

工业中粉体颗粒的荷电机理及数值模拟方法

危卫 张力元 顾兆林

Particle charging mechanism and numerical methodology for industrial applications

Wei Wei Zhang Li-Yuan Gu Zhao-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 168301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.168301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.168301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

两相湍流统一色噪声法概率密度函数模型

[A two-phase turbulence probability density function model in unified colored-noise approximation](#)

物理学报.2015, 64(5): 054704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054704>

强梯度复杂流场中的粒子动力学响应试验研究

[Experimental study on of dynamics of particles in the flow filed with intensive gradients](#)

物理学报.2014, 63(18): 188301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.188301>

二次等效法求三层媒质中静态电偶极子的场分布

[Electric field of a static electric dipole in three-layer medium model using secondary equivalent method](#)

物理学报.2012, 61(24): 244101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.244101>

风沙运动的电场-流场耦合模型及气固两相流数值模拟

[Modeling and simulation of electrification of wind-blown-sand two-phase flow](#)

物理学报.2012, 61(15): 158301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.158301>

综述

工业中粉体颗粒的荷电机理及数值模拟方法*

危卫¹⁾ 张力元²⁾ 顾兆林^{2)†}

1) (武汉理工大学能源与动力工程学院, 武汉 430063)

2) (西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

(2015年1月13日收到; 2015年3月23日收到修改稿)

工业过程中粉体颗粒不可避免地会相互摩擦碰撞而荷电. 荷电颗粒的存在可能会危害正常的工业生产过程, 也可能对工业过程起促进作用. 因此, 荷电粉体颗粒及其特性受到了广泛的关注, 但目前对粉体颗粒的荷电机理依然缺乏透彻的了解, 尤其是在气固两相流动中的粉体颗粒荷电现象. 事实上, 工业中存在的粉体颗粒的运动都受到流体的影响, 是典型的气固两相流系统, 流体对粉体颗粒的作用使粉体颗粒接触的荷电现象变得更为复杂, 因此从两相流动的观点来研究粉体颗粒荷电的物理本质就显得越来越重要. 本文介绍了工业过程中的几种不同类型的粉体颗粒荷电行为, 回顾了颗粒的荷电机理与描述颗粒荷电的数学模型. 对于工业过程中颗粒的荷电现象及颗粒在多相流体中的动力学行为, 介绍了研究颗粒受流体影响时荷电特性的数值模拟方法. 本文旨在对粉体颗粒的荷电机理、应用以及研究方法进行梳理与探讨, 为正确认识工业过程中粉体颗粒的荷电现象并加以控制利用提供理论借鉴.

关键词: 颗粒荷电, 荷电机理, 荷电模型, 数值模拟

PACS: 83.10.Pp, 82.30.Fi, 47.55.Kf, 41.20.Cv

DOI: 10.7498/aps.64.168301

1 引言

现代工业生产过程中的粉体是粉尘、粉末及颗粒状物质的总称. 一般而言, 将粒径 $d > 0.5$ mm 的物质称作颗粒; 将粒径 d 在 100 μm 和 0.5 mm 之间的物质称作粉末; 将粒径 $d < 100$ μm 的物质称作粉尘^[1]. 粉体在生产、处理、运输过程中, 特别是在气力输送过程中, 由于粉体颗粒间的相互摩擦碰撞使之带上静电. 这些带电粉体颗粒在料仓、储罐或运载工具内的积聚, 会形成很强的静电场. 由此诱发的静电放电所引起的火灾、爆炸事故在国内外屡见不鲜. 粉体的燃爆事故严重威胁着化工、塑料、精细化工、石油炼制、制药、面粉、粮食储运等不少行业的安全生产^[2,3]. 例如: 发生于2014年8月2日的昆山市某金属制品公司汽车轮毂抛光车间的粉尘爆炸事故造成75人死亡, 185人受伤. 2011年4

月1日, 位于浙江省缙云县某公司一零件抛光车间内由金属粉尘引发爆炸事故, 造成现场作业的工人5人死亡. 2010年2月24日16时12分, 河北秦皇岛市抚宁县某公司淀粉四车间发生粉尘爆炸, 事故共造成19人死亡、49人受伤. 有分析指出, 由粉体颗粒摩擦产生的静电场可能是粉体爆燃的着火源^[1]. 尽管荷电的粉体颗粒会严重危害工业过程, 然而由粉体颗粒产生的静电也可以被工业过程所利用. 例如: 将粉体颗粒的荷电特性加以利用, 可以用于粉体的喷涂、静电除尘、粉体的分离、静电层析成像技术等工业过程中^[4]. 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, 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.

尽管粉尘颗粒的静电现象得到了如此广泛的关注与应用, 但对粉尘颗粒静电产生的机理依然缺乏透彻的了解^[5], 甚至在许多基本概念上都存在争

* 国家自然科学基金 (批准号: 11302155, 10872159) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2014-IV-033) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guzhaoln@mail.xjtu.edu.cn

议,尤其是在外部流体作用下的颗粒荷电现象. 外部流体会对颗粒荷电产生何种影响? 是什么原因造成了颗粒表面荷电? 是何种物质在表面迁移而产生净电荷? 当相互接触的颗粒间的物理属性相似时(比如: 相似的化学组分、相似的结构), 导致电荷转移的驱动力是什么? 湿度或其他类型的吸附组分是否在荷电过程中起着作用? 这些都是亟待解决的问题^[6].

事实上, 工业中存在的粉体颗粒的运动都受到流体的影响, 是典型的气固两相流系统, 流体对粉体颗粒的作用使粉体颗粒接触的荷电现象变得更复杂. 因而从两相流动的观点来研究粉体颗粒荷电的物理本质就显得越来越重要. 本文首先介绍粉体颗粒在工业中的应用, 然后回顾颗粒的荷电机理与颗粒荷电的数学模型. 颗粒在工业过程中的荷电现象涉及颗粒在多相流体中的动力学行为, 因此本文重点介绍研究上述多物理场中多相流体运动特性的数值模拟方法. 本文旨在对颗粒的荷电机理、应用以及研究方法进行梳理与探讨, 为正确认识颗粒的荷电现象并加以控制利用提供理论借鉴.

2 工业中的粉体颗粒荷电

在人类现代生产和生活活动中, 静电存在的范围很广. 静电带来极大便利的同时, 给人类社会带来了各种各样的麻烦甚至引发灾难性事故. 工业粉体的来源与种类繁多, 其材料组成包括金属、非金属, 甚至高分子材料. 因此, 不论是从提高粉体颗粒静电利用效率还是降低粉体颗粒静电危害的角度, 都有必要深入研究粉体颗粒之间带电机理、影响因素及静电的趋势.

2.1 静电的利用

在工业生产过程通常利用颗粒相反的电荷极性在电场中的运动轨迹的差异将其分离, 其颗粒荷电的方式有感应荷电、电晕荷电^[7]和摩擦荷电等.

2.1.1 静电分选

由于颗粒几何形状、导电率、介电常数等的不同, 其在相互接触过程中形成的荷电量和极性不同, 导致颗粒在外加电场中的运动轨迹不同. 利用此特性可以实现颗粒的分选, 这种颗粒分离提纯的方法叫静电分选^[8-10], 其工作原理如图1所示. 目前静电分选已经广泛应用于选矿工艺、药品分离和产品筛选等工业过程中^[11].

