钒钛磁铁矿制备镁质熔剂性球团性能研究

袁 壮，潘 建，朱德庆，郭正启，杨聪聪，王 硕，王定政
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要： 镁质熔剂性球团因具备良好的冶金性能，越来越受到高炉的青睐。本文通过相关球团试验，研究了不同碱度与 w(MgO) 对钒钛磁铁矿制备的成品球团强度、冶金性能的影响；并对成品球团的微观结构及物相组成进行分析，阐述了球团的固结机理。研究结果表明：随着碱度的增加，成品球团内部孔隙率增大，导致其抗压强度降低；而 w(MgO) 的增加，成品球晶粒间的连接虽受到一定影响，但 MgO 粘附在晶粒表面抑制了钙钛矿的生成，最终使得球团抗压强度受影响较小。在碱度为 0.48，w(MgO) 为 3.0% 时，可制备出 *RI* 为 75.29%，$RDI_{+6.3\ mm}$ 为 97.31%，*RSI* 为 12.45% 的优质镁质熔剂性球团，其可作为优质的高炉炉料。

关键词： 碱度；MgO；钒钛磁铁矿；固结机理；镁质熔剂性球团
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)03－0047－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.03.038

Study on the properties of magnesia flux pellets prepared from vanadium－titanium magnetite

YUAN Zhuang，PAN Jian，ZHU Deqing，GUO Zhengqi，YANG Congcong，
WANG Shuo，WANG Dingzheng
(*School of Minerals Processing and Bioengineering，Central South University，Changsha* 410083，*Hunan*，*China*)

Abstract: Magnesium fluxed pellets are more and more used in blast furnace smelting due to their good metallurgical performances. In this paper，the effect of basicity and w(MgO) on the properties of vanadium-titanium magnetite pellets was investigated by pelletizing tests，and the difference of consolidation mechanism of pellets was revealed by the mineralogical analysis of the pellets. The results indicate that with the increase of basicity，the porosity of the finished pellets increase，resulting in the reduction of its compressive strength. Besides，as w(MgO) increases，the increased w(MgO) is adverse to the grain connectivity of vanadium-titanium magnetite finished pellets，but the compressive strength is not obviously reduced attributing to the odhesion of MgO on the grain snrface，inhibiting the formation of perovskite. Furthermore，when the basicity and w(MgO) are 0.48 and 3.0% respectively，the high-quality magnesium fluxed pellets can be obtained with the *RI*，$RDI_{+6.3\ mm}$ and *RSI* of 75.29%，97.31% and 12.45% respectively，and it can be used as high-quality blast furnace charge.

Key words: basicity；MgO；vanadium-titanium magnetite；consolidation mechanism；magnesia fluxed pellets

近年来，随着我国经济的高速增长，作为支柱产业的钢铁行业得到了迅速的发展，钢铁产量急剧膨胀，使得我国铁矿石资源的需求量显著增加。我国虽然铁矿石资源储量大，但存在贫、细、杂等特点，大部分铁矿石资源难以得到有效利用。因此，我国铁矿石资源主要依靠进口，2019年我国铁矿石对外依存度高达80%以上。此外，近年来，钒、钛的市场需求旺盛，导致钒、钛原料需求也快速增加，而我国提钒、提钛的原料较大部分来源于国外进口

收稿日期： 2020－11－08；**修回日期：** 2020－12－12
基金项目： 国家青年自然科学基金资助项目(51574281)
作者简介： 袁 壮(1994—)，男，硕士研究生，从事钢铁冶金方面的研究。
通讯作者： 潘 建(1977—)，男，教授，从事钢铁冶金方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的钒、钛渣，少部分来自钒钛磁铁矿[1]。但随着我国环境安全和环保意识的加强，以及颁布的《禁止洋垃圾入境推进固体废物进口管理制度改革实施方案》，钒、钛渣的进口受到限制，导致我国钒钛原料供应紧张，制约了钒钛工业的发展。因此高效利用钒钛磁铁矿资源成为钒钛行业的必然选择[2-3]。

