超细粒级钒钛磁铁精矿烧结规律研究

胡 鹏

(攀钢集团研究院有限公司,四川 攀枝花 617000)

摘 要: 为找出攀钢自产钒钛铁精矿提质后的烧结规律,对超细粒级钒钛磁铁精矿原料性能、单烧以及替代现有钒钛精矿进行试验研究。结果表明: 钒钛精矿经过超细磨选后,TFe 质量分数提高 8%,-0.074 mm 粒级占比达到 96% 以上,主要物相组成为钛磁铁矿和钛铁矿; 此种精矿大量配入烧结后,由于超细颗粒自黏附成核改善了混合料制粒性能,提高了烧结矿的成品率和烧结机利用系数,但由于自成核内熔剂占比低以及烧结速度加快,影响了矿物液相生成量和结晶程度,从而导致烧结矿的转鼓强度明显降低。

关键词: 超细粒级; 钒钛磁铁精矿; 烧结; 转鼓强度

中图分类号: TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2020)04-0006-06

doi: 10.13403/j.sjqt.2020.04.047

Research on sintering law of ultra-fine grade V-Ti magnetite concentrate

Hu Peng

(*Pangang Group Research Institute Co.,Ltd.,Panzhihua* 617000,*Sichuan*)

Abstract In order to find out the sintering law of self-produced improved V-Ti magnetite concentrate, the raw material properties, single firing test and substitution of existing V-Ti concentrate of ultra-fine grade V-Ti magnetite concentrate are studied. The results show that TFe content is increased by 8%, the -0.074 mm part is over 96%, and the main phase composition is composed by titanomagnetite and ilmenite, after ultra-fine grinding and separation of V-Ti concentrate. After this kind of concentrate is mixed into the sintering in large quantities, the granulation performance of the mixture is improved, while the yield and productivity of the sinter are increased due to the self-adhering nucleation of ultrafine particles. However, due to the low content of solvent in the self-nucleation and the acceleration of sintering speed, the amount of liquid phase formation and the degree of crystallization of the mineral are affected, resulting in the obvious reduction of the tumbler strength of the sinter.

Key words ultra-fine grade; V-Ti magnetite concentrate; sintering; tumbler strength

攀钢由于地处西南内陆城市攀枝花,离沿海港口较远,导致巴西、澳大利亚、南非等地的优质富矿粉的运输成本较港口城市的钢铁企业增加了 300 元/t 以上,为了降低这一地理劣势,攀钢高炉冶炼一直大配比使用自产钒钛精矿[1-2]。但由于自产钒钛精矿中铁钛紧密共生的特点以及当前选矿技术的限制,导致攀钢自产钒钛精矿含铁品位低、TiO_2 质量分数高,使高炉入炉品位明显低于行业水平,目前攀钢高炉入炉品位仅在 50.5% 左右,严重降低了高炉的生产效率[3]。国内同类钢铁企业高炉入炉品位均达到了 55% 以上,攀钢也在不断发展钒钛磁铁矿选冶技术,通过对自产钒钛精矿进一步细磨提质降杂,以达到提高入炉品位的目的。而通过进一步细磨的钒钛精矿粒度更细,与原钒钛精矿的烧结性能相比,其性能产生了较大差别[4]。本文针对细磨后的超细粒级钒钛精矿进行烧结试验研究,以探索其对烧结生产的影响。

收稿日期: 2019-08-19

作者简介: 胡 鹏(1988—),男,工程师,主要从事铁矿造块及高炉炼铁工艺方面的研究。

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

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

1.1.1　原料性能

攀钢目前烧结生产所用的自产钒钛磁铁精矿(以下简称“精矿 A”)来自攀西矿区，是经过两段磨选工艺所得的产品。而试验所用的超细粒级钒钛磁铁精矿(以下简称“精矿 B”)同样来自攀西矿区，是经过四段超细磨选工艺后得到的产品。两种精矿的化学成分和粒度组成如表 1、2 所示。

表 1　两种钒钛磁铁精矿的化学成分和烧损(质量分数)　%

原料名称	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	V_2O_5	TiO_2	S	烧损
精矿 A	53.70	3.60	0.40	2.80	3.80	0.56	12.25	0.713	-1.5
精矿 B	61.70	2.80	0.70	1.80	2.10	0.70	6.08	0.669	-2.5

