

逆流荷电双区 ESP 改善高比 电阻粉尘除尘效果

郝文阁, 张 聪, 杨艳云, 黄文杰

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了改善 ESP 对含高比电阻粉尘烟气的除尘效果, 对比测定了常规单、双区及逆流荷电双区三种静电除尘器模型在净化分别含有正常或高比电阻粉尘气体时的 $U-I$ 特性和除尘效率。常规单、双区 ESP 在净化含高比电阻粉尘气体的过程中, 当极间电压升高至 50 kV 时, 收尘电场发生反电晕, 且除尘效率开始下降; 而逆流荷电双区 ESP 净化含高比电阻粉尘气体与净化含有正常比电阻粉尘的 $U-I$ 特性曲线并无明显差异, 两种粉尘的净化效率与极间电压之间的关系曲线也呈相同的变化态势。研究结果证实, 对于净化含有高比电阻粉尘烟气, 新型 ESP 可以避免发生反电晕, 有效改善除尘效果。

关 键 词: 静电除尘器(ESP); 高比电阻粉尘; 反电晕; 逆流荷电; 除尘效率

中图分类号: X 701.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0109-05

Improving Collection Efficiency of the High Specific Resistance Dust by the Counter-Current Charged Dual-Zone ESP

HAO Wen-ge, ZHANG Cong, YANG Yan-yun, HUANG Wen-jie

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HAO Wen-ge, E-mail: haowenge0510@163.com)

Abstract: In order to improve the purification effect of ESP on high resistivity dust in flue gas, $U-I$ characteristics and collection efficiency of cleaning normal or high resistivity dust gas were measured in the three electrostatic precipitators test model such as ordinary single district, the conventional dual-zone and dual-zone counter-current charged. In the process of cleaning high resistivity dust gas by ordinary single district and the conventional dual-zone ESP, when the voltage rises to 50 kV, dust collection electric field occurs back corona and the collection efficiency begins to decline. While the trends of $U-I$ characteristic curve have no significant differences when dual-zone counter-current charged ESP cleaning gas containing the high specific resistance dust and the normal specific resistance dust, and the collection efficiency and voltage show the same trends. The research results confirm that the new ESP can avoid anti-corona and improve the effects of cleaning dust effectively for the purification of flue gas containing a high resistivity dust.

Key words: electrostatic precipitator(ESP); high specific resistivity dust; back corona; counter-current charge; collection efficiency

静电除尘器(ESP)以其除尘效率高、运行稳定、能量消耗低等优点在烟气粉尘净化领域得到普遍应用^[1]。但是,在净化含高比电阻粉尘^[2]($\rho > 5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$)烟气时,极间电晕电流在通过收尘极板表面沉积的粉尘层时会产生较强反向电

场,严重时甚至产生反电晕^[3],导致除尘效率下降,这是常规静电除尘器应用中遇到的最突出问题^[4-6]。为了改善静电除尘器净化高比电阻粉尘的效果,美国偏好于采用通过烟气调质降低粉尘比电阻的技术措施^[7];以德国为代表的欧洲选择

收稿日期: 2014-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078064)。

作者简介: 郝文阁(1959-),男,河北唐山人,东北大学教授。

调整静电除尘器结构,加大比集尘极面积的方法^[8];日本则着力推广低温和移动电极静电除尘器技术^[9-10]. 实践表明,四种技术途径都能有效提高对高比电阻粉尘的除尘效率. 在透彻理解高比电阻粉尘影响静电除尘器除尘效果机理的基础上,研发出实施容易且能切实改善高比电阻粉尘除尘效果的静电除尘器新技术仍然是当前静电除尘技术领域一项重要课题.

1 逆流荷电双区静电除尘器结构及工作原理

常规静电除尘器在净化高比电阻粉尘时,极间电晕电流在穿越沉积在收尘极板表面的粉尘层时所形成的电压降和电场强度分别为

$$\Delta U = j\rho\delta, \quad (1)$$

$$E = jp. \quad (2)$$

式中: ΔU 为粉尘层上形成的电压降,V; E 为粉尘层中电场强度,V/m; j 为穿越粉尘层的电流面密度,A/m²; ρ 为粉尘层比电阻, $\Omega\cdot\text{m}$; δ 为收尘极板沉积粉尘层厚度,m.