从摩擦电选的工作原理可以看出, 分选的效率取决于如何使粉体颗粒带上大小不同的异性电荷. 在自由下落式静电分选过程中, 颗粒首先进入到摩擦荷电的装置内, 经过多次摩擦碰撞之后使颗粒带上电荷. 根据使颗粒摩擦荷电装置的不同, 摩擦电选还有辊式静电分选和板式静电分选等. 在对摩擦电选颗粒荷电效率的研究中发现, 颗粒材料组成、气流速度、环境温度、环境湿度、颗粒电学物理性质等会影响颗粒的分选效率^[13].

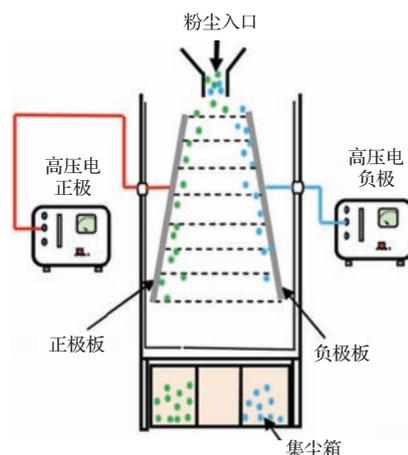


图1 (网刊彩色) 自由下落式静电分选工作原理示意图^[12]

Fig. 1. (color online) Scheme of the free fall electrostatic separator^[12].

2.1.2 静电除尘

静电除尘是一种利用含尘气体通过强电场使颗粒物带电、再通过电场使带正/负电荷颗粒物分别被负/正电极板吸附的方式除去气流中颗粒物的一种除尘方法^[14]. 线板式静电除尘器结构示意图如图2所示, 由作为放电(或电晕极)的高压导线和作为集尘板的极板所组成. 在极线上施加高电压时, 极线附近就会产生电晕形成一个极不均匀的电场, 使极线附近的气体电离, 由此所生成的离子在向集尘板运动的过程中与气流中的悬浮颗粒碰撞并附着在其上面, 从而导致颗粒荷电, 颗粒荷电的大小取决于附着离子的数目^[15,16].

在外加电场的作用下, 颗粒上的电荷受到指向集尘板的电场力的作用, 其大小取决于荷电量的大小和电场的强度. 在机械力、电场力和分子力的共同作用下, 颗粒沉积于集尘板上. 主要包括以下四个过程: 气体的电离、悬浮颗粒的荷电、荷电颗粒在外加电场中的运动和荷电颗粒的沉积^[17,18].

静电除尘器内粉尘颗粒的荷电行为受粉尘属性、气流性质和操作因素等影响. 其中, 进入静电除

尘器内空气的湿度很大程度上会影响粉尘颗粒的荷电特性^[20].

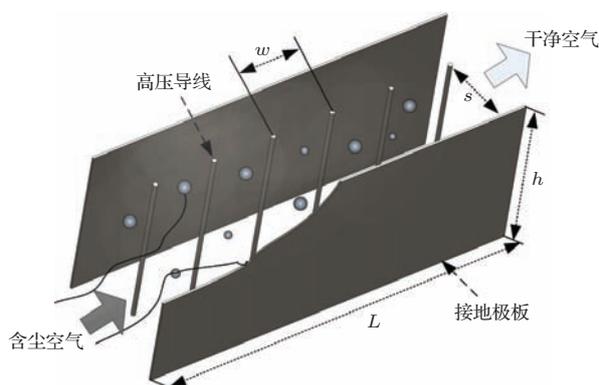


图2 线板式静电除尘器结构示意图^[19]

Fig. 2. Scheme of the wire-plate electrostatic precipitator^[19].

2.2 静电的危害

粉体加工或处理过程中, 粉体颗粒必然悬浮于加工设备内部或扩散到生产处理空间; 粉体颗粒被流体夹带, 受曳力作用不可避免地发生摩擦碰撞而荷电. 由于粉尘微粒的荷电作用, 在粉体加工设备内部或粉体扩散空间产生静电场. 粉尘如果达到一定浓度, 就有可能发生爆燃.

2.2.1 流化床(设备)内的静电

气固流化床具有传质传热速率高、颗粒易于混合均匀和适合大规模连续化生产等优点, 被广泛应

用于过程工业中. 然而在流化床的正常操作过程中, 由于颗粒间及颗粒与流化床壁面间的碰撞会不可避免地产生电荷, 静电电荷的产生会使带异种电荷的颗粒由于相互吸引而团聚, 床体壁面吸引带异种电荷的颗粒而导致粘壁. 电荷积累到一定程度时, 甚至会造成放电爆炸等安全事故^[21,22].

流化床内静电的产生与其中流体运动的力学特性密切相关, 气体相与颗粒相的运动特性决定了颗粒与颗粒之间、颗粒与壁面之间的摩擦频率和强度, 进而影响流化床内静电的产生、耗散和累积速率^[23,24]. 气固流化床内的电荷的产生和积累通常被认为是摩擦起电效应. 颗粒摩擦的来源包括颗粒和颗粒的作用, 以及颗粒和流化床壁面的作用. 由于颗粒之间的碰撞频率数量级远远高于颗粒和流化床壁面之间的碰撞频率, 颗粒之间的碰撞是流化床内静电形成的最主要的原因^[25], 图3所示为根据实验结果利用信号重构技术得到的流化床内电荷密度的云图^[26,27].

2.2.2 粉体分布的生产车间(空间)内的静电

金属制品抛光车间、淀粉生产车间、大型粮食贮仓等空间内都曾发生过着火或爆炸, 造成人员伤亡和财产损失. 由于粉体的最小点火能量小, 当其恰处于爆炸浓度范围内, 只要有大于其最小点火能的火源, 就有可能造成粉体爆炸. 就点火源来说,

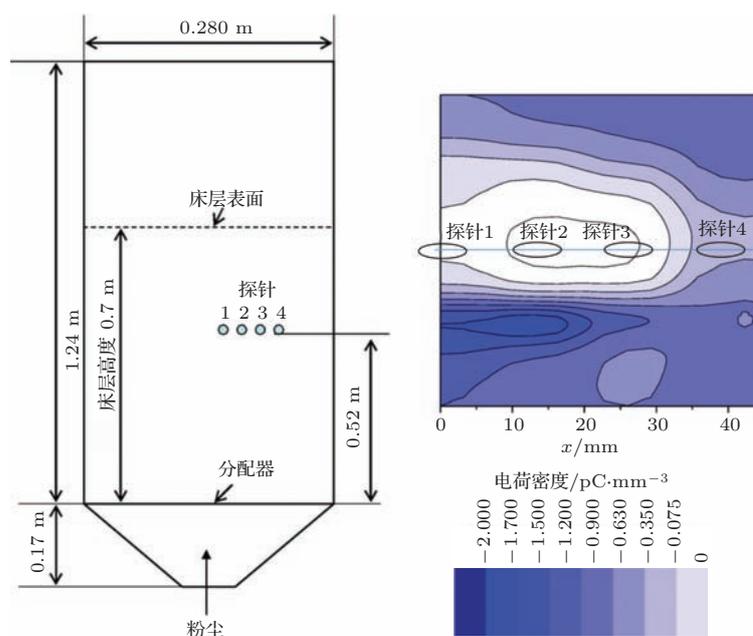


图3 (网刊彩色) 流化床内电荷密度的云图^[27]

Fig. 3. (color online) Charge density in fluidized bed^[27].

