

# 线-板式电除尘器中 RS 芒刺电极放电特性研究

李卓函, 贺超, 安毅, 邵诚

(大连理工大学电子信息与电气工程学部, 辽宁省 大连市 116023)

## Discharge Characteristic Research for the RS-type Barbed Electrode in Wire-plate Electrostatic Precipitator

LI Zhuohan, HE Chao, AN Yi, SHAO Cheng

(Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** It is difficult to calculate the electric field distribution in the electrostatic precipitator with complex electrodes, such as the barbed electrodes. In order to establish the reasonable geometric models of these electrodes, the study of the discharge characteristic is very necessary. This paper established an experimental platform with industrial high voltage source to study the discharge characteristics of the factual RS-type barbed electrodes. The locations where the corona discharge occurs were observed and the voltage-current characteristics, the current density distributions on the collection plate were measured. By using the hemisphere to replace the tip portion of the barbed electrode, the electric field intensity distribution on the surface of the electrode was analyzed numerically. The research results show that the corona discharge mainly occurs on the tip portion of the RS-type barbed electrode. The slice portion of the electrode can produce the discharge in the absence of the tip portion, and the tube portion of the electrode can also produce the discharge in the absence of both the tip portion and the slice portion. There is a clear corresponding relationship between the current density distribution on the collecting plate and the arrangement of the tip on the electrode. The parts closer to the electrode tips on the collection plate have higher current density. In addition, the current density distribution on the collecting plate is not uniform along the longitudinal direction of the RS-type barbed electrode.

**KEY WORDS:** electrostatic precipitator; RS-type barbed electrode; discharge characteristic; electrostatic field

**摘要:** 线-板式电除尘器中管状芒刺类电极几何形状复杂, 其电场特性的数值计算面临几何建模的困难, 而对电极放电

特性的研究是建立合理几何模型的基础。针对实际 RS 芒刺电极, 建立了实验平台, 对电极放电特性进行了实验研究, 观察确定了电极的放电部位, 测量了电场伏安特性和极板电流密度分布, 对比分析了电极不同部位的放电情况; 利用半球面代替芒刺尖端, 通过数值方法获得了电极表面静电场分布。研究结果表明, RS 芒刺电极的放电位置主要集中在芒刺尖端区域; 无芒刺尖端时, 芒刺片会放电; 无芒刺片时, 芒刺管将放电; 而极板电流密度分布与芒刺位置有显著对应关系, 离芒刺越近, 极板电流密度越大, 且沿 RS 电极长度方向, 极板电流密度分布并不均匀。

**关键词:** 电除尘器; RS 芒刺电极; 放电特性; 静电场

## 0 引言

电除尘器作为工业烟气净化设备, 已广泛应用于火电厂燃煤锅炉、钢厂烧结机、水泥厂回转窑等装备的生产过程中。在电除尘器的放电极和收尘极之间施加负高压, 可产生电晕放电, 释放出大量电子和负离子, 在电场和电荷扩散两方面作用下, 使粉尘荷电, 荷电后的粉尘颗粒受电场力作用, 向收尘极运动并被捕集<sup>[1-4]</sup>。粉尘颗粒的荷电和捕集能力是决定收尘效率的关键因素, 其主要取决于除尘器两极之间的电场特性, 即电晕场强、空间电荷密度等。而电场特性又受供电电压、放电极和收尘极的几何形状、放电极之间的同极距、放电极与收尘极之间的异极距、温度、压力、粉尘颗粒的性质等多种因素影响<sup>[5-6]</sup>。其中, 放电极的几何形状和尺寸对电场特性的影响仅次于电压<sup>[7-9]</sup>。

相关文献对不同放电极所对应的电场特性进行了大量理论研究和数值计算。目前, 针对圆形放电极所对应的电场特性, 已能获得较好的解析结果<sup>[10-12]</sup>和数值结果<sup>[13-15]</sup>。其中, H.J. White 给出了

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61074020).

圆线-管式电极场强分布的解析计算式<sup>[10]</sup>；G. Cooperman 将圆线-板式电极的异间距等效为圆线-管式电极中的管半径，从而给出了圆线-板式电极静电场的解析计算式，并进一步预测了电场的伏安特性<sup>[12]</sup>；龙等<sup>[14]</sup>利用非结构化网格的有限体积元方法计算了圆线-板式电极中的二维电场特性。而对于非圆形放电极，郝吉明等<sup>[7,16]</sup>提出直径当量数的概念完成了星型线、锯齿线电场分布的解析计算，且利用不等线径、不等线距圆线组合的方法获得了芒刺线的电场分布，在非圆型电极的电场特性计算方面取得了开创性成果，但由于非圆形电极几何形状较为复杂，要获得其对应电场特性的完整解析结果非常困难。目前，研究人员仍主要通过有限差分、有限元、有限体积元等数值方法对电场特性进行近似计算<sup>[17-20]</sup>。对于锯齿线和星型线所对应的电场特性，由于能够建立较为准确的几何模型，采用数值方法已能获得比较可靠的结果。其中，N. Neimarlijia 等<sup>[17]</sup>计算了针-板式电极的三维电场特性；N. Farnoosh 等<sup>[18]</sup>利用 FE-FCT 方法对锯齿-板式电极中的收尘过程进行了三维仿真。

然而，对于几何形状更为复杂的管状芒刺类电极，如 BS 芒刺电极、RS 芒刺电极，在数值计算时却仍然面临着电晕部位不明确、几何模型复杂、芒刺尖端几何特性难以准确描述、计算网格数量庞大等困难，因此在计算前对该类电极进行合理的几何建模非常必要，而合理的建模需要对电极上的放电部位及不同部位的放电特性有着深入了解。

