

国外摩擦电选的研究与发展^{*}

于慧敏^{1,2}, 戴惠新^{1,2}, 陈晓鸣^{1,2}, 杨伟林^{1,2}, 何东祥^{1,2}, 蒋海勇^{1,2}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

摘要:概述了摩擦电选在矿物加工领域的地位和应用,总结了摩擦电选理论、设备和实际应用的研究现状和发展过程,介绍了摩擦电选实际应用的领域,展望了摩擦电选工艺的发展前景。

关键词:摩擦电选;理论;设备;应用;发展

中图分类号:TD924 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2015)04-0067-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2015.04.014

Research and Development Status of Triboelectrostatic Beneficiation Abroad

YU Huimin^{1,2}, DAI Huixin^{1,2}, CHEN Xiaoming^{1,2}, YANG Weilin^{1,2}, HE Dongxiang^{1,2}, JIANG Haiyong^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: The paper outlined the status and application of tribo-electrostatic, summarized the research status and development process about its theory, equipment and practical application, presented the potential application fields for tribo-electrostatic, and illustrated the broad development prospects for tribo-electrostatic process.

Key words: tribo-electrostatic; theory; equipment; application; development

矿物及物料在电场中的荷电量及其极性不同,导致矿粒其在高压电场中具有不同的运动轨迹。电选是利用各种矿物及物料电性质,对矿粒进行分选的一种方法。目前,电选主要有摩擦分选、静电分选、电晕分选和介电分选四种方法。摩擦电选因具有工艺简单、污染小、投资少、成本低等特点而广泛应用。

摩擦电选是利用矿物电性的差异,在摩擦和碰撞作用下,使颗粒带上电性相反的电荷。然后在高压电场的作用下,利用作用在这些矿物上的电力及

机械力的差异造成颗粒的运动轨迹的不同,从而对颗粒进行选别的工艺。目前,摩擦电选已经从钾盐工业的应用扩大到煤、煤粉灰、铁矿、钛和其他海滨砂矿、镁盐矿物、磷酸盐矿石、金刚石和锡石矿石等矿产资源的分选中。

随着湿法选矿所带来的水资源紧张和水污染问题,以及矿产资源因赋存地缺水而无法开发、或因矿产资源品位下降而导致的矿物分选粒度越来越细等问题逐渐受到人们的重视,摩擦电选技术在这些方面的优越性也显现出来。摩擦电选作为一新型的选

* 收稿日期:2015-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51264020)

作者简介:于慧敏(1991-),女,汉,在读硕士研究生,主要研究方向为矿物加工工艺理论与技术研究。

通讯作者:戴惠新(1966-),男,汉,教授,博士生导师。

矿方法,国外开展了大量的研究工作,为系统了解和掌握国外研究发展情况进行了综述。

1 摩擦电选的理论研究

随着人们对摩擦电选技术的重视,在摩擦带电理论方面的研究也取得了一定的进展,对摩擦材料、气流速度、温度、湿度等参数等进行了研究。对于各种摩擦电选法来说,矿粒物理性质的差异,特别是摩擦电荷、导电率和介电常数等性质的差异在矿物电选中起着重要作用^[1]。矿物组成决定了是采用摩擦带电、传导感应带电还是电晕带电方法进行电选,为此国外的专家和学者对摩擦电选的理论做出了很多研究。

日本东京大学 Matsuyama T 和 Yamamoto H 对聚合物颗粒与金属盘碰撞荷电的机理进行了研究^[2],分析测量了冲击力、接触时间和接触面积对摩擦荷电的影响,并提出了“有效接触面积模型”。

美国凯斯西储大学 Duff N 等^[3]利用质点动力学模拟方法研究了单一材料颗粒系统的摩擦荷电过程,模拟过程应用高能态电子在碰撞过程中可以转移到其他颗粒低能态轨道的模型。加拿大西安大略大学 Sharmene A F 等^[4]研究了摩擦荷电颗粒在电场中自由下落分离的过程,并建立了一个基于分子动力学的计算机模型来模拟单个颗粒的运动轨迹。Jhon M S^[5]利用颗粒流动分析系统和激光多普勒测速仪研究了荷电颗粒在电场中的统计分布。美国卡内基梅陇大学 Doney J A^[6]利用聚乙烯和硅胶颗粒对影响摩擦电选的流体动力学因素进行了研究。