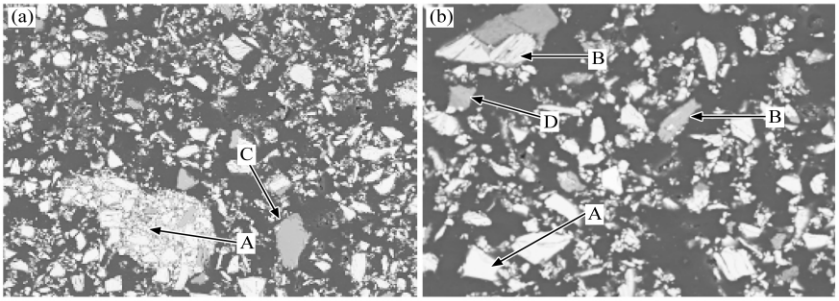
表 2　铁精矿的粒度组成和平均粒度

原料名称	质量分数/%					平均粒度/mm
	1~0.35 mm	0.35~0.165 mm	0.165~0.106 mm	0.106~0.074 mm	<0.074 mm	
精矿 A	1.09	25.40	16.04	4.25	51.82	0.122
精矿 B	0.06	1.50	0.26	1.58	96.60	0.042

从表 1、2 可以看出：精矿 B 中 TFe 质量分数达到 61.70%，较精矿 A 提高了 8%；而 TiO_2 质量分数为 6.08%，较精矿 A 降低了 6%；其它脉石成分经过细磨后都有不同程度的降低，随着精矿 B 逐渐替代精矿 A，其不仅能够提高烧结矿品位，还能增加高炉入炉钒钛矿占比；精矿 B 的粒度非常细，-0.074 mm 粒级质量分数为 96.60%，平均粒度为 0.042 mm，而精矿 A 的平均粒度为 0.122 mm，较精矿 B 粗了 3 倍左右。

1.1.2　微观结构

对精矿 A 和精矿 B 进行工艺矿物自动定量分析系统(mineral liberation analyser，MLA)检测，结果如图 1、表 3 所示。由图 1 和表 3 可见：精矿 A 的物相构成主要为钛磁铁矿、绿泥石、钛铁矿、铁橄榄石和钛辉石，其中钛磁铁矿和钛铁矿质量分数分别为 69.86% 和 4.55%；精矿 B 的物相构成主要为钛磁铁矿和钛铁矿，此外还含少量的钛辉石、铁橄榄石等物相，其中钛磁铁矿和钛铁矿的质量分数分别为 80.39% 和 5.14%。



(a) 精矿 A；(b) 精矿 B

A—钛磁铁矿；B—钛铁矿；C—铁橄榄石；D—钛闪石；E—辉石。

图 1　精矿 A 和精矿 B 的矿相显微结构

表 3　两种钒钛精矿主要物相组成(质量分数)　%

原料名称	钛磁铁矿	钛铁矿	钛辉石	铁橄榄石	钛闪石	微斜长石	透辉石	绿泥石	其它
精矿 A	69.86	4.55	2.76	6.92	—	0.07	1.49	8.66	5.69
精矿 B	80.39	5.14	2.35	1.95	1.86	0.97	0.81	0.73	5.80

注：由于 MLA 无法准确区分钛磁铁矿和钛赤铁矿，故表中钛磁铁矿中包含钛赤铁矿。

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

1.2 试验方法

(1) 将熔剂加适量水充分消化，紧接着将已消化好的熔剂加入到混合料中，并补充加水到要求水分；将混合料经机械混匀4～6 min，然后将其装至圆筒混合机(∅600 mm×1 200 mm，转速为16.77 r/min)内制粒5 min，而后装料烧结。

(2) 在∅300 mm×800 mm烧结杯中进行烧结试验，试验参数：点火负压为6 kPa，烧结负压为12 kPa，点火时间为2.5 min，料层厚度为700 mm，烧结杯铺底料粒度为10～16 mm，铺底料厚度为20 mm[5-6]。

