

工业气体的电滤法净化

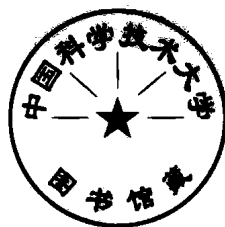
[苏联]B.Н.烏 饒 夫 著

化学工业出版社

工业气体的电滤法净化

〔苏联〕B.H.烏鏡夫 著

华南工学院无机物工学教研組 译



化学工业出版社

本书論述工业气体电力淨化的理論基础；根据苏联国家气体淨化设备設計院在工业气体淨化技术方面的多年工作經驗，提出了电滤器的計算和选择的方法。

书中描述电滤器和供电的升压整流机组的结构，闡明电滤器最适宜操作状况的問題。并且提供現行各种电滤器装置操作的强化和气体在用电滤器淨化以前的預处理方法等方面的資料。

书中研討由电滤器以及干式和湿式的机械淨化设备所組成的联合裝置的工艺流程，列举淨化裝置的技术經濟指标，同时介紹电滤器在化学工业、石油加工工业和其他工业部門中的应用。

本书供工业企业、設計和研究单位的工程技术人员閱讀，也可以供高等工业学校和中等技术学校的师生参考。

В. Н. УЖОВ
ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ
ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАМИ
ГОСХИМИЗДАТ МОСКВА·1962

工业气体的电濾法淨化
华南工学院无机物工学教研組譯

化学工业出版社出版 (北京安定門外和平門七区八号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第120号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本：850×1168毫米^{1/32} 1966年3月北京第1版
印张：9^{1/16} 插頁：2 1966年3月北京第1版第1次印刷
字数：205,000 印数：1—2,091
定价：(科五) 1.30元 书号：15063·1023

目 录

序	1
緒論	6
1. 工业气体和悬浮粒子的特性	6
2. 气体净化设备的特性	11

第 一 篇

气体电力净化的物理基础

第一章 电场及其在清除气体中悬浮粒子方面的应用	15
3. 电场和电场中作用力的概念	15
4. 气体的电离, 气体中放电过程	16
5. 电除尘器中的电晕和产生电晕的条件	17
6. 电除尘器的结构	19
第二章 气体电力净化过程的计算基础	22
7. 悬浮粒子的荷电	22
8. 粒子在电除尘器中的运动	26
9. 荷电粒子的沉积	28
10. 电除尘器的伏安特性	28
第三章 电除尘器的伏安特性与结构因素和气体工艺参数的 关系	32
11. 电除尘器伏安特性与结构因素的关系	32
12. 电除尘器伏安特性与气体工艺参数的关系	33
13. 电除尘器伏安特性与气体中悬浮粒子含量及粒子性质的关系	34
第四章 电除尘器净化气体的净化度	39
14. 悬浮粒子在电除尘器中的理论捕集度 (气体理论净化度)	39
15. 用电除尘器净化气体时净化度的计算方法	41

第 二 篇

电滤器的电气设备

第五章 关于正弦波交变电流的概念和定义	45
16. 正弦波交变电流的瞬时值、有效值和平均值	45
第六章 已整电流 气体净化装置的整流器	48
17. 供应电滤器的已整电流	48
18. 电滤器用的整流器	49
第七章 电滤器供电用的升压整流机组	56
19. АФА-90-200型机组	56
20. АФАП-80-225 型机组	63
21. 具有六相机械整流器的卢尔基-西門子型机组	66
22. 具有半导体整流器的西蒙-卡尔兹-費兰季型机组	67
23. РИОН 型双区电滤器供电用的 АПР-1 型机组	68
第八章 配合电滤器的整流站	70
24. 整流站里电气设备的布置	70
25. 供电线路、接地装置和信号装置	72
26. 抑制对无綫电-电视装置干扰的设备	73

第 三 篇

电 滤 器 的 构 造

第九章 电滤器的类型	74
27. 单区电滤器和双区电滤器	74
28. 单区电滤器	74
29. 絕緣箱的构造	83
第十章 单区电滤器的构造	91
30. 干式热电滤器	91
31. 操作温度在250℃以下的干式电滤器	93
32. 净化无腐蚀性气体的湿式电滤器	98
33. 净化冷的腐蚀性气体的湿式电滤器	101
34. 净化热的腐蚀性气体的湿式电滤器	103
第十一章 双区电滤器	105
35. РИОН 型电滤器	105
36. 具有屏蔽电量电极的电滤器	110