根据不同矿物颗粒下落分布情况,宾夕法尼亚州立大学 Sun S 等^[7],对矿物颗粒在滚筒电选机中的运动行为进行了研究。法国 Dascalescu L 等^[8]进行了物料表面预处理方法可以有效改善荷电效率的研究,发现紫外(UV)光照射后可以使聚酰胺颗粒在振动摩擦器中荷电量增加。美国国家能源技术实验室 Pope M I 等人的研究发现预先让颗粒表面吸附调整剂,摩擦荷电的极性和电量就可能改变^[9]。

Yoon R 等进行了利用摩擦荷电在线测量系统对影响颗粒荷电的因素,如颗粒粒径、气流速度、煤阶、给料速率等进行了研究^[10]。Tennal K B 等^[11]研究了煤粉粒度和电荷分布对煤粉摩擦电选效率的影响。美国阿肯色大学 Trigwell S 等人^[12]进行了微粉煤燃前摩擦电选脱硫降灰研究,研究表明微粉煤

分选效率取决于煤粉团聚、表面成分和细度。

Buda 等^[13]进行了物料含水率对塑料颗粒的摩擦电选过程中影响的研究。Gustafson R M^[14]等进行了化学预处理和在线处理微粉煤摩擦电选研究,利用化学药剂改变煤颗粒表面荷电性质。

Gupta R^[15]研究了温度对摩擦荷电的影响,测量发现随着温度升高(20 ~ 43 ℃)黄铁矿和油页岩荷质比增加。美国肯塔基大学应用能源研究中心 Ban H 对摩擦电选中石英颗粒的荷质比随温度升高而减小进行了深入研究^[16]。

Soong, Y 等^[17]进行了机械筛分和摩擦电选分离的组合在不同煤粉灰中进行分离的研究,通过百叶窗板分离器进行摩擦电选的分选。

2 摩擦电选设备的研究

通过国外对摩擦电选设备的研究发现摩擦荷电器的形状和结构及与之对应的操作参数是矿粒影响摩擦荷电效果的主要原因。因此国外的摩擦电选设备主要从设备的结构和荷电方式来进行改进的。不管何种摩擦电选设备,主要结构基本上都是由摩擦荷电器与静电场部分构成。摩擦荷电部分被称为摩擦荷电器,静电分选部分被称作静电场。目前应用于摩擦电选机上的摩擦荷电器种类较多,结构也各不相同,其典型结构有振动槽、溜槽、摩擦辊、流化床、旋流器、涡轮及螺旋管几种。

加拿大西安大略大学 Inculet I I、Bergougnou A、Beeckmans J M 等^[18-20]设计了流化床摩擦荷电分选机,该装置由流化床、金属筛电极和 U 型(V 型)收集槽组成。为了克服微细矿粒难流态化的问题,Kiewiet 等采用振动流化床摩擦荷电的方法对 45 ~ 15 μm 粒级(铁和玻璃)矿粒进行了电选试验研究^[21],研制了振动流化床摩擦荷电电选机。

意大利卡利亚里大学对研制的气流式电选机不断改进^[22],并且重新设计开发了一种新型的涡轮摩擦电选机,该电选机克服了细颗粒由于集中在旋流器中心造成荷电不足,无法正常分选,以及生产能力低和能耗高的难题。

Inculet II 等^[23]设计了滚筒式摩擦荷电电选机,并进行了废旧塑料的摩擦电选试验研究。Brown J D 等^[24]对滚筒摩擦电选机进行了改进。

日本新潟工科大学 Saeki M^[25]研制了一种摩擦带电振动分选机,分选 5 × 5 × 0.5 mm PVC 和 PET

混合物料时,PVC 纯度最高 99.66%,回收率最高 91.85%,PET 纯度为 99.18%,回收率为 95.88%。

STI 公司与新英格兰发电厂 (NEP) 合作,在 NEP 公司的 Salem 港发电厂安装了第一台处理能力 18 t/h 的 STI 分选机样机^[26]。美国 STI 公司在 AED 公司设备基础上研制出 STI 皮带式摩擦电选机^[27,28]。

