

金属材料静电起电理论分析及实验验证

张晓勇¹, 郑会志², 王勇苗², 宋小飞², 祝华杰²

(1. 唐山师范学院现代教育技术中心, 唐山 063000;

2. 中国人民解放军95927部队, 沧州 061000)

摘要: **目的** 减小包装材料在运输过程中产生的静电对周围或包装内电子产品的影响。**方法** 对金属包装材料与空间粒子的摩擦起电机理进行理论分析,以固体接触分离起电为基础推导出摩擦起电电位的计算公式。为验证理论分析的正确性,以铝系金属材料为例进行摩擦起电实验。**结果** 通过理论推导得到材料静电电位随时间以负指数规律增加,并逐步趋近饱和值,该饱和值与材料的性质有关,并与摩擦速度和接触面积成正比。在材料摩擦起电电位测试实验中,所得的静电电位变化曲线与理论分析相同,且连续测试后发现材料起电电位逐次降低;根据不同材料和不同摩擦速度时静电电位饱和值的变化情况,证实了金属材料摩擦起电电位与材料摩擦系数和接触面积的对应关系。**结论** 通过理论分析和材料摩擦起电实验,得到了摩擦起电电位的增长规律,对减小静电危害起到指导意义。

关键词: 静电起电; 充电电流; 泄漏电流; 静电测试

中图分类号: TB484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)19-0038-04

Electrification Theory and Experimental Research of Metal Material

ZHANG Xiao-yong¹, ZHENG Hui-zhi², WANG Yong-miao², SONG Xiao-fei², ZHU Hua-jie²

(1. Modern Educational Technical Center Tangshan Teacher's college, Tangshan 063000, China;

2. No. 95927 PLA Unit, Cangzhou 061000, China)

ABSTRACT: Objective In order to reduce the damage to electronic products around or inside of aluminum-base metal packaging material by electrostatic discharge. **Methods** The principle of the triboelectrification between metal packaging material and space particles was theoretically analyzed and a calculation formula for triboelectrification potential was deduced based on solid contact separation electrification. To verify the theoretical analysis, an aluminum-base metal material was used as an example to study the triboelectrification. **Results** The theoretical deduction found that the electrostatic potential of the material increased in a negative exponent manner with time, and tended to be saturated gradually. The saturation value was related with the properties of the material, and was positively correlated with the friction speed and the contact area. In the material triboelectrification potential test, the variation curve of electrostatic potential was the same as the theoretical analysis results. And the electrification potential in continuous test decreased gradually. The variation of the electrostatic potential saturation values of different materials and different friction speeds verified the relationship between the triboelectrification potential of metal material and the friction coefficient of the material as well as the contact area. **Conclusion** The increasing rule of the triboelectrification potential was obtained through theoretical analyses and material triboelectrification experiment, which provides guidance for the reduction of electrostatic damage.

收稿日期: 2013-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61172035)

作者简介: 张晓勇(1981—),男,河北唐山人,硕士,工程师,主要研究方向为静电理论与防护。

KEY WORDS: electrostatic charging; charging current; bleeder current; electrostatic testdetermination

在运输过程中,金属材料因不断与空间粒子摩擦而带有电荷。在没有良好接地通道时,电荷会不断积累。由于金属材料具有良好的导电性,电荷会集中在曲率较大的地方进而发生静电放电,静电放电会导致包装内或周围的电子设备无法正常工作^[1-6]。通过对摩擦静电形成条件、作用机理的研究,可以制定相应的防护对策,避免或减轻静电放电的危害。

为了更好地分析有关金属材料静电电位变化规律,文中对金属材料摩擦起电规律进行理论分析,推导静电起电电位的计算公式,并对设计模拟实验装置进行验证。在进行模拟试验时,设计金属材料摩擦起电测试平台^[7],该测试平台采用同轴旋转方式,以高速旋转的角速度来代替水平方向的线速度,减小了环境因素对实验的影响。设计复合式绝缘层使被测材料与驱动设备隔离,保证绝缘层的强度和绝缘性能能够满足实验的需要。研制静电电位动态测试系统测量被测材料的静电电位,实现对静电电位变化规律的监测。为减小环境因素对测试结果的影响,实验在恒温恒湿的环境控制实验室内进行。

