

尘土颗粒带电特征的研究

高锦春¹, 孟青山², 章继高²

(1. 北京邮电大学 电信工程学院; 2. 自动化学院, 北京 100876)

摘要 使用密立根方法, 对尘土颗粒的带电特性进行了研究。结果表明: 尘土颗粒所带电荷的变化趋势可用一元三次多项式表示, 电荷分布呈现带状区域, 其所带的平均正电荷高于所带的负电荷。尘土颗粒的等效表面积和表面形貌是影响尘土带电的重要因素。环境相对湿度影响尘土颗粒的带电量, 相对湿度越大, 尘土带电量越少。适当地控制机电元件运行的环境湿度, 以及进行防尘处理, 可以有效地降低故障率。

关键词 尘土颗粒; 电荷; 电接触

中图分类号: TM503+.5 文献标识码: A

文章编号: 1008-5548(2004)03-0001-05

Characteristics of Electric Charges Carried by Dust Particles

GAO Jin-chun¹, MENG Qing-shan², ZHANG Ji-gao²

(1. School of Telecommunication Engineering; 2. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876 China)

Abstract: The study of characteristics of electric charge for charged dust particles by the Millikan testing method is introduced. The result shows that the variation of electric charge carried by dust particles can be expressed by a formula with three orders of a single element. The distribution of electric charge is illustrated as a band region. The amount of average positive charge carried by particles is higher than that of negative charge. The equivalent surface and morphology of dust particles seems to be the major factor which influences the electric charge. Relative humidity of the environment also affects the amount of electric charge. The higher the relative humidity, the less the electric charge carried by the particle. Appropriately controlling the environmental humidity during the operation and protecting the electric mechanical components against dust can effectively lower down the failure of electric contacts.

Key words: dust particle; electric charge; electric contact

尘土污染是造成我国机电元件电接触故障的主要原因之一^[1-4]。尘土颗粒直接吸附在机电元件表面上, 会造成闭合时的高电阻值^[5]。尘土颗粒也可在电镀金的过程中吸附在镀件表面而形成镀金表面微

孔。尘土中多含有可溶性盐^[6], 在潮热环境下, 可溶性盐易吸潮形成电解液。当落尘吸附在镀金微孔附近时, 其电解液进入微孔并与底层金属(镍或铜)接触, 造成金与底层金属间的电池效应。由于底层金属的电极电位很低, 它们将被加速腐蚀, 其腐蚀生成物沿微孔蔓延到金属表面而造成接触故障。

尘土颗粒在表面的吸附与它带有电荷密切相关。当带电的尘土颗粒靠近接触表面时, 颗粒与表面之间建立了微小的电场, 从而增加尘土颗粒对表面的吸附。当外加电场存在时, 带电的尘土颗粒在电场的作用下, 加速吸附在电接触表面上, 从而引起电接触故障。使用 SEM/XES 电子扫描电镜和 X 射线能谱仪对失效的连接器触点进行分析发现: 触点接触区域的污染远远高于非接触区。进一步的研究发现: 污染物中主要成分为尘土。这种现象是由于机电元件在使用过程中是通电的, 触点接触区域的电场强度高于非接触区。因此, 研究尘土颗粒在自然状态下的带电特征, 对于研究尘土颗粒对电接触可靠性的影响实验室模拟和降低设备的故障率等有着重要的理论和实际意义。

1 实验

1.1 实验方法的选择

常用的测量颗粒电荷的方法是法拉第筒法(Faraday cup)。使用法拉第筒法可以测量多个尘土颗粒的电荷总量, 该电荷量为颗粒正、负电荷中和后的宏观结果。但该方法无法测量单个尘土颗粒的电荷量。

密立根方法(Millikan)是用来测量单个油滴带电量的方法。我国许德玄教授使用密立根方法测量了粉尘荷电后的电荷量^[7]。他的研究方法对于我们研究尘土颗粒的带电具有重要的参考意义。我们将密立根方法应用于自然状态下尘土颗粒静态电荷的测量。