常见的是明火、电器火花和金属撞击火花三种。但是,有些粉体爆炸事故却是发生在上述三种点火源都不存在的情况下,有学者将这种情况的点火源推测为静电引燃^[28]。粉体加工或处理过程中,由于粉尘微粒的荷电作用^[29],在粉体加工设备内部或粉体扩散空间产生静电场,当局部的静电场场强超过空气的绝缘强度时,空气被击穿,产生局部放电,并伴有瞬间发光、发声和放热现象,特别是极短时间内的放热过程产生局部高温,进一步引发粉尘微粒的剧烈氧化反应,迅速扩散至整个粉尘体系空间,产生冲击波,破坏设备或整个工厂设施。

从静电产生的角度,对于粉体加工设备,预防粉尘爆炸的措施应该包括:防止静电生成,例如削弱生产过程中粉体摩擦、分离起电,生产过程中适当限制粉体流速等;促使静电泄漏,如向粉体中加入防静电添加剂,粉体加工设备静电接地等。

对于粉体微粒扩散分布的生产车间(空间),首先按照国家有关规范,去除火源,增设灭火装置和疏爆装置等,加强环境通风换气,减少粉体空间积累量是基本措施。对于生产车间(空间)的通风死角,须利用其他技术措施消除荷电粉尘的电荷并去除粉尘,是值得进一步研究的工作,也包括改进粉体加工或处理车间的空间结构。

3 粉体颗粒荷电机理

处于自然态下的物质其总体呈现电荷平衡,从物质的电荷结构来看,物质荷电的过程,其实质上就是物体内部电荷的平衡被打破,物体内部原有的电子/离子等分离后再分配的过程。由于物质材料属性的不同,其带电的极性和带电量的大小与环境温度、环境湿度、接触过程中摩擦力的大小、电阻率、介电常数等有关。为了更好地理解和控制工业过程中颗粒系统内的摩擦荷电现象,首先必须理清颗粒接触过程中颗粒荷电的机理^[30,31]。

金属材料接触荷电的机理比较直观,可以用费米能级或功函数来描述金属材料中能量的最高占据价态。当两个金属表面相互接触时,自由电子从低功函数(高费米能级)的表面传递到高功函数(低费米能级)的表面。然而,对绝缘体接触荷电时发生转移的物质却存在着不同的解释,认为可能是电子、离子、某种纳米物质或者是水性离子在接触面上发生转移,而且不同的条件下使物质发生转移的方式也不同,如图4所示^[32]。

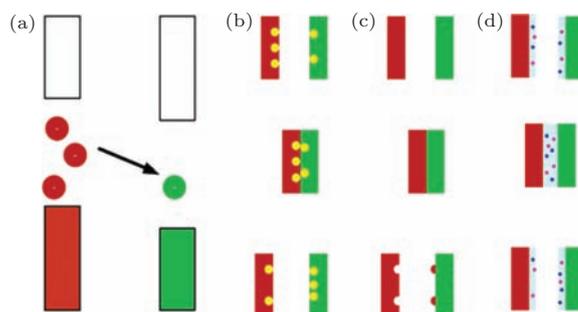


图4 (网刊彩色) 绝缘体材料接触荷电机理^[6,32] (a) 电子转移模型,被困于材料缺陷处(图示间隔部分)的电子转移到低能级态; (b) 离子转移模型,可自由移动的离子通过接触面转移; (c) 物质转移模型,某种纳米尺度的物质在材料表面相互转移; (d) 水性离子转移模型,水膜离子通过材料表面吸附水层转移

Fig. 4. (color online) Contact electrification models of insulating materials^[6,32]: (a) electron transfer model; (b) ion transfer model; (c) material transfer model; (d) aqueous ion transfer on particle surfaces model.

3.1 电子转移荷电机理

众所周知,金属接触荷电的原因是自由电子的相互转移,发生转移的驱动力是不同材料间功函数的差异。因此,自然而然可以将这种观点延伸到解释到绝缘体的接触荷电现象。绝缘体的电子结构由已被电子填满的满带和未被电子填满的导带组成,导带和满带之间存在着禁带。因此,由于没有空余电子位,自由电子不可能自发地从导带转移到满带,而且也没有足够的能量自发地突破禁区而转移到导带。然而材料并非都是理想状态,会存在缺陷从而存在受困于禁带的电子^[33]。面态理论(surface state theory)假设在绝缘体接触过程中受困于高能态的电子与另一绝缘体表面低能态的电子发生交换,其驱动力是不同绝缘体间“有效功函数”的差异。

事实上,利用化学探针测试的方法,在实验中发现了电子在绝缘体相互接触过程发生转移^[34-36]。聚四氟乙烯在接触荷电后被放置到具有能使组分还原的溶液中让其产生化学反应。与电子探针不能分辨电荷极性不同的是,化学反应只有当电荷被电子携带时才能发生。例如:含 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ 的溶液具有良好的氧化还原特性,原始溶液的伏安特性显示出溶液中含有稳定的 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ 电流信号,而当荷电的聚四氟乙烯浸没在溶液中后,电流信号会减弱,从而可以确定溶液中的 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ 变成了 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$,由此便确认绝缘体中是存在电子的。

3.2 离子转移荷电机理

另外一种使绝缘体荷电的机理涉及离子转移。绝缘体表面可能存在着能自由移动的离子,例如表面存在盐分的离聚物或聚合物。这种类型的材料能将某种极性的离子束缚在其内部,而另外一种相反极性的离子会游离于材料表面。当两物体相互接触时,处于游离状态的离子可以通过接触界面扩散,在相互接触的表面重新分布^[37]。基于此种解释,绝缘体接触荷电的过程中,离子在其表面相互转移的机理被广泛认可。也有学者认为^[38]:绝缘体表面结构存在缺陷,致使绝缘体颗粒可能并不是严格地呈电中性的,存在于表面的局部电荷被从大气中吸收的离子所抵消(离子密度可达 10^9 m^{-3} 数量级)。当两个表面接触发生摩擦时,电荷与离子的动态平衡被打破,电荷或离子发生重新分配,致使表面荷电。

3.3 物质转移荷电机理

目前存在的荷电机理普遍认为:1)发生接触荷电时,相互接触的物体间具有不同的材料属性和(或)不同的化学势(比如,同种材料但直径不同的颗粒);2)荷电量的大小与有效接触面积成正比。然而,从原子能的角度发现完全相同的绝缘体间接接触分离后也能荷电,而且荷电量随着接触次数的增加而增多。因此认为:同种材料间接接触荷电的驱动力可能是材料内部某种固有的、分子尺度的波动^[39]。学者们开始认识到接触荷电的物质转移荷电机理,物质转移荷电机理表明纳米或者微米级的物质会在物体相互接触的过程中在物体间相互转移使之荷电。采用射线光电子能谱分析和拉曼光谱分析发现由于物体表面化学和微观力学特征在纳米/原子尺度上是非均匀的,物质会在相互接触的表面间转移形成类似于“马赛克”图案的分布^[40,41],以此证实了物质转移模型的可能性。值得一提的是,当物体接触时,不仅会发生物质的转移,而且会改变物体表面吸附离子的方式。因此,物质转移并不仅仅是直接转移物质上携带的电子,可能还存在某些更复杂的非直接的影响因素^[42]。

3.4 水性离子转移荷电机理

事实上,大气环境中吸附于材料表面的水分子在接触过程中扮演着非常复杂的角色。如果相互接触的物体表面都存在水膜,则在接触界面会形成

“水桥”,氢离子和氢氧离子通过水桥发生重新分配,物体分离后使其荷电^[32]。实验结果已经证实:改变环境的相对湿度会改变自由离子在物体表面吸附水层中与环境转移的速率,从而会改变物体表面荷电特性^[43]。此外,当环境压力降低时,由于物体表面离子的解析作用,表面上的电荷的数量会发生突变^[44]。在实验中还发现,当通过紫外线改变物体表面的化学组成使其变为疏水性时,物体接触荷电的速率会随之发生改变,这说明在接触荷电时物体表面吸附水层中的离子发生了交换^[45]。

