

# 燃煤脱硫塔除雾器出口烟气浆液滴含量测定方法优化

高德民<sup>1</sup>, 王中伟<sup>2</sup>

(1. 通辽霍林河坑口发电有限责任公司, 内蒙古 通辽 029200; 2. 国家电投集团东北电力有限公司, 辽宁 沈阳 110181)

**摘要:**为准确测量燃煤脱硫系统除雾器出口的浆液滴含量, 分析现有除雾器出口浆液滴含量测定方法的优劣, 对国标测定方法进行优化, 提出了一种新的可实现等速采样的浆液滴取样方法和简化的浆液滴浓度测定计算方法, 并进行了对比试验。试验结果表明, 本文提出的测量浆液滴浓度的取样方法, 无需对捕集器进行干燥和称重即可计算得到浆液滴浓度, 可简化操作步骤, 减少测量误差; 采用国标的浆液滴捕集法存在较大的逃逸率, 1号机组国标浆液滴捕集法的浆液滴逃逸率为39.84%, 2号机组的浆液滴逃逸率为41.41%, 平均逃逸率40.60%, 本文提出的浆液滴取样分析方法可更精确地测量除雾器出口的净烟气携带的浆液滴含量。

**关键词:** 脱硫塔; 除雾器; 出口烟气; 浆液滴; 国标法; 逃逸率

中图分类号: X831

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2018)06-0112-05

## Optimization of determination method for slurry droplets carried by coal-fired flue gas after demister

GAO Demin<sup>1</sup>, WANG Zhongwei<sup>2</sup>

(1. Tongliao Huolinhe Pithead Power Generation Co., Ltd., Tongliao 029200, China;

2. SPIC Northeast Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110181, China)

**Abstract:** In order to measure the slurry droplet content at the outlet of demister in desulfurization system more accurately, the advantages and disadvantages of determination method for slurry droplets at the outlet of demister were analyzed, and the national standard slurry droplet sampling method was optimized. An improved slurry droplets sampling method was proposed, which can realize equal-speed velocity sampling and is a simplified method for measuring and calculating the concentration of slurry droplets. Furthermore, comparative experiments were carried out. The experimental results show that there is a large escape rate in the national standard slurry droplet trapping method. Compared with the improved slurry droplet sampling method, the escape rates of the national standard slurry droplet sampling method are 39.84% and 41.41% in Unit 1 and 2 respectively, and the average escape rate is 40.6%. The improved slurry droplet sampling analysis method can measure the slurry droplets entrained by purified flue gas after the demister more accurately, and it can provide the basis for the performance evaluation of desulfurization system.

**Key words:** slurry droplet; demister; national standard method; optimization; escape rate

## 0 引 言

石灰石-石膏湿法脱硫技术是现有脱硫技术中

工艺最成熟、运行最可靠、工程应用最广泛的脱硫技术, 我国85%以上的电厂烟气脱硫均采用该技术<sup>[1]</sup>。由于脱硫后的净烟气温度低, 烟气排入大气

收稿日期: 2018-05-27; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18052701

作者简介: 高德民(1963—), 男, 内蒙古通辽人, 高级工程师, 主要从事火电厂电气维护与检修工作。E-mail: 285185732@qq.com

引用格式: 高德民, 王中伟. 燃煤脱硫塔除雾器出口烟气浆液滴含量测定方法优化[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(6): 112-116.

GAO Demin, WANG Zhongwei. Optimization of the national standard method for determination of slurry droplets carried by coal-fired flue gas after demister[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 112-116.



