



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Green Industrial Processes—Article

凝变除湿复合烟气深度净化技术工程应用

刘建民, 朱法华*, 马修元

State Power Environmental Protection Research Institute, State Environmental Protection Key Lab for Air Physical Simulation & Pollution Control, Nanjing 210031, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 December 2017

Revised 14 February 2018

Accepted 15 May 2018

Available online 21 May 2018

关键词

湿烟羽

凝变除湿

溶解盐

SO₃

颗粒物

摘要

湿法脱硫后湿烟气排放会形成湿烟羽现象, 不仅浪费水资源, 产生视觉污染, 同时湿烟气中的SO₃、溶解在液态水中的盐、颗粒物等在大气环境中会形成二次污染。本文提出了一种凝变除湿复合烟气深度净化技术, 包括凝变湿电一体化和凝变除雾一体化两种技术路线, 分别在630 MW和1000 MW燃煤机组上进行了工程应用。结果表明, 凝变除湿复合烟气深度净化技术对脱硫后饱和湿烟气的除水量大于4 g·kg⁻¹·℃⁻¹, 在烟气温度降低1.5~5.3℃时, 可回收烟气中5%~20%的水分, 有效节约水资源; 显著减少水汽排放, 有效消除湿烟羽现象; 离子浓度降低65%以上, SO₃脱除率大于75%, 颗粒物脱除率为92.53%。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

燃煤电厂是耗水大户, 主要耗水是循环冷却条件下, 通过冷却塔排放的水汽; 其次是近年来燃煤电厂采用湿法烟气脱硫工艺、湿式电除尘工艺, 烟气净化后湿烟气由烟囱排入大气带走的水[1]。湿烟气排放不仅会造成严重的水资源浪费, 而且在烟囱出口会形成湿烟羽现象, 产生明显的视觉污染[2-4]。上海市《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB31/963—2016), 要求燃煤发电锅炉采取烟温控制及其他有效措施消除“石膏雨”“有色烟羽”等现象。目前, 湿烟羽治理主要采用烟气再热技术, 但是烟气再热能耗大, 且在环境温度较低的情况下无法完全消除湿烟羽[5-8]。因此, 亟需开发出一种

新的烟气深度净化技术, 高效收集烟气中的水分, 减少水资源消耗; 同时, 有效消除湿烟羽现象。

我国大气灰霾治理的形势依然严峻, 烟气中SO₃、溶解在烟气液滴中的盐等污染物的脱除成为目前解决这一问题的研究重点。然而, 目前国内外尚未有针对烟气中溶解盐的脱除技术, 且现有的烟气除尘和SO₂的脱除设施对SO₃的协同脱除效率仅为50%~70%[9]。因此, 开展针对烟气中SO₃、溶解盐及其他污染物的同时脱除技术研究及工程应用具有重要的现实意义。

烟气中水分回收技术包括膜分离、吸收和冷凝, 其中只有冷凝技术在一些工业装置中应用。法国Gaz de France and L'Industrialde设计的冷凝燃气锅炉烟气旨在通过烟气水分的冷凝来循环利用潜热。近年来, 美国里

* Corresponding author.

E-mail address: zhufahua@nepri.com (F. Zhu).

海大学能源研究中心开发了一种技术，通过冷凝作用，将烟气中的水分循环利用，并协同清除多种污染物[10]。山东大学通过冷却脱硫浆液来回收湿法烟气中的水分[11]。北京清新环境技术股份有限公司利用冷却水冷却烟气回收烟气中的水分。本文提出一种可实现低温高湿烟气环境中 SO_3 、溶解盐、 $\text{PM}_{2.5}$ 等深度协同脱除的凝变除湿复合烟气深度净化技术，并对该技术的原理、一体化工艺设计进行了分析，重点针对该技术的工程应用效果进行了详细讨论，给出了凝变除湿复合烟气深度净化技术的关键技术参数，为凝变除湿复合烟气深度净化技术的推广应用提供指导。