1 金属材料摩擦起电理论

金属材料因不断与空间粒子摩擦而带有电荷,这种不断摩擦可等效为一个电流源,不断地给被测材料充电,使被测材料获得充电电流 I_m 。因被测材料围绕固定轴旋转,在不同位置上摩擦速度不同,起电率也不同,但金属材料在静电起电过程中可视为良好导体,其达到静电平衡的速度远大于静电起电速度,由此,在摩擦起电测试时,可将被测材料视为等势体进行测试。在摩擦起电的同时,被测材料上的电荷会通过测试装置泄露。在开始阶段静电电荷的产生大于电荷的泄露,使被测材料的电位增加,随着静电电荷的积累,静电电荷的产生与泄露达到动态平衡,静电电位达到饱和。

设达到平衡前在 dt 时间内净增加的电量为 dQ ,它是在 dt 时间内静电产生量 dQ_1 与泄漏量 dQ_2 的代数和^[5-17],即:

$$dQ=dQ_1+dQ_2 \quad (1)$$

静电泄漏量 Q_2 遵循电容器的放电规律,在 dt 时间

内的电荷泄露量为:

$$dQ_2=-\frac{Q}{RC}dt \quad (2)$$

计算空间粒子与被测材料碰撞产生的电量 Q_1 时,假设在空间粒子与被测材料摩擦过程中,能量完全由被测材料吸收,并将被测材料视为一个整体来考虑。灰尘粒子为球形粒子(直径为 d ,若粒子不是球形,则为等效直径),单位面积上单位时间内发生 N 次碰撞,每粒灰尘粒子一次碰撞的起电量等于粒子与材料表面的接触面积 S_k 和碰撞面积上电荷密度 σ_m 的乘积,即起电电流密度 J ,其大小为:

$$J=Nq=NS_k\sigma_m \quad (3)$$

如果是直径为 d 的球形粒子(若粒子不是球形,则为等效直径)和材料表面碰撞,最大接触面积 S_k 为:

$$S_k=3.25d(k_b v^2)^{0.4} \quad (4)$$

式中: v 为粒子与材料的摩擦速度; b 为粒子与材料的碰撞系数; k_c 为灰尘粒子与材料碰撞的材料系数。结合气体分子运动论,可得到浓度为 n 的灰尘在单位时间内与材料发生碰撞的次数为:

$$N=\frac{nbv}{6\sqrt{2}}=0.12bnv \quad (5)$$

则

$$J=0.38dn\sigma_m k_c^{0.4} b^{1.8} v^{1.8} \quad (6)$$

摩擦起电产生的充电电流 I_m 为:

$$I_m=\int JdS=0.14dn\sigma_m k_c^{0.4} b^{1.8} S r^{1.8} \omega^{1.8} = Bk_c^{0.4} S r^{1.8} \omega^{1.8} \quad (7)$$

式中: S 为材料的面积; r 为材料的长度; ω 为旋转的角速度。在 dt 时间内,被测材料上的电量 dQ 可表示为:

$$dQ=I_m dt - \frac{Q}{RC} dt \quad (8)$$

解方程(8)得:

$$Q=0.14dnRC\sigma_m b^{1.8} k_c^{0.4} S v^{1.8} (1-e^{-t/RC}) \quad (9)$$

由此,被测材料上的电位 Φ 可表示为:

$$\Phi=\frac{Q}{C}=0.14dnR\sigma_m b^{1.8} k_c^{0.4} S v^{1.8} (1-e^{-t/RC}) \quad (10)$$

由式(10)可知,被测材料电位 Φ 与时间 t 呈负指数型增长,最终趋于饱和值。电位饱和值与材料和空间粒子的摩擦速度、接触面积都成正比,当接触面积

增加,或者摩擦速度加快时,被测材料的电位 ϕ 会迅速增加。为验证该理论分析的正确性,文中对某金属包装材料进行摩擦起电实验。

2 摩擦起电实验及数据分析

将表面材料摩擦起电试验平台置于调温调湿实验室内,连接静电电位动态测试系统,将被测金属材料安装在测试平台上,同化48 h后进行摩擦起电实验。

2.1 起电电量随时间的变化规律

实验过程中,通过静电电位测试系统记录材料上的电位值。同一实验条件下重复多次试验,在环境温度为18.5~19.7℃、相对湿度为53.7%~55.2%的条件下,材料摩擦起电电位随时间的典型变化曲线见图1。