本文针对实际使用的 RS 芒刺电极，建立了实验台，并对该电极的放电特性进行了实验研究，观察确定了电极上的放电位置，并比较了电极不同部位对应的电场伏安特性和极板电流密度分布。此外，分析了该电极表面的静电场分布，研究结果可以为 RS 芒刺电极电晕电场的精确计算提供基础数据。

## 1 实验系统

以实际电除尘器的机械尺寸为参考，针对 RS 芒刺电极建立了电除尘器模型，采用实际的单相工频高压电源为电除尘器模型提供负高压，实验系统如图 1 所示。

该系统主要包括：电除尘器模型、高压控制柜、整流变压器、分压器、电流模块、上位机等。高压控制柜与整流变压器是单相工频高压电源的 2 个主要组成部分，高压控制柜从电网输入单相交流 380 V 电压，经柜内反并联可控硅调压后，输出 0~

380 V 交流电压到整流变压器一次侧绕组，经整流变压器升压、整流后在二次侧输出 0~72 kV 直流负高压，为电除尘器模型供电；由于实际电除尘器为容性负载，为模拟实际工况，该实验系统在整流变压器输出端与大地之间连接了 72 kΩ 电阻负载和滤波电容。电除尘器模型主要由放电极(极线)和收尘极(极板)组成，放电极直接与整流变压器输出端连接，收尘极的右侧极板经电流表连接到大地，左侧极板则被划分为多个单元格，用于极板电流密度分布的测量，相对于 Tassicker 边界探针法<sup>[19]</sup>，采用极板分割法测量电流密度分布，操作较为简便，且更容易获得同一时刻下极板不同部位的电流密度值。左右两侧极板整体尺寸相同，长度为 480 mm，高度为 500 mm，两极板之间的极距为 420 mm。右侧极板为一整张钢板，用于测量电场伏安特性；左侧极板被划分为 16 行(编号：A~P)和 16 列(编号：1~16)，共 256 个单元格，每个单元格的尺寸为 30 mm×31.25 mm。为保证单元格划分的均匀性，特制作了一张印刷电路板作为左侧极板，电路板上每个单元格内面向放电极一侧进行敷铜，每块敷铜的尺寸为 29 mm×30.25 mm，其通过直径为 0.5 mm 的过孔与背部的接线柱相连，相邻敷铜上、下、左、右间距均为 1 mm，所有单元格内敷铜面积之和即为左侧极板总收尘面积，容易计算，左侧极板总收尘面积较右侧极板总收尘面积减少约 6.4%，电除尘器模型实物如图 2 所示。

放电极位于电除尘器模型的中心位置，其高度与极板高度相同，顶部通过铜线与整流变压器输出端连接，底部固定在绝缘瓷瓶上，为防止其顶部和底部连接点位置的放电对实验结果造成影响，特将聚四氟乙烯材料加工成绝缘管，套接在连接点外部，以抑制其放电。

实验时，施加到放电极上的 0~72 kV 直流负高压(二次电压  $U_2$ )经分压器衰减 10000 倍后，由电压表的 20 V 直流档进行测量；右侧极板总电流直接由电流表进行测量；左侧极板上每个单元格的电流通过两个自制电流模块进行测量，每个电流模块具有 8 路测量通道，通过切换开关，每次将左侧极板每一行的 16 个单元格连接到两个电流模块相应测量通道的负端，而每路测量通道的正端与大地连接，未被测量的单元格则通过切换开关全部连接到大地；通过开关的不断切换，可依次完成左侧极板全部单元格电流的测量。电流模块和高压控制柜通过 RS485 总线与上位机通信，上位机记录电流模块