37. 具有放射电离器的电滤器	112
38. 离心式电滤器 (电力旋风器)	112

第 四 篇

电滤器操作的强化

第十二章 进入电滤器的气体的预处理	114
39. 气体的冷却	114
40. 气体的增湿	116
41. 用加入调理剂降低电极上灰尘层电阻的方法调理气体	124
42. 用添加导电粒子的方法调理气体	126
43. 进入电滤器的气体的预处理 (粗净化)	126
离心除尘器—旋风分离器	127
离心除尘器—复式旋风分离器 (多管式旋风分离器)	132
44. 气流中悬浮粒子的增大 (凝聚)	137
利用高温流洗气器的粒子凝聚	137
根据苏联气体净化科学研究所和苏联国家气体净化设 备设计院所制订的方法进行高温流洗气器的计算	139
用蒸汽在粒子表面冷凝的方法增大气体中的悬浮粒子	145
声学凝聚	151
电滤器—凝聚器	153
45. 电滤器内气体的分布	154
第十三章 电滤器的最适宜供电规程	177
46. 对电滤器供电的整流系统和整流器的类型选择	177
47. 电滤器的供电规程	181
48. 最适宜电压的自动维持	183
49. 用于对电滤器供电的升压整流机组的最适宜数目	185

第 五 篇

电滤器在工业中的应用和净化

装置的技术经济指标

第十四章 电滤器在化学工业和石油加工工业中的应用	189
50. 硫酸生产中炉气的净化	189
51. 硫酸浓缩工段废气的净化	202
52. 纯碱生产中气体的净化	205

53. 无机肥料生产中废气的除尘	209
54. 重铬酸盐生产中废气的净化	212
55. 炭黑工厂中气体的净化	213
56. 粉状触媒的回收	218
57. 焦炉煤气、发生炉煤气和其他煤气中焦油和尘粒的清除	220
第十五章 电滤器在黑色冶金工业中的应用	226
58. 高炉煤气的净化	226
59. 平炉废气的净化	230
第十六章 用于净化烟道气的电滤器	233
60. 发电站和锅炉的烟道气的除尘	233
第十七章 电滤器在建筑材料工业中的应用	241
61. 水泥工厂的气体净化	241
62. 雪花石膏和石膏工厂的排出气的除尘	248
第十八章 电滤器的选择和计算的示例	251
63. 根据目录的数据选择电滤器	251
64. 电滤器的近似计算示例	254
附 录	
I. 工艺计算中应用的公式	259
II. 固体物料的重度及其堆积重度	263
III. 气体的基本物理性质	264
IV. 混合气体压力为760毫米汞柱时饱和气体的湿含量和水蒸 汽分压	266
V. 按沉降速度确定粒子直径的列线图	269
VI. 苏联气体净化设备设计院所设计电滤器的特性	270
VII. 电晕电极特性	274
VIII. 电滤器使用的高压电绝缘子的型号及其特性	275
IX. 电滤器使用的高压电缆的技术特性	279
X. 机械整流器操作时电场强度计算公式的校正	280
XI. 计算电滤器效率(气体净化度)的列线图	插頁
参考文献	281

序

在許多生产过程中需要制取或加工不同工业气体，而在某些工艺过程中产生废气并要将它排入大气中。

在大多数情况下，工业气体（包括生产厂房内部的空气）含有不同物质的微小的固体粒子（灰尘）或液体粒子（雾），而由于某种理由要从中除去上述各种悬浮物。

例如，在硫酸工厂中用于生产塔式法硫酸的焙烧炉气必须除去其中夹带的矿渣微尘，以免将塔堵塞和污染成品酸；上述炉气若是用于生产接触法硫酸，除了清除矿尘之外，还要除去毒害转化器中触媒的硫酸雾、砷和硒。