目前，国内主要采用高炉－转炉工艺与非高炉工艺处理钒钛磁铁矿，其中高炉－转炉工艺具有产能大、生产效率高和技术成熟等优点，从而占据了市场主导地位[4-5]。为满足高炉生产需要，通常对钒钛磁铁矿进行造球与预热焙烧处理，因此制备出合格的成品球具有重要意义。对于普通铁矿炼铁工艺而言，随着“精料方针”的高炉入料要求，球团矿在高炉原料中具有热效率高、性能好、污染小等一系列优点，使其在高炉原料中的占比逐渐增加[6]。此外，为了降低生产成本，钢铁企业通过大量外购高铝铁矿作为高炉炼铁原料，但这也导致了高炉炉渣中$w(Al_2O_3)$的增加，对高炉渣的流动性、熔化性和冶金性能造成了不利的影响[7-9]。已有研究表明，提高$w(MgO)$可有效解决$w(Al_2O_3)$过高带来的不利影响[10-11]。目前，高炉炉料的常规模式为高碱度烧结矿配加酸性炉料(氧化球团、普通烧结矿或天然块矿)[12]，这也导致了高炉炼铁所需的钙、镁等碱性成分只由烧结矿提供，而钙、镁等占比过高会导致烧结矿强度变差。虽然高配比的酸性球团矿适应目前高炉生产环境，但迫切需要将一定量的钙、镁等元素转移至球团矿中，从而减少烧结矿中钙、镁等占比，最终使烧结矿质量得到提升。生产镁质熔剂性球团不仅能够改善炉渣流动性，而且可分担烧结矿中钙、镁质量分数过高的压力，从而提高高炉的技术经济指标[13-14]。因此，制备性能优良的镁质熔剂性球团具有重要意义，这将促进我国钢铁行业的高质量发展。

1 原料性能与研究方法

1.1 原料性能

实验原料主要包括南非钒钛磁铁矿(SFTM)、中南大学自主研制的F黏结剂、熔剂(石灰石)以及氧化镁试剂(分析纯)。原料的物理化学性能如表1～4所示，由表1～4可知：SFTM的$w(TFe)$与$w(TiO_2)$分别为51.64%与

表1 SFTM主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of SFTM %

TFe	FeO	V_2O_5	TiO_2	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P	S	Zn	Pb	Cu	LOI
51.64	16.8	1.52	12.96	0.17	1.2	2.17	4.37	0.18	0.051	0.007 1	0.13	0.042	0.007 1	0.022	2.88

表2 SFTM粒度与比表面积

Table 2 Size distributions and specific surface areas of SFTM

粒度(mm)/%					比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
+0.150	0.074～0.150	0.044～0.074	0.038～0.044	−0.038	
0.00	0.24	1.63	27.39	70.74	1 572

表3 F黏结剂主要化学成分分析(质量分数)

Table 3 Main chemical composition of F binder %

TFe	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	Na_2O	P	S	LOI
7.91	0.85	0.42	13.40	28.65	1.06	3.35	0.11	0.003	37.24

表4 石灰石的主要化学成分(质量分数)

Table 4 Main chemical compositions of limestone %

Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	S	LOI
0.37	1.01	0.42	53.31	1.19	0.021	0.016	0.007 7	0.012	0.005 4	43.11

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

12.96%，w(MgO)与自然碱度(二元碱度)分别分为 1.20%与 0.08；SFTM 的比表面积为 1 572 cm^2/g；石灰石 -0.074 mm 粒级占比达到 85%以上；用于调整球团 w(MgO)的氧化镁试剂其粒级较细，-0.074 mm 占 100%。