(3) 试验返矿配比为30%(占新料的比)。

2 结果与讨论

2.1 单烧性能对比

2.1.1 试验配料方案

根据精矿A和精矿B的化学成分，结合单烧试验原则进行单烧性能对比试验，配料方案如表4所示。

表4 单烧试验配料方案及碱度

方案编号	质量分数/%					R
	精矿A	精矿B	石灰石	焦粉	水分	
D－A	82.0	—	13	5.0	7.2	1.80
D－B	—	85.4	10	4.6	7.1	1.80

2.1.2 混合料粒度组成

在两组单烧试验水分控制基本稳定的条件下，进行混合料粒度湿筛和干筛检测，检测结果如表5所示。从表5可看出：不论是混合料粒度湿筛还是干筛，D－B的混合料粒度组成明显好于D－A；对于混合料+3 mm的粒级占比，D－B湿筛较D－A湿筛提高8.09%，D－B干筛较D－A干筛提高6.16%，分析其原因主要在于超细粒级精矿易于自成球。

表5 混合料粒度组成(质量分数) %

项目	>8 mm	8～5 mm	5～3 mm	3～1 mm	－1 mm	+3 mm
D－A混合料湿筛	1.91	19.33	51.42	24.12	3.22	72.66
D－A混合料干筛	1.60	8.61	38.59	21.01	30.18	48.81
D－B混合料湿筛	7.90	23.30	51.42	16.37	1.01	82.62
D－B混合料干筛	3.74	16.04	44.39	24.38	11.45	64.17

为了验证超细粒级精矿B的制粒性能，控制混合料水分在同一水平条件下开展不同配比精矿B替代精矿A对混合料制粒的影响研究，得到混合料粒度与精矿配比的关系如图2所示。从图2可看出：随着精矿配比的提高，混合料中+3 mm的粒级质量分数明显提高。制粒小球包括3种结构[7]：①单独核颗粒结构；②细颗粒黏附核颗粒结构；③无核颗粒结构。针对细颗粒黏附核颗粒结构，有学者考察了铁矿石的颗粒粒度组成，得出：1～3 mm粒级粒子为成核颗粒，－0.25 mm粒级粒子为黏附粉，0.25～1 mm粒级粒子为中间颗粒。对混合料中+3 mm粒级颗粒进行按压处理，发现其属于第三种无核颗粒结构，大部分为细粒物料相互黏附成球，从而导致烧结过程中液相黏结少，烧结矿转鼓强度低。

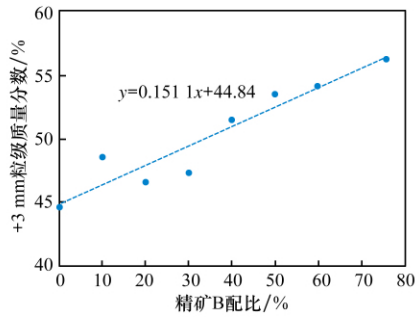


图2 混合料粒度与精矿配比的关系

2.1.3 烧结矿化学成分

对两组烧结矿化学成分进行检测，结果如表6所示。

从表6可看出，D－B能够大幅度提高烧结矿品位和降低烧结矿中TiO_2质量分数，其中TFe质量分数提高3.79%，TiO_2质量分数降低3.32%，其它如MgO、Al_2O_3组分明显降低。

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

表 6　烧结矿化学成分和碱度

试验编号	质量分数/%										R
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	V_2O_5	TiO_2	S	P	MgO	Al_2O_3	
D－A	49.85	8.34	4.78	8.57	0.48	9.60	0.039	0.013	3.34	3.34	1.79
D－B	53.64	8.44	4.67	8.39	0.45	6.28	0.024	0.022	2.57	2.54	1.80