4 粉体颗粒荷电的数学模型

当颗粒在气流作用下运动时,颗粒会发生相互碰撞,从而使颗粒荷电。由于颗粒的比表面积比较大,因此即使是比较小的电量也会对整个系统产生比较大的影响。颗粒系统中电荷的极性与颗粒的粒径密切相关。对自然界中尘卷风和沙尘暴的电场的测量结果表明:电场方向垂直于地面并且负极指向空中^[46-49]。小粒径的颗粒易被吹到高空,因此电场的方向表明,小粒径的颗粒带负电,而大粒径的颗粒带正电。在对工业粉末传输的研究中^[50]也发现了小粒径颗粒带负电,大粒径颗粒带正电的现象。

大量的实验研究也表明由单一材料组成的颗粒系统中存在双性带电现象,即一部分颗粒带正电,另外一部分颗粒带负电。大多数实验发现双性带电现象中通常都是大颗粒带正电而小颗粒带负电,然而也有少量的实验^[51,52]得出了与此相反的结果,即大颗粒带负电而小颗粒带正电。对造成这种差异的原因仍然没有得到很好的解释,可能是实验所用的材料的差异,也可能是实验方案引起的,比如说是颗粒之间的碰撞占主导还是颗粒与壁面的碰撞占主导等。

由同种材料组成的绝缘体颗粒系统的荷电过程可由电荷转移模型来描述,不同的电荷转移模型可以描述特定情况下颗粒的荷电过程。

4.1 外加电场作用下电荷转移模型

当完全相同的颗粒(材料属性和化学势均相同)发生对称摩擦碰撞时,电荷转移的驱动力是什么呢?Pächt等^[53]指出外加电场的存在(如大气电场)打破了颗粒间的对称性,为电荷转移提供了驱动力。以外加电场方向由上指向下为例进行说明,

颗粒在此外加电场下被极化,使负电荷聚集在颗粒的上半部,而正电荷聚集在颗粒的下半部,而颗粒总体上仍然呈电中性.被极化的两个颗粒沿上-下方向发生碰撞时,上方颗粒的带正电荷部分与下方颗粒带负电荷部分发生中和,使上方颗粒带负电,而下方颗粒带正电.此外,电场的存在使颗粒在空间上分层:带负电荷的颗粒位于空间上方,而正电荷颗粒位于空间下方.以至于在随后的接触碰撞过程中带正电的颗粒失去更多的负电荷使正电性越来越强,而带负电的颗粒失去更多的正电荷使负电性越来越强.

4.2 非对称碰撞电荷转移模型

无论是在实验还是实测中都会观测到同种材料组成的颗粒系统中小粒径颗粒带负电,而大粒径颗粒带正电的现象,但4.1节中所述的“外加电场作用下电荷转移模型”无法解释此现象.

事实上,颗粒表面的电子处于平衡态时,低能态被电子所占据而高能态被空穴占据,但是也有少数电子可能会被困于高能态而低能态被空穴填充,这就是所谓的电子非平衡分布^[33].受困于高能态的电子不能在颗粒表面上自由从高能态迁移到低

能态,如图5所示.但当两颗粒在相互接近过程中,受困于高能态的电子可能会被释放出来,沿着接触面迁移至与之接触的颗粒的低能态.分开后,失去电子的带正电,得到电子的带负电.

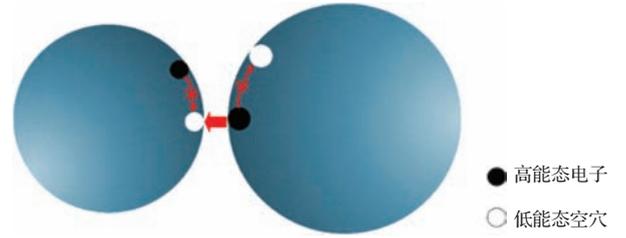


图5 (网刊彩色) 绝缘体颗粒接触时电子转移过程示意图^[54]

Fig. 5. (color online) Schematic representation of the process of electron transfer on the contact surface of two particles^[54].

根据此电荷转移的思路,假设粒径不同的颗粒相互接触碰撞时,通过理论分析,可得到如表1所示的电荷转移模型.可见由于颗粒的粒径差异,颗粒在接触碰撞过程中有电荷发生迁移,我们称之为“非对称碰撞电荷转移模型”,这些模型均能解释小颗粒带负电而大颗粒带正电现象.但这些模型均认为粒径相同颗粒系统中不会有电荷发生迁移.

表1 非对称碰撞电荷模型

Table 1. Charge transfer models of asymmetry contact.

荷电模型	文献
$q_s = -4\pi R_S^2 \rho_0 \left(\frac{x_L}{x_S} \right) \left(1 + \frac{R_L}{R_S} \right) \left\{ \frac{\left(\frac{x_L}{x_S} \right) \left(\frac{R_L}{R_S} \right)^2 \left[\left(\frac{R_L}{R_S} \right)^2 + 2 \left(\frac{R_L}{R_S} \right) - 3 \right] + \left[3 \left(\frac{R_L}{R_S} \right)^2 - 2 \left(\frac{R_L}{R_S} \right) - 1 \right]}{\left[4 + \left(\frac{x_L}{x_S} \right) \left(1 + \frac{R_L}{R_S} \right)^2 \right] \left[4 \left(\frac{x_L}{x_S} \right) \left(\frac{R_L}{R_S} \right)^2 + \left(\frac{x_L}{x_S} \right) \left(1 + \frac{R_L}{R_S} \right)^2 \right]} \right\}$	[54]
<p>其中: q 为荷电量,下标 L 和 S 分别表示相互接触的大粒径和小粒径颗粒, R 为颗粒半径, x 为质量分数, ρ_0 为受困于高能态的初始电荷密度</p> $\Delta q_i = \pi e \rho_{H,0} \delta_0^2 \left(\frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \right)$ <p>其中: Δq 为电荷转移的量,下标 i 和 j 分别表示粒径不同的两颗粒, $\rho_{H,0}$ 为颗粒表面受困于高能态的初始电荷密度, δ_0 为颗粒间能转移电荷的最大间隙, R 为颗粒半径</p>	[55]
$\Delta q_i = \pi e \rho_{H,0} \frac{[\delta_0^2 (n) - (n_i + n_j)^2] (R_i - R_j)}{(R'_i + R'_j)}$ <p>其中: Δq, 下标 i 和 j, $\rho_{H,0}$, δ_0, R 同上; n 为颗粒表面水膜厚度, R' 为颗粒有效半径,等于颗粒半径与水膜厚度的总和</p>	[56]
$\Delta q_i = B_i \frac{\pi e \delta_0 R_i (2R_j + \delta_0)}{R_i + R_j} \rho_{iH,0} - B_j \frac{\pi e \delta_0 R_j (2R_i + \delta_0)}{R_i + R_j} \rho_{jH,0}$ <p>其中: Δq, 下标 i 和 j, $\rho_{H,0}$, δ_0, R 同上; B 为模型系数,与颗粒碰撞时的相对速度、角度和颗粒粒径有关</p>	[57]
$q'_S = C_1 (q_S + q_L) - C_2 \Delta \Phi_{\text{eff}}; q'_L = (1 - C_1) (q_S + q_L) + C_2 \Delta \Phi_{\text{eff}}, \Delta \Phi_{\text{eff}} = S (R_L - R_S) / (R_L + R_S)$ <p>其中: 下标 L 和 S, R 同上; q 和 q' 分别为碰撞前后颗粒的荷电量; C_1, C_2 是与粒径有关的函数; S 为常数</p>	[58]

4.3 水性离子电荷转移模型

顾兆林等^[59-61]将水的电离理论和颗粒动力学理论结合起来,并考虑到颗粒与周围环境的热交换,从颗粒表面的微观形貌特征与宏观力学行为出发,研究了相同材料组成的颗粒系统中荷电机理.