Ahmadi G 等人设计了矩形管式摩擦电选机,并对射流入料的分散性进行了研究,结果表明该入料方式可以使 $-40\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒可以均匀地进入摩擦分选段^[29]。

美国肯塔基大学 Jiang X 设计了一种采用旋转摩擦器的新型摩擦电选机^[30]。TAO D 等^[31,32]开发了一种旋转式摩擦电选机,通过旋转式摩擦荷电装置使物料颗粒荷电,旋转式摩擦电选机可以显著提高颗粒的荷电效率、分选效率和粒度范围。Tao D 等^[33]又研制了一种新颖的旋转式摩擦电选分离器 (RTS),具有适用的颗粒尺寸范围显著等优势。Chen J X 等^[34]研制了一种新型的旋转摩擦电分离器 (RTS) 用于煤-二氧化硅混合物分选,这种新型的静电分离器具有高的颗粒充电效率,良好的分离的环境和高处理量等特征。

前苏联伊尔库茨克稀有金属研究院研制成功了实验室型槽式摩擦电选机^[35],并进行了从难选黄绿石粗精矿中分选钽精矿的试验研究。

Stencel J M 等^[36]在早期摩擦静电分选机基础上又设计了一种多级摩擦静电分选机,该装置由多个摩擦电选单元串联组成,可以取得更好的分选效果,并且可以提高摩擦电选机的处理能力。Stencel J M 等^[37]又设计了一种双隔板摩擦电选机,根据颗粒物料摩擦荷电差异分选得到三个产品。美国 Brown D K^[38]发明了一种摩擦电选机用来脱除煤粉中的黄铁矿和灰分矿物。卡利亚里大学 DIGITA-CSGM 实验室又开发出了一种新型摩擦电选机^[39],并进行了粉煤灰电选试验研究。Stencel J M 等^[40]发明了一种摩擦静电-离心分选机通过粉煤灰分选试验表明,经一段分选可将碳含量降至 5% 以下,具有非常好的应用前景。

Park C H 等^[41]设计出了一个实验室规模的摩擦电选机,用于从混合塑料 (聚氯乙烯/聚对苯二甲酸乙二酯) 中除去 PVC,然后进行材料分离试验。Zenkiewicz 等^[42]研制了新型混合塑料摩擦分选机,

该分选机可以有效的分离混合塑料。

德国 K+S 公司 Geisler I 等设计了一种自由落体式分离器类型的静电分离装置^[43],用于分选摩擦荷电的混合物料。Kim, Jae-Kwan 等^[44]开发了一种从煤粉灰中除去未燃碳试点规模的选矿系统。

国外摩擦电选设备的研究已经趋于完善,克服了很多问题。但是,目前实际生产中应用的摩擦电选设备还存在一些易堵塞、磨损快、耗能大等问题。摩擦电选机的处理能力也是其推广应用的主要障碍,通过优化设计,制造高效、大处理量的电选机也是其重要的发展方向。

3 实际应用的研究

随着国外对摩擦电选理论和设备的不断研究和试验的不断进步,摩擦电选技术以其独特的优点,已广泛应用于矿产资源的分选中,甚至扩展到废弃物分离等很多领域。国外主要从粉煤灰脱碳、粗钾盐、废旧塑料回收等领域进行了研究。

意大利卡利亚里大学的 Alfano G、Carta M、Ciccu R 等^[45-50]在 19 世纪 60 年代至 80 年代,设计了多种实验室摩擦电选系统,并建立了半工业性试验系统,对煤、磷酸盐、钾盐等矿物进行了大量的摩擦电选试验研究,并对矿物颗粒摩擦荷电特性进行了试验研究,研究表明摩擦荷电的效果与矿物相关性质、摩擦面特性和试验条件有关。

前苏联 Olofinsky N F 等进行了煤炭和矿物的分选分级试验研究^[51]。日本的牧野、黑川、须藤等就分别利用平板型、滚筒型电选机和摩擦电选的方法进行了煤的电选试验^[52]。斯洛伐克科学院 Turcaniova L 等人对斯洛伐克褐煤进行了摩擦电选研究,研究表明 900 W 微波辐射处理 10 min 的褐煤经摩擦电选可以得到挥发分 44%、灰分 18.3% 的精煤,微波处理对褐煤摩擦电选具有促进作用^[53]。