粉尘层的高比电阻值将会导致粉尘层上的电压降较大,降低了极间的电场强度;当 E 值大于粉尘层的击穿电场强度时,就会发生“反电晕”现象. 逆流荷电双区多段 ESP 结构原理如图 1 所示,除尘器每段设有荷电区和收尘区;荷电区由垂直于气流流动方向布置的 V 型金属槽组装的阳极栅排和在迎风面装有芒刺的金属管组装的阴极栅排构成;收尘区则由平行于气流流动方向布置的阴、阳极板构成. 当含尘气流通过荷电区时,阴极芒刺产生的负离子在电场力的驱使下,在向上风侧阳极栅运动过程中对气流中粉尘粒子荷电,荷电粒子则在风流黏性力的推动下流向下风侧的阳极栅,一部分在阳极栅的迎风面沉降,大部分随气流进入收尘区的板-板电场通道;而绝大部分未与粒子结合的负离子继续向阳极栅的背风面沉积^[11],避免了负离子电流穿越阳极表面沉积的高比电阻粉尘层时产生的电压降及严重时发生的反电晕,有效改善了粉尘的荷电效果. 当荷电粒子进入收尘区时,电场空间只有荷电粒子形成的较小电流,同样避免了在收尘极板表面沉积的粉尘层上产生过大的电压降及严重时发生的反电晕,有助于改善粉尘的收集效果.

2 实验装置与测试方法

2.1 实验与测试系统

为了检验新型 ESP 对高比电阻粉尘的净化效果,组装的实验测试系统如图 1 所示.

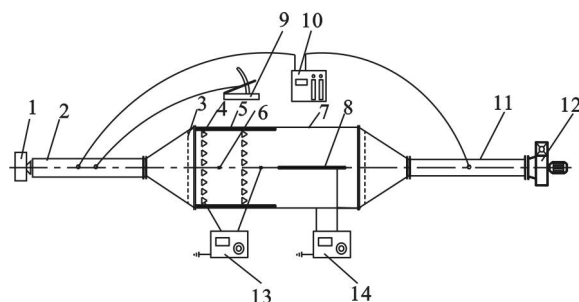


图 1 实验装置与测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup and test system

1—发生器;2—进风管;3—整流板;4—荷电区阳极栅排;5—绝缘板;6—荷电区阴极栅排;7—收尘区阳极板;8—收尘区阴极板;9—微压计;10—粉尘采样仪;11—出风管;12—风机;13—荷电区高压电源;14—收尘区高压电源.

静电除尘器的整体长为 1 700 mm, 高为 300 mm, 宽 400 mm, 上、下绝缘盖板材质为聚四氟乙烯. 根据实验需求, 可将除尘器分别改装成逆流荷电双区、普通双区、单区静电除尘器. 其中逆流荷电双区静电除尘器的荷电区电场长度为 600 mm, 阴、阳极栅排间距各为 400 mm, 每排阴极栅由一个迎风面装有“八”字型芒刺的钢管构成; 收尘区长为 1 100 mm, 阴极板长为 700 mm, 宽为 300 mm. 普通双区静电除尘器收尘区长仍为 1 100 mm, 荷电区沿轴向布置两根芒刺电晕线, 线间距为 200 mm. 普通单区静电除尘器沿纵向等间距布置 5 根芒刺电晕线, 线间距为 300 mm. 采用皮托管加倾斜式微压计测定风管中的风速; 采用 EST121 型比电阻测量仪测定粉尘的比电阻值; 两台高压电源型号为 ZGF-120/5, 粉尘采样仪型号为 FC-A-III. 在空气温度为 20 ℃, 相对湿度为 60% 的条件下分别测得滑石粉、粉煤灰、碳酸钙三种粉体的比电阻值为 1.84×10^9 , 3.52×10^{10} , $9.61 \times 10^{10} \Omega\cdot\text{cm}$, 三种粉尘的质量中位径分别为 6, 8, 12 μm . 实验时电场断面风速保持为 1.0 m/s, 进口粉尘质量浓度为 1.0 g/m³.