假设颗粒的初始温度与大气环境温度相同,忽略相互碰撞时颗粒间法向变形与切向变形对表面温度的影响,认为颗粒温度的改变与摩擦力做功和迟滞变形能有关.则颗粒*i*和颗粒*j*摩擦碰撞过程中内能的转换量*W*可以表示为

$$W = F_{tij}^C \cdot \delta_{tij} + F_{nij}^C \cdot \delta_{nij}, \quad (1)$$

式中, F_{tij}^C 和 F_{nij}^C 分别为颗粒碰撞时的切向力和法向力, δ_{tij} 和 δ_{nij} 分别为颗粒碰撞时的切向位移和法向位移.

假设所转换得到的内能平均分配于相互碰撞的两个颗粒之内,颗粒相互摩擦的过程中,颗粒间热传递暂被忽略.颗粒在风场中通过对流和辐射等方式与其周围的大气环境换热.根据热平衡原理,经过推导可得出颗粒发生碰撞导致温度升高,分离后颗粒*i*的瞬时温度为

$$\Delta T_i = e^{-\frac{Nu}{B}t} \Delta T_1, \quad (2)$$

其中*Nu*为努塞尔数,绕球换热时*Nu*的经验公式为 $Nu = 0.37Re^{0.6}Pr^{1/3}$; $B = \rho c d_s^2 / (6\lambda)$; λ 为导热系数,单位为 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; ΔT_1 为由碰撞摩擦做功引起颗粒*i*温度的增加量, $\Delta T_1 = \frac{a_1 W / 2}{V_i \cdot \rho \cdot c}$, V_i 为颗粒*i*的体积; ρ 为颗粒*i*的密度; c 为颗粒*i*的比热容; a_1 为摩擦生热转换系数.

由于颗粒表面凹凸不平的多孔性质,在颗粒表面会吸附一层水分子薄层.如果环境温度维持不

变,水分子层中 H^+ / OH^- 的浓度随着颗粒表面的温度的升高而升高.当有温差的两个颗粒相互接触时, H^+ / OH^- 会沿浓度差方向迁移,相互接触的颗粒*i*和颗粒*j*间由于温度差产生的 H^+ / OH^- 的流量*J*可以表示为

$$J = a_2 a_3 (\Delta T_i - \Delta T_j), \quad (3)$$

式中, ΔT_i 和 ΔT_j 分别为颗粒*i*/颗粒*j*与环境间的温差,故 $(\Delta T_i - \Delta T_j)$ 则表示颗粒*i*和颗粒*j*间的温度差. a_2 表示含吸附水颗粒表面的介电常数,与相对湿度和环境温度有关. a_3 是表示颗粒间的温度差引起离子迁移形成颗粒间的电势差的比例系数,与水的离子积、 H^+ / OH^- 迁移速度有关.

因此,颗粒的带电量表示为

$$\begin{cases} q_i = \int_{t_s}^{t_e} J dt, \\ q_j = - \int_{t_s}^{t_e} J dt. \end{cases} \quad (4)$$

在碰撞过程中,大粒径颗粒温度升高较低,小粒径颗粒温度较高,由于 H^+ 的迁移速度要比 OH^- 离子的速度要快,较多的 H^+ 从温度相对较高的颗粒迁移到温度相对较低的颗粒,所以在两个颗粒接触过程中, H^+ 从温度较高的小粒径颗粒迁移到温度较低大粒径颗粒,总体上呈现小粒径颗粒带负电,大粒径颗粒带正电.其物理模型如图6所示.

工业生产过程中形成的颗粒表面并不是绝对光滑的,其表面也存在一层水分子薄层,因此,含吸附水颗粒系统摩擦荷电机理可以描述工业过程中的颗粒系统内的荷电过程,如干燥过程、流化床、煤粉输送等.

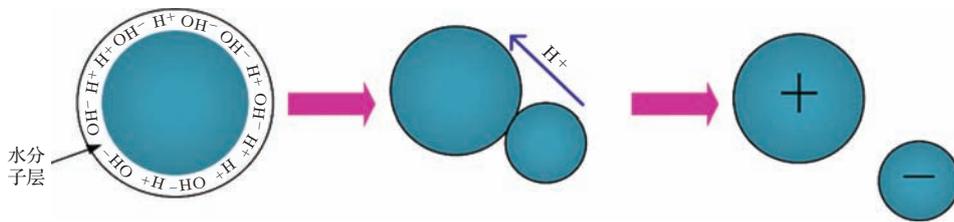


图6 (网刊彩色) 含吸附水颗粒系统中颗粒接触摩擦荷电机理^[59]

Fig. 6. (color online) The schematic of aqueous ion transfer on particle surfaces^[59].

5 粉体颗粒荷电特性的数值模拟方法

在实际工业生产过程中,颗粒的荷电特性受外部流场的影响,颗粒与外部流场构成典型的气固两

相流动,研究这类多相流的最简单方法就是不考虑由颗粒相的存在造成的对连续相流体流动的影响,也不考虑颗粒之间的相互作用.连续相的流场可由求解 Navier-Stokes 方程得出,考虑单个颗粒在连

续相流体中的受力和运动,称为单颗粒动力学模型,主要用于处理稀疏的气-固两相流,单颗粒动力学模型是一种单向耦合模型.随后发展起来的颗粒轨道模型考虑了颗粒相与连续相之间的相互作用,认为颗粒相与连续流体相之间存在速度差,在计算中先求解流场,然后计算各组颗粒的运动轨迹,对大量颗粒的运动轨迹进行统计分析后即可得到颗粒群运动的概貌.

显然,不论是单颗粒动力学模型还是颗粒轨道模型都不能描述颗粒与颗粒之间的相互作用,然而颗粒系统在外流体中荷电行为的实质是微观颗粒动力学特性与颗粒体系的宏观行为之间的相互关系.离散元方法(discrete element method, DEM)能提供颗粒碰撞时颗粒运动特性的全部信息,包括颗粒碰撞前后的速度、角度、颗粒的运动轨迹、相互作用力等.采用离散单元法进行颗粒流的研究有很多,其综述性文献可见[62,63].

颗粒系统受流场的影响时,颗粒与流场相互耦合,流体不仅受到流体内部力的作用,还受到颗粒对流体的作用力,而颗粒之间的接触碰撞是电荷产生的直接原因.下面简单介绍采用CFD-DEM方法模拟气固两相流中颗粒荷电特性的数值模拟方法.

5.1 流体与颗粒运动特性的描述

从数值计算的角度,单相流体运动由流体的连续性方程和动量方程控制.对流体的运动特性进行模拟的难点是如何更加准确地描述流体相的湍流特性.目前湍流模拟的方法有直接模拟(direct numerical simulation, DNS)、大涡模拟(large eddy simulation, LES)和雷诺时均(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS).根据湍流涡旋学说,湍流的脉动主要取决于大尺度的涡[64].大尺度的涡从主流中获得能量,并通过相互作用将能量传递给小尺度的涡,小尺度涡的主要作用是耗散能量.在流动过程中,大尺度的涡随主流流动特性而异并表现出强烈的各向异性,而不同流动中的小尺度涡存在许多共性且几乎是各向同性的.因此,大涡模拟方法旨在通过求解非稳态 Navier-Stokes 方程来直接模拟大尺度涡,小涡对大涡的影响通过近似的亚格子模型来模化,大涡模拟方法在计算机内存及模拟精度两方面找到了平衡点[65].