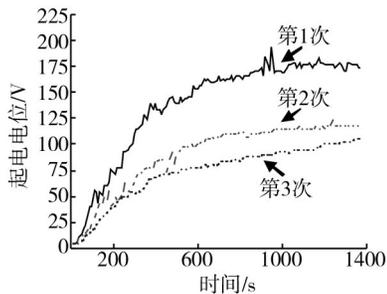


图1 材料静电起电电位随时间的变化规律
Fig.1 Variation of electrostatic charge with time

从实验结果可以看出,被测表面材料在空气中高速运动后带正电,这是因为被测材料与空气中的微尘接触分离,金属系材料的费米能级比周围空气中微尘的高^[8],这2种材料相互摩擦之后,微尘带负电,金属材料带正电。由图1可知,起电电位随着时间的增长呈负指数增长,与式(10)的结果相同。因实验过程中空间分布着与材料表面相异的电荷,所以导致重复实验时电位饱和值降低。

2.2 起电电量随接触面积的变化规律

公式(10)可知,材料静电电位与材料接触面积成正比。为验证这一规律,进行不同接触面积条件下的静电起电实验。通过改变测试材料的长度,以获得不同的接触面积。在环境温度为6~10℃、相对湿度为30%~35%的条件下,选择6种不同尺寸的旋叶,其最

大长度为0.5 m,表面积为0.15 m²,最小长度为0.25 m,表面积为0.075 m²,长度间隔为0.05 m,表面积间隔为0.015 m²。因形状弯曲使得实际接触面积减小,计算接触面积约为0.1~0.05 m²,间隔为0.01 m²。将每次实验所得静电电位最大值与接触面积之间的对应关系绘制成曲线,见图2。

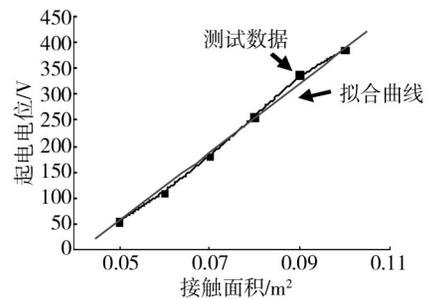


图2 摩擦起电电位随接触面积变化曲线

Fig.2 Variation of electrostatic charge with different contact area

由图2可知,材料摩擦起电电位的最大值随试验平台旋叶长度的增大而增大。旋叶长度为0.5 m时,其与空间粒子的接触面积为0.1 m²,测试系统在工作700 s后,摩擦电位不再增加,其值为385 V,整个过程中的平均起电率为0.48 V/s,静电电量平均增速为0.045 nC/s;旋叶长度为0.25 m时,其与空间粒子的接触面积为0.05 m²,测试系统在工作480 s之后,摩擦电位不再增加,其值为58 V,整个过程中的平均起电率为0.15 V/s,静电电量平均增速为0.014 nC/s。在不同的接触面积下测试材料静电起电电位时,随着接触面积的增加,静电电位的增速增加,达到平衡的时间变长。在不同接触面积的条件下,材料静电电位最大值进行曲线拟合得到图3中的实线曲线,其最佳拟合函数为:

$$y=6700x-285 \quad (11)$$

由式(11)可知,材料静电起电电位随接触面积的增加呈线性增长,与式(10)中的结论相同。

2.3 起电电位随相对速度的变化规律

由公式(10)可知,材料静电电位与材料旋转速度成正比。为验证这一规律,进行不同旋转速度条件下的静电起电实验。通过调整电机的转速,研究不同相对速度条件下起电电位的变化规律。在环境温度为6~10℃、相对湿度为10%~15%的条件下,计算不同转速条件下旋叶末端的相对速度,并测试该条件下静