炭黑生产中的气体、应用粉状触媒裂解石油产品过程中的气体和有色金属冶炼厂的气体等，必须净化以回收其中有价值的粉尘状物质。

使用固体燃料的发电站的烟道气在经过烟囱排掉之前要进行净化，以免炉灰污染大气和附近的地区。

进入调节装置、氧气站、发电机和巨型电动机附设的通风装置以及照象软片的生产车间等的空气，必须除去其中的微尘、霉菌孢子和真菌等。

因此，几乎任何一个现代化的工业部门都要净化不同的气体，以除去其中的灰尘或雾。在许多场合下，每小时要净化数百万米³的工业气体，而从分离出来的灰尘或液体每小时有数十吨之多。

例如，一台生产能力为50吨/小时的烧制水泥熟料的转窑每小时排入大气中的气体约50万米³，其中含尘达11吨；一个中等规模的炭黑工厂，每年被气体从炉中带出的炭黑的数量为1.5—2万吨。

首先从卫生观点来考虑，就不允許将这样大量的气体不經淨化而排入大气中；何况在許多場合下应该避免有价值的产物为气体带出而造成損失。

利用电滤器的电力淨化法是从工业气体中除去灰尘或雾的最完善的方法之一。这一方法大約是在本世紀的二十年代实现工业化的。

苏联于 1925 年在列宁格勒的《Красный выборжец》工厂建成第一个电滤器，用来从废气中回收氧化鋅；1926年在亚罗斯拉夫的《Победа рабочих》工厂設計并建成带有电滤器的装置，同样用于回收氧化鋅。

后来，特别是在第二次世界大战以后，在苏联气体淨化技术得到广泛的发展。

苏联制造的电滤器在本国以及国外的許多工业部門中使用着。

在各种已知的气体淨化方法中，以电力淨化法的效率最高；而电滤器是通常用来清除空气或其他气体所含的粉尘的各种淨化設備中适用面最广的設備。

气体的电力淨化法具有如下主要特点：

1) 根据具体条件和要求，可以設計能达到任意淨化度（达 99%，甚至达 99.9%）和生产能力变动范围很广（从几个米³/小时到几百万米³/小时）的电滤器。

2) 在所有已知的各种气体淨化設備中，电滤器的流体阻力最小。苏联国家气体淨化設備設計院（Гипрогазоочистка）所設計的电滤器，在气体进出口之間的气体压力降为 5—15 毫米水柱。

3) 可以設計适合在常压、加压或負压下操作的各种电滤器。

4) 电滤器淨化气体中悬浮粒子的浓度介于十分之几克/米³到 50 克/米³之間，或者更高一些，而气体的溫度容許达到 500℃ 或者更高一些。气体可以按干法淨化，也可以按湿法淨化。

5) 电滤器能够捕集大小从0.01微米到100微米的各種粒子。
 6) 电滤器可以用耐酸、耐碱和耐其他腐蝕性物质的材料制作。

7) 气体在电滤器中的净化过程可以完全自动化。

8) 净化气体消耗的电能通常比应用其他类型的气体净化设备时少。

但是，决不能认为电滤器可以适合于任何场合，因为电滤器本身还有一系列的缺点：

1) 电滤器只能除去气体中的悬浮物，即灰尘或雾。利用电滤器不可能分离混合气体中的某一种气体；也不能将气体与蒸气分离，除非该种蒸气预先冷凝成为升华冷凝物或雾，或者预先借助于某种化学反应的作用。

2) 某些产物具有不能够用电滤器有效地捕集其悬浮粒子的这种物理-化学性质。

比电阻很小而粒子又极其微細的輕质活性炭黑便是一个这样的例子。炭黑的粒子在电滤器中容易荷电和沉积，但是由于它是导电的，在它和沉积电极接触之后，即失去电荷，結果不能附着在沉积电极的表面上，而重新荷电，脱离該表面，然后被从电滤器中排出的气流带出去。氧化鋅升华冷凝物也可作为难捕集粉尘的一个例子，它也极度分散，但相反具有高度的比电阻从而引起电暈放电“熄灭”。

3) 电滤器的净化效率取决于其操作条件。

例如，在使用莫斯科近郊的煤为燃料的发电站中，用于净化170—180℃的烟道气的电滤器的操作不够稳定，其效率为80—85%；同样的电滤器在净化130—150℃的烟道气时操作却十分稳定，能够捕集气体中95—97%的炉灰。这可以用下面的理由来解释：当气体温度超过160℃时，所捕集的炉灰的比电阻为 2×10^{10} 欧姆·厘米或更高一些，这就在电滤器中造成所謂“反电暈”的现象，从而妨碍炉灰沉积；在气体温度低于160℃时，烟道气中含有的SO₂便在炉灰上面冷凝下来，于是沉积电极上沉积层的比