德国 Singewald A、Fricke G 发明了一种改善煤粉静电分选脱除黄铁矿的处理方法^[54],该方法利用一种脂肪酸甘油酯对煤粉调控处理并控制电选过程中的温度和湿度,煤粉采用该方法处理后经多段电选可以取得非常好的分选效果。Ban H 等^[55]进行了粉煤灰摩擦电选的试验,研究表明通过摩擦电选可以得到碳含量 < 5% 的精灰,回收率 60%~80%,尾灰的碳含量 > 50%,可以再利用,在粉煤灰资源化利用方面具有广泛的应用前景。

美国能源部 Soong Y 等^[56]利用平行板式电极、圆柱式电极和百叶窗式电极三种不同形式的摩擦电选机对斯洛伐克三种褐煤进行了摩擦电选试验,研究表明平行板式电极摩擦电选机可以降低 Ci' gel 煤和 Handlova' 煤的灰分,但 Nova' ky 煤的分选效果很差,可能是由于颗粒间作用和表面氧化的原因。Soong Y 等^[57-59]对粉煤灰干法筛分—摩擦电选工艺进行了试验研究,采用超声波干法筛分技术将粉煤灰分级,并能起到粗选的作用,然后将各粒级粉煤灰利用百叶窗式电极摩擦电选机进行摩擦静电分选,结果表明根据粉煤灰矿物成分的不同产品中的碳含量最低到 1.5%,最高达 60%。

瑞典 Lulea 大学 Dwari R K、Hanumantha Rao K 对印度高灰动力煤进行了摩擦电选试验研究^[60],煤样灰分高达 45%,煤中矿物质以石英和高岭石为主,考察了铝、铜、黄铜、有机玻璃和特氟龙几种材料摩擦器的摩擦荷电效果,研究发现铜摩擦器效果最佳。

Kali & Salz AG 公司(K+S 公司前身)进行了大量的粗钾盐摩擦电选研究。德国 Kali & Salz AG 公司 Singewald A^[61]利用硝基酚等调控钾盐矿物,然后再给入电选机进行分选,使 K_2O 的品位从 40% 提高到 48.6%,回收率从 86.1% 提高到 90.6%,并设计了一种两级静电分选装置用于粗钾盐的分选^[62]。德国 Pfoh O 等发明了一种控制粗钾盐静电分选过程的方法和装置^[63],根据产品质量反馈,利用计算机控制调整自由落体式电选机中分料板角度,能够实现经粉碎和化学调控粗钾盐的高效电选。

日本静冈大学 Matsushita Y 等人进行了废塑料电选试验研究,采用叶片摩擦搅拌器使物料摩擦荷电,然后带电物料进入静电场中分离,分选试验表明两种混合塑料颗粒分选效果良好,产品纯度大于 90%^[64]。

BAEK 等^[65]进行了摩擦电选分离 ABS 和 PBT 的混合废旧塑料,回收 ABS 的研究,在研究中开发了 PP 材料的管线充电器,应用于摩擦电选分离技术中,可除去 99.9% 以上的 PBT,回收的 ABS 高达 92.5%。

Buda 等^[66]进行了摩擦电选混合颗粒塑料的过程中点的识别和鲁棒性的试验,Zelmat 等^[67]进行了旋风摩擦电选装置分离塑料颗粒自由落体的试验分析,验证了修改这种装置的“标准”操作的可能性,

以使旋流器的涡轮机参与颗粒的充电过程。

通过国外对摩擦电选实际应用的研究中发现目前摩擦电选的应用领域已经在不断扩大,但是在实际工业生产中摩擦电选工艺效率低和处理量小的问题制约了其发展,要想提高企业的效益就需要提高效率 and 增大处理量。同时应加强摩擦电选在资源综合利用和废物回收方面的关注。