2. 凝变除湿工艺介绍

2.1. 凝变技术原理

石灰石-石膏湿法脱硫后的饱和湿烟气中不仅含有气态水，而且含有溶解了盐的液态水。此外还含有固态微细颗粒物，如烟尘、石膏、未反应的石灰石等，以及气态酸性物质，如 SO_3 等[12]。因此，湿烟气在降温过程中不仅发生相变凝聚，而且烟气中的固态微细颗粒物、冷凝形成的细小液滴会由于对流、扩散和热泳作用等相互碰撞，团聚成大颗粒，烟气中的酸性组分 SO_3 等会部分溶解在冷凝水中，与碱性固态颗粒物烟尘、石灰石等发生中和反应，改变凝结水中阴、阳离子的浓度及pH值（详见图1），这种湿烟气冷凝过程被称为相变凝聚技术。利用相变凝聚技术原理做成的装置被称为相变凝聚器，简称凝变器，可促进湿烟气中气态水、液态水及溶解盐、微细颗粒物和 SO_3 的脱除[13-15]。

2.2. 凝变除湿一体化工艺设计

凝变器可使湿烟气中的部分气态水转变成微小的液滴、微细固态颗粒物团聚变大，但仍需借助后续的相关

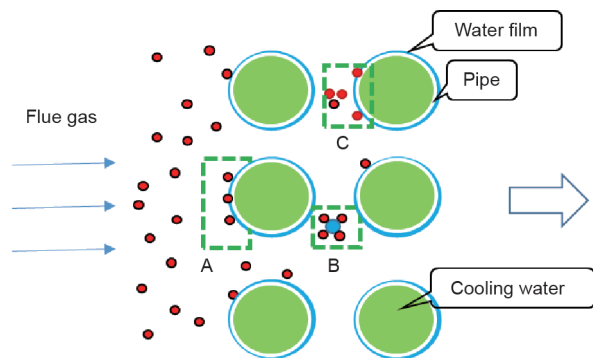


图1. 相变凝聚技术原理图。

装置才可有效脱除，后续装置主要有湿式电除尘器（简称“湿电”）或者除雾器，组合后简称“凝变除湿技术”。针对以湿式电除尘器为主的颗粒物超低排放技术路线，可将凝变器均匀布置于湿式电除尘器的收尘区域前端，取代原有整流格栅，形成凝变湿电复合一体化工艺，简称“凝变湿电技术”，如图2所示。

针对无湿式电除尘器的超低排放技术路线，可将相变凝聚器与除雾器一起布置于脱硫尾部烟道，形成凝变除雾复合一体化工艺，简称“凝变除雾技术”，如图3所示。

2.3. 工程设计参数

凝变湿电复合一体化技术首次应用于江苏省某电厂630 MW燃煤机组，工程主要设计参数如表1所示。

凝变除雾复合一体化工艺首次应用于上海某电厂1000 MW燃煤机组，工程主要设计参数如表2所示。

3. 结果与讨论

3.1. 凝变除湿技术收水性能研究

江苏某电厂630 MW燃煤机组在运行负荷为600 MW时，当烟气温度从 53.7°C 下降至 52.2°C ，凝变湿电复合一体化装置回收水量 $15 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ ，单位温降的平均凝水量为 $4.05 \text{ g水}\cdot\text{kg干烟气}^{-1}$ ，回收水量占烟气中总水分的5.7%，