1.2　研究方法

由原料的物理化学性能检测(表 1～3)可知：原料的粒度与比表面积不能满足造球要求，因此对铁精矿进行高压辊磨预处理(高压辊磨压强为 0.5 MPa、给料速度为 6 kg/min)使其比表面积达到 1 698 cm^2/g，以满足造球需要。对预处理后的铁精矿与 F 黏结剂进行配料、混合、造球处理，最终确定最佳参数：造球时间为 12 min、F 黏结剂质量分数为 1.0%、水分为 8.20%；在该条件下可制备出落下强度大于 4 次/(0.5 m)、抗压强度超过 20 N/P 的合格生球；所得生球进行预热焙烧实验，其最佳热工制度如表 5 所示。

后续生球制备与热工制度将在上述最佳条件下进行，研究碱度与 w(MgO)对 SFTM 球团强度和固结性能的影响。通过对成品球微观分析，明确碱度与 w(MgO)对 SFTM 制备镁质熔剂性球团的影响，并利用还原炉测定成品球团冶金性能(还原性、低温还原粉化率、还原膨胀性，测定方法按照相应 GB/T 13241—1971 标准)，最终制备出性能优良的镁质熔剂性球团。

表 5　SFTM 球团焙烧最佳热工制度

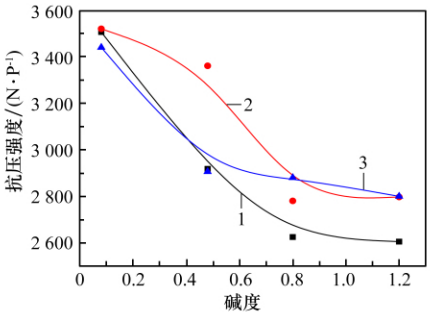
Table 5　The best thermal system of SFTM

预热		焙烧		均热		球团强度/(N·P^{-1})
温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/min	
950	15	1 275	10	950	5	3 278

2　结果分析与讨论

2.1　碱度与w(MgO)分别对成品球团强度的影响

在 w(MgO)分别为 1.2%(自然)、2.0%、3.0%的条件下，考察了碱度对 SFTM 成品球团抗压强度的影响，结果如图 1 所示。由图 1 可知：随着碱度的增加，SFTM 成品球团抗压强度显著降低，但均高于 2 500N/P。因此，SFTM 可制备出满足高炉抗压强度的熔剂性球团。

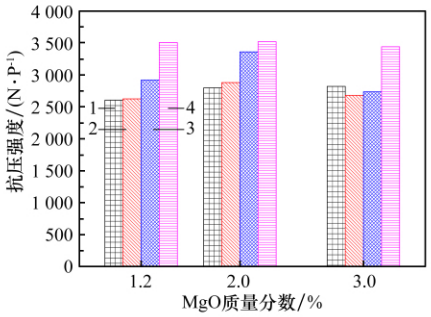


MgO 质量分数/%：1—1.2；2—2.0；3—3.0。

图 1　碱度对球团抗压强度的影响

Fig. 1　The effect of alkalinity on the compressive strength of pellet

在碱度分别为 0.08(自然)、0.48、0.80、1.20 的条件下，考察了 w(MgO)对 SFTM 成品球团抗压强度的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知：随着 w(MgO)的增加，SFTM 成品球抗压强度受影响较小，且在高 w(MgO)下 SFTM 可以制备出合格的镁质球团。



碱度：1—1.20；2—0.80；3—0.48；4—0.08。

图 2　w(MgO)对成品球抗压强度的影响

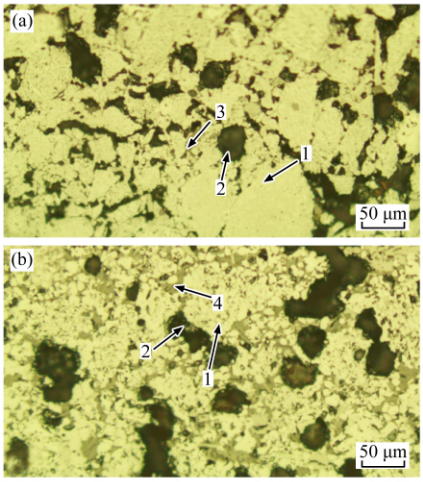
Fig. 2　Influence of w(MgO) on the compressive strength of fired pellets