移动阅读

后温度进一步降低,气态水凝结成液态饱和水小液滴降落,小液滴中含有石膏浆液及固体颗粒(石膏雨),石膏雨不仅对烟道及烟囱具有腐蚀性,对环境也会造成污染<sup>[2-5]</sup>,因此,控制石膏雨的形成是燃煤电厂急需重点解决的问题。“石膏雨”中的石膏浆液主要来源于脱硫吸收塔喷淋层喷嘴雾化后的细小液滴<sup>[6]</sup>,这些小液滴随净烟气进入后续管道,因而必须在脱硫塔出口处安装除雾设备。若除雾器设计不合理(除雾器除雾面积偏小、叶片间距过大、除雾器的极限流速选择不合理等<sup>[7-8]</sup>),除雾效果无法满足 JB/T 10989—2010《湿法烟气脱硫装置专用设备除雾器》要求脱硫系统正常运行时,在除雾器第2级出口烟气中雾滴携带量不能超过  $75 \text{ mg/m}^3$ (标况,干态,下同),从而产生“石膏雨”现象。此外,浆液液滴中含有石膏等固体细颗粒物,占脱硫浆液含固量的 20%~40%,且细颗粒物排放浓度随脱硫净烟气中液滴夹带量的增加而增加<sup>[9]</sup>。周道斌等<sup>[10]</sup>研究指出,通过浆液滴排放的颗粒物占总颗粒物排放比率的平均值为 63.1%,通过脱硫系统浆液滴排放的颗粒物在超低排放中占比较大,为了满足超低排放的要求,一般要求除雾器出口浆液滴含量不能超过  $35 \text{ mg/m}^3$ 。为准确测量除雾器出口烟气中浆液滴含量,本文研究了现有的浆液滴测量方法的优缺点,以此为基础,提出了一种新的浆液滴取样测量方法,并进行对比试验,以确定与国标法的差异,并将国标方法中的数据处理分析方法进行简化。

## 1 浆液滴测量方法

浆液滴含量的测定包括现场采样和实验室分析计算 2 部分,GB/T 21508—2008《燃煤烟气脱硫设备性能测试方法》<sup>[11]</sup>中,除雾器出口烟气浆液滴含量测定是利用安装在除雾器出口的采样装置(图 1)对烟气进行采样,烟气等速通过液滴捕集器,烟气中大于一定粒径(约  $3 \mu\text{m}$ )的液滴在重力和惯性力作用下附着在液滴捕集器的内壁上,采样结束后记录采集的烟气量,冲洗液滴捕集器内部后称重;待液滴捕集器充分干燥后再称重,干燥前后的质量差即为液滴中水的质量(包括脱硫浆液滴的含水量和烟道中冷凝水滴的质量),但冷凝水滴中不含镁离子,需测定液滴捕集器中的镁离子含量,并根据脱硫塔浆液中的镁离子含量,计算得到总液滴中脱硫浆液携带的水含量,根据脱硫塔浆液中固液比得到除雾器

出口烟气携带浆液滴的质量浓度。国标法中,为实现等速烟气采样,将除雾器出口测量截面进行网格划分,利用标准皮托管测量每个网格测试点的烟气流速,得到烟道截面平均流速,以确定取样速度。该方法属于预测流速法,由于液滴取样时间较长且除雾器出口烟道截面积大,烟气流量波动大,所以预测流速方法无法真正实现等速测量。樊雄伟<sup>[12]</sup>利用等速烟尘采样装置,将国标中的液滴捕集器进行重新设计,使液滴捕集器入口截面与烟尘采样枪入口截面相同,并将液滴捕集器接于烟尘采样枪入口,从而实现浆液滴自动跟踪烟气流速等速采样。

