

粉体静电学国内外研究动态与进展*

孙可平

(上海海运学院应用物理应用数学研究所 上海 200135)

摘要 就粉体放电形态与点燃性,电场模型化与电场分布数值计算,放电电荷转移量与等价能量的实验规律,粉体静电防灾技术等几个方面,论述了粉体静电学国内外研究动态与进展。

关键词 粉体静电学,静电安全技术

RESEARCH DEVELOPMENTS AND PROGRESS ON POWDER ELECTROSTATICS

SUN Ke-Ping

(Institute of Applied Physics and Mathematics, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135)

Abstract Progress in the research on powder electrostatics is discussed, with particular mention of different sorts of powder discharge and their incendivity, field modeling and numerical simulation experimental tests of charge transfer and equivalent energy during discharges and powder hazard prevention.

Key words powder electrostatics, static safety technology

1 引言

高绝缘粉状物体(简称粉体)在生产、处理、运输过程中,特别是在气力输送过程中,会带上很高的静电。这些高带电粉体在料仓、储罐或运载工具内的积聚,就会形成很强的静电场。由此诱发的静电放电所引起的火灾、爆炸事故在国内外已屡见不鲜。粉体的燃爆事故,已成为化工、塑料、精细化工、石油炼制、制药、面粉、粮食储运等不少行业安全生产的严重威胁。因此,不少国家纷纷投入大量人力和资金进行粉体静电学的研究。20多年来,特别是近10年来,粉体静电的起电机理、安全评价、安全规范、防治措施和模型化研究已成为国际静电界的研究热点与前沿。

正如欧洲著名静电界学者 Berta 所指出的^[1],与60年代末超级油轮的连续爆炸引起了液体静电学研究的突破与进展一样,70年代以来,粉体料仓、储罐的不断爆炸,激发了粉体静电学的研究高潮,并不断取得重大进展。

Maurer 通过观测与研究,率先揭示了发生在粉体料仓内的一种新的静电现象——散装粉堆锥形表面的放电,简称锥体放电(cone discharge)。目前,学术界越来越多的人又把这种放电称为“maurer 放

电”,以纪念 Maurer 这一重大发现。对这种放电现象的进一步研究使人们认识到:以前认为只要避免对所有接地导体的火花放电,避免使用可能传播刷型放电的材料组合,就能避免静电放电成为点火源,这是很不够的,因为这并未考虑粉体自身。这种新的放电形态是人们必须重新考虑粉体本身静电场的安全评价。

2 粉体放电形态及点燃性

2.1 放电形态

Jones, King, Glor 与 Schwengfeuer 归纳了堆积粉体6种不同的放电形态^[3,4]:电晕放电、刷型放电、火花放电、传播型刷型放电(propagating brush discharge)、雷状放电(lightning-like discharge)和锥体放电(maurer 放电)。

传播型刷型放电又称 lichtenberg 放电,是指一个薄的绝缘层,背后衬有导体,一旦该绝缘层带电到某一程度时所发生的放电。显然,这种放电形态并不是粉体所特有的,其他薄的绝缘层(如涂漆的船舶钢板等)均可能发生。但对粉体而言,由于这种放电能量有时高达1J,已经引起了不少化工厂的爆炸,因

* 1999-11-08 收到初稿

此引起了人们的重视。

雷状放电,是取其类似于大气中的雷电而言的。它是指悬浮在粉堆上部空间的带电粉尘云,当其场强超过空气击穿场强时,向接地仓壁发生的长火花放电。这种放电仅发生在料仓容积大于 60 m^3 或直径 3 m 以上的大型料仓内。

之所以把散装粉体自身的放电——maurer 放电单独列为一种放电形态,是因为无论是通过模型计算,还是通过光学观测,都发现这种放电不仅能沿粉堆的表面进行,而且能穿过堆积粉体本身,到达仓的底部。特别是灌充粉堆的料位高度小于筒仓半径时,这种放电现象发生得更加频繁。不少学者通过进一步的研究,揭示出:

(1) mauerer 放电对正负两种带电粉体均能发生。

(2) mauerer 放电的能量随着筒仓直径的增加而增加。

(3) mauerer 放电往往发生在正在灌充的料仓。

(4) mauerer 放电从放电形态上看,仍是一种特殊的刷型放电,但实验再现性很低。

(5) 发生 mauerer 放电需满足以下条件:第一,相对较粗的粒子容易发生,较细的粒子较难发生。发生这种放电的粒子直径范围大约为 $1\text{—}10\text{ mm}$ 。第二,粒子的比电荷小于 $3\mu\text{C}/\text{kg}$ 。第三,连续快速地将这种粉体灌入料仓。

2.2 点燃性

长期以来人们普遍接受的一个观点,即“刷型放电仅能点燃可燃气体,不能点燃粉尘”的结论,已被 Schwengfeuer, Glor, Maurer 的最新试验结果所否定^[4,5]。他们用改进型的哈特曼管做试验,试图用刷型放电来点燃硫磺粉和聚乙烯粉,结果均成功地点燃了。Gibson 和 Glor 早先用来点燃丙烷/氮气/空气混合物的刷型放电的等价能量位于 $1\text{—}4\text{ mJ}$ 之间;而在新试验中所确定的聚乙烯粉的最小点火能量为 $1\text{—}3\text{ mJ}$ 。硫磺粉则小于 1 mJ 。因此在点燃试验中成功地点燃它们并不使他们感到吃惊。他们还发现,当硫磺粉更细时更易点燃。他们还从等价能量与电荷转移量的关系中推算出,放电时如果电荷转移量在 $220\text{—}280\text{ nC}$ 范围内(280 nC 是该试验装置能达到的最高电荷转移量),或者等价放电能量在 $0.8\text{—}1.3\text{ mJ}$ 的范围内,硫磺粉的点燃几率非常高,几乎达到 100% 。

自从发现 mauerer 放电以来,欧洲静电界对下述观点一直有争论:“maurer 放电总是发生在上部的

粉层或直接发生在粉堆的表面,因此很难点燃任何粉堆上部的粉尘云”。Glor 和 Maurer 以自己的最新研究成果宣布:上述观点不再得到承认^[5]。为了与钢质接地筒仓实验结果作比较,他们使用 2 m 直径的聚乙烯仓作试验,结果发现了一些重要特点:(1) 灌充粉体料位达到 1.5 m 高度时,已经观测到了穿过样品到达仓底的强烈放电;(2) 为了测量放电时的电荷转移量,在距仓底 1 m 高处紧贴内壁安装了环状金属带,如果这种金属带未接地,也观测到了强烈放电;(3) 灌充粉体料位即便只有 0.1 m 高(低于环状金属带),堆积成锥体形状的粉体仍发生了强烈放电,而且这种放电窜到了这种金属带的上面。他们以无可辩驳的试验事实解决了欧洲静电界的上述争论。

3 电场模型化与电场分布数值计算

3.1 安全评价的新思维

随着粉体静电学研究的不断深入,传统的仓内电场测量方法与安全评价理论受到了批评。Kattler 和 Glor 首先对传统的测量仓内几个孤立点电场强度的方法提出批评^[6],认为这种方法很难捕捉到仓内电场的最大值或最大值出现的区域,提出必须对仓内的电场分布进行模型化处理。

Berta 对电场模型化作了充分肯定与归纳,提出这是粉体安全技术的重要发展方向^[1]。

国际权威杂志《Journal of Electrostatics》的主编,美国教授 Jones 也提出了传统的测量方法与评价技术的缺陷;一是不系统,不全面,捕捉的信息有以偏盖全之嫌;二是忽略了累积电荷的动力学特征。进而提出了新的电荷弛豫理论,指出存在一种新的非本征时间常数,其影响超过了粉体自身的本征时间常数,提出了必须将带电粉体、灌充比、筒仓尺寸等多种因素融为一体,综合评价粉体的静电安全性能。