2.2　碱度与w(MgO)对球团固结机理的影响

由 2.1 节可知，不同碱度与 w(MgO)影响到 SFTM 成品球团的抗压强度，为揭示这一现状的根本原因，对成品球进行微观结构、物相组成及其固结机理分析。图 3 为自然 w(MgO)条件下，不同碱度对 SFTM 成品球的微观结构影响，由图 3 可知：SFTM 成品球的矿物组成简单，主要为钛赤铁矿；当碱度为 0.08 时，球团中钛赤铁矿为紧密状且存在少量的铁板钛矿，球团孔隙较少；当碱度增加到 0.8 时，渣相游

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

离在钛赤铁矿周围且孔隙增加。SFTM 球团随着碱度的提高，球团内部孔洞增加，孔隙率提高，致密度下降，导致其抗压强度下降。



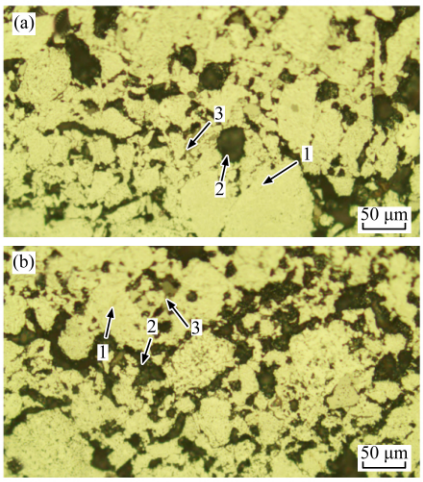
(a) $R=0.08$；(b) $R=0.80$

1—钛赤铁矿；2—孔隙；3—铁板钛矿；4—钙钛矿。

图 3 自然 w(MgO) 条件下碱度对 SFTM 球团矿微观结构的影响

Fig. 3 The influence of alkalinity on microstructure of SFTM pellets under natural w(MgO) content

在自然碱度条件下，对 w(MgO) 不同的成品球进行矿相分析，如图 4 所示。由图 4 可知：SFTM 成品球矿物组成简单，其主要为钛赤铁矿，其余为少量铁板钛矿；在自然 w(MgO) 条件下，SFTM 球团中钛赤铁矿成紧密状分布且存在少量的铁板钛矿和孔隙；当 w(MgO) 增加到 3.0% 时，钛赤铁矿形态无明显变化，球团内部孔洞虽略有增加，给球团强度带来不利影响，但是球团中铁板钛矿黏结相增加，且 MgO 分散在钛铁矿周围阻碍晶粒间互联，同时也阻碍了 CaO 与 TiO_2 的接触，从而减少了钙钛矿的生成，这有利于提高球团强度。因此，随着 w(MgO) 的增加，SFTM 成品球抗压强度无明显变化。



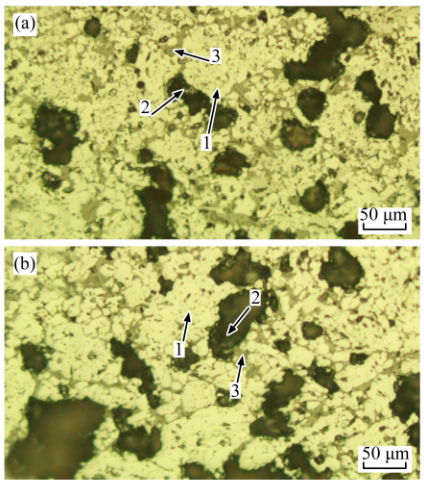
(a) MgO = 1.2%；(b) MgO = 3.0%

1—钛赤铁矿；2—孔隙；3—铁板钛矿。

图 4 自然碱度条件下 w(MgO) 对 SFTM 球团矿微观结构的影响

Fig. 4 The influence of w(MgO) content on microstructure of SFTM pellets under natural alkalinity