学者们构建了许多模化小涡的亚格子湍流模型,针对经典 Smagorinsky 模式中,网格过滤尺度作为亚格子特征混合长度的缺点,基于 Smagorin-

sky 模式的动态混合长度亚格子模式能够适应高雷诺数的流动模拟,能够有效地捕捉湍流的空间特性,提高大涡模拟的数值模拟精度[66,67],其中,亚格子的动态混合长度通过湍动能,耗散率以及相似尺度假设来计算.

结合大涡模拟与雷诺时均各自的优势,一些混合方法 RANS/LES [68], 离散涡方法(discrete eddy simulation, DES)等[69,70]被提出来,完善大涡模拟方法.尽管如此,混合方法的缺陷仍然明显,在混合区域处会出现跳跃,不连续情况;其次,对于复杂几何的流动模拟得到的结果并不能让人满意.针对大涡模拟在壁面附近模拟精度差,根据多尺度亚格子模式的思想以及涡结构理论,从 RANS 的涡黏性模型而发展来的通用亚格子模式克服了以上的缺陷,其涡黏性系数仅与小尺度量有关,而小尺度应力的变形率张量与大尺度量有关,具有明确的物理基础;数值模拟的精度也比其他带有壁面函数的亚格子模式高[71].

颗粒在空气中运动,气体和颗粒间的相互作用可以通过曳力来描述.由于颗粒与空气相互作用的复杂性,空气与颗粒间的曳力通常采用经验模型来计算[72].

由于颗粒的运动服从牛顿力学定律,颗粒运动的控制方程可由牛顿第二定律描述,考虑颗粒的重力、流体对颗粒的作用力、颗粒间的接触力等.[73].

在 DEM 的数值计算中,通常人为降低颗粒材料刚度(颗粒软化),获得合适的时间步长,以提高计算速度和计算资源利用效率.但是,颗粒软化使颗粒碰撞接触过程的时间和颗粒变形的接触面积显著增加,导致与颗粒接触时间或接触面积相关的微观行为,如固体颗粒间的导热、液体微粒间的传质等不能正确描述或计算.而颗粒间的传热过程会影响电荷的转移,针对此问题提出的时间还原系数和面积还原系数的概念,可以保证 DEM 计算过程即使颗粒软化也可以准确模拟颗粒传质、传热等微观行为,并保持颗粒软化的计算效率[74].

将由 CFD-DEM 方法计算得出的颗粒运动特性与第 3 节所述的荷电模型结合起来,便可以用数值方法预测颗粒碰撞荷电过程.

5.2 计算过程

首先设置流场的初始条件与边界条件,设置颗粒的初始分布与初始位置,通过求解流体控制方程,得到瞬时流场,由颗粒运动方程更新颗粒的位

置, 如果颗粒发生碰撞, 则利用颗粒系统摩擦荷电模型计算颗粒的带电量, 最后得到考虑流体影响的颗粒系统中颗粒的运动特性与荷电特性.

5.3 颗粒荷电特性数值模拟结果

在粉体工业过程或气固两相流中, 粉体颗粒由于相互摩擦碰撞而荷电形成静电场, 静电场的产生又会影响颗粒的力学特性与运动轨迹^[75]. 大量的实验结果证实了由颗粒摩擦碰撞形成的静电场对粉体工业过程或气固两相流流场的影响^[25,52,76-78], 然而只有少数的学者用数值模拟的方法研究了粉体工业过程或气固两相流中颗粒的荷电特性^[79-85].

将荷电模型与DEM方法结合起来, 忽略流体的影响, Laurentie 等^[86]模拟了聚碳酸酯(polycarbonate, PC)和聚酰胺(polyamide, PA)颗粒的摩擦荷电过程. 通过将模拟得到的平均荷电量与实验结果对比, 结果表明模拟结果与实验结果的总体趋势非常一致, 证明数值方法可以很好地模拟颗粒的荷电过程.

Matsusaka 等^[87]认为每一次碰撞过程中电荷的转移量与最大接触面积成正比, 所以第 m 次碰撞过程中, 转移的电荷量可以表示为 $\Delta q_m = kS_m\Delta V_m$, 其中 ΔV_m 为 m 次碰撞时的总势差; S_m 为最大接触面积, 可以用DEM方法求得; k 为接触荷电过程中的荷电常数. 利用CFD-DEM方法预测了流化床内的电荷密度分布^[88], 电荷刚开始在贴近壁面处产生, 随后由于颗粒与颗粒之间的相互摩擦碰撞而扩散到整个流化床区域, 最终电荷累积到一个平衡态. 事实上, 在气固两相流运动, 系统中的能量从气相转移到颗粒项. 在颗粒间相互碰撞的过程中, 由切向位移引起的摩擦功和由法向位移引起的迟滞变形能转换为使颗粒自身温度升高的内能. 同时, 颗粒与环境间的温度差会增强颗粒表面与环境之间的热量交换. 所以, 气流不仅会影响颗粒的运动轨迹, 而且还会影响颗粒表面的温度变化, 从而对颗粒摩擦荷电过程产生影响, 这正是4.3节中水性离子电荷转移模型. 顾兆林等^[59]利用CFD-DEM方法研究了水平风洞中沙粒的荷电特性, 得出了不同粒径沙粒的荷电量, 模拟结果表明: 总体上大粒径颗粒带正电而小粒径颗粒正负电, 这与实验观测结果一致^[89].

6 结论与展望

工业生产中形成的粉体颗粒不可避免地会相互摩擦碰撞而荷电. 荷电颗粒的存在可能对工业过程起促进作用, 如静电除尘, 粉体的分离, 静电层析成像技术等; 也可能会危害正常的工业生产过程, 如电子设备内产生的静电、煤粉输送过程中产生的静电等. 尽管荷电的颗粒得到了如此广泛的关注与应用, 但对颗粒系统中颗粒的荷电机理依然缺乏透彻的了解, 甚至在许多基本概念上都存在争议. 本文通过对气固两相流中颗粒荷电的应用、荷电机理及数值模拟方法的评述, 可以归纳出以下几点结论.

1) 颗粒摩擦碰撞荷电现象可以归结于电子转移、离子转移、物质转移和水性离子转移等. 对于异种导体颗粒, 可以用功函数的差异在解释电荷转移; 而对于绝缘体颗粒的荷电, 可以用离子转移和物质转移来解释荷电现象. 此外, 水性离子转移荷电机理考虑了环境中湿度的影响也可以用来解释绝缘体颗粒的荷电. 值得一提的是, 这几种荷电机理可能共存于颗粒摩擦碰撞瞬间.

2) 可以利用摩擦荷电的数学模型来定量地计算颗粒的带电量, 根据使电荷产生转移的方式不同, 荷电模型考虑了外加电场的影响, 非对称碰撞的影响和颗粒表面水性离子的影响. 值得一提的是, 不同的荷电模型可能只适用于特定的电荷转移方式.

3) 在气固两相流中, 颗粒会通过相互摩擦碰撞而荷电, 静电累积到一定程度后会影响流体的运动行为; 而流体的运动又直接影响颗粒的碰撞频率, 决定了静电的产生与累积率. 流体的运动与颗粒的荷电相互耦合, 在研究气固两相流中颗粒的荷电特性时就不能忽略流体的影响. 将CFD-DEM与荷电模型结合起来可以系统地研究气固两相流中颗粒的荷电特性, 综合地考虑影响颗粒荷电特性的各要素, 如流场、接触面积、接触力、碰撞速度的影响等.

尽管对气固两相流中颗粒荷电的应用、荷电机理和数值模拟方法的研究取得了很大的进展, 但仍有些亟待解决的问题.