4 结 语

近年来,随着摩擦电选理论、设备、实际应用方面研究成果的取得,摩擦电选的工业应用前景逐渐显现。摩擦电选设备的进一步发展为微细粒矿物的分选提供了新的选择,并在实际生产中取得了良好的社会效益和经济效益。目前,摩擦电选的发展趋势主要体现在研制新型、高效、处理量大的摩擦电选设备;研究矿物在摩擦电选过程中的行为、矿物表面结构以及物料的表面处理技术对矿物摩擦电选过程的影响等。摩擦电选技术的应用领域已经向矿物以外的其他领域发展如农业、废旧塑料的分选等领域,并越来越受到人们的关注。

参考文献:

- [1] Engers D A, Fricke M N, Newman A W, et al. Triboelectric charging and dielectric properties of pharmaceutically relevant mixtures [J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65 (9): 571 - 581.
- [2] Matsuyama T, Yamamoto H. Charge transfer between a polymer particle and a metal plate due to impact [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, 30 (3): 602 - 607.
- [3] Duff N, Lacks D J. Particle dynamics simulations of triboelectric charging in granular insulator systems [J]. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66 (1 - 2): 51 - 57.
- [4] Sharmene A F, Adnan A M, Ayesha A R, et al. Minority charge separation in falling particles with bipolar charge [J]. *Journal of Electrostatics*, 1998, 45: 139 - 155.
- [5] Jhon M S. An experimental study of multi - particle dynamics in triboelectrostatic systems [R]. Pittsburgh: Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellon University, 2001.
- [6] Doney J A. Hydrodynamic factors that can influence triboelectrostatic separations [D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1995.
- [7] Sun S, Morgan J D, Wesner R F. Behavior of mineral particles in electrostatic separation [J]. *Transactions AIME - Mining Engineering*, 1950, 187: 369 - 373.