为制备镁质熔剂型球团，本文探究了在碱度为 0.8 时，不同 w(MgO) 对 SFTM 成品球团固结的影响，如图 5 所示。由图 5 可知：成品球团物相结构及变化规律与上述自然碱度条件下，w(MgO) 对 SFTM 成品球团固结机理一致。



(a) MgO = 1.2%；(b) MgO = 3.0%

1—钛赤铁矿；2—孔隙；3—钙钛矿。

图 5 碱度 $R=0.80$ 条件下 w(MgO) 对 SFTM 球团矿微观结构的影响

Fig. 5 The influence of w(MgO) on microstructure of SFTM pellets under $R=0.80$

为进一步研究镁质熔剂性球团内不同元素的分布状况及物相组成，对碱度为 0.8，w(MgO) 为 3.0% 的成品球进行 SEM-EDS 分析，所得结果如图 6 与表 6 所示。由图 6 与表 6 可知：SFTM 镁质熔剂性球团内部铁为主体元素，而钛与镁元素富集区域分隔较为明显。其中铁以 Fe^{3+} 的形式存在，并与钛元素共同组成钛赤铁矿，而镁元素与钙钛矿则主要存在于渣相之中。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

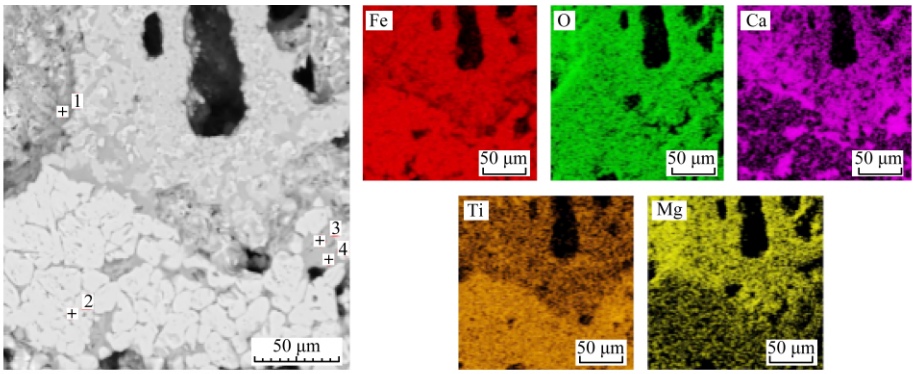


图 6　SFTM 镁质熔剂性球团 SEM-EDS 分析

Fig. 6　SEM-EDS analysisof SFTM magnesium fluxed pellets

表 6　SFTM 镁质熔剂性球团 SEM-EDS 分析（质量分数）

Table 6　SEM-EDS analysis of SFTM magnesium fluxed pellets　%

区域	Fe	O	Ca	Mg	Ti	物相
1	30. 54	54. 12	3. 46	8. 83	3. 05	渣相
2	60. 65	29. 17	0. 43	2. 02	7. 73	钛赤铁矿
3	8. 54	41. 36	27. 10	0. 17	22. 83	钙钛矿
4	51. 40	35. 74	1. 98	3. 92	6. 95	渣相