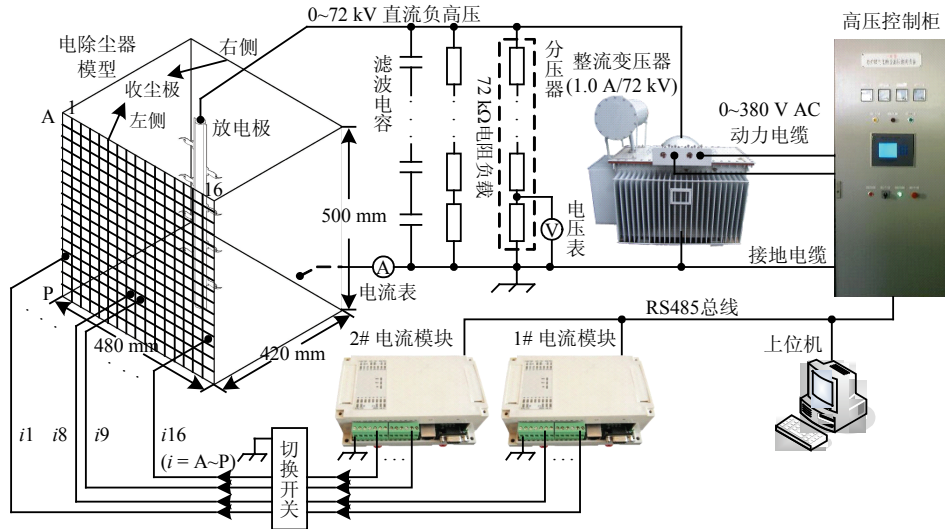


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

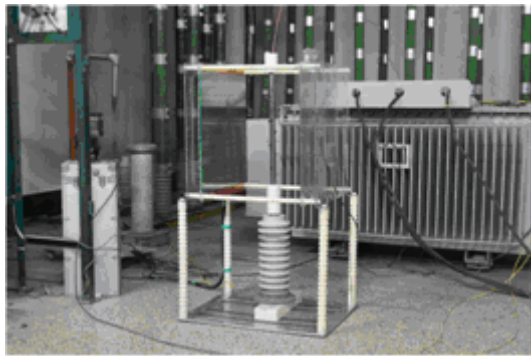


图 2 电除尘器模型实物

Fig. 2 Object of electrostatic precipitator model

的测量数据，并控制高压控制柜实现对二次电压的调节，实验中所用仪器及设备如表 1 所示。

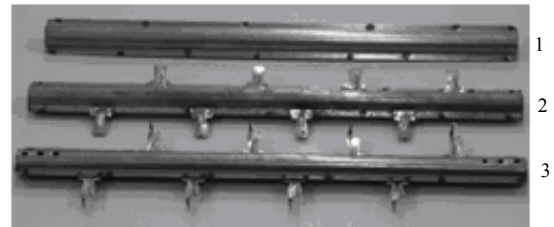
表 1 测试仪器及设备

Tab.1 Instrument and equipment list for experiments

序号	仪器及设备	型号及描述	厂商
1	高压控制柜	GGAJ02-JHB-1.0A/72 kV	大连嘉禾
2	整流变压器	GGAJ02-1.0A/72 kV	大连嘉禾
3	放电极	RS 芒刺电极	江苏丰达
4	分压器	FRC-200 kV	上海苏特
5	电压表	UT56 4-1/2 bits	UNI-T
6	电流表	8845A 6-1/2 bits	FLUKE
7	电流模块	DZH100	自制

实验中，对 RS 芒刺电极、去掉芒刺尖端的电极(芒刺片电极)、无芒刺片的电极(芒刺管电极)的电晕放电情况进行了观察，并分别测量了其对应的电场伏安特性和极板电流密度分布。三种电极的实物如图 3 所示。

图 3 中，RS 芒刺电极两侧各布置了 4 个芒刺片，两侧芒刺片相互交错排布，每个芒刺片上具有 2 个芒刺尖端，分别指向左、右两侧极板。将 RS



1—芒刺管电极；2—芒刺片电极；3—RS 芒刺电极。

图 3 放电极实物图

Fig. 3 Objects of discharge electrodes

芒刺电极上所有芒刺尖端剪掉，便得到芒刺片电极，而去掉所有芒刺尖端和芒刺片，剩余部分即为芒刺管电极。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 电晕放电

3 种电极的电晕放电情况如图 4 所示。图 4(a)、(b)、(c)是在二次电压分别为 60.42、58.80、59.03 kV 条件下拍摄的。对于 RS 芒刺电极，所有芒刺尖端均出现强烈且稳定的电晕亮光，如图 4(a)所示，而所有芒刺片上仅发现一处出现了相对较弱的电晕亮光，芒刺管部分则未见电晕亮光出现；可见，RS 电极上芒刺尖端处的电晕放电最为强烈，而芒刺片上的电晕亮光应该是其表面不光滑造成的电晕放电。当去掉芒刺尖端后，在所有芒刺片顶部边沿处均出现多点电晕亮光，而芒刺管部分未发现电晕亮光出现，如图 4(b)所示。对于芒刺管电极，电晕亮光出现在两侧薄边处，如图 4(c)所示，其中多数位置出现较弱的电晕亮光，而少数位置出现了较为明显的电晕亮光，电晕亮光的不均匀应为芒刺管电极表面光滑度不一致造成的，芒刺管电极整体应表现

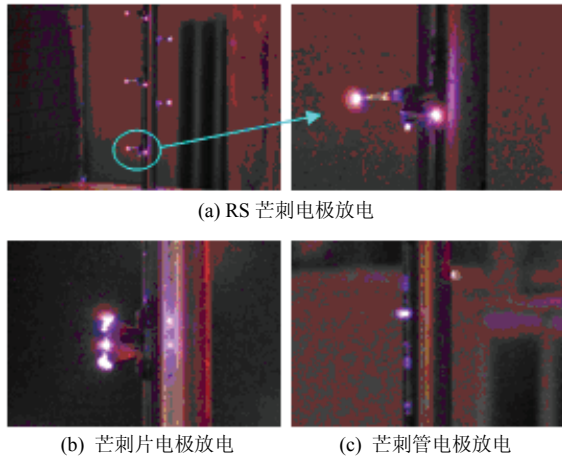


图4 电晕放电图

Fig. 4 Corona discharge photo

为两侧薄边处具有较弱的电晕放电。

从图4可以看出,对于RS芒刺电极,电晕放电主要集中在芒刺尖端,当芒刺尖端存在时,芒刺片和芒刺管部分不会出现明显的电晕放电;但当去掉芒刺尖端时,芒刺片会产生电晕放电;当去掉芒刺尖端和芒刺片时,芒刺管也会发生放电。

### 2.2 伏安特性

针对三种电极,分别测量了其对应的电场伏安特性,测试时,平均环境温度为18℃,平均环境湿度为42%,测试结果经3次重复实验后取平均,如图5所示。

图5(a)中,曲线1~3分别代表RS芒刺电极、芒刺片电极、芒刺管电极伏安特性测量时的升压曲线,每条曲线采样18个数据点;曲线4对应RS芒刺电极电流密度测量时的升压曲线,该曲线具有15个数据点,较曲线1,缺少第9、12、18三个数据点;同一采样点对应相同可控硅导通角,由于高压控制柜的控制误差以及电网波动等因素的影响,使得在测试三种电极的伏安特性时,相同导通角下对