密立根油滴仪实验是一个经典的物理实验。我

收稿日期: 2003-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 编号: 50277002。

第一作者简介: 高锦春(1962-), 女, 副教授, 博士研究生。

理论研究

们将该实验用于尘土颗粒的电荷测量时,需要改变原来的进样方式,使尘土颗粒自由下落至样品仓进行测量。它可以分别测量出单个尘土颗粒所带的正或负电荷的量。

由密立根实验原理^[8]推导得知:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \frac{1}{1 + \frac{b}{\rho r}}} \quad (1)$$

式中, r 为颗粒半径; v_g 为带电颗粒受重力作用加速下降,由于空气阻力作用,达到阻力与重力平衡时的速度; η 为粘滞系数; b 为修正系数; ρ 为颗粒密度; p 为大气压强。

由于 $v_g = \frac{l}{t_g}$ (l 为颗粒匀速下降的距离; t_g 为下落时间), 得到

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t_g \left(1 + \frac{b}{\rho r}\right)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \quad (2)$$

式中, q 为颗粒电荷量; d 为两块平行板之间的距离; U 为平衡电压。

由实验可得到 t_g 和平衡电压 U 。从上述 (1) (2) 式, 可以求出尘土颗粒的半径 r 和电荷量 q 。

1.2 样品

(1) 尘土样品: 在北京邮电大学教 4 楼一层北屋的架上, 收集玻璃板等光滑物体表面尘土, 简单剔除纤维等杂物, 得尘土样品约 5 cm^3 。

(2) 纯物质颗粒样品: CaCO_3 (化学纯), CaSO_4 (化学纯), Al_2O_3 (化学纯), Al_2O_3 ($0.5 \mu\text{m}$, 日本公司提供)。

1.3 尘土密度的测定

使用比重瓶法测量尘土的密度。填充液体为蒸馏水。测得尘土的平均密度等于 2.3 g/cm^3 。

1.4 实验条件

实验仪器: 密立根油滴仪, MOD-5, 中国南京培中公司生产。

实验条件: 温度 23°C , 相对湿度: 25% 。

2 结果与讨论

2.1 尘土电荷的带电量

研究发现, 尘土颗粒一部分带有负电荷, 一部分带有正电荷, 少量颗粒不带电。

对尘土负电荷的测量表明: 尘土的带电量随半

径的增加而增大。用最小二乘法进行曲线拟合, 其变化趋势可用一元三次多项式表示^[9]

$$y = 1.02x^3 + 8.72 \times 10^{-6}x^2 - 7.54 \times 10^{-13}x + 1.58 \times 10^{-18} \quad (3)$$

式中, y 表示电量, 单位为 C; x 表示颗粒半径, 单位为 m 。

尘土带电呈现一个带状分布区域。带状的边界呈曲线关系, 我们用函数来表示带状边界, 见图 1。

上边界:

$$y = 3.19 \times 10^{10}x^3 + 4.43 \times 10^4x^2 + 3.62 \times 10^{-1}x - 1.64 \times 10^{-7} \quad (4)$$

下边界:

$$y = 1.80 \times 10^{10}x^3 + 1.61 \times 10^5x^2 - 2.0 \times 10^{-1}x + 6.89 \times 10^{-8} \quad (5)$$

所以, 尘土带电的带状区域可表示为

$$0.4 \mu\text{m} < x < 2.5 \mu\text{m}$$

$$y \leq 3.19 \times 10^{10}x^3 + 4.43 \times 10^4x^2 + 3.62 \times 10^{-1}x - 1.64 \times 10^{-7}$$

$$y \geq -1.80 \times 10^{10}x^3 + 1.61 \times 10^5x^2 - 2.0 \times 10^{-1}x + 6.89 \times 10^{-8}$$

