
NIU Lele,LIU Zhengjian,ZHANG Jianliang,et al. Effect of mineral composition of iron ore on metallurgical properties of sinter[J]. Iron and Steel,2019,54(9):27 - 32;38.

[16] 王喆,张建良,左海滨,等. Al_2O_3 质量分数对高碱度烧结矿软熔滴落性能影响[J]. 钢铁,2015,50(7):20 - 25.
WANG Zhe,ZHANG Jianliang,ZUO Haibin,et al. Influence of Al_2O_3 content on softening-melting property of high basicity sinter[J]. Iron and Steel,2015,50(7):20 - 25.

(上接第 15 页)

[13] 戴方钦,刘婷,郭悦,等. 钢铁行业碳达峰碳中和行动方案介绍[J]. 工业安全与环保,2021,47(S1):25 - 29.
DAI Fangqin,LIU Ting,GUO Yue,et al. Introduction to the action plan for carbon peak and carbon neutrality in the steel industry[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2021,47(S1):25 - 29.

[14] 徐万仁,朱仁良,毛晓明,等. 国内外氢冶金发展现状及需要研究解决的主要问题[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集:2. 炼铁与原燃料. 北京:冶金工业出版社,2022:507 - 519.
XU Wanren,ZHU Renliang,MAO Xiaoming,et al. The current situation of hydrogen metallurgy development at home and abroad and the main issues that need to be studied and solved[C]//Proceedings of the 13th China Iron and Steel Annual Conference,Chinese Metallurgical Society:2. Ironmaking and Raw Fuels. Beijing:Metallurgical Industry Press,2022:507 - 519.

[15] 段贵生. 氢冶金原理及工业化应用研究进展[J]. 河南冶金,2021,29(1):1 - 5;52.
DUAN Guisheng. Research progress on the principles and industrial applications of hydrogen metallurgy[J]. Henan Metallurgy,2021,29(1):1 - 5;52.

[16] 王波. 宝钢湛江钢铁开建国内首套百万吨级氢基竖炉[J]. 能源研究与信息,2022,38(1):52.
WANG Bo. Baosteel Zhanjiang iron and steel has launched the construction of the first domestic million ton hydrogen based shaft furnace[J]. Energy Research and Information,2022,38(1):52.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net