电阻降低到 2×10^{10} 欧姆·厘米以下，結果“反电暈”的現象便会停止，于是电滤器的效率急剧升高。

某一冶金工厂的洗气塔-电滤器装置每小时处理 36000—39000 米³ 的高炉煤气，净化后气体中残余的炉灰含量为 15—20 毫克/标准米³。只要稍为增加供气量，净化后气体的炉灰含量即显著提高。为了加强净化操作，可在洗气塔-电滤器装置前面安装一个高温流洗气器（文丘里管），这样一来每小时通过洗气塔-电滤器的气体量达 50000—70000 米³，而净化后气体中炉灰含量降低为 8—10 毫克/标准米³。由此可见，由于气体在高温流洗气器中经过预处理，包括悬浮粒子发生凝聚而增大，电滤器的生产能力提高 0.5—1 倍，同时净化后气体中炉灰含量大约降低一半。

4) 电滤器的造价高于在许多场合下可以代替它的其他设备的造价。因此，如果气体的温度不高，而且所捕集的是干燥和无腐蚀性的物质，则以使用比电滤器价廉的袋式过滤器更为合适；但若物料的粒子粗大，可以应用费用更低的旋风除尘器（但是这两种设备的流体阻力比电滤器为大）。

按每小时处理 1000 米³ 工业气体来计算，电滤器装置的造价为 275 到 2200 卢布（包括净化设备、电气装置和建筑安装等费用）。

构造复杂的电滤器，例如用于气体精细净化的湿式洗气塔-电滤器、用耐腐蚀材料（铅、硅铁、安山岩）制作的净化腐蚀性气体的电滤器，或者使用特种热强钢制作的净化热气体的电滤器，其造价比较高。

按每小时处理 1000 米³ 气体计算，工业电滤器的电能消耗为 0.2—0.3 千瓦·小时。

按每小时处理 1000 米³ 气体计算，视净化装置的复杂性不同，操作管理费为 0.85—6.0 戈比。

考虑到电滤器的造价比较昂贵，所以在任何具体场合下选用电滤器时都必须具备充分的理由。

同时应该指出，如果正确地选择电滤器，并使它在最适宜的

工艺条件和与此相应的供电状况下来操作时，电滤器的全部指标在大多数情况下都比已知的其他气体净化设备的指标更高。

将电滤器与其他气体净化设备或预处理气体的设备联合使用，可以达到特别高的气体净化效率。

本书系统地介绍了有关工业气体电滤法净化的理论和实践的知识。

“电滤器内气体的分布”一节由И.Е.伊杰利奇克(Идельчик)执笔，М.А.阿利佩罗维奇(Альперович)于审阅本书原稿中提出宝贵的意见，谨此一併致谢。

緒 論

1. 工业气体和悬浮粒子的特性

机械过程、热过程和化学过程造成工业气体夹带悬浮粒子的现象。

水泥干燥器、生料干燥器、研磨机和硫铁矿的机械焙烧炉等设备所排出的气体中，以及风力输送装置使用的空气中存在的灰尘是由于进行固体粉碎的机械过程（压碎、磨碎、混和与磨蚀等）以及由于倒撒和输送疏松物料而形成的。

在烟道气、发生炉煤气、高炉煤气、焦炉煤气和其他煤气中形成的灰尘则是由燃料燃烧的热过程所造成的。燃烧时燃料发生裂紋和破碎，同时可能形成夹带于气体中的可燃物和炉灰的微小粒子。

炭黑是有机物和燃料在空气不足的条件下不完全燃烧的产物。

如果气体中含有某一种物质的蒸气，则将其冷却到一定的温度时，蒸气会凝結成液体或固体。

由于蒸气冷凝而成的悬浮物有如：硫酸浓缩设备的废气中所含的硫酸雾；发生炉煤气和焦炉煤气中的焦油雾；以及有色冶金企业的气体中所含的低蒸发点的有色金属（鋅、錫、鉛和銻等）微粒。