2. 3　球团冶金性能

为制备优质的镁质熔剂性球团，在自然 w(MgO) 下，研究不同碱度对 SFTM 球团冶金性能的影响，结果如表 7 所示。由表 7 可知，随着碱度的增加，SFTM 球团的还原度(*RI*) 先缓慢增加后趋于稳定，还原膨胀指数(*RSI*) 先无明显变化后增大，还原粉化指标(*DRI*) 变差。由于碱度的增加使得钙钛矿占比增加，最终致使球团内晶粒变小，孔隙率变大，从而促进了还原速度，有益于还原，但球团强度降低且铁氧化相变产生的内应力增大，最终导致球团还原粉化加剧。还原膨胀指数先无明显变化，后迅速增加，则是由于 CaO 优先与 TiO_2 反应生产钙钛矿，当 CaO 质量分数较高时，一部分 Ca^{2+} 进入铁氧化物晶格中，有利还原过程中“铁晶须”的生成，因而导致其还原膨胀迅速增加，因此在碱度为 0. 48 时，SFTM 球团冶金性能较为理想。

表 7　不同碱度 SFTM 成品球冶金性能

Table 7　The metallurgical performances of SFTM finished balls on different basicity

碱度	*RI*/%	*RSI*/%	孔隙率/%	*RDI*/%		
				+6. 3 mm	+3. 15 mm	−0. 5 mm
0. 04	67. 12	5. 72	11. 93	99. 35	99. 35	0. 62
0. 48	68. 24	5. 38	11. 04	87. 81	91. 43	7. 42
0. 80	72. 31	5. 24	9. 63	76. 01	84. 55	9. 09
1. 20	71. 39	8. 09	11. 30	72. 69	82. 67	9. 46

选择碱度为 0. 48，研究不同 w(MgO) 对镁质熔剂性球团冶金性能的影响结果如表 8 所示。由表 8 可知，w(MgO) 与 SFTM 球团的冶金性能呈现正相关趋势。这是由于 w(MgO) 的增加阻

表 8　不同 w(MgO) SFTM 成品球冶金性能

Table 8　The metallurgical performances of SFTM finished balls on different w(MgO)

w(MgO)/%	*RI*/%	*RSI*/%	孔隙率/%	*RDI*/%		
				+6. 3 mm	+3. 15 mm	−0. 5 mm
1. 20	66. 24	5. 38	11. 04	87. 81	91. 43	7. 42
2. 00	73. 96	8. 46	9. 54	96. 33	96. 76	3. 01
3. 00	75. 29	12. 45	10. 22	97. 31	97. 34	2. 64

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

碍了 CaO 与赤铁矿反应，使得液相量生成减少，并且促进了 Fe_2O_3 的再结晶，同时 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 可相互取代，导致难以生成不易还原的铁橄榄石相，使得低温还原粉化性能和还原性得到改善[15]。结合球团的抗压强度，发现在碱度为 0.48，w(MgO) 为 3.0% 时，SFTM 可制备出还原度为 75.29%，还原粉化指数为($RDI_{+6.3\ mm}$) 97.31%，还原膨胀指数为 12.45% 的优质镁质熔剂球团。

3 结 论

(1) 随着碱度的增加，SFTM 成品球团抗压强度逐渐降低，但最终均大于 2 500 N/P；随着 w(MgO) 的增加，SFTM 球团抗压强度受影响较小且强度较高。

(2) 碱度的增加导致 SFTM 成品球内部孔隙率增大；而 w(MgO) 的增加，SFTM 成品球赤铁矿晶粒间的连接虽受到一定影响，但未矿化的 MgO 更抑制了钙钛矿渣相的生成，使得 SFTM 成品球抗压强度受影响较小，因此 SFTM 可制备优良的镁质熔剂性球团。

(3) SFTM 成品球具有良好的还原性、更低温度的还原粉化及还原膨胀率，并且在碱度为 0.48，w(MgO) 为 3.0% 时，SFTM 可制备出 *RI* 为 75.29%，$RDI_{+6.3\ mm}$ 为 97.31%，*RSI* 为 12.45% 的优质镁质熔剂性球团。

参考文献:

[1] 王帅，郭宇峰，姜涛，等. 钒钛磁铁矿综合利用现状及工业化发展方向[J]. 中国冶金，2016，26(10)：40－44.
WANG Shuai，GUO Yufeng，JIANG Tao，et al. Comprehensive utilization of vanadium titanomagnetite and development direction of industrialization[J]. China Metallurgy，2016，26(10)：40－44.