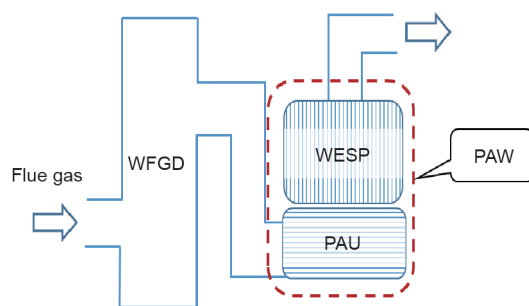


图2. 凝变湿电复合一体化工艺。

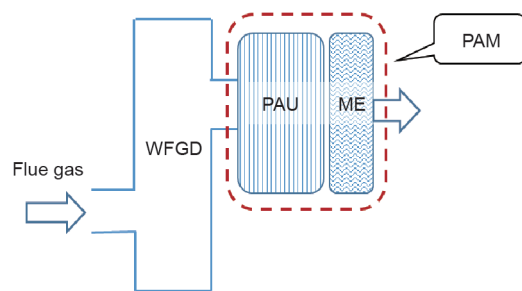


图3. 凝变除雾复合一体化工艺。

表1 凝变湿电复合一体化工程主要设计参数

Item	Unit	Value
PAU in Jiangsu Province		
Inlet flue gas flow	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2 780 666
Inlet flue gas temperature	$^{\circ}\text{C}$	50–57
Temperature drop	$^{\circ}\text{C}$	2
Pressure drop	Pa	< 100
Condensed water flow	$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	10–15
Cooling water flow	$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	1 000
WESP in Jiangsu Province		
Pressure drop	Pa	< 250
Flue gas velocity	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	< 3
Flue gas passing time	s	> 2
Power supply rated voltage	kV	72
Power supply rated current	A	1.8

表2 凝变除雾复合一体化工程主要设计参数

Item	Unit	Value
PAU in Shanghai		
Inlet flue gas flow	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	4 030 690
Inlet flue gas temperature	$^{\circ}\text{C}$	50–57
Temperature drop	$^{\circ}\text{C}$	5
Pressure drop	Pa	200
Condensed water flow	$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	70
Cooling water flow	$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	3 700
ME in Shanghai		
Pressure drop	Pa	< 150
ME blade spacing	mm	20
ME type	—	Horizontal flow
ME blade type	—	Streamlined dual channel with barbs

详见表3。

上海某电厂1000 MW燃煤机组在运行负荷为900 MW时，当烟气温度从53.1 $^{\circ}\text{C}$ 下降至47.8 $^{\circ}\text{C}$ ，凝变湿电复合一体化装置回收水量67.5 $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ ，单位温降的平均凝水量为4.02 $\text{g} \text{水} \cdot \text{kg} \text{干烟气}^{-1}$ ，回收水量占烟气中总水分的20.7%，详见表3。据文献报道[16]，当烟气温度从180 $^{\circ}\text{C}$ 降至50 $^{\circ}\text{C}$ 时，烟气中水分回收率仅为28.78%。表3中的数据表明，与以前的研究结果相比，凝变除湿技术回收烟气中水分的效果更好。

对江苏省和上海市两个电厂烟气中回收的水进行了沉淀和过滤处理，处理后的水被用作湿法脱硫系统的补充水。

湿烟气中的水蒸气在环境空气中凝结是形成湿烟羽的主要原因，凝变除湿复合技术通过降温凝结收集烟气中水分，降温后烟气只需进行小幅度再热，就可有效解

表3 凝变除湿复合技术回收水性能

Item	Unit	Value
PAW in Jiangsu Province		
Running load	MW	600
Flue gas temperature	$^{\circ}\text{C}$	53.7
Temperature drop	$^{\circ}\text{C}$	1.5
Recycled water amount	$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	15
Average recycled water amount (experimental value)	$\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	4.05
Average recycled water amount (theoretical value)	$\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	5.77
Error between experimental value and theoretical value	$\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	1.72
Water recycling rate	%	5.7
PAM in Shanghai		
Running load	MW	900
Flue gas temperature	$^{\circ}\text{C}$	53.1
Temperature drop	$^{\circ}\text{C}$	5.3
Recycled water amount	$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	67.5
Average recycled water amount (experimental value)	$\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	4.02
Average recycled water amount (theoretical value)	$\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	5.02
Error between experimental value and theoretical value	$\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	1.00
Water recycling rate	%	20.7

决湿烟羽问题。图4为安装有凝变除湿一体化装置和未安装凝变除湿一体化装置两台机组的烟囱出口排烟效果图，其中安装有凝变除湿一体化装置的烟囱排烟温度为55.1 $^{\circ}\text{C}$ ，升温幅度为7.3 $^{\circ}\text{C}$ 。由图4可知，安装有凝变除湿一体化装置的烟囱出口湿烟羽彻底消失，表明凝变除湿一体化是治理湿烟羽的有效技术。