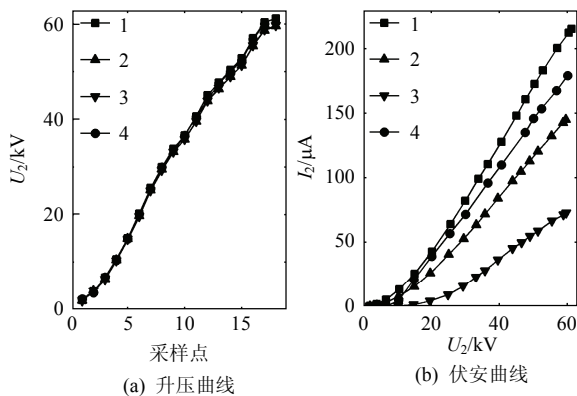


图5 升压及伏安特性曲线

Fig. 5 Curves of boosting secondary voltage and voltage-current characteristic

应的二次电压  $U_2$  表现出微小的差别,但整体而言,对于同一采样点,其对应的二次电压可以看作是一致的。

图5(b)中,曲线1~3分别代表RS芒刺电极、芒刺片电极、芒刺管电极对应的电场伏安特性,3条曲线对应的二次电流  $I_2$  均为右侧极板总电流;曲线4代表RS芒刺电极电场伏安特性,但其对应的二次电流  $I_2$  是左侧极板所有单元格电流之和。可以看出,4条曲线均呈现抛物线状,且在相同的二次电压下,RS芒刺电极对应极板电流最大,芒刺片电极次之,芒刺管电极对应极板电流最小。对比曲线1与曲线4可知,在相同的二次电压下,左侧极板所有单元格电流之和小于右侧极板总电流,且最大误差为16.6%,考虑左侧极板各单元格之间有1mm间隔,其总敷铜面积较右侧极板总面积减少6.4%,因此左侧极板所有单元格电流之和小于右侧极板总电流是合理的,实际最大测量误差应为10.2%;测量时,左侧极板各单元格电流通过自制的电流模块测量,右侧极板的总电流通过六位半万用表测量,两种方式所测得的结果保持了基本一致,这表明实验所获得的电场伏安特性是有效的。

伏安特性测量结果表明:RS电极芒刺尖端的电晕放电最为强烈,所产生的电晕电流最大;去掉芒刺尖端后,芒刺片将放电,但电晕电流有所减小;去掉芒刺尖端和芒刺片后,芒刺管也将发生放电,但电晕电流最小。

### 2.3 极板电流密度

图1中,左侧极板被划分为256个单元格,假设每个单元格内电流均匀分布,则每个单元格上的电流密度为

$$J_{mn} = \frac{i_{mn}}{2.9 \times 3.025}, \quad m = A, \dots, P, \quad n = 1, \dots, 16 \quad (1)$$

式中:  $J_{mn}$  代表左侧极板上第  $m$  行第  $n$  列单元格上的电流密度,  $\mu A/cm^2$ ;  $i_{mn}$  为实验测量得到的该单元格上的平均电流,  $\mu A$ 。

每个单元格内敷铜的宽度为2.9cm,敷铜的高度为3.025cm。RS芒刺电极与芒刺片电极在不同二次电压下对应的极板电流密度分布如图6所示。

图6(a)、(c)、(e)为RS芒刺电极对应的左侧极板电流密度分布,当  $U_2=60.41$  kV时,左侧极板平均电流密度为  $0.797$  mA/m<sup>2</sup>,方差为0.404;图6(b)、(d)、(f)为芒刺片电极对应的左侧极板电流密度分布;图6(a)与(b)所对应的二次电压较为接近,属于同一电压等级,(c)与(d)、(e)与(f)也类似;对于芒刺