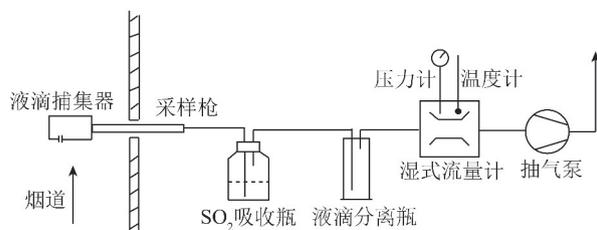


图 1 国标法液滴采样系统示意

Fig. 1 Diagram of the standard droplet sampling system

潘光等<sup>[13]</sup>对国标取样方法进行了修正,在烟道外烟气捕集器后加设冷凝系统,并提出改进滴定液浓度的分析方法,与国标取样分析方法相比,同一工况下净烟气的浆液液滴含量分别为  $12.87$  和  $10.16 \text{ mg/Nm}^3$ ,相对误差 26.67%。可见,单独采用国标方法测浆液滴含量,液滴捕集并不完全。此外,王珩等<sup>[14]</sup>研究表明,WFGD 系统出口处干燥后的颗粒物中除去飞灰颗粒外,还包含约 7.9% 的石膏颗粒和 47.5% 的石灰石颗粒,其粒径分布范围为  $0.4 \sim 10 \mu\text{m}$ ,且呈现双峰性,峰值分别出现在  $0.9$  和  $2.5 \mu\text{m}$  处。按照浆液滴中含固体物 50% 估算,可得浆液滴的粒径主要分布范围为  $0.6 \sim 5.0 \mu\text{m}$ ,峰值粒径为  $1.13$  和  $3.15 \mu\text{m}$ ,平均粒径约为  $2 \mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>。国标法测量浆液滴浓度时,只能捕集烟气中粒径大于  $3 \mu\text{m}$  的液滴,而浆液滴的平均粒径为  $2 \mu\text{m}$ ,说明国标液滴捕集法可能存在较大的逃逸率问题。

本文采用文献[13]设计的液滴捕集系统进行浆液滴含量试验,试验机组为某热电厂 300 MW 燃煤机组,浆液滴测量计算方法采用国标法,采样结束后,分别测试液滴捕集器中和冷凝瓶中的浆液滴含量,二者之和为浆液滴总浓度,结果见表 1,可见国标液滴捕集法对浆液滴的捕集不完全,液滴捕集器存在约 50% 逃逸率。

表1 国标法浆液滴逃逸率

Table 1 Droplet escape rate of national standard method

项目	数值
机组负荷/MW	199
液滴捕集器中镁离子总质量/mg	0.077
冷凝水中镁离子总质量/mg	0.076 25
浆液镁离子浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	937
6%氧烟气体积(干态)/Nm <sup>3</sup>	557.6
液滴捕集器中镁离子折算的浆液滴浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	160.4
冷凝水镁离子折算的浆液滴浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	158.9
浆液滴总浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	319.3
逃逸率/%	49.8

文献[13]提出的改进浆液滴测量方法,虽能更准确测量浆液滴含量,但其采样过程中采用预测流速法,无法实现浆液滴自动跟踪烟气流速等速采样;另外浆液滴取样时,因未进行管道保温,除了需要冲洗称重捕集器、冷凝管和冷凝瓶外,还需要冲洗称重捕集器与冷凝管之间的连接管道,操作繁琐,且易出现测量误差。为此,本文提出一种新的浆液滴取样测量方法:首先将捕集器与烟尘取样装置组合,实现浆液滴自动跟踪烟气流速等速采样;将捕集器与冷凝管之间的管道进行保温伴热,使管道内的温度与烟道内烟气温度保持一致,以避免管道的冲洗称重,简化采样操作,减小测量误差。

新的浆液滴取样测量方法可将浆液滴全部收集起来,不存在浆液滴逃逸问题。本文对新的浆液滴取样测量方法进行试验,并与国标取样法对比,确定国标取样方法的逃逸率;并简化国标中的数据处理方法。

## 2 试验条件和方法

### 2.1 试验条件

某热电厂2×300 MW 燃煤机组,其烟气脱硫工艺采用湿法脱硫,在脱硫塔出口设置除雾器,在除雾器出口处的竖直管段上,采用本文提出的浆液滴取样测量方法和国标取样方法分别进行采样和数据处理分析。

### 2.2 试验方法

本文提出的浆液滴取样方法的主要仪器有:WJ-60B 烟尘采样仪、取样枪、蛇形冷凝管、循环冷凝泵、按国标定制的液滴捕集器。烟尘采样仪包含温度传感器、含湿量传感器、SO<sub>2</sub> 吸收瓶和液滴分离

瓶,取样枪和液滴捕集器直接连接(图2)。烟尘取样枪和连接管以及取样枪外面均设有加热保温,以保证管道内与烟道内温度相同,避免烟气中水蒸汽在管道上凝结。与文献[13]所用采样系统相比,本文提出的方法可实现自动跟踪烟气流速等速采样,且仅需洗涤收集液滴捕集器、蛇形冷凝管和冷凝瓶中的液滴,减少了测量步序和测量误差。