- [8] Dascalescu L, Urs A, Bente S, et al. Charging of mm - size insulating particles in vibratory devices[J]. Journal of Electrostatics, 2005, 63(6 - 10): 705 - 710.
- [9] Baltrus J P, Diehl J R, Soong Y, et al. Triboelectrostatic separation of fly ash and charge reversal[J]. Fuel, 2002, 81(6): 757 - 762.
- [10] Yoon R, Luttrell G H, Yan E S, et al. Poc - scale testing of a dry triboelectrostatic separator for fine coal cleaning - final report[R]. Washington: Department of Energy, 2001.
- [11] Tennal K B, Lindquist D, Mazumder M K, et al. Efficiency of electrostatic separation of minerals from coal as a function of size and charge distributions of coal particles[C]. Phoenix, AZ: IEEE, 1999.
- [12] Trigwell S, Tennal K B, Mazumder M K, et al. Precombustion cleaning of coal by triboelectric separation of minerals[J]. Particulate Science and Technology, 2003, 21(4): 353 - 364.
- [13] Buda G, Bilici M, Dascalescu L, et al. Influence of material moisture on the tribocharging process of plastic granules[J]. Particulate Science and Technology, 2013, 31: 162 - 167.
- [14] Gustafson, Dimare R M, S Sabatini J. A chemical enhancement of the triboelectric separation of coal from pyrite and ash[R]. United States: Little Inc Cambridge, 1992.
- [15] Gupta R, Gidaspow D, Wasan D T. Electrostatic separation of powder mixtures based on the work functions of its constituents[J]. Powder Technology, 1993, 75(1): 79 - 87.
- [16] Stencel J M, Schaefer J L, Ban H, et al. Triboelectrostatic cleaning of coal in - line between pulverizers and burners at utilities[J]. Int. J. Coal Prep. Util., 1998, 19(1): 115 - 129.
- [17] Soong Y, Irdi G A, McLendon T R, et al. Triboelectrostatic separation of fly ash with different charging materials[J]. Chemical Engineering and Technology, 2007(30): 214 - 219.
- [18] Inculet I I, Bergounou M A, Brown J D. Electrostatic separation of particles below 40 μm in a dilute phase continuous Loop[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1977, 13(4): 370 - 373.
- [19] Kiewiet C W, Bergounou M A, Brown J D, et al. Electrostatic separation of fine particles in vibrated fluidized beds[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1978, IA - 14(6): 526 - 530.
- [20] Beeckmans J M, Inculet I I, Dumas G. Enhancement in segregation of a mixed powder in a fluidized bed in the presence of an electrostatic field[J]. Powder Technology, 1979, 24(2): 267 - 269.
- [21] Kiewiet C W, Bergounou M A, Brown J D, et al. Electrostatic separation of fine particles in vibrated fluidized Beds[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1978, IA - 14(6): 526 - 530.
- [22] G Alfano, 刘永之, 杨英杰. 矿物摩擦电选的进展[J]. 国外金属矿选矿, 1989(2): 1 - 9.
- [23] Inculet I I, Castle G S P, Brown J D. Tribo - electrification system for electrostatic separation of plastics[C]. Denver, CO, USA: IEEE, 1994.
- [24] Brown J D, Wynen P F, Doyle T E. Tribocharging and electrostatic separation of mixed electrically insulating particles: USA, 10/181755[P]. 2005 - 08 - 09.
- [25] Saeki M. Vibratory separation of plastic mixtures using triboelectric charging[J]. Particulate Science and Technology, 2006, 24(2): 153 - 164.
- [26] 黄开飞. 分离粉煤灰中未燃烧的碳质[J]. 国外选矿快报, 1997(19): 6 - 8.
- [27] Tondue E, Thompson W G, Whitlock D R, et al. Commercial separation of unburned carbon from fly ash[J]. Mining Engineering (Littleton, Colorado), 1996, 48(6): 47 - 50.
- [28] 张金明. 选矿技术在粉煤灰综合利用中的应用[J]. 国外金属矿选矿, 1998(7): 44 - 48.
- [29] Ahmadi G, Chungong H, Hang B, et al. Air flow and particle transport in a triboelectric coal/ash cleaning system - counter flowing straight duct design[J]. Particulate Science & Technology, 2000, 18(3): 213 - 225.
- [30] Jiang X. Development and fundamental evaluation of a novel triboelectrostatic separator[D]. Lexington: University of Kentucky, 2003.
- [31] Daniel T, Mao - Ming F, Xin - Kai J. Dry coal fly ash cleaning using rotary triboelectrostatic separator[J]. Mining Science and Technology, 2009, 5(19): 642 - 647.
- [32] 陶东平. 静电颗粒带电分选装置: 200420079562. 1[P]. 2005 - 12 - 14.
- [33] Tao D, Sobhy A, Li Q, et al. Dry cleaning of pulverized coal using a novel rotary triboelectrostatic separator (RTS)[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2011(31): 187 - 202.
- [34] Chen J X, Honaker R. Dry separation on coal - silica mixture using rotary triboelectrostatic separator[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 131: 317 - 324.
- [35] 高鹏义. 用摩擦电选法分离难选的黄绿石产品[J]. 国外金属矿选矿. 1976(7): 45 - 47.
- [36] Stencel J M, Schaefer J L, Neathery J K, et al. Electrostatic particle separation system, apparatus, and related method: USA, 09/470916[P]. 2002 - 12 - 24.
- [37] Stencel J M, Gurupira T Z. Particle separation/purification system, diffuser and related methods: USA, 10/438375[P]. 2006 - 08 - 08.
- [38] Brown D K. Electrostatic pyrite ash and toxic mineral separator: USA, 5637122[P]. 1997 - 06 - 10.
- [39] R 茨库, 魏明安, 肖力子. 一种用于细粒分选的新型静电分选机[J]. 国外金属矿选矿, 2001(1): 40 - 44.