3.2 电场模型化

为粉体静电学作出重要贡献的 Glor 于 1985 年率先提出了粉体料仓的电场物理模型。他用电容器代表能量储存,电阻代表电荷弛豫,灌充、卸料和搅拌都表示为静电源,用两个火花间隙分别表示电晕放电和刷型放电或火花放电。该模型对讨论粉体料仓静电危害无疑有重要意义。但是,只可惜这是一个定性模型,并未给出定量描述。

Jones 在 1987 年提出了一维筒仓模型,指出了

随时间变化的电场的基本特征^[9]。

Jones 和 Chan 于 1989 年提出了二维模型,讨论了粉体料仓灌充期间的电荷弛豫问题,提出了电荷弛豫过程中存在着明显不同的非本征时间常数的计算公式^[9]。同年又提出了有绝缘衬层的料仓内的电场模型^[10],为进一步研究与解释传播型刷型放电与 maurer 放电作出了开拓性的贡献。

Glor 与 Maurer, Kuttler, Schwengfeuer 等人合作,于 1993 年提出了新的定量分析与计算的粉体料仓模型^[4-6]。Jones, Pazda 和 Matsubara 于 1994 年提出了任意截面、部分灌充的料仓内电荷弛豫模型。可以说,最近几年,粉体电场模型化的研究正不断取得突破性进展。

在我国,由作者任课题组长,由上海海运学院与中国石化总公司联合攻关,也提出了结合中国实际的粉体料仓电场模型。该模型体现了带电粉体的动力学特征,将灌充比、带电粉体、筒仓尺寸等多种因素融为一体,涵盖了我国各种尺寸的大小料仓,为研究料仓电场分布奠定了技术基础。该模型在第三届国际静电学术会议上发表后,得到了国际同行的认同与好评。

3.3 电场分布数值计算

要把粉体电场模型实用化,就必须使用有限单元法或差分法,对电场进行离散化处理,再利用数值计算技术,编制程序,就能够分析、求解料仓内的电场分布。目前,完成这项工作并公开发表研究成果的,国际上只有两家:一是 Glor 和 Kuttler 于 1993 年发表^[6];二是笔者于 1998 年发表^[11]。这两项独立完成的研究成果,均摒弃了单点测量仓内电场的传统方法,完成了粉体料仓内电场数值计算程序编制,从而能够计算仓内任意位置、任意时刻的电场强度与电势,并能对大量数据进行分析、处理和作图,预测仓内电场强度最大值可能出现的区域与时间。这就为安全评价进而为筒仓防爆奠定了开拓性的技术基础。本文作者的研究成果发表后,已被 SCI, EI 等 13 种国际检索系统所收录。

为了对两种数值计算的精度作比较,特将两种计算系统对同一料仓(直径 3 m,高 8 m)和同一粉体(质量密度为 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,堆积质量密度为 $0.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,空间电荷密度为 $0.6 \times 10^{-3} \text{ C/m}^3$,相对介电常数为 2.5)进行电场计算。现将 5 个料位时的仓内最高电势与最大电场强度计算结果列于表 1 [假定仓内未发生任何静电放电,即所有计算都是在稳定条件(steady-state condition)下完成的,因此计

算结果出现了高于空气击穿场强的值,就不足为奇了]。

表 1 国内外两种数值计算系统对同一料仓、同一粉体的计算结果

料位/ m		0.5	1	1.5	2	3
V_{\max}	Glor 计算结果	3500	9020	13200	16000	19200
	笔者计算结果	3788	8566	11470	12906	13877
/ kV	Glor 计算结果	14400	22900	26500	28100	29000
	笔者计算结果	10588	15533	18180	19342	20155