2.2 实验方法

2.2.1 电场风速

采用倾斜式微压计在进风管的测孔处测定管内风流的平均风速, 并换算为除尘器过流断面的平均风速^[8].

2.2.2 电场 $U-I$ 特性

调节高压电源控制装置的二次电压,读取二次电流强度的值,得到实验烟气工况条件下的 $U-I$ 特性曲线^[8]。

2.2.3 除尘效率

进风与出风管气体中的粉尘浓度采用 GB5748—1985 质量法进行测定,运用式(3)计算除尘效率^[9]:

$$\eta = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3)$$

式中: ρ_1 为除尘器进口含尘质量浓度 (mg/m^3);
 ρ_2 为除尘器出口含尘质量浓度 (mg/m^3)。

2.2.4 分级效率

采用显微镜计数法测定除尘器进、出口烟气中粉尘粒径的质量频率分布,用式(4)计算分级效率:

$$\eta_d = 1 - (1 - \eta) \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \quad (4)$$

式中: η_d 为对应粉尘粒径为 d 时除尘器的分级除尘效率,%; g_{d1} , g_{d2} 分别为除尘器进、出口粉尘的质量频率,%。

3 实验结果与分析

3.1 伏安特性

图2~图4分别是单区、普通双区、逆流荷电双区电除尘器模型处理正常室内干净空气和分别含有滑石粉、粉煤灰及 CaCO_3 粉三种粉尘模拟气体工况条件下所记录的单区、荷电区及收尘区的 $U-I$ 特性曲线。

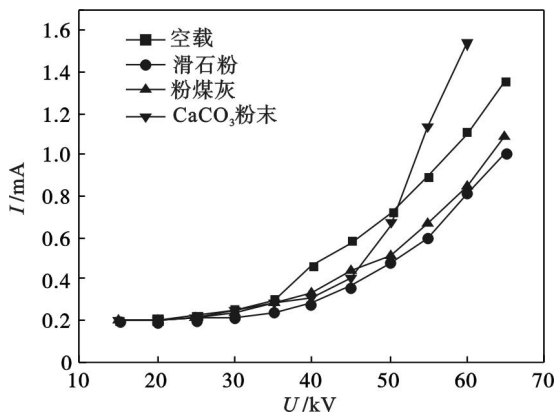


图2 $U-I$ 特性曲线(单区)

Fig. 2 $U-I$ characteristics curves (single-zone)

如图2所示,普通单区静电除尘器处理气体中含有正常比电阻粉尘时的电流强度明显小于相同电压条件下进气为干净气体时的电流强度,而对于气体中含有 CaCO_3 粉尘时,当极间电压升高

到50 kV以上时,电晕电流骤然升高,且高于干净空气时对应的电晕电流,据此可以判定反电晕现象导致电流的不正常增大。

图3a显示,对于普通双区 ESP,当收尘区电压固定在60 kV时,测得荷电区的 $U-I$ 特性曲线与普通单区的 $U-I$ 特性曲线类似。对于净化含有 CaCO_3 高比电阻粉尘的气体,当极间电压超过50 kV时,也产生反电晕现象。图4a为逆流荷电双区 ESP 在收尘区电压固定在60 kV时所测定的荷电区的 $U-I$ 曲线。从图4a可以看出,随着极间电压的升高,净化含有正常比电阻粉尘和高比电阻粉尘气体的电晕电流始终小于不含粉尘气体时所对应的电晕电流值,其结果证实了荷电区阳极栅排的迎风面和背风面不会出现荷电粉尘与负离子同时沉降的现象,从而避免了电晕电流穿越粉尘层时所引发的反电晕现象。图3b及图4b则是荷电区电压固定在50 kV时,两种双区 ESP 收尘区测得的 $U-I$ 特性曲线。从图中可以看出,随着极间电压的升高,极间电流虽然有所升高,但其电流强度值远小于同等收尘区长度下板-板电场所对应的电流强度。这是因为,板-板电场中的电流理论上只有从荷电区流入的粉尘粒子所带电荷形成的所谓“暗流”。但是,当电压超过40 kV时所测