2.1.4　烧结矿技术经济指标

对烧结矿的技术经济指标进行统计，结果如表 7 所示。

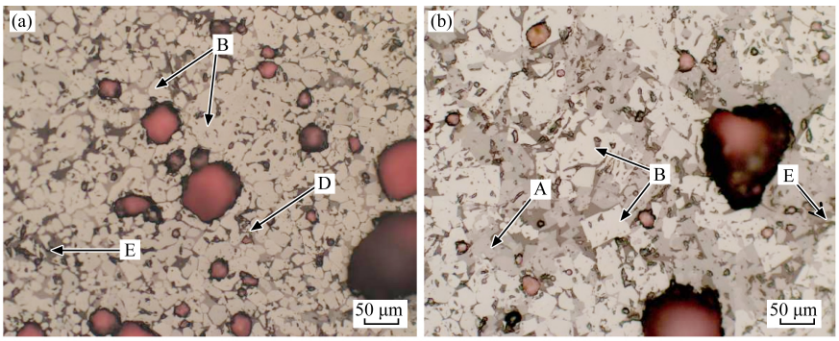
从表 7 可看出：D－B 的烧结速度、利用系数均优于 D－A，其成品率在烧结速度明显提高的条件下仍略高于 D－A；D－B 的转鼓强度则明显低于 D－A，下降了 7.6%，主要原因在于精矿 B 粒度极细，自成球现象严重，导致烧结混合料偏析严重，自成球为主的烧结矿转鼓强度低，加之烧结速度过快，导致高温时间保持较短，从而使矿物矿化不充分，液相强度低，影响了烧结矿强度[8-9]。

表 7　烧结矿技术经济指标

试验编号	烧结速度/($mm \cdot min^{-1}$)	成品率/%	转鼓强度/%	抗磨指数/%	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
D－A	8.93	69.60	58.13	6.27	0.622
D－B	13.14	69.67	50.47	5.81	0.912

2.1.5　烧结矿微观结构

对单烧烧结矿进行微观结构检测，结果如图 3、表 8 所示。从图 3、表 8 中可看出：两组烧结矿主要矿物组成为钛磁铁矿、钛赤铁矿、铁酸钙、钙钛矿和硅酸盐相；D－B 的钛赤铁矿质量分数较 D－A 高 10% 以上，可见因烧结速度过快、氧化不充分，影响了烧结矿中矿物的矿化[10]；D－B 烧结矿的孔洞较 D－A 更大，裂纹更多更明显，从而影响了烧结矿的转鼓强度[11]。



(a) D－A；(b) D－B

A—钛磁铁矿；B—钛赤铁矿；C—铁酸钙；D—钙钛矿；E—硅酸盐相。

图 3　两种烧结矿的微观结构(50 倍)

表 8　两种烧结矿中主要矿物组成(质量分数)　%

试验编号	钛磁铁矿	钛赤铁矿	铁酸钙	钙钛矿	硅酸盐相
D－A	12～14	41～43	15～17	11～13	16～18
D－B	6～8	51～53	11～13	10～12	17～19

2.2　精矿 B 逐渐替代精矿 A 的烧结试验

2.2.1　试验配料方案

通过用精矿 B 等比替代精矿 A，在保持烧结碱度基本不变的情况下，考察精矿 A 与精矿 B 互换对烧结技术经济指标的影响，具体配料方案如表 9 所示。

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

表 9 精矿 B 逐渐替代精矿 A 的烧结试验配料方案(质量分数) %

方案编号	精矿 A	精矿 B	铁矿 1	铁矿 2	铁矿 3	熔剂 1	熔剂 2	熔剂 3	焦粉	无烟煤
JZ	47.5	—	10	21	4.3	5	3	4.2	3	2
S1	50.0	10.0	—	16	6.5	5	3	4.5	3	2
S2	39.7	20.0	—	16	6.9	5	3	4.4	3	2
S3	29.3	30.0	—	16	7.4	5	3	4.3	3	2
S4	20.5	40.0	—	16	6.9	5	3	3.6	3	2
S5	11.6	50.0	—	16	6.4	5	3	3.0	3	2
S6	2.7	60.0	—	16	6.0	5	3	2.3	3	2
S7	—	76.2	—	—	8.5	5	3	2.3	3	2

2.2.2 混合料粒度

对各方案的烧结矿混合料粒度进行干筛检测，得到混合料粒度与水分的关系如图 4 所示。从图 4 可看出，混合料水分与混合料 +3 mm 粒级质量分数的相关性显著，随着混合料水分质量分数的逐渐提高，烧结混合料的粒度明显改善，+3 mm 粒级质量分数显著提高。