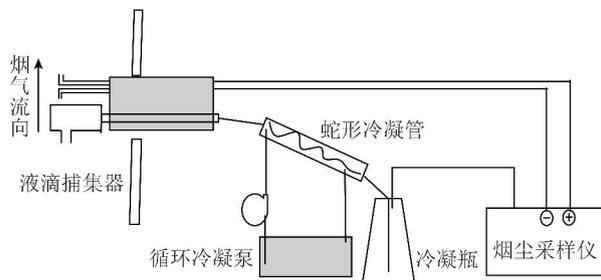


图2 新型液滴采样系统

Fig. 2 Schematic diagram of a new droplet sampling system

液滴中镁离子浓度采用 ICP-AES(原子发射光谱法)测试仪,根据原子的特征发射光谱测定物质的结构和化学成分。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 采样及数据处理

烟气经浆液滴捕集器进行一、二级捕集后,在蛇形冷凝管进行三级捕集,最终液滴被捕集至液滴捕集器内壁、蛇形冷凝管内壁及冷凝瓶中。根据 Mg<sup>2+</sup> 示踪法和质量平衡原理,液滴含量分析步骤:

1) 采样前,用除盐水冲洗捕集器,在 105 °C 下干燥 2 h,完全冷却后置于干燥器中待用。

2) 采样后,记录采样烟气体积为  $V$ 。将液滴捕集器从烟道中取出,立即用胶带密封采样口,用纯净水冲洗捕集器外表面,用干棉纱擦拭后称重,质量为  $G_1$ ,将冷凝管和冷凝瓶用干棉纱擦拭后称重,质量为  $G'_1$ 。

3) 用除盐水冲洗捕集器内表面,将冲洗液装在采样瓶中。捕集器在 105 °C 下干燥 2 h,冷却后称重,质量为  $G_2$ ,冷凝管和冷凝瓶同样干燥冷却后称重,记为  $G'_2$ 。

$$G_y = (G_1 - G_2) + (G'_1 - G'_2) \quad (1)$$

式中, $G_y$  为捕集器、冷凝管和冷凝瓶采样前、后的质量差(采集液滴总质量),mg。

4) 采样中采集吸收塔浆液,测定 Mg<sup>2+</sup> 浓度。

5) 将捕集器、冷凝管和冷凝瓶冲洗液用定容瓶

定容后, 体积为  $V_1$ , 测定  $Mg^{2+}$  浓度为  $C_1$  (mg/L), 吸收塔浆液  $Mg^{2+}$  浓度为  $C_2$  (mg/L), 则

$$C_{w0} = \frac{G_y C_1 V_1}{V} \frac{1}{G_y C_2} = \frac{C_1 V_1 \rho}{VC_2} \quad (2)$$

式中,  $C_{w0}$  为烟气中水滴浓度,  $mg/m^3$  (标态、干烟气、6%  $O_2$ );  $\rho$  为水的密度, 取 1 000 mg/L。

6) 吸收塔中浆液含固量为  $C_x$ , 则

$$C = C_{w0} \frac{100}{100 - C_x} = \frac{C_1 V_1 \rho}{VC_2} \frac{100}{100 - C_x} \quad (3)$$

式中,  $C$  为浆液滴浓度,  $mg/m^3$  (标态、干烟气、6%  $O_2$ )。

可见, 仅需确定采样烟气体积、冲洗液定容后的体积及其  $Mg^{2+}$  质量浓度、脱硫吸收塔浆液中  $Mg^{2+}$  质量浓度和吸收塔中浆液含固量, 即可计算得到浆液滴浓度。而采用 GB/T 21508—2008 国标法进行浆液滴测量计算时, 需采样前、后捕集器的质量, 一般捕集器的质量约为 30 g, 而采样后捕集器中液滴质量仅在 0.1 g 左右, 易产生较大的测量误差。因而采用式(3) 计算得到浆液滴浓度, 可避免因称重引