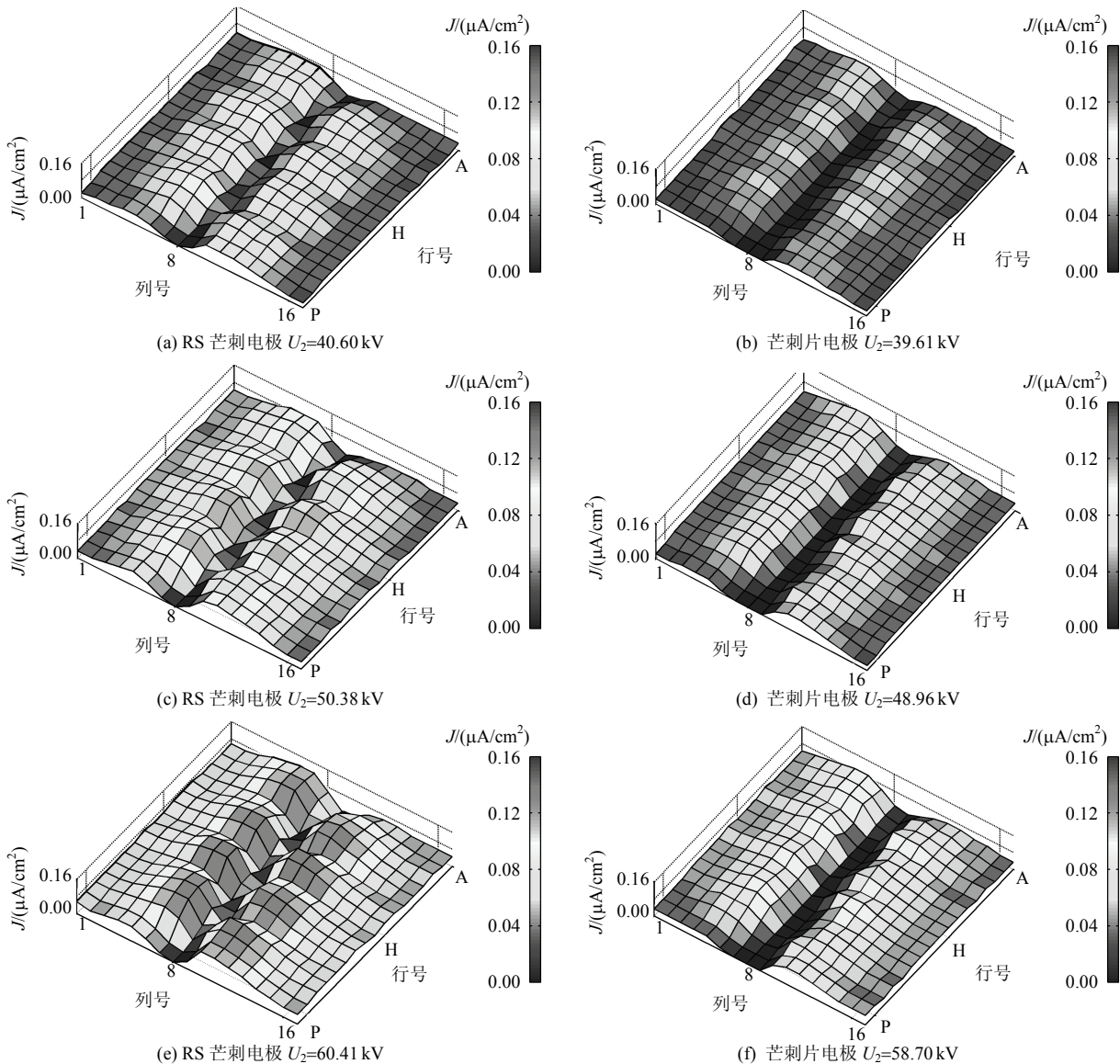


图 6 极板电流密度分布

Fig. 6 Current density distribution of collecting electrode

管电极，由于每个单元格电流较小，其电流密度分布在此未列出。由图 6 可以看出，在相同的电压等级下，RS 芒刺电极对应的极板电流密度明显大于芒刺片电极对应的极板电流密度，但芒刺片电极对应的电流密度分布更加均匀；随着二次电压的上升，两种电极对应的极板电流密度均相应增加。在图 6(e)中，RS 芒刺电极对应的极板电流密度分布在左右两侧均明显出现 4 个波峰区域，且左侧波峰区域与右侧波峰区域相互交错，这与图 3 中 RS 电极两侧芒刺尖端的分布位置一一对应，可见，极板上正对芒刺尖端的区域电流密度最大；而在极板的第 8、9 列位置，电流密度分布则明显出现波谷，表明极板上正对芒刺管的区域电流密度最小，这与文献[16]中的理论结果相一致；在极板的第 5~7 列、第 10~12 列，沿 RS 芒刺电极长度方向，电流密度

分布表现出明显的不均匀；从第 4 列和第 13 列分别往左右两侧延伸，电流密度则逐渐减小。相对于芒刺片电极和芒刺管电极，RS 芒刺电极放电主要集中在芒刺尖端，导致其对应的电流密度分布更不均匀，容易形成反电晕，但平均电流密度却明显大于前两者，同样条件下，极板平均电流密度大，意味着空间电荷密度也大，这将有利于粉尘荷电，并提高粉尘颗粒的趋近速度。此外，可通过调整异极距来改善 RS 芒刺电极对应电流密度分布的均匀性，从而抑制反电晕的形成，因此针对粉尘比电阻适中的应用场合，如钢厂烧结机机尾、整粒等电除尘器，采用 RS 芒刺电极将有利于提高除尘效率。

为验证实验结果的有效性，本文将第 F 行 1~8 列和第 H 行 9~16 列电流密度分布的测量结果与瓦氏(Warburg)理论结果进行了对比，如图 7 所示。

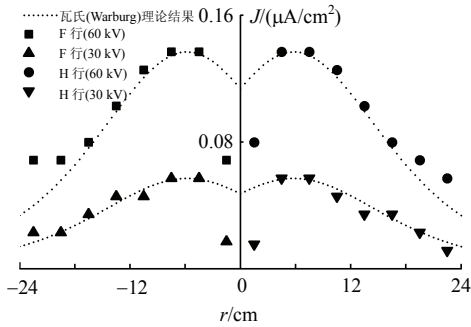


图7 实验结果与瓦氏理论结果对比

Fig.7 Comparison between experimental results and theoretical results obtained by Warburg

图7中，横坐标  $r$  代表极板任意一点与极板中心线之间的水平距离， $r=0$  处正对放电极轴线。理论计算时<sup>[21-22]</sup>，以 F 行第 7 列和 H 行第 10 列对应单元格电流密度测量值  $J_{F7}$  和  $J_{H10}$  分别作为芒刺尖端正对极板区域的电流密度值  $J_0$ ，考虑芒刺本身长度，芒刺尖端与极板距离  $b$  设为 20 cm。从图7可以看出，在 60 kV 和 30 kV 两种电压等级下，实验结果与理论结果均较为吻合；在芒刺尖端正对区域，电流密度出现波峰；在靠近极板中心线位置，电流密度均出现波谷；在极板两侧边沿处，实验结果较理论结果偏大，其原因主要在于瓦氏理论计算是针对单个芒刺尖端，而实际极板电流密度分布是受多个芒刺尖端放电影响，但芒刺尖端正对区域的电流密度受影响较小<sup>[23]</sup>；此外，30 kV 电压等级下，实验结果与理论结果误差相对较大，其原因在于电压降低后实际电流密度较小，导致测量误差偏大。

