高压恒流电源对湿电场的适应及提效特性研究

刘卫东[1]，郭英鹏[2]，孙 涛[3]
（1. 国网山东省电力公司，山东 济南 250000；2. 潍坊特钢集团有限公司，山东 潍坊 261000；
3. 山东理工大学 电气与电子工程学院，山东 淄博 255094）

摘要： 为深入研究不同电控技术对湿电场的适应及提效特性，本文中搭建了湿式电除尘器（WESP）实验系统。实验研究发现：恒流源抗“干扰”能力强，更适用于WESP的湿电场供电；高频电源可提供更高的电源参数，对应的湿电场污染物脱除性能更高，WESP入口在高、中、低烟尘质量浓度3种工况条件下，工频电源供电湿电场对烟尘、$PM_{2.5}$脱除效率分别为（70.33%、68.38%、67.92%）、（61.07%、59.77%、58.97%）；高频电源则分别为（77.99%、76.92%、75.47%）、（70.23%、70.11%、69.23%）。采用高频高压恒流源WESP对山东某烧结项目改造后，出口烟尘排放质量浓度仅为4.5 mg/m^3，减排效果显著。本研究可为烧结烟气烟尘超低排放改造提供借鉴。

关键词： 烧结烟气；湿式电除尘器；高压恒流源；工频电源；高频电源
中图分类号： X513；X701 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2021）03－0080－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.03.043

Research on adaptation and efficiency－enhancing features of high voltage constant current source to wet electric field

LIU Weidong[1]，GUO Yingpeng[2]，SUN Tao[3]
（1. *State Grid Shandong Electric Power Company，Jinan* 250000，*Shandong*，*China*；2. *Weifang Special Steel Group*，*Weifang* 261000，*Shandong*，*China*；3. *School of Electrical and Electronic Engineering*，*Shandong University of Technology*，*Zibo* 255094，*Shandong*，*China*）

Abstract: In order to further study the adaptation and efficiency-enhancing features of different electronic control technologies to wet electric field，the wet electrostatic precipitator（WESP）experimental system is established. The results show that，due to the strong anti-interference ability，constant current source is more suitable for wet electric field power supply of WESP. High frequency power supply can provide higher power parameters，and the corresponding wet electric field has higher removal performance for wet filed pollutants. Under such 3 working conditions as high，medium and low concentration of dust at the inlet of WESP，the removal efficiency of wet electric field powered by fundamental frequency power supply to dust and $PM_{2.5}$ are 70.33%，68.38%，67.92% and 61.07%，59.77%，58.97%，respectively. The one of high frequency power supply are 77.99%，76.92%，75.47% and 70.23%，70.11%，69.23%，respectively. After the transformation of a sintering project in Shandong province by a WESP with high frequency and high voltage constant current source，the dust emission is only 4.5 mg/m^3 with significant reduction effect. This research can provide references for the ultra-low emission transformation of sintering flue gas and dust.

Key words: sintering flue gas；wet electrostatic precipitator；high voltage current source；fundamental frequency power supply；high frequency power supply

收稿日期： 2020－06－16；**修回日期：** 2021－03－12
基金项目： 山东省重点研发计划资助项目（2018CXGC1015）
作者简介： 刘卫东（1967—），男，高级工程师，从事新型供电电源技术开发工作。
通讯作者： 孙 涛（1984—），男，副教授，从事电控理论及实验方面的研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

钢铁行业是颗粒物排放的重要污染源之一，目前，钢铁行业超低排放改造已逐渐开始大范围实施。湿式电除尘器(WESP)作为颗粒物的精处理设备，在燃煤电厂烟尘超低排放改造中发挥了重要作用，对消除“蓝色烟羽”也具有较好的效果，如赵磊等[1]研究了 WESP 对燃煤烟气细颗粒物的高效脱除性能，但未涉及不同电控方式的对比；高朋等[2]研究分析了管式 WESP 气流分布特性，但未涉及电控稳定性和安全性方面内容。李菁川等[3]通过实验研究确定了高频电源、脉冲电源及两种电源组合使用时对烧结烟气干式电除尘器的提效规律，但未涉及 WESP。目前，随着钢铁冶金行业环保要求的不断提高，烧结球团工艺中烟气湿法脱硫后越来越多地采用 WESP[4-6]来实现颗粒物超低排放。目前，WESP 多采用常规的工频电源，当喷淋开启时，电场内存在火花放电现象，电源运行参数不稳定，部分项目因阳极板导电涂层绝缘指数不达标，甚至出现着火现象，严重影响电厂的安全生产。另外，更换不同的电控技术，是否可进一步提升 WESP 的污染物减排性能，也缺乏相应的实验数据支撑。