电电位。将相对速度和静电起电电位的最大值绘制成曲线,见图3。

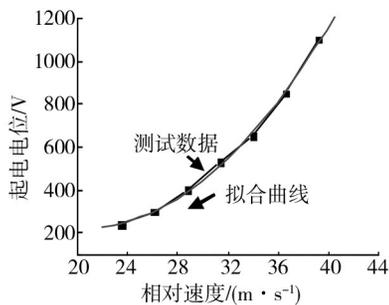


图3 摩擦起电电位随相对速度变化曲线

Fig.3 Variation of electrostatic charge with different relative speed

由图3可知,材料静电起电电位的最大值随试验平台旋叶与空间粒子相对速度的增大而增大。当旋叶末端的线速度为39.2 m/s时,测试系统在工作1800 s之后,摩擦电位不再增加,其值为1100 V。当旋叶末端的线速度为23.5 m/s时,测试系统在工作1200 s之后,摩擦电位不再增加,其值为240 V。在不同相对速度的条件下测试材料静电起电电位时发现,随着相对速度的增加,静电起电率增加,达到平衡的时间变长。对不同相对速度下的材料静电电位最大值进行曲线拟合得到图4中的实线曲线,其最佳拟合函数为:

$$y=1280-102x+2.5x^2 \quad (12)$$

由式(12)可知,材料静电起电电位随相对速度的平方呈抛物线性增长,与式(10)中的结论相似。

2.4 起电电位随材料系数的变化规律

由式(10)可知,材料静电电位与摩擦材料的材料系数有关,并与材料系数的0.4次幂成正比。针对这一规律,采用4种不同材料作为被测体进行摩擦起电实验。所选4种材料为复合材料M1,铁系金属材料M2,铝系金属材料M3,将M3喷涂防静电漆得到材料M4。将4种材料的静电起电电位随时间的变化规律绘制成曲线,见图4。

由图4知,不同材料的摩擦电位随时间的变化规律相似,都随时间变化呈指数性增长。复合材料M1的材料系数较大,其摩擦电位值增长较快,在800 s之后增长速度减缓,1200 s时电位增长趋于稳定,电位饱和值达到547 V。金属材料M2和M3的材料系数相似,其电位增长速度比较接近,在600 s时电位增长趋于稳定,材料系数相对较大的M3饱和值较大,相

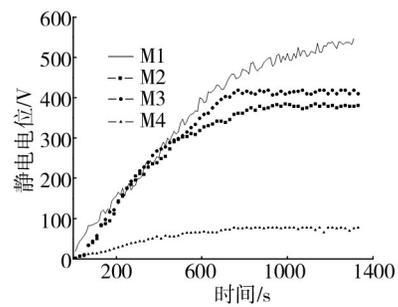


图4 不同材料摩擦起电电位随时间的变化曲线

Fig.4 Variation of electrostatic charge for different material with time

对于材料M2的电位饱和值为385 V,材料M3的电位饱和值达到420 V。材料M3喷涂防静电漆之后得到材料M4,其材料系数迅速降低50倍,其摩擦电位增长较缓慢,在700 s左右电位趋于稳定,电位饱和值为80 V。根据不同材料摩擦起电实验,不同材料的电位饱和值与材料系数之间的对应关系与公式(10)基本一致。

实验中同为金属材料的M2和M3,因材料系数相近而得到了较为相似的实验结果,因材料系数与材料本身的导电率及材料在静电序列表中的位置有关,是材料自身的属性。对于绝大部分金属材料,其导电性都较好,在静电序列表中的位置也较为接近,因此具有相近的材料系数。对于个别导电性较差,材料系数与一般金属差距较大的材料,其静电起电规律有待进一步研究。

3 结语

文中分析了金属材料静电起电的成因,推导出了金属材料摩擦起电电位计算公式。为了验证该理论分析的正确性,文中以铝系金属材料为例进行了摩擦起电实验。理论分析和实验结果表明,金属材料静电电位随时间的增长呈负指数性增加,并最终趋于电位饱和值;静电电位随接触面积的增加呈线性增长,与理论公式相一致;静电电位随着旋转速度的增加迅速增长,测试电位值与理论计算值的变化趋势相似;静电电位随被测材料的材料系数的增长而增长,在不同材料的摩擦起电电位测试中得到的电位变化规律与理论计算结果基本一致。

(下转第51页)

University of Science and Technology, 2007.