3.2 凝变除湿技术对溶解盐的脱除性能

溶解在烟气液滴中的盐会随着凝变除湿装置对液滴

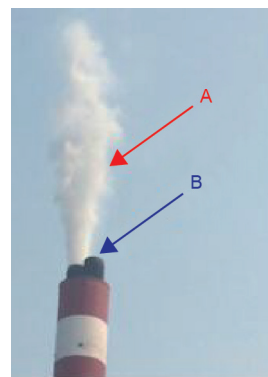


图4. 烟囱排放视觉效果图。

的去除而去除。为了分析凝变除湿复合技术对溶解盐的脱除效率,采用戴安离子色谱(ICS-2000)对凝结水的阴离子进行测试,采用等离子发射光谱仪(Optima 7000 DV)对凝结水的阳离子进行测试。

图5为凝变湿电技术对主要阴、阳离子的脱除效率,由图5可知,凝变湿电技术对不同离子的脱除性能存在差异,对离子的整体脱除效率大于75%。采用BEC950型实验室用电导率仪对凝结水的电导率进行测试,凝变器开启前凝结水的电导率比开启后凝结水的电导率降低79.21%,从 $505 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 下降到 $105 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,也说明了大部分离子被凝变湿电技术高效脱除。

图6为凝变除雾技术对主要阴、阳离子的脱除效率,由图6可知,凝变除雾技术对离子的脱除效率大于65%。

3.3. 凝变除湿技术对 SO_3 的脱除性能

为了分析凝变除湿技术对 SO_3 的脱除效果,按照《燃煤烟气脱硫设备性能测试方法》(GB/T 21508—2008)附录C对凝变除湿装置进、出口的 SO_3 浓度进行了测试。

图7给出了江苏省某电厂的凝变湿电技术、上海市某电厂的凝变除雾技术及凝变技术对 SO_3 的脱除效率。由图7可知,凝变湿电技术对 SO_3 的脱除效率为90%,比湿电的脱除效率65%高25%。凝变除雾技术对 SO_3 的脱除效率75.8%,比除雾器的脱除效率54.5%高21.3%。可见,凝变湿电技术和凝变除雾技术对 SO_3 的脱除效率

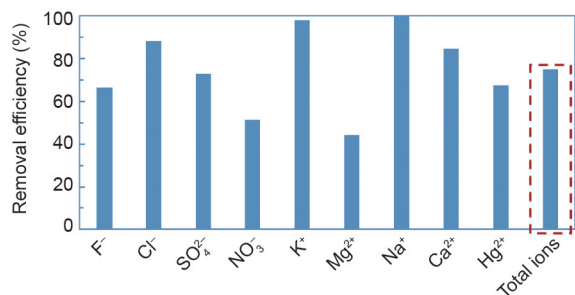


图5. 凝变湿电技术对离子的脱除性能。

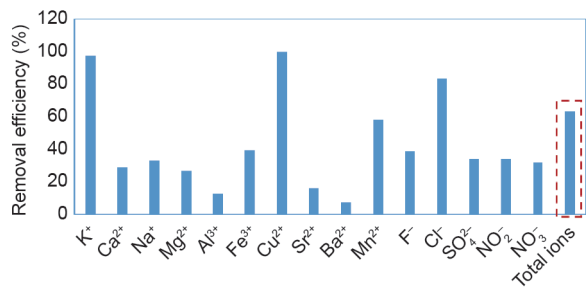


图6. 凝变除雾技术对离子的脱除性能。

均大于75%。现场试验结果显示,江苏某电厂630 MW燃煤机组在满负荷工况下凝变湿电装置出口 SO_3 质量浓度为 $7.4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (标态、干基、6% O_2);上海某电厂1000 MW燃煤机组在满负荷工况下凝变除雾装置出口 SO_3 质量浓度为 $1.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (标态、干基、6% O_2)。综上所述,凝变除湿技术对 SO_3 的脱除效率较高,且凝变器的温降越大, SO_3 脱除效率越高,排放浓度越低。凝变除湿技术对 SO_3 的高效脱除可有效减轻脱硫后尾部烟道和烟囱的腐蚀,同时可降低大气环境中二次颗粒物的形成。