本文通过实验手段，研究不同电控技术对 WESP 运行稳定性的影响，定量分析不同电控技术对 WESP 的提效特性，可为后续烧结烟气烟尘超低改造提供借鉴。

1　实验设备与方法

电源实验系统见图 1。该实验系统包括风机、飞灰料仓、文丘里射流器、混流装置和 WESP 等。系统可定量控制向实验系统内喷射的燃煤飞灰量。通过向烟道内喷水增湿，使烟气达到湿饱和状态，且为了模拟实际工程烟气条件，对水进行预热，通过喷水温度和风量控制，使得 WESP 入口烟气温度控制在 50 ℃左右。WESP 采用导电玻璃钢管式的间歇喷淋方式，喷淋系统每次冲洗时间设定为 5 min，其供电电源分别采用工频高压恒流源、恒压源和高频高压恒流源，以开展对比实验，其中工频电源参数为 72 kV/100 mA，高频电源参数为 72 kV/200 mA。鉴于湿式电除尘器布置在烟气处理系统的最末端，且烟气处于湿饱和状态，对粉尘性质并不敏感，本实验以燃煤飞灰为除尘介质，开展相关规律性实验研究，实验结果对烧结烟气除尘的精处理也有较好的借鉴价值。

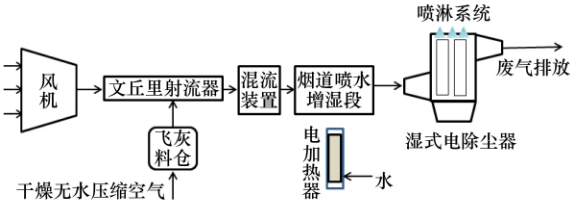


图 1　电源实验系统

Fig. 1　The experimental system of power supply experiment

在烟尘采样方面，针对低浓度、高湿度的采样环境，采用一体化采样头采样系统，测试仪器分别为 ZR-D09A 采样枪和 ZR-3260 烟尘仪。实验期间，在 WESP 出口设置烟气在线监测系统(Continuous Emission Monitoring System，CEMS)仪表用于监测在线烟尘数据，并采用手工测试方法测得的结果对 CEMS 进行数据校准；在 $PM_{2.5}$采样方面，采用配置 2 级稀释系统(1 级高温稀释 + 1 级常温稀释)的静电低压撞击器(Electrical Low Pressure Impactor，ELPI)。

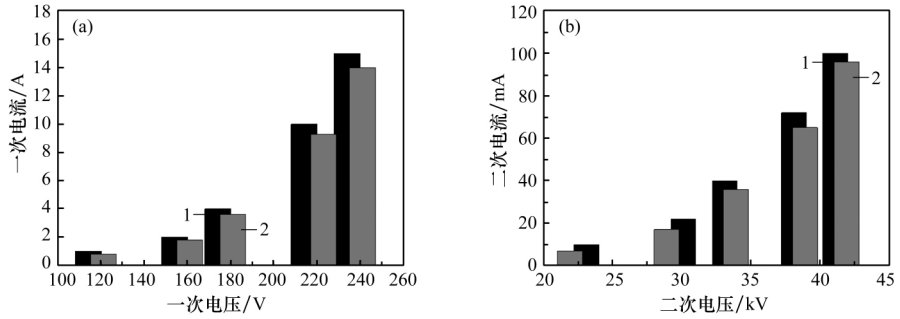
2　结果与讨论

2.1　供电稳定性实验

分别对工频高压恒流源、恒压源进行空载升压实验，得到实验结果如图 2 所示。由图 2 可知：在空载条件下，从(一次、二次)电压、电流信号来看，工频高压恒流源和恒压源的参数规律基本一致。

在 WESP 运行过程中，开启喷淋系统，发现喷淋开启约 2 ~ 3 s 后 WESP 电场内开始出现闪络现象，此时工频高压恒流源和工频高压恒压源的二次电压、二次电流变化规律如图 3 所示。由图 3 可知：对于工频恒流源来说，电源检测到火花放电后，可自动下调电源运行参数，以适应湿电场内烟气放电特性的变化，虽仍偶尔会有零星火花，但恒流源运行更平稳，一旦