若气体組份能彼此反应而形成另一种蒸发温度比較高的物质，则当这类气体組份相互发生化学作用时，产物就会在气体中凝結为液滴或者固体粒子。

例如，在有色金属冶炼厂的某些炉子中还原炉料时，会析出金属（鋅、錫等）蒸气；当它与空气中的氧接触时即发生氧化

(燃烧), 结果生成金属氧化物 ZnO 、 SnO_2 和其他种在該温度条件下不挥发的产物, 它們成細小的固体尘粒为气体所带走。

由于蒸气凝結所形成的尘粒称为升华凝結物。

含有悬浮粒子的气体 (包括空气在內) 属于气分散系統。由分布在任何一种分散介质 (水、溶剂、空气) 中的細小而分散的粒子 (分散內相) 所形成的系統通常称为分散系統。

气分散系統 (或称气溶胶) 是指分散介质为气体, 而分散內相为固体粒子 (灰尘) 或液体粒子 (雾) 的这类分散系統。

分散內相可能是同样粒度的粒子 (单分散系統) 或者不同粒度的粒子 (多分散系統)。

工业气体通常是复杂的气分散系統, 其中分散介质是几种不同气体的混合物, 而悬浮粒子的大小不等, 并且会有不同的聚集状态。

悬浮粒子按其粒度划分为各种粒級。

处在某一尺寸下限和某一尺寸上限之間的粒子所占的重量分率, 即表示該粒級的多少。例如, 对粒子大小在 100 微米以下的灰尘, 可以分成下列粒級:

粒 級 序 号	1	2	3	4	5
粒度, 微米	0—5	6—10	11—15	16—20	21—30
粒 級 序 号	6	7	8	9	
粒度, 微米	31—40	41—60	61—90	91—100	

在选择气体淨化的方法和設備时, 重要的是查明气体悬浮物的起源, 因为分离气体非均一系的可能性主要是由悬浮粒子的粒度来决定的, 而粒子的粒度則取决于其形成的条件。

通常由于机械过程所形成的悬浮物是直径从 5 微米到 50 微米或者更大一些的粒子, 而由于热过程和化学过程所形成的悬浮物是直径 3 微米以下的粒子。

在蒸气凝結时最初形成的极其細小的悬浮物粒子通常可能結

合成較粗大的棉絮状粒子。粒子变大的这种現象称为凝聚。細小的粒子凝聚的趋向比較大，直径超过 100 微米的粒子几乎不能凝聚。粒子在碰撞和接触时发生凝聚。当粉末粒子和沉淀粒子进行沉积时，同样发生强烈的凝聚作用。

悬浮粒子的粒度通常以微米来表示。有时候粒子按沉降速度 (скорость витания) 分类 (在这种場合下，灰尘的粒度組成用空气分級法确定)。

利用附录 V 的列线图可以根据粒子的沉降速度确定粒子的直径。

某些气溶胶的粒度列于表 1。

气溶胶粒子的粒度

表 1

物 质	平均公称直径, 微米	物 质	平均公称直径, 微米
海上的雾.....	38	氧化鋅粉尘 (平均)	0.5
大气中的灰尘.....	0.97	石油烟.....	0.1—0.005
制粉厂的面粉.....	15—20	发生炉煤气和焦炉气中	
煤粉 (平均)	10	的焦油雾.....	0.1—0.001
研磨装置中的水泥粉尘.....	7—10	烟草烟.....	0.015—0.001
轉窑废气中水泥粉尘.....	6—0.8	炭黑:	
粉煤燃烧的炉灰.....	5—10	灯炭黑.....	0.15
硫酸雾.....	1.1—0.16	气炭黑.....	0.06

工业气体中悬浮粒子的浓度及其所占产物的重量百分率列于表 2。

通常存在于气体中的悬浮粒子带有电荷，原因是粒子直接吸附气体的离子，或者受到电离因素的作用 (例如，受紫外线或放射性物质裂变的影响)，还可能是运动摩擦所引起的。悬浮粒子的这种自然发生的电荷規定称为摩擦电荷 (трибозаряд)。