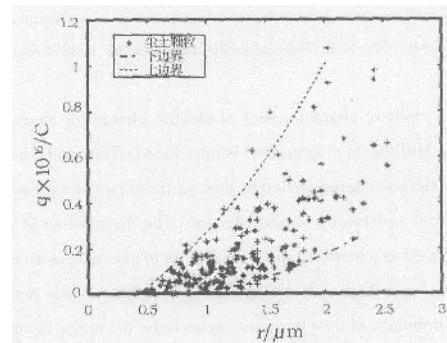


图 1 尘土带负电荷的带状分布区域

尘土颗粒所带的正电荷也呈带状分布, 总体变化趋势也可用一元三次多项式来表示, 见图 2。曲线方程:

$$y = 5.25x^3 - 1.06 \times 10^{-5}x^2 + 3.72 \times 10^{-11}x - 1.34 \times 10^{-17} \quad (6)$$

由图 2 可以看出: 相同尺寸的尘土颗粒中所带的平均正电荷要多于所带的负电荷。这一结果与大气中正离子浓度高于负离子浓度是相一致的。尘土颗粒是处在大气环境中的, 它所带的正电荷高于负电荷是受大气环境影响的结果。因此, 也可以这样解释: 尘土颗粒所带的电荷主要是它捕捉大气中的带电粒子形成的。

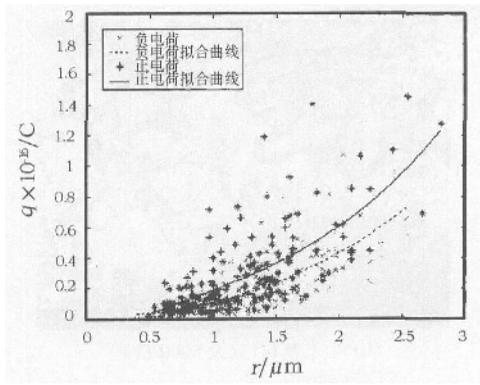


图2 尘土所带正、负电荷比较

尘土颗粒中,一部分带有负电荷,一部分带有正电荷。因此,在外加电场作用下,带电的尘土颗粒就会沿着电场的方向被吸附,静电吸附力取决于电场的强度和所带的电荷量。这一实验结果解释了为什么机电元件在使用时连接器触点的接触区域容易被尘土污染而造成接触失效的原因。

以半径 0.9 ~ 1.1 μm 带负电荷的尘土颗粒为例,在该粒径范围内,共测量了 29 个尘土颗粒,其电荷的分布结果见图 3。图中横坐标为尘土颗粒所带的电荷数(一个电荷数为所带一个电子的电量),纵坐标为尘土的颗粒数。

图 3 显示了同一粒径的尘土颗粒,在相同的条件下所带的电荷量是不相同的,拥有最大尘土颗粒数目的电荷量即为该粒径的平均电荷量。这一测量结果与许德玄教授在研究粉尘荷电的结果^[7]是一致的。许德玄教授发现:同一粒径下,电炉粉尘的荷电量是不相同的,其荷电量分布符合玻尔兹曼平衡态分布。由此可见,尘土颗粒的静态电荷分布存在着一个带宽,是玻尔兹曼平衡分布的结果。

2.2 颗粒表面对带电量的影响

由上述(3)式所推导的一元三次多项式可见,颗粒的带电量与颗粒半径、半径平方和其三次方有关,

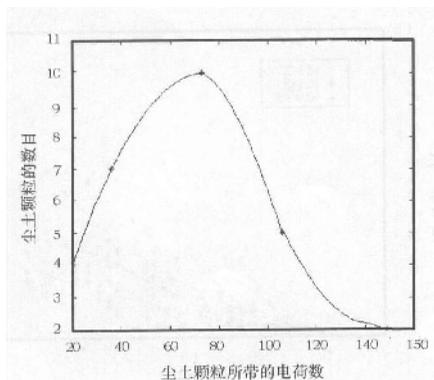


图3 相同粒径(半径 0.9 ~ 1.1 μm)尘土颗粒电荷的分布

其中特别引起注意的是半径平方,即颗粒表面积。

目前常用的测定比表面积的方法是氮吸附法。该方法测得的是颗粒的内表面与外表面的总和。应用氮吸附法,我们测量了纯物质 Al₂O₃、CaSO₄、CaCO₃ 及尘土颗粒的比表面积,见表 1。