1) 除了文中所提及的四种电荷转移机理之外, 是否还存在着其他的“元素”通过接触面发生迁移? 这需要利用更尖端的实验技术从分子角度来研究摩擦荷电现象.

2) 目前大部分荷电模型都将固体微粒假设为球形微粒^[90-92], 事实上工业过程中存在的固体微粒并不是理想的球形, 会存在尖角、孔洞等特征, 导致离子/电子浓度在固体表面的分布不均匀, 在固体微粒相互接触的过程中, 离子/电子会自发地发生转移. 离子/电子转移的机理可能也并不是单一的, 可以将多种荷电模型结合起来, 从更微观的角度, 更加全面地研究颗粒系统摩擦荷电现象.

3) 目前大多数接触荷电的实验都是以测量一次或多次接触后颗粒的荷电量为目的^[93-95], 事实上, 在气固两相流中, 颗粒的碰撞特性, 如碰撞角度、碰撞速度和碰撞概率都变得不确定, 因而在实验结果的基础上发展考虑颗粒动力学特性的荷电模型是值得继续研究的课题.

参考文献

- [1] Zhou B M, Liu S H, Fan B C 2004 *Physics* **33** 759 (in Chinese) [周本谋, 刘尚合, 范宝春 2004 物理 **33** 759]
- [2] Liu S H 2004 *Electrostatic Discharge and Hazard Prevention* (Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications Press) p45 (in Chinese) [刘尚合 2004 静电放电及危害防护 (北京: 北京邮电大学出版社) 第 45 页]
- [3] Sun K P 2000 *Physics* **29** 364 (in Chinese) [孙可平 2000 物理 **29** 364]
- [4] Enayati M, Chang M W, Bragman F, Edirisinghe M, Stride E 2011 *Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* **382** 154
- [5] Schein L B 2007 *Science* **316** 1572
- [6] Lacks D J, Sankaran R M 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 453001
- [7] Liu X H, He W, Yang F, Wang H Y, Liao R J, Xiao H G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075201
- [8] Wu G Q, Li J, Xu Z M 2013 *Waste Manage.* **33** 585
- [9] Wu G Q 2013 *Master Thesis* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [吴贵青 2013 硕士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [10] Wang H F 2010 *Ph. D. Dissertation* (Xuzhou: China University of Mining & Technology) (in Chinese) [王海锋 2010 博士学位论文 (徐州: 中国矿业大学)]
- [11] Manouchehri H R, Rao K H, Forssberg K S E 2000 *Miner. Metall. Proc.* **17** 139
- [12] Benabboun A, Tilmatine A, Brahami Y, Bendimerad S E, Miloudi M, Medles K 2014 *Separ. Sci. Technol.* **49** 464
- [13] Engers D A, Fricke M N, Newman A W, Morris K R 2007 *J. Electrostat.* **65** 571
- [14] Zhang J P, Du Y Y, Dai Y X, Pan W G 2011 *Environmental Engineering* **29** 78 (in Chinese) [张建平, 杜玉颖, 戴咏夏, 潘卫国 2011 环境工程 **29** 78]
- [15] Wang W 2013 *Master Thesis* (Hangzhou: Zhejiang University of Technology) (in Chinese) [王威 2013 硕士学位论文 (杭州: 浙江工业大学)]
- [16] Jiang X D, Xu H, Wang X 2014 *Chin. Phys. B* **23** 125201
- [17] Adamiak K 2013 *J. Electrostat.* **71** 673
- [18] Long Z W, Yao Q 2012 *Powder Technol.* **215-216** 26
- [19] Long Z W, Yao Q 2010 *J. Aerosol. Sci.* **41** 702
- [20] Nouri H, Zouzou N, Moreau E, Dascalescu L, Zebboudj Y 2012 *J. Electrostat.* **70** 20
- [21] Rokkam R G, Sowinski A, Fox R O, Mehrani P, Muhle M E 2013 *Chem. Eng. Sci.* **92** 146
- [22] Wang F 2008 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [王芳 2008 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [23] Peng X 2013 *Qilu Petrochemical Technology* **41** 140 (in Chinese) [彭啸 2013 齐鲁石油化工 **41** 140]
- [24] Zhu Z C, Sun J Y, Huang Z L, Wang J D, Yang Y R 2013 *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* **64** 490 (in Chinese) [朱子川, 孙婧元, 黄正梁, 王靖岱, 阳永荣 2013 化工学报 **64** 490]
- [25] Moughrabiah W O, Grace J R, Bi X T 2012 *Chem. Eng. Sci.* **75** 198
- [26] Chen A H, Bi H T, Grace J R, van Willigen F K, van Ommen J R 2006 *Aiche J.* **52** 174
- [27] Chen A, Bi H T, Grace J R 2007 *Powder Technol.* **177** 113
- [28] Yu D Z 1988 *Fire Science and Technology* **21** 3 (in Chinese) [俞大忠 1988 消防科学与技术 **21** 3]
- [29] Zou X B, Mao Z G, Wang X X, Jiang W H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045206
- [30] Williams M W 2012 *AIP Advances* **2** 010701
- [31] Matsusaka S, Maruyama H, Matsuyama T, Ghadiri M 2010 *Chem. Eng. Sci.* **65** 5781
- [32] McCarty L S, Whitesides G M 2008 *Angew. Chem. Int. Edit.* **47** 2188
- [33] Lowell J, Truscott W S 1986 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **19** 1281
- [34] Liu C, Bard A J 2008 *Nat. Mater.* **7** 505
- [35] Liu C, Bard A J 2009 *Chem. Phys. Lett.* **480** 145
- [36] Liu C, Bard A J 2009 *J. Am. Chem. Soc.* **131** 6397
- [37] Harper R W 1998 *Contact and Frictional Electrification* (Morgan Hill: Laplacian Press)
- [38] Kornfeld M I 1976 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **9** 1183
- [39] Apodaca M M, Wesson P J, Bishop K J M, Ratner M A, Grzybowski B A 2010 *Angew. Chem. Int. Edit.* **49** 946
- [40] Baytekin H T, Patashinski A Z, Branicki M, Baytekin B, Soh S, Grzybowski B A 2011 *Science* **333** 308
- [41] Baytekin H T, Baytekin B, Incorvati J T, Grzybowski B A 2012 *Angewandte Chemie* **124** 4927
- [42] Piperno S, Cohen H, Bendikov T, Lahav M, Lubomirsky I 2011 *Angew. Chem. Int. Edit.* **50** 5654
- [43] Ducati T R D, Simoões L S H, Galembeck F 2010 *Langmuir*. **26** 13763
- [44] Hogue M D, Mucciolo E R, Calle C I, Buhler C R 2005 *J. Electrostat.* **63** 179