起的测量误差。

采用国标法测量浆液滴浓度时, 需预测烟气流速, 即需对测量截面进行网格划分, 用标准皮托管测定各点的烟气流速, 从而确定捕集器抽气泵的抽气速度。本文对此进行了改进, 将捕集器与烟尘取样装置组合, 实现浆液滴自动跟踪烟气流速等速采样, 简化了测量操作步骤。

### 3.2 数据分析

在某热电厂 2×300 MW 燃煤 1、2 号机组进行试验, 其结果见表 2。可知, 1 号机组负荷为 230、260 MW 时, 采用国标法取样测得的浆液滴质量浓度分别为 22.02、20.46  $mg/Nm^3$ , 捕集器的浆液滴平均逃逸率为 39.84%; 采用本文提出的浆液滴采样系统取样, 测得的浆液滴质量浓度分别为 37.09、33.57  $mg/Nm^3$ 。2 号机组负荷为 200、270 MW 时, 采用国标法测得的浆液滴质量浓度分别为 27.94、13.89  $mg/Nm^3$ , 浆液滴平均逃逸率为 41.41%; 采用本文提出的取样方法测得的浆液滴质量浓度分别为 42.47、27.03  $mg/Nm^3$ 。2 台机组的国标法取样测得的浆液滴平均逃逸率相差不大, 平均为 40.6%。

表 2 不同机组负荷下国标取样法和改进的浆液滴取样法对比

Table 2 Comparison of national standard sampling method and modified slurry droplet sampling method under different unit load

机组	负荷/MW	捕集方法	$Mg^{2+}$ 质量浓度/( $mg \cdot L^{-1}$ )		浆液含固量/%	烟气体积/( $DNm^3 \cdot h^{-1}$ )	浆液滴总浓度/( $mg \cdot Nm^{-3}$ )	逃逸率/%	平均逃逸率/%
			液滴(定容 250 mL)	原浆液					
1 号机组	230	国标法	0.068	2 275.7	7.8	368.00	22.02	40.64	39.84
	260		0.110	2 737.2	8.8	538.32	20.46	39.04	
	230	本文浆液	0.118	2 399.0	8.6	362.76	37.09	—	—
	260	滴取样法	0.145	2 505.8	8.8	472.53	33.57	—	—
机组	负荷/MW	捕集方法	$Mg^{2+}$ 质量浓度/( $mg \cdot L^{-1}$ )		浆液含固量/%	烟气体积/( $DNm^3 \cdot h^{-1}$ )	浆液滴总浓度/( $mg \cdot Nm^{-3}$ )	逃逸率/%	平均逃逸率/%
			液滴(定容 250 mL)	原浆液					
2 号机组	270	国标法	0.140	2 737.2	10.2	509.60	27.94	34.21	41.41
	200		0.054	3 057.4	8.3	346.63	13.89	48.61	
	270	本文浆液	0.167	2 225.0	10.1	491.41	42.47	—	—
	200	滴取样法	0.098	2 883.5	8.4	343.17	27.03	—	—

## 4 结 论

1) 本文提出的测量浆液滴浓度的取样方法, 无需对捕集器进行干燥和称重即可计算得到浆液滴浓度, 可简化操作步骤, 减少测量误差。

2) 采用国标法测定的浆液滴浓度存在较大的浆液滴逃逸率, 而本文提出的浆液滴取样方法不存

在浆液滴逃逸率, 使除雾器出口浆液滴浓度的测定结果更准确。与新的浆液滴取样方法相比, 国标法测得的浆液滴平均逃逸率为 40.60%。

3) 测量取样时, 国标法与本文提出的浆液滴取样法取样时具有 1 h 的时间差, 故浆液中  $Mg^{2+}$  浓度不一致, 因而 2 种取样方法应在同一时间取样, 以保证工况完全相同。