- [40] Stencel J M, Schaefer J L, Ban H, et al. Method and apparatus for triboelectric – centrifugal separation: USA, 5755333 [P]. 1998 – 05 – 26.
- [41] Park C H, Jeon H S, Park J K. PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144: 470 – 476.
- [42] Zenkiewicz M, Zuk T, Blaszkowski M, et al. Role – type triboelectrostatic separator of mixed plastics [J]. Przemysl Chemiczny, 2013, 92: 279 – 283.
- [43] Geisler I, Knauer H, Stahl I. Electrostatic separator for classifying triboelectrically charged substance mixtures: USA, 6011229 [P]. 2000 – 07 – 04.
- [44] Kim J K, Lee H D. Design variables of pilot scale electrostatic separator for removing unburned carbon from coal fly ash [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2009 (42): 471 – 477.
- [45] Alfano G, Carbini P, Carta M, et al. Applications of static electricity in coal and ore beneficiation: The contribution of the university of cagliari to the development of new separators and to the improvement of the processing technology [J]. Journal of Electrostatics, 1985, 16(2 – 3): 315 – 328.
- [46] Carta M, Alfano G, Carbini P, et al. Triboelectric phenomena in mineral processing: theoretical fundamentals and applications [J]. Journal of Electrostatics, 1981(10): 177 – 182.
- [47] M Carta, 丘继存. 矿物表面能的结构对电选和浮选的影响 [J]. 国外金属矿选矿, 1975(Z2): 13 – 25.
- [48] M Carta, G Ferrara, 徐建民. 用电离或摩擦使矿粒带电在气体介质中处于悬浮状态的细磨矿石的电选 [J]. 国外金属矿选矿, 1973(7): 1 – 11.
- [49] M Carta, 刘振中. 用改变表面层能级改善电选和浮选 [J]. 国外金属矿选矿, 1974(Z1): 1 – 13.
- [50] Ciccu R, Peretti R, Serici A, et al. Experimental study on triboelectric charging of mineral particles [J]. Journal of Electrostatics, 1989, 23: 157 – 168.
- [51] и н 普拉克辛, н ф 奥洛夫斯基, 胡力行. 论选别矿物细粒级时电晕除尘机和分级机的采用 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 1960(5): 19 – 25.
- [52] (日) 菅义夫. 静电手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [53] Turcaniova L, Soong Y, Lovas M, et al. The effect of microwave radiation on the triboelectrostatic separation of coal [J]. Fuel, 2004, 83(14 – 15 SPEC ISS): 2075 – 2079.
- [54] Singewald A, Fricke G. Process for electrostatic separation of pyrite from crude coal: USA, 497636 [P]. 1976 – 03 – 02.
- [55] Ban H, Li T X, Hower J C, et al. Dry triboelectrostatic beneficiation of fly ash [J]. Fuel, 1997, 76(8 SPECISS): 801 – 805.
- [56] Soong Y, Link T A, Schoffstall M R, et al. Dry beneficiation of slovakian coal [J]. Fuel Processing Technology, 2001, 72(3): 185 – 198.
- [57] Link T A, Schoffstall M R, Soong Y. Device and method for separating minerals, carbon and cement additives from fly ash: USA, 09/878196 [P]. 2004 – 01 – 27.
- [58] Soong Y, Schoffstall M R, Gray M L, et al. Dry beneficiation of high loss – on – ignition fly ash [J]. Separation and Purification Technology, 2002, 26(2 – 3): 177 – 184.
- [59] Soong Y, Irdi G A, McLendon T R, et al. Triboelectrostatic separation of fly ash with different charging materials [J]. Chemical Engineering & Technology, 2007, 30(2): 214 – 219.
- [60] Dwari R K, Hanumantha Rao K. Tribo – electrostatic behaviour of high ash non – coking Indian thermal coal [J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 81(2): 93 – 104.
- [61] Singewald A, Fricke G, Jung D. Process for the electrostatic separation of clay containing crude potassium salts: USA, 282839 [P]. 1974 – 09 – 17.
- [62] Singewald A, Geisler I, Fricke G, et al. Process and apparatus for the electrostatic dressing of carnallite – containing crude potassium salts: USA, 25521 [P]. 1981 – 12 – 27.
- [63] Pfoh O, Radick C, Thenert H. Process and device for controlling the electrostatic separation of crude potash salts in electrostatic free fall separators: USA, 776956 [P]. 1988 – 05 – 10.
- [64] Matsushita Y, Mori N, Sometani T. Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades [J]. Electrical Engineering in Japan, 1999, 127(3): 33 – 40.
- [65] Baek, Sang Ho, et al. Development of electrostatic separation technique for removal of PBT from waste ABS – PBT mixture [J]. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 2008, 45: 249 – 256.
- [66] Buda G, Samuila A, Bilici M, et al. Set point identification and robustness testing of a triboelectrostatic separation process for mixed granular plastics [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1153 – 1160.
- [67] Zelmat M E, Tilmatine A, Rizouga M, et al. Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free – fall triboelectric separation of plastic particles [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013 (20): 1584 – 1589.