3.4 安全评价

3.4.1 低料位时的安全评价

由于我国发生了两起大型料仓的爆炸事故,所以笔者特意对低料位时的电场分布进行了计算与分析。图 1 是料位为 0.1 m 时仓内粉堆表面电场强度随筒仓半径的变化曲线。筒仓尺寸为直径 3 m,高 8 m,粉体质量密度为 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,初始空间电荷密度为 $0.6 \times 10^{-3} \text{ C/m}^3$,粉体相对介电常数为 2.5。

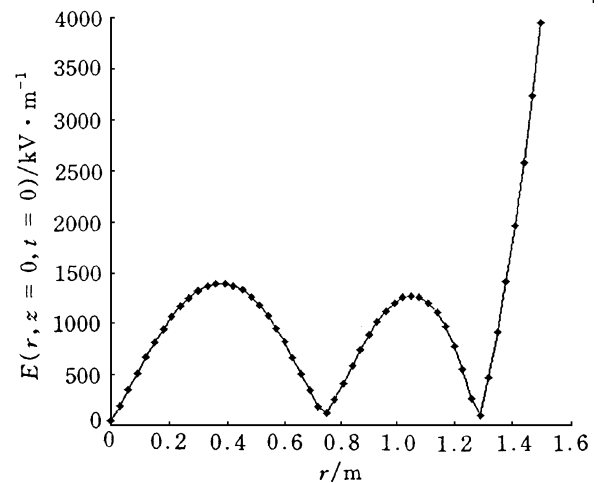


图 1 低灌充比时粉堆表面电场强度随半径 r 的变化曲线(料位 $b=0.1 \text{ m}$)

该图表明,即便是很低的灌充水平(0.1 m),但场强最大值仍然达到了空气击穿场强。

我们的计算结果表明,场强最大值出现在仓壁附近,而不是文献[6]所说的出现在仓底的中心。笔者还认为,场强最大值出现在仓壁附近与出现在中心相比,危险性更大,因为更容易引发对接地筒仓仓壁的静电放电。

3.4.2 高料位时的安全评价

不少研究者对高料位灌充作业时的静电放电危险性发出了警告。例如,文献[7]指出,当灌充比 $f \rightarrow 100\%$ 时,电路时间常数 τ_0 与粉体时间常数 τ 之比很快变大,这就使电荷衰减大大放慢,从而使静电放

电的几率大幅度提高。

但是,对于高料位时的电场强度与电势的变化规律,却少见报道。从我们的计算看,当灌充比位于 $0.3 < f < 0.9$ 区间时,电场强度与电势的变化规律与其他文献结果并无不同,都显示出典型的单调变化趋势。

但是,当灌充比 $f > 90\%$ 时,虽然电势仍然随半径单调变化,但是电场强度却一改随半径单调变化的趋势,而变得起伏不定,难于预料,如图 2 所示。

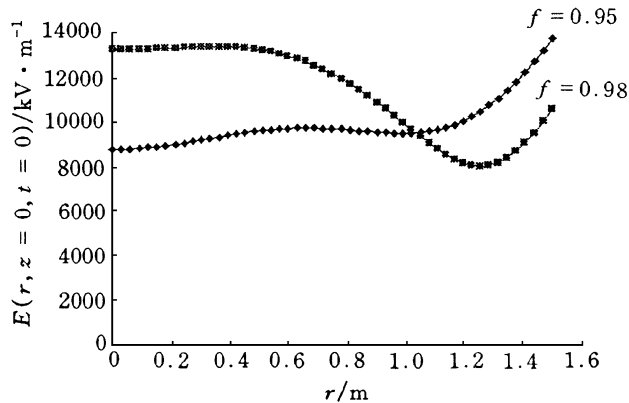


图 2 灌充比 $f > 90\%$ 时, 电场强度随 r 的变化曲线

4 放电时的电荷转移量与等价能量的实验规律

评价静电放电的点燃危险,涉及以下两个方面:一是分析、评价发生静电放电的可能性(几率),这就与电场强度的最大值出现的时间与区域、现场空气击穿场强等密切相关;二是分析、评价静电放电的点燃性(incendivity)。点燃性的高低,与静电放电时的等价能量(equivalent energy)的大小密切相关,而等价能量又与放电时的电荷转移量有直接关系。因此,试验研究放电时的电荷转移量与等价能量,探索其规律,是粉体静电学的重要内容之一。现将国际上的最新研究成果^[4-6]介绍如下。