3.4. 凝变湿电技术对颗粒物的脱除性能

为了分析凝变除湿技术对颗粒物的脱除效果,按照《火电厂烟气中细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)测试技术规范重量法》(DL/T 1520—2016)和《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB 16157—1996)对凝变除湿装置进、出口的颗粒物浓度进行了测试。

图8为凝变湿电一体化装置进口和出口不同粒径颗粒物占总颗粒物的质量分数,表4为凝变湿电一体化技术对不同粒径颗粒物的脱除效率。由图8可知,在凝变器停运的情况下,凝变湿电一体化装置出口微细颗粒物(粒径小于 $1 \mu\text{m}$)的质量分数明显增大,其中粒径介于 $0.1\sim 1.0 \mu\text{m}$ 颗粒物的质量分数增大幅度最大,其次是小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒物,表明湿式电除尘器对微细颗粒物的脱除效率较低,与表4的结果相一致。

凝变器投运后,凝变湿电一体化装置出口微细颗粒物的质量分数降低,表明凝变器可以促进微细颗粒物的团聚长大,有利于提高脱除效率[17]。对凝变湿电一体化装置出口微细颗粒物的测试结果表明:在满负荷工况下,凝变湿电技术对粒径小于 $1.0 \mu\text{m}$ 超细颗粒物的脱除效率增大了10%以上,总颗粒物的脱除效率达92.53%。

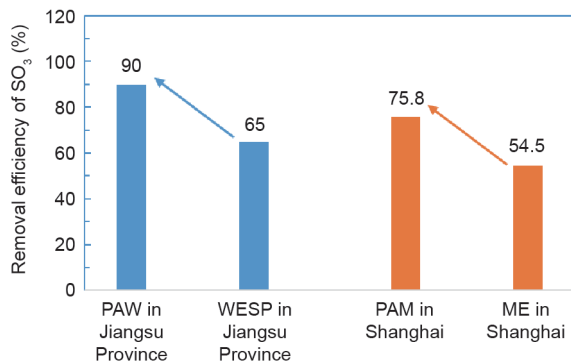


图7. 凝变除湿技术对 SO_3 的脱除效率。

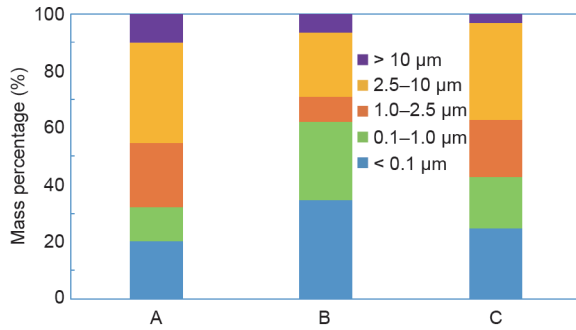


图8. 装置进、出口不同粒径颗粒物质量分数。

表4 凝变湿电技术对不同粒径颗粒物的脱除效率

Particle diameter	Removal efficiency (%)		Efficiency growth rate (%)
	WESP	PAW	
< 0.1 mm	82.42	90.88	10.26
0.1-1.0 mm	75.97	88.69	16.74
1.0-2.5 mm	95.94	93.33	-2.72
2.5-10 mm	93.44	92.80	-0.68
> 10 mm	93.20	97.60	4.72
Total	89.68	92.53	3.18

4. 结论

通过理论分析和工程现场试验, 分析了凝变除湿技术对湿烟气中 SO_3 、水及溶解盐、颗粒物等的脱除效果, 得到结论如下:

(1) 凝变除湿技术对脱硫后饱和湿烟气的平均回收水量大于 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 在烟气温度降低 $1.5 \sim 5.3^\circ\text{C}$ 时, 可回收烟气中 $5\% \sim 20\%$ 的水分, 有效节约水资源; 显著减少水汽排放, 可有效消除湿烟羽现象。