## 参考文献 (References):

- [1] 曾庭华,杨华,廖永进,等. 湿法烟气脱硫系统的调试、实验及运行[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [2] 郭彦鹏,潘丹萍,杨林军. 湿法烟气脱硫中石膏雨的形成及其控制措施[J]. 中国电力,2011,47(3):152-154.  
GUO Yanpeng, PAN Danpin, YANG Linjun. Formation and control of gypsum rain in wet flue gas desulfurization[J]. Electric Power, 2011, 47(3):152-154.
- [3] 李春雨. 火电厂湿法烟气脱硫中“石膏雨”问题分析[J]. 能源工程,2012(1):43-47.  
LI Chunyu. Analysis for gypsum rain of wet flue gas desulfurization system[J]. Energy Engineering,2012(1):43-47.
- [4] 郭长仕. 石灰石-石膏湿法脱硫“石膏雨”现象原因分析及治理措施[J]. 环境工程,2012,30(2):221-223.  
GUO Changshi. The treatment measures and cause analysis for gypsum rain of wet limestone-gypsum FGD system[J]. Environmental Engineering,2012,30(2):221-223.
- [5] 周洪光,李延兵. 火电厂湿法脱硫石膏雨和白雾治理措施及效果分析[J]. 电力科技与环保,2014,30(6):34-37.  
ZHOU Hongguang, LI Yanbing. Control measures and effect of gypsum rain and mist in thermal power plant with FGD[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2014, 30(6):34-37.
- [6] 单永华,张永玉,马晓军. 脱硫系统湿烟囱石膏雨成因分析与治理研究[J]. 能源与节能,2016(7):111-113.  
SHAN Yonghua, ZHANG Yongyu, MA Xiaojun. Analysis and countermeasures on the cause of gypsum rain in wet stack of desulfurization system[J]. Energy and Energy Conservation, 2016(7):111-113.
- [7] 张泽玉,任庚坡,严红,等. “烟塔合一”湿法脱硫工艺中烟囱飘雨的成因分析[J]. 上海节能,2017(10):602-607.  
ZHANG Zeyu, REN Gengpo, YAN Hong, et al. Analysis on chimney raining from ‘smoke tower into one’ wet method desulphurization process[J]. Shanghai Energy Conservation, 2017(10):602-607.
- [8] 杨治中,郭士义. 火电厂石灰石-石膏湿法脱硫除雾器的研究及应用进展[J]. 能源环境保护,2014,28(6):11-14.  
YANG Zhizhong, GUO Shiyi. A review on the research and application of demister in wet limestone-gypsum flue gas denitrification system at coal-fired power plant[J]. Energy Environmental Protection, 2014, 28(6):11-14.
- [9] 侯大伟,潘丹萍,周心澄,等. 石灰石-石膏法脱硫过程中浆液雾化夹带与细颗粒排放的关系[J]. 化工学报,2018,69(4):1714-1722.  
HOU Dawei, PAN Danping, ZHOU Xincheng, et al. Relationship between fine particle emission and droplets during limestone-gypsum WFGD process[J]. CIESC Journal, 2018, 69(4):1714-1722.
- [10] 周道斌,易玉萍,张文杰,等. 基于浆液滴对燃煤电厂超低排放颗粒物的特征分析研究[J]. 电力科技与环保,2018,34(2):14-16.  
ZHOU Daobin, YI Yuping, ZHANG Wenjie, et al. Ultra-low emission particle characteristics from coal-fired power plant base on droplet[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(2):14-16.
- [11] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 燃煤烟气脱硫设备性能测试方法:GB/T 21508—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008:21-23.
- [12] 樊雄伟. 用烟尘测试法测定除雾器出口烟气中浆液滴含量[J]. 广西电力,2009(4):54-55.  
FAN Xiongwei. Measurement of droplet quantity in the outlet gas of demister based on smoke and dust measurement method[J]. Guangxi Electric Power, 2009(4):54-55.
- [13] 潘光,常景彩,马春元,等. 脱硫后净烟气携带浆液量监测的实验研究[J]. 环境工程学报,2011,5(4):876-879.  
PAN Guang, CHANG Jingcai, MA Chunyuan, et al. Research on measurement method of slurry droplets carried by coal-fired flue gas after WFGD[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(4):876-879.
- [14] 王琿,宋蕾,姚强,等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(5):1-7.  
WANG Hui, SONG Qiang, YAO Qiang, et al. Experimental study on removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles from a coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5):1-7.
- [15] 赵华峰. 数字显微全息测量脱硫浆液滴试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.