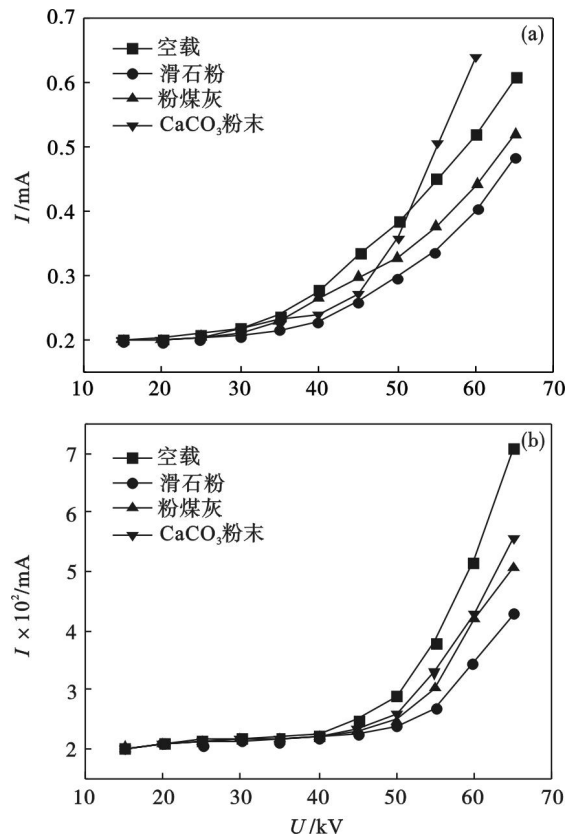
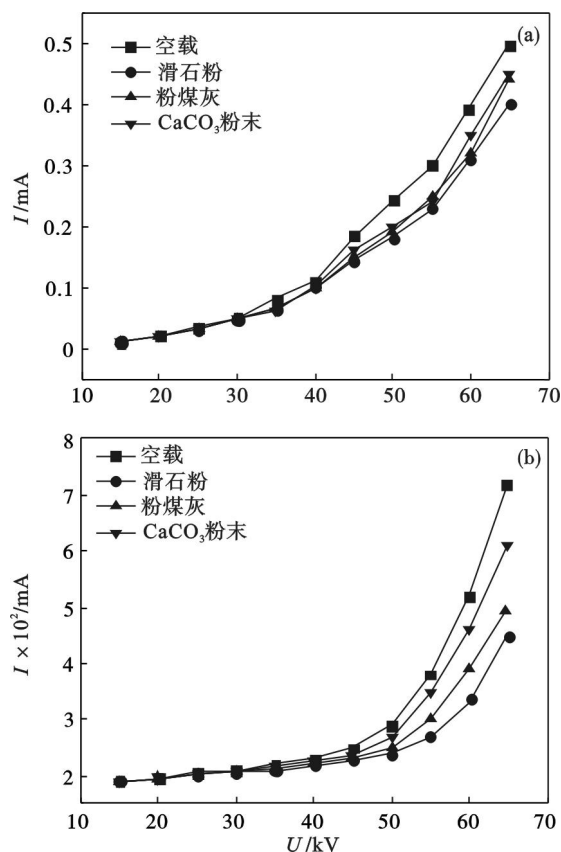


图3 $U-I$ 特性曲线(双区)

Fig. 3 $U-I$ characteristics curves (dual-zone)

(a)—荷电区; (b)—收尘区。

图 4 $U-I$ 特性曲线(逆流荷电)Fig. 4 $U-I$ characteristics curves (counter-current charged)

(a)—荷电区; (b)—收尘区.

得的电流值明显高于荷电粉尘所形成的“暗流”电流强度,这可能是因为阴极边沿处产生的电晕放电所致.