我们同时对上述颗粒的带电量(负电荷)进行了测量。结果发现:在相同粒径下,颗粒所带的平均电荷是不相同的:CaSO₄> 尘土颗粒> CaCO₃> Al₂O₃。

将各种不同颗粒的带电量与颗粒的比表面进行分析比较后发现:颗粒的带电量与比表面积之间并没有对应关系。即:比表面积的大小并不决定颗粒带电荷的多少。

实际上,颗粒在大气环境下带电荷的多少是由于他们的形貌和等效表面积不同引起的。颗粒的 ESEM(环境扫描电子显微镜),分析结果见图 4。从图中看出:CaSO₄ 为片状颗粒。CaCO₃ 和 Al₂O₃ 为角状颗粒。普通尘土颗粒既有角状,也有片状。

表 1 各种颗粒带电量与比表面积的比较

	CaSO ₄	尘土颗粒	CaCO ₃	Al ₂ O ₃
比表面积 /m ² · cm ⁻³	11.6	3.4	1.2	211.3
比等效表面积 /m ² · cm ⁻³	1.8	0.9	0.5	0.3

使用激光衍射粒度分析仪,对上述颗粒进行了粒度分析,并计算出各种颗粒比等效表面积,见表 1。我们发现,该等效表面积与颗粒的带电量有密切关系。

考虑到颗粒的形状,我们引入形状系数对比等效表面积进行修正^[10]

$$\varphi_{sv} = S_v / d$$

式中, φ_{sv} 为比表面形状系数; S_v 为比表面; d 为颗粒半径。

$$\text{所以 } S_v = \varphi_{sv} d$$

由于浑圆形颗粒^[1],如水冲浊的沙粒等, $\varphi_{sv} = 8.34 \sim 8.29$; 粉状的角状颗粒:石灰石、沙子等, $\varphi_{sv} = 12.5 \sim 11.43$; 片状颗粒:滑石、石膏等, $\varphi_{sv} = 16.67 \sim 17.5$ 。