- [45] Friedle S, Thomas S W 2010 *Angew. Chem. Int. Edit.* **49** 7968
- [46] Freier G D 1960 *J. Geophys. Res.* **65** 3504
- [47] Stow C D 1969 *Rep. Prog. Phys.* **32** 1
- [48] Farrell W M 2004 *J. Geophys. Res.* **109** E03004
- [49] Williams E, Nathou N, Hicks E, Pontikis C, Russell B, Miller M, Bartholomew M J 2009 *Atmos. Res.* **91** 292
- [50] Inculet I I, Peter Castle G S, Aartsen G 2006 *Chem. Eng. Sci.* **61** 2249
- [51] Mehrani P, Bi H T, Grace J R 2005 *J. Electrostat.* **63** 165
- [52] Sowinski A, Miller L, Mehrani P 2010 *Chem. Eng. Sci.* **65** 2771
- [53] Pahtz T, Herrmann H J, Shinbrot T 2010 *Nat. Phys.* **6** 364
- [54] Lacks D J, Levandovsky A 2007 *J. Electrostat.* **65** 107
- [55] Kok J F, Lacks D J 2009 *Phys. Rev. E* **79** 051304
- [56] Zheng X J, Zhang R, Huang H J 2014 *Sci. Rep.* **4** 4399
- [57] Hu W, Xie L, Zheng X 2012 *The European Physical Journal E: Soft Matter* **35** 1
- [58] Kok J F, Renno N O 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 014501
- [59] Gu Z L, Wei W, Su J W, Yu C W 2013 *Sci. Rep.* **3** 1377
- [60] Wei W, Lu L Y, Gu Z L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 158301 (in Chinese) [危卫, 鲁录义, 顾兆林 2012 物理学报 **61** 158301]
- [61] Lu L Y, Gu Z L, Luo X L, Lei K B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6939 (in Chinese) [鲁录义, 顾兆林, 罗昔联, 雷康斌 2008 物理学报 **57** 6939]
- [62] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, Yu A B 2007 *Chem. Eng. Sci.* **62** 3378
- [63] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, Yu A B 2008 *Chem. Eng. Sci.* **63** 5728
- [64] Markatos N C 1986 *Appl. Math. Model.* **10** 190
- [65] Gui N 2010 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [桂南 2010 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [66] Gu Z, Jiao J, Zhang Y, Su J 2012 *Int. J. Numer. Meth. Fl.* **69** 1457
- [67] Gu Z, Jiao J, Su J 2011 *Bound-lay. Meteorol.* **139** 439
- [68] Fujihira H 2003 *Theor. Comp. Fluid Dyn.* **16** 387
- [69] Spalart P R, Deck S, Shur M L, Squires K D 2006 *Theor. Comp. Fluid Dyn.* **20** 181
- [70] Shura M L, Spalart P R, Strelets M K, Travina A K 2008 *Int. J. Heat Fluid Fl.* **29** 1638
- [71] Gu Z L, Jiao J Y, Zhang Y W, Su J W 2011 *Europhys. Lett.* **94** 34003
- [72] Falkovich G 2011 *Fluid Mechanics: A Short Course for Physicists* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [73] Gu Z L 2010 *Eolian Dust: Near Surface Layer Turbulence and Gas-Solid Flow* (Beijing: Science Press) p273 (in Chinese) [顾兆林 2010 风扬粉尘: 近地层湍流与气固两相流 (北京: 科学出版社) 第 273 页]
- [74] Lu L Y, Gu Z L, Lei K B 2009 *Europhys. Lett.* **87** 44004
- [75] Matsusaka S, Masuda H 2003 *Adv. Powder Technol.* **14** 143
- [76] Liu Z L, Bi X T T, Grace J R 2010 *J. Electrostat.* **68** 321
- [77] Iuga A, Calin L, Neamtu V, Mihalcioiu A, Dascalescu L 2005 *J. Electrostat.* **63** 937
- [78] Mehrani P, Bi H T, Grace J R 2005 *J. Electrostat.* **63** 165
- [79] Schmid H J, Vogel L 2003 *Powder Technol.* **135** 118
- [80] Lim E W C, Zhang Y, Wang C H 2006 *Chem. Eng. Sci.* **61** 7889
- [81] Jalalinejad F, Bi X T T, Grace J R 2012 *Int. J. Multiphas. Flow* **44** 15
- [82] Lim E W C, Yao J, Zhao Y L 2012 *Aiche J.* **58** 1040
- [83] Bo T L, Zhang H, Zhu W, Zheng X J 2013 *J. Geophys. Res.* **118** 4494
- [84] Nwose E N, Pei C, Wu C Y 2012 *Particuology* **10** 229
- [85] Cheng Y P, Lau D Y J, Guan G Q, Fushimi C, Tsutsumi A, Wang C H 2012 *Ind. Eng. Chem. Res.* **51** 14258
- [86] Laurentie J C, Traore P, Dascalescu L 2013 *J. Electrostat.* **71** 951
- [87] Matsusaka S, Ghadiri M, Masuda H 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 2311
- [88] Pei C L, Wu C Y, England D, Byard S, Berchtold H, Adams M 2013 *Powder Technol.* **248** 34
- [89] Zheng X, Huang N, Zhou Y 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 4322
- [90] Castle G S P, Schein L B 1995 *J. Electrostat.* **36** 165
- [91] Girardi M 2010 *J. Electrostat.* **68** 409
- [92] Ireland P M 2010 *Powder Technol.* **198** 199
- [93] Pham R, Virnelson R C, Sankaran R M, Lacks D J 2011 *J. Electrostat.* **69** 456
- [94] Sow M, Lacks D J, Sankaran R M 2013 *J. Electrostat.* **71** 396
- [95] Shinbrot T, Komatsu T S, Zhao Q 2008 *Europhys. Lett.* **83** 24004

REVIEW

Particle charging mechanism and numerical methodology for industrial applications*

Wei Wei¹⁾ Zhang Li-Yuan²⁾ Gu Zhao-Lin²⁾†

1) (School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

2) (School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 13 January 2015; revised manuscript received 23 March 2015)

Abstract

Particles in industrial flows can be charged under an action of external electric field, while in the absence of external electric field, tribo-electrostatic charges are almost unavoidable in gas-solid two-phase flows due to the consecutive particle contacts. The particle charging may be beneficial, or detrimental. In the past decade considerable progress has been made in understanding the physics of particles charging. However, the particle charging mechanism, especially in the gas-solid phase flow, is still poorly understood. The purpose of this review is to present a clear understanding of the particle charging and movement of charged particle in two-phase flow, by summarizing the charging mechanisms, physical models of particle charging, and methods of charging/charged particle entrained fluid flow simulations. In this review, charged particles in industry, which would be beneficial (triboelectrostatic separation, electrostatic precipitator) or detrimental (electrification in gas-solid fluidized bed and manufacturing plant) are discussed separately. The particle charging through collisions could be attributed to electron transfer, ion transfer, material transfer, and/or aqueous ion shift on particle surfaces. For conductive particle contacts, the difference in work function is often used to explain the charge transfer. For insulation particle contacts, the charging tendency can be explained by the ion transfer and material transfer. In addition, aqueous ion shift transfer would be an important charge transfer mechanism considering water content in environmental conditions and the influences of temperature and humidity. The charges on particle through collision can be quantitatively predicted by using the particle charging model. According to the differently induced ways of charge transfer, the charging models are related to the external electric field, asymmetry contact, and/or aqueous ion shift on particle surfaces. In fact, the motions of particles in industry are influenced by fluid flow. The effect of fluid on particle dynamics makes the particle charging more complicated. Thus it is more reasonable to study the particle charging from the viewpoint of the gas-solid two-phase flow. The method combining particle charging model with computational fluid dynamics and discrete element method is applicable to the studying of the particle charging/charged processes in gas-solid two phase flow in which the charge behaviors are significantly influenced by the fluid mechanics behavior. By this method, the influence factors of particle charging, such as gas-particle interaction, contact force, contact area, and various velocities, are described systematically. This review presents a clear understanding of the particle charging and provides theoretical references on controlling and utilizing the charging/charged particles in industrial technology.

Keywords: particle charging, charging mechanism, charging model, numerical methodology

PACS: 83.10.Pp, 82.30.Fi, 47.55.Kf, 41.20.Cv

DOI: 10.7498/aps.64.168301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11302155, 10872159) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 2014-IV-033).

† Corresponding author. E-mail: guzhaoln@mail.xjtu.edu.cn