中国知网　https://www.cnki.net

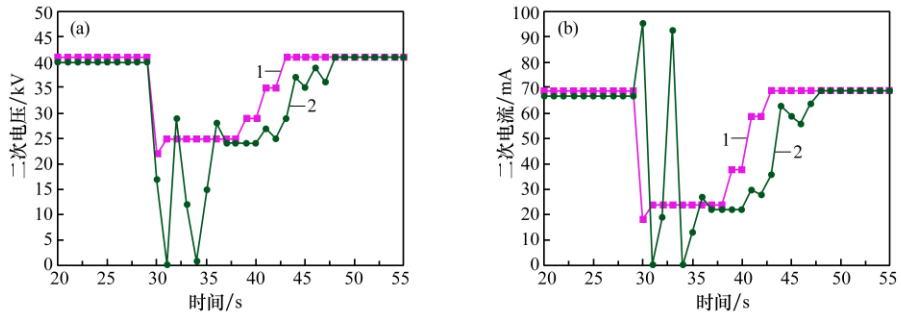


(a) 一次电压、电流; (b) 二次电压、电流

1—恒流源; 2—恒压源。

图 2 两种电源的空载升压实验对比结果

Fig. 2 Comparison results of no-load voltage boost test of two kinds of power supply



(a) 二次电压; (b) 二次电流

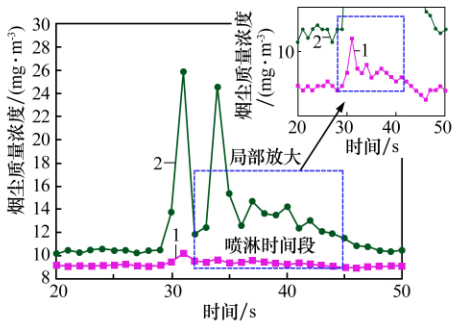
1—恒流源; 2—恒压源。

图 3 喷淋系统开启时二次电压与二次电流曲线

Fig. 3 Secondary voltage and secondary current curve when sprinkler system is turned on

喷淋结束，运行参数便会较快恢复；恒压源实验时，当喷淋开启后，电源的运行参数则出现较大幅度的振动，尤其是在刚开始喷淋的初期，火花放电较为频繁，这不仅造成电源运行参数不稳定，影响除尘性能，还可能危及电场的安全运行。喷淋结束后，其电源运行参数也不能较快地恢复初始设置。由此可见，恒流源输出特性稳定，抗“干扰”能力强。

通过 CEMS 在线测定 WESP 出口的烟尘质量浓度，经测定，两种电源供电时，喷淋开启前后 WESP 出口烟尘质量浓度的变化如图 4 所示。由图 4 可知: 当喷淋开启之后，两种电源的运行参数均会下降，此时，WESP 的除尘性能减弱，出口烟尘质量浓度相应增加，但增幅明显不同。恒流源供电时，喷淋开启后，WESP 出口烟尘质量浓度从约 9 mg/m^3 提高至约 10 mg/m^3，烟尘质量浓度增加了约 11%; 但恒压源因存在一个电源参数震荡区，电晕运行极不稳定，此时，出口烟尘质量浓度最大时达 26 mg/m^3，其增幅达 160%。因此，对于 WESP 而言，恒流源的供电稳定性明显优于恒压源。



1—恒流源; 2—恒压源。

图 4 喷淋系统开启时 WESP 出口烟尘质量浓度变化

Fig. 4 Change of dust mass concentration at the outlet of WESP when the sprinkler system is opened

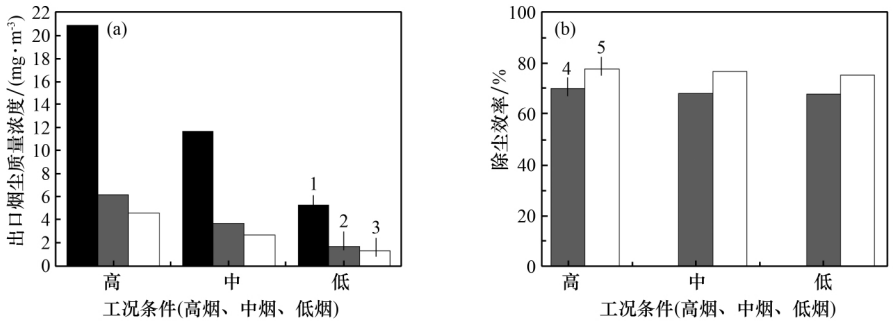
2.2 不同电控技术对湿电场的提效特性

鉴于恒流源对湿电场供电比较稳定，分别采用工频高压恒流源(72 kV/100 mA)、高频高压恒流源(72 kV/200 mA)在 WESP 入口高烟尘质

中国知网 https://www.cnki.net

量浓度(20.9 mg/m³)、中烟尘质量浓度(11.7 mg/m³)、低烟尘质量浓度(5.3 mg/m³)(文中分别采用高烟、中烟、低烟表示)3 种工况条件下开展对比实验，研究不同电控技术对湿电场的提效特性。