实验结果与瓦氏理论结果的对比表明所测得的电流密度分布是有效的，该实验结果可以为 RS 芒刺电极电晕电场的计算提供参考数据。

### 3 RS 芒刺电极表面电场强度分布

对于电除尘器，当忽略粉尘颗粒对电场的影响时，其电场控制方程可简化为电势泊松方程和电流连续性方程<sup>[24-25]</sup>：

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho \tag{2}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \tag{4}$$

$$\mathbf{J} = (\mathbf{u} - \mu_i \mathbf{E})\rho - D_i \nabla \rho \tag{5}$$

式中： $\mathbf{E}$  为电场强度； $\rho$  为空间电荷密度； $\epsilon$  为空气介电常数； $V$  为电势； $\mathbf{J}$  为电流密度； $\mathbf{u}$  为气流速度； $\mu_i$  为离子迁移率； $D_i$  为离子扩散系数。

通过数值方法求解电场控制方程，即可获得相应电场特性。而求解之前，需要对电除尘器进行几

何建模，其中包括建立放电极的几何模型，RS 芒刺电极几何尺寸如图8所示。

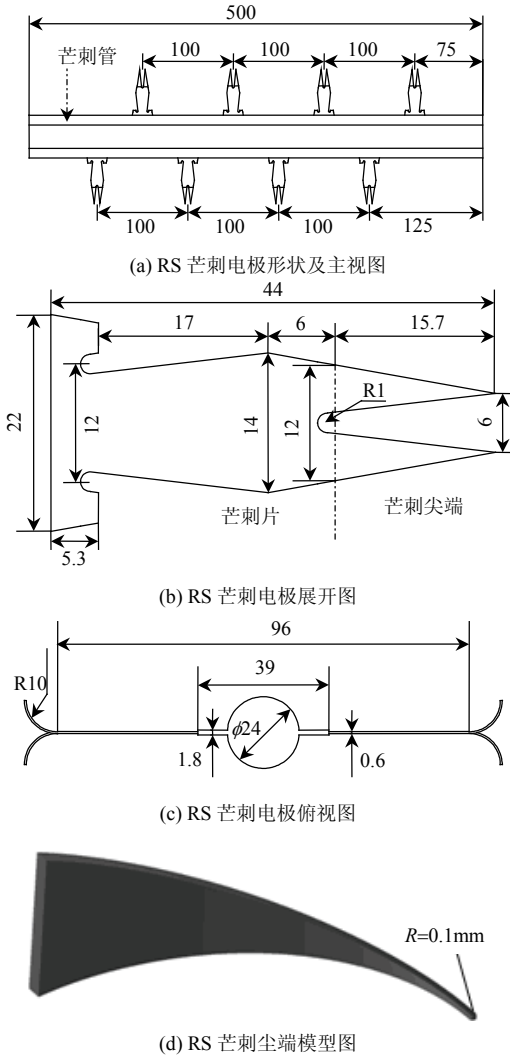


图8 RS 芒刺电极尺寸

Fig.8 RS barbed discharge electrode dimensions

从图8可以看出，芒刺尖端是很细小的一个尖，很难采用精确的几何参数进行描述。根据电晕放电理论<sup>[26]</sup>，电极的放电部位可以用具有一定曲率半径的曲面进行表示，在放电发生时，放电部位的电场强度会保持在一个常数<sup>[27]</sup>，而这个常数与曲率半径有关。对于形状简单的电极，如圆形线，由于其曲率半径单一，电极表面电场强度均匀，因此可以较为容易地计算其电晕放电；但对于 RS 芒刺电极，其几何形状复杂，表面电场强度分布很不均匀，直接求解其电晕电场将非常困难。在此，本文仅给出 RS 芒刺电极表面的静电场强度分布，由于球面理论上可以逼近任意几何形状的曲面，且根据 McKinney 实验结果<sup>[23]</sup>，其测得的不同芒刺电极尖端的曲率半径范围为 0.056~0.269 mm，对于同一根芒刺电极，其给出的曲率半径是固定的；因此，本

文在数值计算时, RS 电极芒刺尖端采用直径为 0.1 mm 的半球近似表示。此外, 从放电机理上看, 电晕放电时在放电尖端周围会形成一个细小的电晕区<sup>[28]</sup>, 严格讲此区域与尖端几何形状有很大关系, 但由于放电尖端的几何尺寸都非常小, 因此该电晕区域可以视为一个圆形(2D)或者球形(3D)。

由于是计算静电场, 不考虑电流, 因此式(2)—(5)所描述的电场控制方程可简化为如下电势方程:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (6)$$

利用有限体积元方法求解该电势方程<sup>[14]</sup>, 计算区域为图 1 中电除尘器模型所包含的整个区域, 网格数量为 2920 万, 放电电压为 50 kV, 求解得到的 RS 芒刺电极表面法向静电场强度分布如图 9 所示。

图 9 中的电场强度值是采用空气击穿场强值  $3.6 \times 10^6$  kV/m 无量纲化后的值, 可以看出没有考虑空间电荷时, 放电极上施加 50 kV 直流负高压后, 整个电极表面的法向电场强度均超过了空气常压下的击穿场强, 特别是在芒刺尖端位置, 其电场强度远远大于其他表面。当电压达到起晕电压时, 首先是芒刺尖端放电, 而产生的空间电荷会减小芒刺电极表面的电场强度, 从而限制了其他曲率半径较大的位置的放电, 最终使得放电位置集中在细小的芒刺尖端区域, 这与实验观察得到的现象一致。