我们取 CaSO₄ = 17.1,其它实验颗粒则取 $\varphi_{sv} = 12.0$ 。球形取 $\varphi_{sv} = 8.3$ 。

经过形状系数校正后,例如 CaCO₃、Al₂O₃ 等,得到下列修正公式

$$S_{CaCO_3} = \frac{12.0}{8.3} S_{sphere}$$

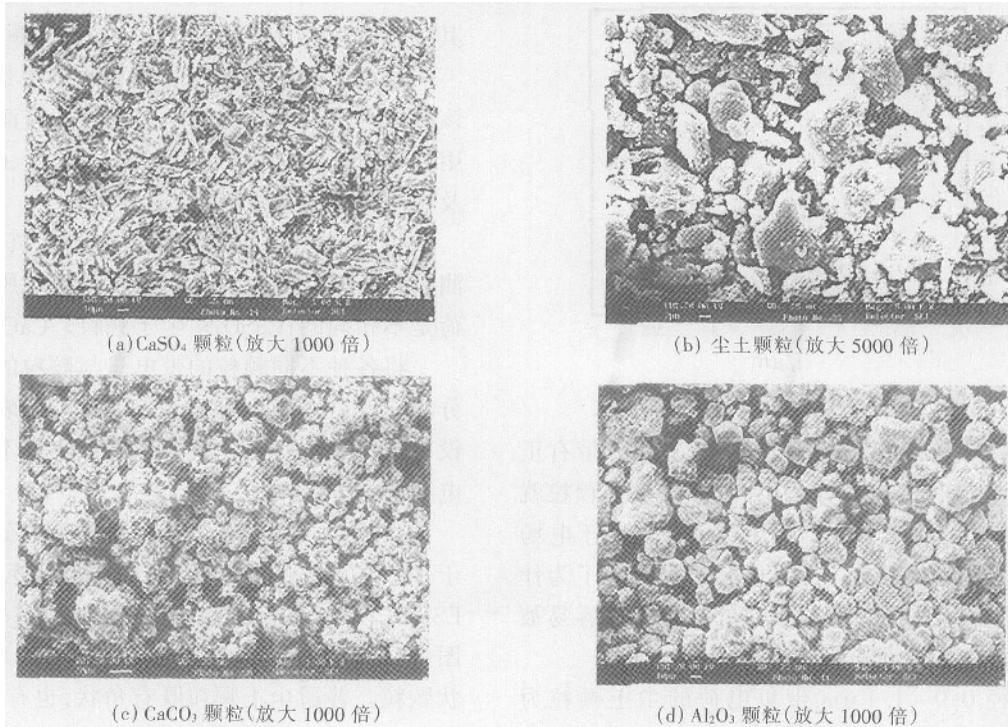


图4 几种颗粒的ESEM照片

对于 CaSO_4 有： $S_{\text{CaCO}_3} = \frac{17.1}{8.3} S_{\text{sphere}}$
修正后的颗粒比等效表面积见表2。

表2 校正后的比等效表面积

	CaSO_4	尘土颗粒	CaCO_3	Al_2O_3
校正后的比等效 表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$	3.7	1.3	0.7	0.4

上述结果说明： Al_2O_3 的比表面积虽然很大，但是比表面对颗粒的带电量没有直接影响。所以，颗粒的带电量是由颗粒的等效表面及颗粒的形貌决定的。颗粒的等效表面越大，越易捕捉大气中带电粒子的电荷。

2.3 颗粒成分的影响

我们对颗粒 CaSO_4 和 CaCO_3 的带电量进行分析发现： CaSO_4 和 CaCO_3 同为钙的氧化物，但颗粒的带电量不同。为了便于比较，我们对化学组成相同、表面形貌不同的两种 Al_2O_3 颗粒的带电量进行分析，结果发现：他们虽然同为一种化合物，但所带的电量也是不相同的。而比等效表面积接近的颗粒，它们的带电量却相近。因此可以推论：大气环境中颗粒的带电量不是主要由颗粒成分决定的，而是由颗粒的等效表面积及表面形貌决定的。

2.4 湿度对尘土带电量的影响

我们在实验中测定了湿度在 25%、50%、75% 下的尘土的带电量，见图5。从图中可以看出：环境湿度越大，尘土颗粒带电量越少。

当相对湿度提高时，空气中的水分子做热运动撞击到尘土颗粒表面的几率增大，水分子容易被颗粒吸收或附着在表面。由于水的强极性和高电阻率，以及溶解在水中的杂质（例如：二氧化碳）的作用，使颗粒的表面电阻率大大下降，从而改善其表面的导电性，使颗粒表面的电荷减少。这个结果与湿度对粉尘的荷电影响及对物体起静电的影响^[11]是一致的。因此，增加湿度，可降低尘土颗粒的带电量。但是，对于电触点来说，湿度的增加会加大触点表面的腐蚀。

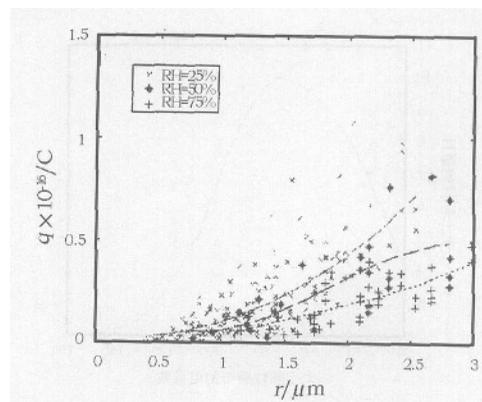


图5 尘土在不同湿度下的带电量比较

所以,适当地控制机电元件运行的环境湿度,以及进行防尘处理,可以有效地降低触点表面的污染,降低故障率。

3 结 论

(1) 尘土污染是造成电接触故障的主要原因。尘土颗粒是带电的,带电的尘土颗粒在电场的作用下,易吸附在电接触表面引起电接触故障。

(2) 使用密立根方法可以定量地测量在大气环境下尘土颗粒的静态电荷,测量结果发现:尘土颗粒中一部分带有负电荷,一部分带有正电荷,少量颗粒不带电。其正、负电荷的变化趋势可用一个一元三次多项式表示。尘土颗粒电荷分布呈现带状区域。尘土颗粒所带的平均正电荷高于所带的负电荷。