两种电源供电时，3 种工况条件下 WESP 出口烟尘质量浓度及对应的湿电场除尘效率如图 5 所示。由图 5 可知：工频电源供电时，高、中、低烟 WESP 出口烟尘质量浓度分别为 6.2、3.7、1.7 mg/m³，对应的湿电场除尘效率分别为 70.33%、68.38%、67.92%；WESP 入口烟尘质量浓度越低，对应的出口烟尘质量浓度也越低，但相应的湿电场除尘效率有所减小；高频电源供电时，高、中、低烟 WESP 出口烟尘质量浓度分别为 4.6、2.7、1.3 mg/m³，对应的湿电场除尘效率分别为 77.99%、76.92%、75.47%。可见，高频电源供电时，湿电场除尘性能明显提升。其原因主要是供电电源主要通过影响空间电场强度和空间电荷密度来影响湿电场的除尘性能，高频电源因其可提供更高的电源参数，因此，对应的 WESP 出口烟尘质量浓度更低，湿电场的除尘效率更高。



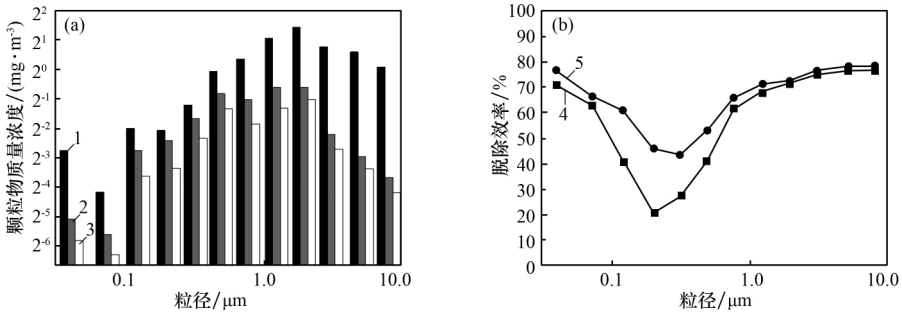
(a) 烟尘质量浓度；(b) 除尘效率

1—WESP 进口；2—WESP 出口(工频)；3—WESP 出口(高频)；4—工频；5—高频。

图 5　3 种工况条件下烟尘测试结果

Fig. 5　Test results of smoke dust under three working conditions

以高烟尘质量浓度工况为例，采用 ELPI 测定 WESP 进出口的粒径分布，并计算各粒径段的分级脱除效率，测定结果如图 6 所示。由图 6 可知：与 WESP 入口各粒径段颗粒质量浓度相比，WESP 出口均有所降低，且高频电源供电时 WESP 出口各粒径段颗粒质量浓度明显低于工频电源。但不难发现，0.1 ~ 1 μm 段的颗粒减少幅度要小一些，这是因为颗粒在湿电场内的荷电方式主要分为电场荷电和扩散荷电两种，而 0.1 ~ 1 μm 段的颗粒两种荷电效果均不理想[9]，因此脱除性能较差一些，且从图 6(b)可发现，0.1 ~ 1 μm 段颗粒分级脱除效率最低，在湿电场内的脱除效率多不足 50%。



(a) 空气动力学粒径分布；(b) 颗粒物的分级脱除效率

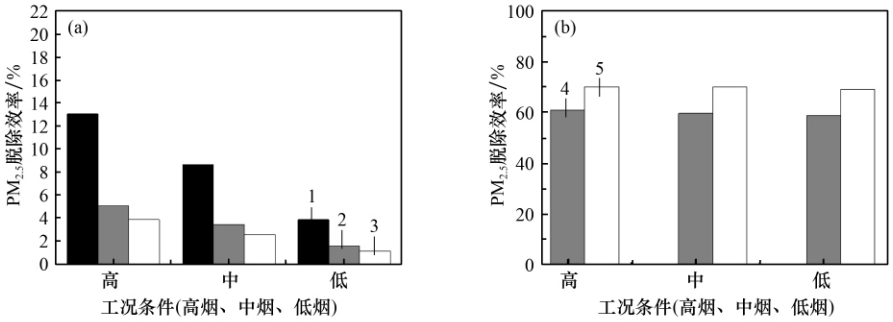
1—WESP 进口；2—WESP 出口(工频)；3—WESP 出口(高频)；4—工频；5—高频。