悬浮粒子所带电荷的符号取决于粒子形成的方式及其化学成分。

工业气体中悬浮粒子的含量

表 2

气 体 来 源	悬浮粒子的 平均浓度, 克/标准米 ³	悬浮物含量 占产物的重 量百分率
化 学 工 业		
硫铁矿机械焙烧炉.....	2.5—5.0	3—6 ^①
粉矿焙烧炉.....	20—50	20—60 ^①
硫酸浓缩器.....	6—20	1.5—6.0
炭黑炉和炭黑发生器.....	20—30	100
燃 料 气 化		
气化褐煤的发生炉(灰尘).....	5—50	2.5—25
气化褐煤的带有干馏筒的发生炉(焦油).....	20—35	4—6
水 泥 工 业		
水泥研磨机.....	20—50	3—6
生料干燥器.....	20—80	8—25
轉 窑		
湿 法.....	20—50	6—15
干 法.....	30—60	8—20
干 燥 装 置		
干燥器		
用于干燥石灰或石膏.....	5—50	4—20
用于干燥氯化钾.....	5—20	3—8
用于干燥矿砂或用在煅烧装置中.....	30—100	10—25
煤 的 加 工		
干燥器		
用于干燥褐煤.....	12—25	6—12
用于干燥烟煤.....	10—20	3—5
研 磨 机.....	20—50	2—3
冶 金 工 业		
高 炉.....	10—40	4—16
熔炼铅-锡的竖炉和反射炉.....	3—20	3—12
精炼铜的吹炉.....	6—10	3—6
黄铜熔炼炉.....	1—5	2—4
鍋 炉 装 置		
鍋 炉		
具有栅式炉膛.....	1.5—5	4—8 ^②
具有燃烧粉状燃料的炉膛.....	6—40	2—20 ^②
电 炉		
制碳化钙用.....	0.9—2.0	1—2
炼 鋼 用.....	2—10	1.5—7
炼 鋁 用.....	0.5—1.6	0.5—1.5
制 磷 用.....	2.1—9.0	0.5—2.5

① 对所焙烧的硫铁矿而言。

② 对所燃烧的煤而言。

某些物质的悬浮粒子所带电荷的符号〔根据杜曼斯基 (Думанский)、麦利道 (Мельдау) 和吉勃斯 (Джибс) 的数据〕为:

物质	符号	物质	符号
磷灰石	+	糊精	-
淀粉	+	钙	-
細粒土壤	+	石英砂	-
大理石	+	面粉	-
砂	+	氧化鉄	-
硫磺	+	氧化鎂	-
浓酸雾	+	氧化鉛	-
煤	+	氧化鋅	-
氯化鈉	+	鋅	-

对某些粒度为 200—500 微米的灰尘所带电荷进行测量的结果〔根据 Е.М. 巴拉巴諾夫 (Балабанов) 和 С.П. 热勃罗符斯基 (Жебровский) 的数据〕列于表 3。

悬浮粒子的电荷数量

表 3

物 料	試 样 克	总电位 伏	每 克 物 料 的 粒 子 数 目	单个粒子的电 荷, 静电单位 (电量)	单个粒子的元电荷数目	
					摩擦电荷	在电晕区中
大理石.....	50	+255	1.66×10^5	$+6.0 \times 10^{-5}$	1.2×10^5	1.5×10^7
石英砂.....	50	-345	1.72×10^4	-9.1×10^{-5}	1.9×10^5	8.6×10^6
花崗石.....	50	-270	1.20×10^4	-9.1×10^{-5}	1.9×10^5	8.7×10^6
硫磺.....	50	+375	2.2×10^4	$+6.9 \times 10^{-5}$	1.5×10^5	7.3×10^6
白鎢矿.....	40	-168	7.5×10^3	-1.14×10^5	2.4×10^5	1.5×10^7
鋳英石.....	33	-204	1.02×10^4	-1.22×10^4	2.5×10^5	8.7×10^6
磷灰石.....	42	+66	1.4×10^4	$+2.3 \times 10^{-5}$	4.8×10^4	1.0×10^7

注: 1. 测量时粒子的温度为 18—20°C; 空气湿度为 70—75%。

2. 表中最末一栏列举粒子在电滤器中获得的元电荷数目, 以資比較。

从表 3 可見, 在給定条件下粒子的摩擦电荷相当于在正常电晕放电时粒子带有电荷的 1—2%。

摩擦电荷对粒子在电晕放电区中获得的电荷的比值将随粒子粒度的减小而增大。