- [15] 李晓燕,孙智慧. 包装机中塑料薄膜常热式热封参数的实验研究[J]. 包装工程, 2003, 24(6): 32—34.

LI Xiao-yan, SUN Zhi-hui. Research on the Film Heat-sealing Course in Heated-continuously Packing Machine through Experiments[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 32—34.

- [16] 潘道津,孟宪文,寇金宝,等. 冠盒式容器包装及其成型工艺的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(11): 75—77.

PAN Dao-jin, MENG Xian-wen, KOU Jin-bao, et al. Research on Top Carton Bottle Packaging and Its Forming Technology[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11): 75—77.

(上接第41页)

参考文献:

- [1] TANNER R L. Radio Interference from Corona Discharges[R]. Menlo Park: Standard Research Institute, 1963: 33—106.

- [2] 李宇明,孙永卫. 包装材料的防静电设计[J]. 包装工程, 2011, 32(10): 73—75.

LI Yu-ming, SUN Yong-wei. Anti-electrostatic Design of Packing Material[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(10): 73—75.

- [3] 宣兆龙,易建政,于新龙. 防静电封存封套材料研究[J]. 包装工程, 2007, 28(3): 37—38.

XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng, YU Xin-long. Study of Antistatic Envelope Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(3): 37—38.

- [4] 张晓玉,袁玉珍. 微电子产品防静电包装材料的研究进展[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 117—122.

ZHANG Xiao-yu, YUAN Yu-zhen. Development Progress of Anti-static Packaging Material for Microelectronic Products[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 117—122.

- [5] GUNN R. Army-Navy Precipitation Static Project[J]. Proc IRE, 1946, 34(4/5): 247—254.

- [6] TERHASEBORG J L, TRINKS H. Electric Charging and Discharging Processes of Moving Projectiles[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980(2): 227—233.

- [7] 郑会志,胡小锋,杜照恒,等. 飞行器表面材料沉积静电的初步研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2612—2616.

ZHENG Hui-zhi, HU Xiao-feng, DU Zhao-heng, et al. The Primary Research of Precipitation Static on Aerial Vehicle Surface Material[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2612—2616.

- [8] 刘尚合. 静电理论与防护[M]. 北京:兵器工业出版社, 1999. LIU Shang-he. Electrostatic Theory and Protection[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1999.

- [9] 孙可平,宋广成. 工业静电[M]. 北京:中国石化出版社, 1994.

SUN Ke-ping, SONG Guang-cheng. Industry Electro-static [M]. Beijing: Chinese Petrification Press, 1994.

- [10] 杨有启. 静电安全技术[M]. 北京:化学工业出版社, 1983.

YANG You-qi. Safety Technology of Electrostatic[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 1983.

- [11] 鲍重光. 静电技术原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1993.

BAO Chong-guang. Technology Principle of Electrostatic[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993.

- [12] PECHACEK R E, GREIG J R, MURPHY D P. Electrostatic Charging of the CH-53E Helicopter[R]. Washington: Naval Research Laboratory, 1985.

- [13] ANDERSON R V. Electrostatic Theory Applied to Helicopter Charging[J]. Lightning Technology Round-up, 1983(8): 60—69.

- [14] JUAN D L C, HERBERT J. Theoretical Analysis of Aircraft Electrostatic Discharge[R]. U S. ARMY Aviation Materiel Laboratories Fort Eustis, 1965.

- [15] DALZIEL C F, LEE W R. Lethal Electric Currents[J]. IEEE Spectrum, 1969, 34: 44—50.

- [16] 菅义夫. 静电手册[M]. 北京:科学出版社, 1983.

JIAN Yi-fu. Electrostatic Manual[M]. Beijing: Science Press, 1983.

- [17] 吉林化学工业公司设计院. 静电安全手册[M]. 北京:劳动出版社, 1978.

Institution of Jilin Chemistry Industry Company. Electrostatic Safety Manual[M]. Beijing: Labor Press, 1978.