图 6　粒径分布及其分级脱除效率

Fig. 6　Particle size distribution and its fractional removal efficiency

中国知网　https://www.cnki.net

ELPI 撞击器的第 1 ~ 9 级累计数据为 $PM_{2.5}$，两种电源供电时，3 种工况条件下 WESP 出口 $PM_{2.5}$ 质量浓度及对应的湿电场除尘效率如图 7 所示。由图 7 可知：工频电源供电时，3 种工况条件下的 WESP 出口 $PM_{2.5}$ 质量浓度分别为 5.1、3.5、1.6 mg/m^3，对应的湿电场对 $PM_{2.5}$ 脱除效率分别为 61.07%、59.77%、58.97%。WESP 入口 $PM_{2.5}$ 质量浓度越低，对应的出口 $PM_{2.5}$ 质量浓度也越低，但相应的湿电场对 $PM_{2.5}$ 脱除效率也有所减小；高频电源供电时，3 种工况条件下的 WESP 出口对 $PM_{2.5}$ 质量浓度分别为 3.9、2.6、1.2 mg/m^3，对应的湿电场对 $PM_{2.5}$ 脱除效率分别为 70.23%、70.11%、69.23%。可见，与工频电源相比，湿电场对 $PM_{2.5}$ 脱除性能有明显提升。



(a) $PM_{2.5}$ 质量浓度；(b) $PM_{2.5}$ 脱除效率

1—WESP 进口；2—WESP 出口(工频)；3—WESP 出口(高频)；4—工频；5—高频。

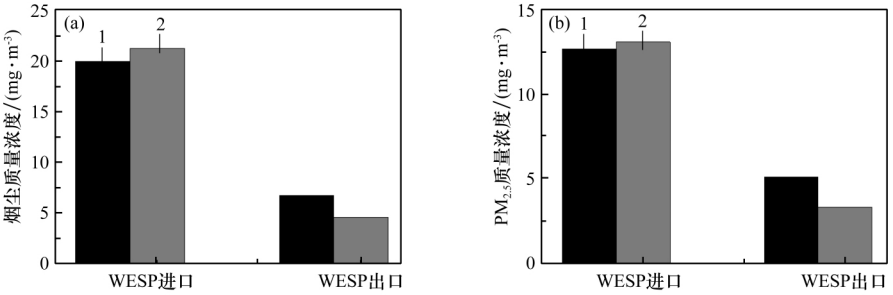
图 7 $PM_{2.5}$ 测试结果

Fig. 7 $PM_{2.5}$ test results

3 应用效果

某烧结烟气改造项目的原烟气治理系统为“电除尘器 + 湿法脱硫”，其中，电除尘器为四电场，脱硫为石灰石 - 石膏湿法脱硫，烟囱的烟尘排放在 16 ~ 28 mg/m^3，平均在 20 mg/m^3 以上。经超低排放改造，在湿法脱硫后设置 WESP，初始配置为常规工频恒压源供电，但机组投运后，WESP 运行不稳定，尤其是喷淋开启后，湿电场内火花放电拉弧现象较为频繁，且烟尘排放质量浓度波动较大。

因此，在 WESP 本体结构不变的前提下，电源更换为 72 kV/1 200 mA 高频高压恒流源。电源更换前后 WESP 出口的烟尘、$PM_{2.5}$ 质量浓度对比如图 8 所示。由图 8 可知：原工频恒压源供电时，烟尘平均排放质量浓度为 6.7 mg/m^3，最高时达 12.9 mg/m^3，超出了超低排放限值，$PM_{2.5}$ 平均排放质量浓度也高达 5.1 mg/m^3，更换高频高压恒流源后，污染物减排显著，烟尘平均排放质量浓度降至 4.5 mg/m^3，$PM_{2.5}$ 排



(a) 烟尘；(b) $PM_{2.5}$

1—工频恒压源供电；2—高频恒流源供电。

图 8 工程项目实际测试结果对比

Fig. 10 Comparison of actual test results of engineering projects

中国知网 https://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.

中国知网　https://www.cnki.net