(2) 湿烟气通过凝变湿电装置, 出口烟气液滴中的离子浓度降低了 75% ; 凝变除雾装置出口烟气液滴中的离子浓度降低 65% 。

(3) 凝变除湿技术可促进烟气中气态酸性物质的脱除, 烟气中 SO_3 的脱除效率大于 75% 。

(4) 凝变除湿技术可促进烟气中微细颗粒物的团

聚, 与湿式静电除尘器相比, 凝变湿电复合技术对小于 $1.0 \mu\text{m}$ 超细颗粒物的脱除效率提高了 10% 以上, 总颗粒物的脱除效率达 92.53% 。

Compliance with ethics guidelines

Jianmin Liu, Fahua Zhu, and Xiuyuan Ma declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Reference

- [1] Zhou H. A correct understanding of the wet flue gas emission and white spray phenomenon in coal-fired power plants. *Environ Eng* 2015;33:433-7. Chinese.
- [2] Qiu LC. The research on stack white fume in large utility boiler burning coal. *Boil Technol* 2015;46(3):26-9. Chinese.
- [3] Tan L, Zhao X, Liang Z, Zhang H. Analysis of the white smoke problem in waste incineration power plant. *Environ Sci Technol* 2014;37(120):483-5. Chinese.
- [4] Nie YQ, Kuang XL, Song CH. The formation mechanism of white-smoke in spray drying tower of ceramic factory and solving measures. *Environ Eng* 2006;24(4):71-5. Chinese.
- [5] Zhai SP, Huang LN, Zeng Y. Application of clean flue gas reheat technology in the wet desulfurization. *Environ Eng* 2015;33(8):52-5. Chinese.
- [6] Chen WL. Technical and economic analysis of MGGH technology application in 1000MW unit. *Electr Power Constr* 2014;35(5):103-7. Chinese.
- [7] Zhang R, Xin DD, Sun XF. Application of heat pipe on decreasing temperature of exhaust gas in power plant. *Power Syst Eng* 2011;27(3):23-5. Chinese.
- [8] Ni YC, Zhang DP. Application of hot secondary-air heating desulfurized clean flue gas in 600 MW unit. *Electr Power Sci Eng* 2013;29(8):69-72. Chinese.
- [9] Pan DP, Wu H, Bao JJ, Huang RT, Hu B, Zhang YP, et al. Removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles and SO_3 acid mist from coal-fired power plants. *Proc CSEE* 2016;36(16):4356-62. Chinese.
- [10] Samuelson C. Recovery of water from boiler flue gas [dissertation]. Bethlehem: Lehigh University; 2008.
- [11] Tian L, Han Z, Dong Y, Lv Y, Li Y, Chen X, et al. Review of water recovering technologies from flue gas in coal fired power plant. *Clean Coal Technol* 2017;23(5):105-10. Chinese.
- [12] Li WJ, Shao LY, Zhang DZ, Ro CU, Hu M, Bi X, et al. A review of single aerosol particle studies in the atmosphere of East Asia: morphology, mixing state, source, and heterogeneous reactions. *J Clean Prod* 2016;112:1330-49.
- [13] Zhu LP, Tan HZ, Xiong YY, Hui RT, Xu Y, Zhuang K, et al. Experimental research on wet phase change condensation of fine particle in boiler flue gas. *Sci Technol Eng* 2015;15(1):210-5. Chinese.
- [14] Xiong YY, Tan HZ. Influence of wet phase transition condensate dust removal technology on fine particle removal. *Clean Coal Technol* 2015;21(2):20-4. Chinese.
- [15] Cao RJ, Tan HZ, Xiong YY, Mikulc'ic' H, Vujanovic' M, Wang X, et al. Improving the removal of particles and trace elements from coal-fired power plants by combining a wet phase transition agglomerator with wet electrostatic precipitator. *J Clean Prod* 2017;161:1459-65.
- [16] Zhou S. Heat condensate recovery research and application of gas-fired boiler flue gas [dissertation]. Jinan: Shandong University; 2012. Chinese.
- [17] Yang Z, Zheng C, Chang Q, Wan Y, Wang Y, Gao X, et al. Fine particle migration and collection in a wet electrostatic precipitator. *J Air Waste Manage Assoc* 2017;67(4):498-506.