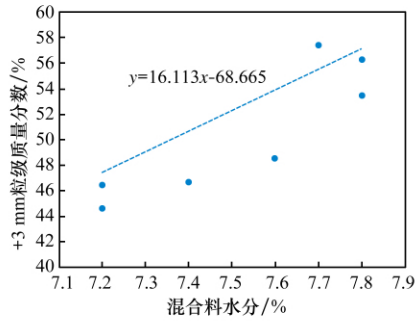


图 4 混合料粒度与水分的关系

2.2.3 烧结矿化学成分

对每组烧结矿进行化学成分检测，结果如表 10 所示。

表 10 烧结矿化学成分和碱度

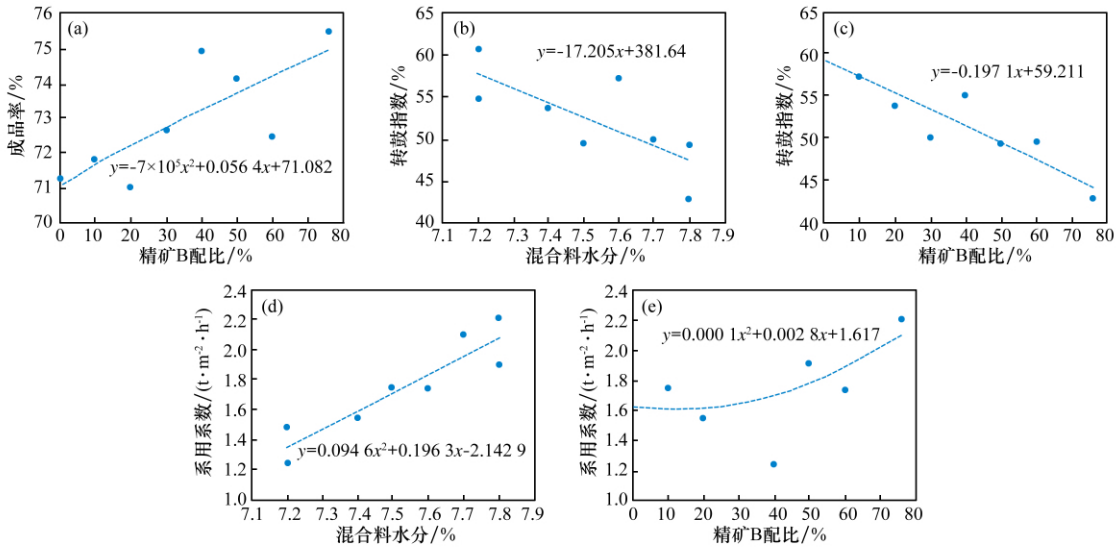
试验编号	质量分数/%										R
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	V_2O_5	TiO_2	S	P	MgO	Al_2O_3	
JZ	50.53	5.91	5.92	10.24	0.31	6.28	0.031	0.051	2.54	3.17	1.73
S1	49.26	7.91	5.89	11.21	0.34	6.99	0.031	0.035	2.58	3.41	1.90
S2	49.21	9.54	5.86	11.69	0.36	6.70	0.047	0.035	2.40	3.3	1.99
S3	50.04	10.30	5.89	11.08	0.34	6.18	0.044	0.037	2.38	3.24	1.88
S4	50.87	9.43	5.77	11.27	0.35	5.77	0.038	0.041	2.23	3.17	1.95
S5	52.06	12.39	5.69	10.59	0.34	5.19	0.051	0.040	2.09	2.91	1.86
S6	52.76	12.82	5.76	9.79	0.36	4.87	0.054	0.048	1.84	2.86	1.70
S7	52.99	13.99	5.22	9.78	0.39	4.90	0.054	0.041	1.80	2.72	1.87

从表 10 可看出：随着精矿 B 配比的增加，烧结矿中 TFe 质量分数明显升高，当配比达到最大时，TFe 质量分数达到 52.99%，较 JZ 提高了 2.46%；烧结矿 SiO_2、CaO、TiO_2、MgO 和 Al_2O_3 质量分数降低，其主要由精矿 B 经过超细磨精选后，带入的脉石成分降低所致。