[2] LI W，FU G Q，CHU M S，et al. Oxidation induration process and kinetics of Hongge vanadium titanium-bearing magnetite pellets[J]. Ironmaking & Steelmaking，2017，44(4)：294－303.

[3] GAO Zixian，CHENG Gongjin，XUE Xiangxin，et al. Property investigations of low-grade vanadium-titanium magnetite pellets with different MgO contents[J]. Steel Research International，2018，89(6)：1700543.

[4] WANG Mingyu，ZHOU Shengfan，WANG Xuewen，et al. Recovery of iron from chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrate by direct reduction[J]. JOM，2016，68(10)：2698－2703.

[5] KOLBEINSEN L. Modelling of DRI processes with two simultaneously active reducing gases[J]. Steel Research International，2010，81(10)：819－828.

[6] 潘建，王硕，甘牧原，等. 带式焙烧机制备镁质球团的工艺及机理研究[J]. 烧结球团，2019，44(3)：27－33.
PAN Jian，WANG Shuo，GAN Muyuan，et al. Study on the process and mechanism of preparing magnesium pellets by belt roasting[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(3)：27－33.

[7] SAHOO S K，TIWARI J N，MISHRA B，et al. Prediction of flow characteristics of Al_2O_3-CaO-MgO-SiO_2-TiO_2-type blast furnace slag and its evaluation. Arabian Journal for Science and Engineering，2019，44(7)：6393.

[8] 吕学伟，严志明，庞正德，等. Al_2O_3 对高炉渣物化性能和结构影响研究综述. 钢铁，2020，55(2)：1.
LV Xuewei，YAN Zhiming，PANG Zhengde，et al. A review of the effects of Al_2O_3 on the physicochemical properties and structure of blast furnace slag. Steel，2020，55(2)：1.

[9] 于鸿宾，潘建，朱德庆，等. 高压辊磨强化高镁磁铁矿球团工艺及机理[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2016，47(5)：1465－1472.
YU Hongbin，PAN Jian，ZHU Deqing，et al. Strengthening process and mechanism of high magnesium magnetite pellets by high pressure roller grinding[J]. Journal of Central South University(JCR-SCI)，2016，47(5)：1465－1472.

[10] 刘小杰，李建鹏，刘颂，等. MgO 对高炉生产影响的研究现状及其展望. 矿产综合利用，2019(2)：16.
LIU Xiaojie，LI Jianpeng，LIU Song，et al. Research status and prospect of effect of MgO on blast furnace production. Comprehensive utilization of mineral resources，2019(2)：16.

[11] 邓睿，苏鸿，韩基祥，等. 高球比炉料结构下镁质球团的冶金性能研究[J]. 烧结球团，2020，45(2)：31－35；50.
DENG Rui，SU Hong，HAN Jixiang，et al. Study on metallurgical properties of magnesium pellets under high spherical ratio charge structure[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(2)：31－35；50.

[12] 王筱留. 钢铁冶金学：炼铁部分[M]. 北京：冶金工业出版社，2008：72－75.
WANG Xiaoliu. Metallurgy of iron and steel：Ironmaking part[M]. BeiJing：metallurgical industry press，2008：72－75.

[13] 李神子，龙跃，潘向阳，等. MgO 及焙烧条件对酸性球团矿抗压强度的影响[J]. 烧结球团，2019，44(4)：36－39；60.
LI Shenzi，LONG Yue，PAN Xiangyang，et al. Effect of MgO and roasting conditions on the compressive strength of acid pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(4)：36－39；60.