3.2 除尘效率

图 5 为单区 ESP 处理气体中分别含有滑石粉、粉煤灰、 CaCO_3 三种不同比电阻粉尘时的除尘效率与极间电压之间的关系曲线. 滑石粉和粉煤灰的除尘效率随着电压升高而升高,当极间电压大于 50 kV 时,除尘效率的变化趋于平缓. 气体

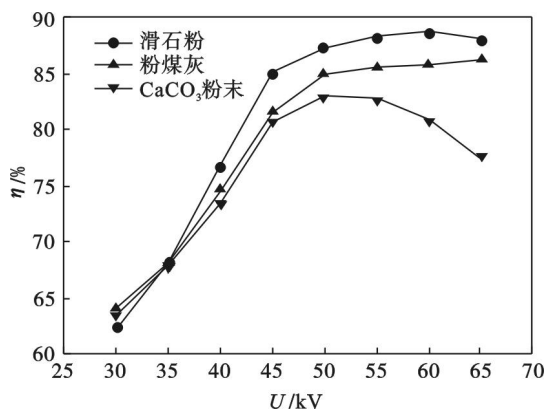


图 5 电压与除尘效率关系曲线(单区)

Fig. 5 Relationship between collection efficiency and voltage (single-zone)

中含有 CaCO_3 粉尘时的除尘效率先是随着电压升高而升高,最高效率为 83.1%,大大地低于中比电阻粉尘的效率,当极间电压大于 50 kV 时,除尘效率则开始下降.

固定收尘区电压为 60 kV,调节荷电区电压,测定除尘器效率,普通双区 ESP 对三种粉尘的除尘效率与荷电区电压之间的关系如图 6a 所示. 滑石粉和粉煤灰的除尘效率与单区的除尘效率相比略低,但相差不大. 对于 CaCO_3 粉尘,当极间电压达到 50 kV 时除尘效率最高,达到 76.8%;随着电压的进一步升高,除尘效率开始降低. 这一事实是与普通双区 ESP 荷电区的 $U-I$ 特性相呼应,当荷电区电压超过 50 kV 时,荷电区发生反电晕现象,直接影响了粉尘粒子的荷电效果.

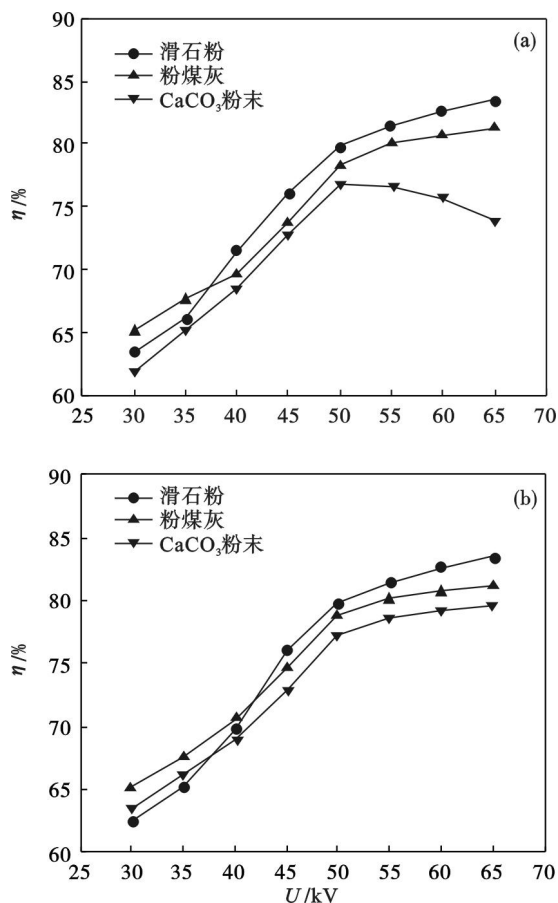


图 6 荷电区电压与除尘效率关系曲线(双区)

Fig. 6 Relationship between collection efficiency and voltage in charged area (dual-zone)

(a)—普通双区; (b)—逆流荷电.

图 6b 是固定收尘区电压为 60 kV,测定的逆流荷电双区 ESP 荷电区电压与除尘效率的关系曲线. 对含有高比电阻 CaCO_3 粉尘的气体,当极间电压超过 50 kV 时,除尘效率仍呈现出随电压升高而提高的趋势. 这表明,新型电除尘器有效避免了在荷电区发生反电晕的现象.