2.2.4 烧结矿技术经济指标

对每组烧结矿的技术经济指标进行统计和分析，结果如图 5 所示。从图 5 可看出：配加不同质量分数的精矿 B 时，成品率与精矿 B 的配比呈正相关；转鼓强度与水分呈负相关，与精矿 B 的配比呈负相关，从图中关系式和变化幅度来看，水分是影响转鼓强度的主要因素[12]；利用系数与水分呈显著正相关，与精矿 B 的配比呈弱的正相关，说明水分对利用系数的影响远大于精矿 B 的配比。

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



(a) 成品率与精矿 B 配比的关系；(b) 转鼓强度与混合料水分的关系；(c) 转鼓强度与精矿 B 配比的关系；
(d) 利用系数与混合料水分的关系；(e) 利用系数与精矿 B 配比的关系

图 5　烧结矿技术经济指标的相关性关系

3　结　论

(1) 精矿 B 的 TFe 质量分数达到 61.7%，TiO_2 质量分数在 6% 左右，<0.074 mm 的粒级占比达到 96% 以上，平均粒度为 0.034 mm，属于超细粒级钒钛磁铁精矿，其物相组成中钛磁铁矿和钛铁矿质量分数分别为 80.39% 和 5.14%。

(2) 从两种精矿单烧对比试验来看，由于超细粒级精矿自黏附成核的特性，能够明显改善混合料粒度组成，大幅度提高烧结矿品位和降低 TiO_2 质量分数，其中 TFe 质量分数提高 3.79%，TiO_2 质量分数降低 3.32%，其成品率、烧结速度、利用系数均较优，而转鼓强度较差。主要受成核颗粒中熔剂质量分数低和烧结速度影响，使液相生成量减少及矿物结晶不充分，导致了烧结矿转鼓强度的下降。

(3) 超细粒级精矿替代普通钒钛精矿试验表明，混合料水分是影响烧结速度的主要因素，随着混合料水分增加，混合料 +3 mm 粒级占比明显增加，烧结速度显著加快，烧结矿转鼓强度明显下降，利用系数明显升高；超细粒级精矿配比是影响烧结成品率的主要因素，随着超细粒级精矿配比的提高，其自黏附成核现象明显增多，从而使成品率显著升高。

参考文献

[1] 李小松，杨广庆，杨文康，等. 攀钢钒钛烧结矿与莱钢普通烧结矿冶金性能对比研究[J]. 烧结球团，2018，43(1)：10－14.

[2] 何木光，蒋大军，陈许玲. 高钒钛磁铁精矿配比烧结强化的研究[J]. 钢铁研究，2014，42(1)：9－12.

[3] 何木光，蒋大军，杜斯宏，等. 攀钢钒高钛型钒钛磁铁矿烧结技术进步[J]. 四川冶金，2013，35(1)：14－19.

[4] 肖志新，刘洪华，陈令坤，等. 基于细粒级铁矿粉基础性能的烧结研究[J]. 武钢技术，2014，52(4)：4－8.

[5] 柳浩. 烧结杯试验系统精细化控制探讨[J]. 钢铁研究，2016，44(6)：58－62.

[6] 王元辉. 配矿烧结中试平台双工位烧结杯系统的研发[J]. 中国重型装备，2014(4)：1－4.

[7] J. D 利斯特，A. G 沃特，S. K 尼克尔. 铁矿石制粒机理[C]//第五届国际造块论文集. 北京：冶金工业出版社，1991：44－65.

[8] 饶家庭，林文康，刘文彬，等. 钒钛磁铁精矿复合烧结技术试验研究[J]. 烧结球团，2018，43(5)：24－29.

[9] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2014：779－780.

[10] 张克诚，朱德庆，李建，等. 高铁低硅高料层烧结研究[J]. 烧结球团，2003，28(2)：1－5.

[11] 边妙莲. 低硅烧结及应对措施的研究[D]. 河北：河北理工学院，2003.

[12] 秦峰，周鹏飞，陈强，等. 混合料水分对新钢铁矿烧结的影响[J]. 烧结球团，2016，41(2)：17－21.

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