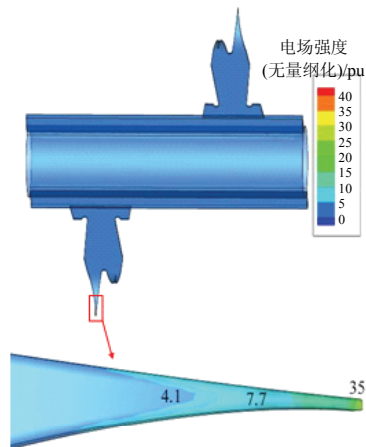


图 9 RS 芒刺电极表面静电场强度分布

Fig. 9 Electrostatic-field distribution on the surface of RS barbed discharge electrode

## 4 结论

本文参照实际电除尘器尺寸, 采用工业现场所使用的高压电源, 搭建了实验台, 对 RS 芒刺电极在线-板式电除尘器中的放电特性进行了实验研究和数值分析, 所得结论如下:

1) 对比分析了 RS 芒刺电极、芒刺片电极和芒刺管电极的放电情况。RS 芒刺电极放电时, 其放电位置集中在芒刺尖端区域, 在芒刺存在的条件下芒刺片、芒刺管区域不存在明显的放电; 但去掉芒刺尖端后, 芒刺片顶部位置能够产生电晕放电; 当去掉芒刺尖端和芒刺片时, 芒刺管两侧也会发生放电。

2) 测量了不同电极对应的电场伏安特性, 结果均呈现抛物线形状; 采用极板分割法, 通过自主开发的电流模块详细测量了不同电压等级下收尘极板上的电流密度分布, 并将测量结果与瓦氏理论结果进行了对比, 二者吻合; 极板电流密度分布与芒刺位置有显著对应关系, 且沿 RS 芒刺电极长度方向, 极板上的电流密度呈不均匀分布, 极板上离芒刺越近的位置电流密度越大。

3) 利用有限体积元方法获得了 RS 芒刺电极表面的法向电场强度分布, 其中采用半球曲面对芒刺尖端进行几何描述的方法对于进一步分析 RS 芒刺电极电晕电场也是可行的, 但半球的半径选取需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] Mizuno A . Electrostatic precipitation[J] . IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 615-624.
- [2] 赵海波, 郑楚光. 单区静电除尘器捕集烟尘过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 31-35.  
Zhao Haibo, Zheng Chuguang. Numerical simulation of single-stage electrostatic precipitator for collecting fly ashes[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 31-35(in Chinese).
- [3] 高翔鹏, 徐明厚, 姚洪, 等. 燃煤锅炉可吸入颗粒物排放特性及其形成机理的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 11-17.  
Gao Xiangpeng , Xu Minghou , Yao Hong , et al. Experimental study on emission characteristics and formation mechanisms of PM<sub>10</sub> from 1 coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 11-17(in Chinese).
- [4] 王鹏, 骆仲泱, 徐飞, 等. 新型复合静电除尘器脱销性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 8-11.  
Wang Peng, Luo Zhongyang, Xu Fei, et al. Research on denitrification character of new type combined electrostatic precipitator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 8-11(in Chinese).
- [5] Brocilo D, Chang J S, Findlay R D, et al. Modelling of

- the effect of electrode geometries on the corona discharge current-voltage characteristic for wire-plate electrostatic precipitators[C]//2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kitchener, Canada, IEEE, 2001: 681-684.
- [6] 孟晓波, 惠建峰, 卞星明, 等. 低气压下流柱放电特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 139-149. Meng Xiaobo, Hui Jianfeng, Bian Xingming, et al. Research on the characteristic of streamer discharge at low air pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 139-149(in Chinese).
- [7] 郝吉明, 贺克斌, 晁红勋, 等. 电除尘器电场分布特性的模拟计算[J]. 环境科学学报, 1988, 8(4): 480-486. Hao Jiming, He Kebin, Chao Hongxun, et al. Simulating calculation of electrical field distribution for electrostatic precipitators[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1988, 8(4): 480-486(in Chinese).
- [8] Jedrusik M, Swierczok A, Teisseyre R. Experimental study of fly ash precipitation in a model electrostatic precipitator with discharge electrodes of different design[J]. Powder Technology, 2003(135): 295-301.
- [9] 耿屹楠, 曾嵘, 何金良, 等. 1m棒-板间隙雷电冲击放电电场测量[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 130-136. Geng Yanan, Zeng Rong, He Jinliang, et al. Electric field measurements of 1m rod-plane gap discharge under lightning impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 130-136(in Chinese).
- [10] White H J. 工业电收尘[M]. 王成汉, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 110-139. White H J. Industrial electrostatic precipitation[M]. Wang C H, translation. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984: 110-139(in Chinese).
- [11] Cooperman P. A theory for space-charge-limited currents with application to electrical precipitation[J]. AIEE Transactions, Part I: Communication and Electronics, 1960, 79(47): 47-50.
- [12] Cooperman G. A new current-voltage relation for duct precipitators valid for low and high current densities [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1981, 1A-17(2): 236-237.
- [13] Gallimberti I. Recent advancements in the physical modeling of electrostatic precipitators[J]. Journal of Electrostatics, 1998, 43(4): 219-247.
- [14] Long Zhengwei, Yao Qiang, Song Qiang, et al. A second-order accurate finite volume method for the computation of electrical conditions inside a wire-plate electrostatic precipitator on unstructured meshes [J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(4): 597-604.
- [15] Villot A, Gonthier Y F J, Gonze E, et al. Numerical model of current-voltage curve for the wire-cylinder electrostatic precipitators in negative voltage in the presence of nonpolar gases[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(8): 2031-2040.
- [16] 郝吉明, 贺克斌, 马永亮. 电除尘器管状芒刺类电晕极电参数模拟计算[J]. 环境科学学报, 1993, 13(3): 262-267. Hao Jiming, He Kebin, Ma Yongliang. Simulating calculation of electric conditions for electrostatic precipitator corona electrode with tube-type spike[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1993, 13(3): 262-267(in Chinese).
- [17] Neimarlijia N, Demirdžić I, Muzafetija S. Finite volume method for calculation of electrostatic fields in electrostatic precipitators[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(1): 37-47.
- [18] Farnoosh N, Adamiak K, Peter Castle G S. Numerical calculations of submicron particle removal in a spike-plate electrostatic precipitator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1439-1451.
- [19] 党小庆, 李伟, 杨雪莲, 等. 电除尘器电场特性实验研究与数值分析[J]. 环境工程, 2006, 24(3): 47-50. Dang Xiaoqing, Li Wei, Yang Xuelian, et al. Study on electrical field characteristics of electrostatic precipitator by means of numerical analyses and experiment [J]. Environmental Engineering, 2006, 24(3): 47-50(in Chinese).
- [20] 杨振兴. 电除尘器的空间电气特性数值分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2008. Yang Zhenxing. Analysis for space electric characteristics in ESPs[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2008(in Chinese).
- [21] Warburg E. Ueber das Verhalten sogenannter unpolarisirbarer Elektroden gegen Wechselstrom [J]. Annalen der Physik, 1899, 303(3): 493-499.
- [22] 郭尹亮, 向晓东, 陈宝智. 芒刺-板式电除尘器收尘极板电流密度分布规律研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(6): 53-55. Guo Yinliang, Xiang Xiaodong, Chen Baozhi. Investigation of the current density distribution regularity in a nail-plate ESP[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(6): 53-55(in Chinese).
- [23] McKinney P J, Davidson J H, Leone D M. Current