图 7 为三种结构 ESP 对应三种不同比电阻粉尘最高除尘效率时粉尘粒子直径为 $5\ \mu\text{m}$ 时的除尘效率与粉尘比电阻之间的关系曲线。从图中可以看出,对于高比电阻 CaCO_3 粉尘,单区及普通双区 ESP 的除尘效率下降明显;而对于逆流荷电双区 ESP,三种不同比电阻粉尘的除尘效率则差别较小。

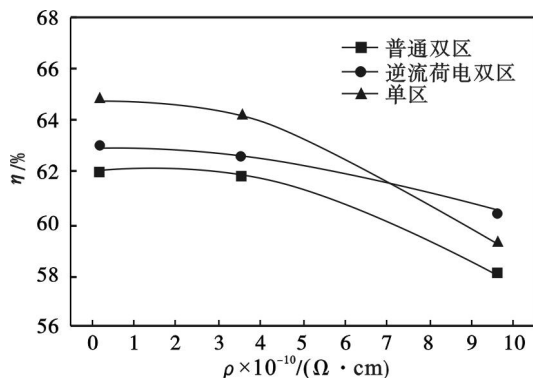


图 7 粉尘比电阻与除尘效率的关系

Fig. 7 The relationship between dust specific resistivity and collection efficiency

4 结 论

1) 当普通单区 ESP 极间电压和常规双区 ESP 荷电区极间电压升高至 50 kV 时,电晕电流急剧升高,显示发生了反电晕现象;随着逆流荷电双区 ESP 荷电区极间电压提高,电晕电流未出现急剧升高的反电晕现象。

2) 当普通单区 ESP 极间电压和常规双区 ESP 荷电区极间电压超过 50 kV 时,对应高比电阻粉尘的除尘效率开始逐渐下降;随着荷电区极间电压的升高,逆流荷电双区 ESP 对高比电阻粉尘的除尘效率则表现为逐渐提高的趋势,表明新型 ESP 对于改善高比电阻粉尘的除尘效率具有一定的潜力。

参考文献:

[1] 郭遵琪. 工业烟气除尘行业发展探讨[J]. 环境保护, 2013, 41(1): 54-55.

(Guo Zun-qi. Investigation of the development of industrial flue gas in the dust removal industry [J]. *Environmental Protection*, 2013, 41(1): 54-55.)

- [2] Hetal F. Applications of electrostatic precipitator with pulse energization system [C]//Proceedings of the 4th International Conference on ESP. Beijing, 1990: 419-423.
- [3] Nouri H, Zouzou N, Moreau E, et al. Effect of relative humidity on current voltage characteristics of an electrostatic precipitator[J]. *Journal of Electrostatics*, 2011, 70(1): 20-24.
- [4] 蔺小力. 电除尘器对高比电阻粉尘收集的研究[J]. 内蒙古环境科学, 2009, 21(2): 24-27.
(Lin Xiao-li. Research on high specific resistance dust collection with electrostatic precipitator [J]. *Neimenggu Environmental Science*, 2009, 21(2): 24-27.)
- [5] Đurić S, Stanojević P, Daković D, et al. The study on the effect of fractional composition and ash particle diameter on the ash collection efficiency at the electrostatic precipitator [J]. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 2010, 16(3): 229-236.
- [6] Kim J H, Lee H S, Kim H H, et al. Electrospray with electrostatic precipitator enhances fine particles collection efficiency[J]. *Journal of Electrostatics*, 2010, 68(4): 305-310.
- [7] Prach P. Flue gas conditioning: controlling fly ash [J]. *Chemical Engineering World*, 2001, 36(6): 77-80.
- [8] Hao W G, Xiong H W. Non-static collection process of the ESP [C]// The 11th International ESP Conference. Hangzhou, 2008: 79-83.
- [9] Misaka T, Oura T, Yamazaki M. 移动电极电除尘器的最新应用和性能改进[C]//第11届全国电除尘学术会议论文集. 郑州, 2005: 467-481.
(Misaka T, Oura T, Yamazaki M. Recent application and reliability improvement of moving electrode type electrostatic precipitator [C]//Proceedings of the 11th Conference of ESP. Zhengzhou, 2005: 467-481.)
- [10] Varonos A, Anagnostopoulos S, Bergeles C. Prediction of the cleaning efficiency of an electrostatic precipitator[J]. *Journal of Electrostatics*, 2002, 55(2): 111-133.
- [11] Zhang X R, Wang L Z, Zhu K Q. An analysis of a wire-plate electrostatic precipitator [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2002, 33(11): 1595-1600.