欧洲的 Schwengfeuer, Glor, Maurer, Kuttler 等用不同直径的钢质筒仓对粉体进行灌充和循环实验,多次观测到了 maurer 放电。他们发现放电时的电荷转移量与筒仓直径有着很敏感的关系。他们总结出的电荷转移量的实验规律为

$$\Delta q = 2.3 \times D^{2.3}, \quad (1)$$

式中 Δq 为 maurer 放电时最大电荷转移量,单位为 μC , D 为筒仓直径,单位为 m 。

他们对多种粉体、不同直径的筒仓作了实验,并

观测 maurer 放电的等价能量,总结出的等价能量与电荷转移量遵守如下实验规律:

$$W_e = 10 \times \Delta q^{1.2}, \quad (2)$$

式中 W_e 为 maurer 放电时的等价能量,单位为 mJ , Δq 为 maurer 放电的最大电荷转移量,单位为 μC 。

从(1)、(2)式很容易得到:

$$W_e = 27 \times D^{3.36}. \quad (3)$$

可见,maurer 放电的等价能量与筒仓直径有着十分敏感的关系。这就是为什么筒仓越大,越要采取各种措施,防止发生静电放电的原因所在。

5 粉体静电防灾技术

粉体静电学的另一个重要研究内容,就是积极采取各种可能的措施,尽量减少仓内发生危险性静电放电的几率。下面简要介绍一下国内外粉体防灾技术的主要发展趋势与研究成果。

5.1 控制粉体中可燃气体的含量

Berta 与中国石化总公司的研究人员,在各自独立的研究过程中,从众多粉体燃爆事故的调查分析中,都发现大多数燃爆事故与粉体中的可燃气体含量有密切的关系。由于粉体在制备、合成、气力输送、干燥、粉碎等工艺中不可避免地混入各种可燃气体,因此,他们分别提出了控制粉体中可燃气体的含量,是防止粉体燃爆事故的重要环节。

中国石化总公司的研究人员,经过艰苦的努力,已经找到了工艺条件下控制可燃气体混入粉体的技术关键。

5.2 合理确定带电粉体进入筒仓前的电荷密度值

如果在带电粉体进入筒仓之前,采取技术措施,大大降低粉体的带电量或电荷密度值,必将显著降低仓内的电场强度。把粉体的电荷密度控制在多少为宜,就需要通过数值计算技术合理地加以确定。

据笔者调查,我国大多数生产企业的粉体在进入筒仓之前的比电荷(即荷质比)为 $0.1 \sim 6 \mu\text{C}/\text{kg}$ 。假定粉体的质量密度为 $1.2 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$,则粉体的体电荷密度为 $(0.12 \sim 7.2) \times 10^{-3} \text{C}/\text{m}^3$ 。

以我国目前最低的电荷密度 $0.12 \times 10^{-3} \text{C}/\text{m}^3$ 来计算:我国的最小筒仓尺寸为直径 1m ,高 2m ,以空气击穿场强 $3 \text{MV}/\text{m}$ 来倒推,可算出料位达 1.98m 时就处于可能的不安全状态。我国目前最大筒仓尺寸为直径 8m ,高 30m ,同样以最低的电荷密度值和空气击穿场强来推算,则料位为 0.01m ,即刚刚灌充时就处于可能的不安全状态。

因此,利用电场分布数值计算技术,可以方便地计算出各种工况条件下允许带电粉体进入筒仓前的电荷密度临界值.

5.3 静电消除器

仅仅推算出带电粉体进入筒仓前的电荷密度值还不够,还必须在进料口加装各种静电消除器,方可将之变为现实.