(下转第 85 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

放质量浓度也降至 3.3 mg/m^3。原工频恒压源供电时，湿电场对烟尘、$PM_{2.5}$的脱除效率分别为 66.33%、59.84%，更换高频高压恒流源后，湿电场对烟尘、$PM_{2.5}$的脱除效率分别达到 78.77%、74.81%。

4 结　论

(1) 工频高压恒流源、恒压源空载/伏安特性曲线一致性较好，且恒流源则运行平稳，抗干扰能力强。

(2) WESP 入口高、中、低烟尘质量浓度 3 种工况条件下，高频电源供电时，湿电场除尘效率分别为 77.99%、76.92%、75.47%，对 $PM_{2.5}$ 脱除效率分别为 70.23%、70.11%、69.23%，均明显高于工频电源。

(3) 山东某烧结项目采用导电玻璃 WESP，更换高频高压恒流源后，烟尘排放从 6.7 mg/m^3 降至 4.5 mg/m^3，减排效果显著。

参考文献:

[1] 李菁川，孙晖. 不同电控技术的电除尘提效特性研究及应用 [J]. 烧结球团，2020，45(2)：67－72.
LI Jingchuan，SUN Hui. Study and application of effect-raising characteristics of different electric control technology [J]. Sintering and pelletizing，2020，45(2)：67－72.

[2] 赵磊，周洪光. 超低排放燃煤火电机组湿式电除尘器细颗粒物脱除分析 [J]. 中国电机工程学报，2016，36(2)：468－473.
ZHAO Lei，ZHOU Hongguang. Particle removal efficiency analysis of WESP in an ultra low emission coal-fired power plant [J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(2)：468－473.

[3] 高朋，党小庆，赵少雄，等. 管式湿式电除尘器气流分布的组织与优化 [J]. 环境工程学报，2017，11(7)：4223－4228.
GAO Peng，DANG Xiaoqing，ZHAO Shaoxiong，et al. Organization and optimization for gas flow distribution of tubular W-ESP [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2017，11(7)：4223－4228.

[4] 周茂军，张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术应用及分析 [J]. 烧结球团，2019，44(3)：58－63.
ZHOU Maojun，ZHANG Daihua. Application and analysis of ultra-low emission technology of sintering flue gas in Baosteel [J]. Sintering and pelletizing，2019，44(3)：58－63.

[5] 刘定平，马佩佩，夏松，等. 旋流雾化氨法脱硫除尘一体化技术研究 [J]. 烧结球团，2020，45(2)；51－60.
LIU Dingping，MA Peipei，XIA Song，et al. Study on integrated rechnique of desulfurization and dust collection using swirl atomizing blenser [J]. Sintering and pelletizing，2020，45(2)；51－60.

[6] 陈丽娟，陈亮亮，杨来怡. 蜂窝管式湿电在烧结球团中应用的技术探讨 [C]//第 17 届中国电除尘学术会议论文集，南京 中国环境保护产业协会电除尘委员会 2017，10.
CHEN Lijuan，CHEN Liangliang，YANG Laiyi，et al. Discussion on the application of honeycomb tube wet electricity in sintering pellet [C]//17th Chinese electrodedusting academic conference，proceedings，Nanjing，China Environmental Protection Industry Association electrostatic Precipitation Committee 2017，10.

[7] SEINFELD J H，PANDIS S N. Atmospheric chemistry and physics [M]. New York：John Wiley，1998.

(上接第 52 页)

[14] 青格勒，王朝东，侯恩俭，等. 低硅含镁球团矿抗压强度及冶金性能 [J]. 钢铁研究学报，2014，26(4)：7.
QING Gelei，WANG Chaodong，HOU Enjian，et al. Compressive strength and metallurgical properties of low silicon magnesium-bearing pellets [J]. Journal of Iron Steel Research，2014，26(4)：7.

[15] 李神子，龙跃，潘向阳，等. MgO 对酸性球团矿冶金性能的影响 [J]. 钢铁钒钛，2020，41(1)：113－118.
LI Shenzi，LONG Yu，PAN Xiangyang，et al. Effect of MgO on metallurgical properties of acid pellets [J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2020，41(1)：113－118.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net