(3) 尘土颗粒的等效表面积和表面形貌是影响尘土带电的重要因素。

(4) 环境相对湿度影响尘土颗粒的带电量,相对湿度越大,尘土带电荷越少。但湿度增加会加大触点表面的腐蚀。因此,适当地控制机电元件运行的环境湿度,以及进行防尘处理,可以有效地降低触点表面的污染、降低故障率。

致谢:作者对中国预防医学研究院环境卫生研究所林秉乐教授、大连理工大学许德玄教授、东南大学物理系吴宗汉教授、石家庄军械工程学院静电技术研究所刘尚合教授等给予的热情帮助,表示衷心地感

谢!

参考文献:

- [1] Reagor B T, Russell C A. A survey of manufacturing problems in telecommunications equipment [A]. Proc IC - CEMCA [C], Nagoya, Japan, 1986. 843 - 850.
- [2] White L. Development of a new connector dust test [A]. Proc of 33rd IEEE Holm Conference on Electrical Contact [C]. USA: CPMT Society of IEEE Inc, 1987. 87 - 92
- [3] Zhang J G. Characteristics of dust deposition and the effect of dust on electric contacts [A]. Proc IC - CEMCA [C]. Nagoya, Japan, 1986. 878 - 881.
- [4] Zhang J G, Wen X M. The effect of dust contamination on electric contacts [J]. IEEE Trans on Compon Hybrids Manuf Technol, 1986, 9(1): 53 - 58.
- [5] Zhang J G. Internal report [R]. Beijing: Beijing Univ of Posts and Telecom, 1990.
- [6] Wan J W, Gao J C, Lin X Y, et al. Water soluble salts in dust and their effects on electric contact surfaces [A]. Proc of the ICECT [C], Japan: Taiho Printing Co, 1999, 37 - 43.
- [7] 许德玄, 李祥生, 马祝阳, 等. 密立根油滴仪测量粉尘电荷量的探讨[J]. 物理实验, 1992, 13(2): 134 - 135, 140.
- [8] 南京培中公司. 密立根油滴仪实验使用手册[R]. 南京: 东南大学, 1999.
- [9] Gao J C, Zhang J G. Measurement of electrical charges carried by dust particles [A]. Proc of 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contact [C]. USA: CPMT Society of IEEE Inc, 2002, 191 - 196.
- [10] 曾凡, 胡永平, 杨毅, 等. 矿物加工颗粒学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [11] 刘尚合. 静电理论与防护[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999.

信息之窗

国家纳米科学中心首次聘用首席科学家

日前,解思深等5位科学家接受国家纳米科学中心的聘书,成为这里的首任首席科学家。

国家纳米科学中心是中国科学院和教育部共同组建的独立法人单位,从事纳米科学的基础研究和应用基础研究,重点在前瞻性、具有重要应用前景的纳米科学与技术的基础研究。根据建设进展和科研发展的需要,纳米科学中心在国内外公开招聘首席科学家,中心除为他们创造宽松的科研环境,配备先进的仪器设备,提供较优厚的待遇外,还将为他们配备科研团队,使他们充分施展才智。

解思深是中科院物理研究所研究员、中科院院士,他被聘为主任首席科学家。其他4位首席科学家是法国科学家光子与纳米结构实验室王肇中、北京大学物理学院朱星、中国科学院化学所江雷、中国科学院物理所薛其坤。

(摘自2004年5月27日《人民日报》)