笔者与上海其他专家合作设计、研制的防爆型管道粉体静电消除器^[12],按照日本技术标准考核(国内尚未颁布有关标准),完全达到防爆要求,目前已投入使用,消电能力强,安装使用方便.

中国石化总公司安全技术研究所研制的料仓入口处专用的无源静电消除器,设计巧妙,也能较好地降低粉体的电荷密度.但这种消除器仅能安装于垂直进料的筒仓入口.

中国石化总公司安全技术研究所近来又研制成功全自动粉体静电消除器.它由法兰式静电消除器、静电传感器、粉体传感器、气体传感器等构成.消电任务主要由法兰式静电消除器来完成.它能把程控高压电源送来的高压电能转换成一定极性和数量的离子,并在正压保护气体作用下把离子吹到带电粉体附近,以消除静电.静电传感器主要用来检测消电后粉体的剩余静电荷,并反馈给模糊控制器.模糊控

制器对反馈的静电信号和给定值进行模糊推理,对程控高压电源进行控制,调节离子输出量,以恰当的离子量去中和粉体所带的电荷量.粉体传感器用于检测法兰式粉体静电消除器中是否有粉体通过,以控制其工作状态.气体传感器用于检测保护气体压力,判断保护气体压力是否大于规定值,以决定是否切断系统工作电源.

参 考 文 献

- [1] Berta I. J. *Electrostatics*, 1993, 30:365—380
- [2] Maurer B. *Ger. Chem. Engrg.* 1979, 2:189—195
- [3] Jones T B, King J L. *Powder handling and electrostatics*. Michigan: Lewis Publishers, 1991
- [4] Schwengfeuer K, Glor M. J. *Electrostatics*, 1993, 30:115—122
- [5] Glor M, Maurer B. J. *Electrostatics*, 1993, 30:123—134
- [6] Kuttler A, Glor M. J. *Electrostatics*, 1993, 30:285—295
- [7] Jones T B, Chan S. J. *Electrostatics*, 1989, 22:185—197
- [8] Glor M. J. *Electrostatics*, 1985, 16:175—191
- [9] Jones T B. *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 85, Section 3*
- [10] Jones T B, Chan S. J. *Electrostatics*, 1989, 22:199—212
- [11] SUN Ke-Ping, YU Ge-Fei. *J. Electrostatics*, 1998, 44:119—123
- [12] SUN Ke-Ping. Investigation on static explosion proof of aldehyde resin powder in pneumatic pipe. In: *Proceedings of the 6th international colloquium on dust explosion*, Shenyang: Northwest University Press, 1994. 420—425

2000 年第 7 期《物理》内容预告

研究快讯

Si(111) - 7×7 表面孤立 C_{60} 分子的吸附取向及局域电子态研究(曾长淦等).

评 述

呼之欲出的新一代 MOS 栅极电介质材料(陈刚等);
胶体晶体结晶过程与人造三维周期性集团点阵材料(潘明祥等).

知识和进展

实验室天体物理学简介(张杰等);
新型分子器件——分子马达(蔺洪振等);
粉末随机激光辐射(林景全等);
CR-39 核径迹探测器及其在核科学等研究领域中的应用(翟鹏济等);
高阻尼材料的阻尼机理及性能评估(方前锋等).

物理学和高新技术

激光和电子束表面强化技术的发展及其应用(宋仁国等).

实验技术

光声技术在固体材料热扩散率测量中的应用(张国斌等);

一个方便实用的粉末衍射数据处理和结构分析程序(董成).

物理学史和物理学家

光辉的一生 崇高的品德——深切怀念谢希德教授(陆栋等);

走在时代前面的卓越物理学家——李政道(朱仁义等);

奥古斯特·孔脱:第一流实验物理学家(罗平).

前沿和动态

记录古气候的同位素温度计(戴闻);

$La_{1.4-x}Nb_{0.6}Sr_xCuO_6$ 中的一维电子结构(戴闻);

国家重点基础研究技术发展规划项目(973)——“超导科学技术”正式启动(刘宣平).