- distributions for barbed plate-to-plane coronas[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(6): 1424-1432.
- [24] 龙正伟, 宋蔷, 李水清, 等. 复合式电袋除尘器的伏安特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(14): 13-20.  
Long Zhengwei, Song Qiang, Li Shuiqing, et al. Current-voltage characteristics of the hybrid particulate collector [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(14): 13-20(in Chinese).
- [25] 周象贤, 卢铁兵, 崔翔, 等. 基于有限元与有限体积元法的直流输电线路合成电场的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 127-133.  
Zhou Xiangxian, Lu Tiebing, Cui Xiang, et al. A hybrid method for the simulation of ion flow field of HVDC transmission lines based on finite element method and finite volume method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 127-133(in Chinese).
- [26] Kaptzov N A. Elektrischeskiye Yavleniya v Gazakh i Vakuume[M]. Moscow: OGIZ, 1947: 560-630.
- [27] Peek F W. Dielectric phenomena in high voltage engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1929: 38-79.
- [28] Cobine J D. Gaseous conductors: theory and engineering applications[M]. New York: Dover Publications, 1958: 178-181.



李卓函

收稿日期: 2013-08-12。

作者简介:

李卓函(1979), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事工业电除尘建模与控制、工业网络通信的研究工作, ladaola@dlut.edu.cn;

贺超(1988), 女, 硕士研究生, 主要从事工业电除尘高压电源控制、工业网络通信的研究工作, duthechao@gmail.com;

安毅(1978), 男, 博士, 副教授, 主要从事工业控制系统设计与应用、三维点云数据处理的研究工作, anyi@dlut.edu.cn;

邵诚(1958), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂工业过程建模与控制、非线性系统鲁棒自适应控制、多目标优化控制技术的研究, cshao@dlut.edu.cn。

(责任编辑 李婧妍)

## 《中国电机工程学报》入选“2013 中国最具国际影响力学术期刊”

新年伊始, 据中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)最新发布,《中国电机工程学报》入选“2013中国最具国际影响力学术期刊”。在175种进入该名单的中英文期刊中, SCI收录的期刊92种, 非SCI收录期刊83种。《学报》排名第39位, 较2012年提高了57位, 在动力与电力领域期刊中排名第一位。这是《中国电机工程学报》继2012年入选“中国最具国际影响力学术期刊”后再次获此荣誉。

“2013 中国最具国际影响力学术期刊”以《中国学术期刊国际引证报告(2013)》给出的期刊国际影响力指标进行综合排序, 再由专家依综合排序按入选条件评审, 遴选出备选总刊数的 Top5%。《中国学术期刊国际引证报告(2013)》是中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)、中国科学文献计量评价研究中心联合清华大学图书馆以中国大陆正式出版的 4622 种中英文科技期刊为研究对象, 将 Web of Science 收录的国际学术文献作为统计源, 以 2012 年为统计年发布的。其中, 科技期刊 3502 种, 人文社科期刊 1120 种。

统计分析结果表明, 从定量指标分析的角度看, 我国已有一批非 SCI 科技期刊的国际影响力达到或超过了 SCI 收录的中国期刊, 我国学术期刊整体“走出去”已经初见成效。《中国电机工程学报》在此国际浪潮下, 将不负重望, 再接再厉, 将我国优秀电力科研论文推向国际, 树立我国电力科研的良好国际形象, 为我国电力科研及期刊走向国际贡献力量。