

〔美〕 H.J. 怀特 著 王成汉 译

工业电收尘

GONGYE DIANSHOUCHEN

冶金工业出版社

81.174
247

工业电收尘

〔美〕H.J.怀特 著

王成汉 译

冶金工业出版社

工业电收尘

(美) H.J. 怀特 著

王成汉 译

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 12 5/8 字数 334 千字

1984年1月第一版 1984年1月第一次印刷

印数00,001~5,300册

统一书号: 15062·4021 定价1.60元

译者序

本书是一本系统地论述电收尘的专著，原书名为“Industrial Electrostatic Precipitation”，1963年版。作者怀特(H.J.White)长期从事电收尘工作，先后在国外许多期刊上发表过有关电收尘的论文和试验报告，但是直到六十年代初期，才在许多朋友的鼓励下把他的试验和经验数据，以及一些理论工作的成果系统地整理出来，出版这样一本专著，他与罗斯和伍德(H.E. Rose and A.J.Wood)合著的《电收尘理论与实践导论》(An Introduction to Electrostatic Precipitation in Theory and Practice)一书，堪称电收尘专论的姊妹篇。多年来，世界各国电收尘工作者在撰写论文中常常援引他们的理论和试验数据，尤以援引本书者最多。原因是本书内容全面，系统性强，理论和试验数据以及工业实践的资料丰富，虽然版本较早，迄今仍无过时之感。这是译者愿意从事翻译本书的原因之一。

其次，本书中谬误之处不少，这或是由于编写疏忽，或是由于校对不严，或是由于印刷排版错误，如果不加分析地援引本书中的论点、公式或数据，就会导致我们工作中的失误。因此，通过翻译而把其中的谬误在该页次的下面加上呼应注予以订正，这对于援引本书的同志们将会是有益的。

第三，翻译本书的工作，实际上早在本书出版后不久就已开始进行，并已译出几章初稿，由于十年浩劫均已荡然无存。党的十一届三中全会决定把工作的着重点转移到社会主义现代化建设上来，这是一个历史性的伟大转变。译者在许多同志的鼓励下决定重新从事于本书的翻译工作。曾考虑用编译的方法改写本书，以便能补充一些较新的资料，后又考虑到一方面需要订正本书中的一些谬误，另一方面需要避免原书和补充资料间的混淆，在征得冶金工业出版社的同意后，仍决定按原书译出并加订正以保持原书的本色。

由于译者水平不高，译文质量和对某些论点的理解均难免有误。此外，原书中的附图亦未能重新绘制，以致未能把其中的英制坐标转换成公制坐标，尚请读者鉴谅。对于译文中的错误，亦请读者予以批评指正。

王成汉 于贵阳
一九八一年国庆前夕

前 言

电收尘是回收工业炉及其生产过程气体中的粉尘、微尘和烟雾的最主要和最通用的高效率收尘方法。尽管它有广泛的效用而且实用范围很广，然而对于电收尘过程的基本物理知识和基本工程原理，人们仍是不够十分了解的。关于电收尘的论著目前大都散见于许多国内外的期刊杂志中，迄今只有极少的关于电收尘的统一论述。在一定意义上来说，这是从事电收尘工作的人们应做的工作，但却又没有人去做这项工作。

因此，我写这本书的目的就是要把已知的关于电收尘过程的科学依据和基本工程原理进行综合的、有条理的论述。本书一方面可供从事气体净化技术、大气污染控制和回收气体中有价物质工作的工程师和科学家使用，另一方面，对于静电过程、气体电子学和粒子物理学方面的研究人员也是有益的。

论述问题的技术标准是由电收尘的技术状态和需要来确定的，并不受任何强制性的限制。重点是以现代的发展和知识为基础。对于电收尘工程技术的阐述则是从基本的原则和理论出发，自然而然地进行推论的，而电收尘的设计则由气体和粒子的基本性质出发给以系统的论述。

本书的内容是基于本人二十年来对电收尘的基础研究和实际工程方面的经验。作者有幸曾与电收尘领域中的先驱者 F.G. 柯特雷尔 (F.G.Cottrel), W.A. 施密特 (Schmidt), E. 安德森 (Anderson) 等共事，本书中的大量历史材料和电收尘早期的研究成果是因此而获得的。

至于本书的编排，前面的三章基本是介绍电收尘过程的有关要素，并且对于气溶胶的有关特性给以基本的论述。第四、五、六、七章是对电收尘基本过程和物理学的理论进行分析。第八、九、十章则涉及到气流分布，粒子的比电阻和粒子的返流损失这几个主要的技术问题。最后一章论述了电收尘实际设计方面的基

本原则。此外，作为本书的一个重要组成部分，列出了几百种关于电收尘的科学技术参考文献。

我要感谢我过去的同事们L.M.罗伯茨 (Roberts) 和Dr.P.库珀曼 (Cooperman)，他们提供了宝贵的意见和资料，感谢柯特雷尔研究公司 (Research-Cottrel Inc.)对写作本书的资助。哈佛大学教授P.德林克 (Drinker) 和 L.E.西尔弗曼 (Silverman) 提出了有益的建议和评论，州立爱迪生公司 (Commonwealth Edison Company) 的M.J.阿奇博尔德 (Archbold) 先生提供了图片和现场操作数据，作者均表示感谢。我尤其要感谢联邦爱迪生公司 (Consolidated Edison Company) 的H.A.鲍曼 (Bauman) 先生，他不仅校阅了原稿，而且提出了许多切实有益的建议。

H.J. 怀 特
于俄勒冈州波特兰
1962年 9 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 历史的渊源	4
1.2 发展和应用	10
1.3 设备和操作条件概要	24
1.4 科学论文, 美国专利和电收尘发展中的大事一览表	25
第二章 电收尘系统的基本内容	30
2.1 基本原理	30
2.2 基本设计和组成部分	35
2.3 机械设计	40
2.4 电收尘的组装投产	42
2.5 仪表和控制	44
第三章 粉尘、微尘和雾的性质	45
3.1 弥散体的生成和分类	45
3.2 悬浮粒子的一般性质	47
3.3 粒子的大小和结构	51
3.4 粒子大小的统计学	55
3.5 粒子的电气性质	61
3.6 粒子的光学性质	63
3.7 粒子的凝聚	66
3.8 粒子性质与气体净化方法的关系	68
第四章 电晕放电	70
4.1 气体中的导电现象	72
4.2 电晕放电的物理学	80
4.3 电流和电压的理论方程式	87
4.4 试验得到的电流-电压特性	100
4.5 电场和电流密度	110
4.6 悬浮粒子的影响	115
4.7 现场电收尘的电晕特性	122
4.8 电晕特性的幂函数方程	124

第五章 粒子荷电	127
5.1 粒子荷电的方法	127
5.2 电场荷电过程	129
5.3 扩散荷电过程	139
5.4 电场荷电和扩散荷电的联合影响	141
5.5 试验结果	143
5.6 现场试验结果	151
5.7 粒子荷电的反常情况	152
第六章 粒子的回收	156
6.1 粒子动力学	157
6.2 粒子回收的理论	161
6.3 理论的扩展	171
6.4 管式和板式电收尘的比较	182
6.5 理论的试验证明	183
第七章 电收尘的供电	198
7.1 回收粒子所需的能量	198
7.2 电能与收尘效率的关系	200
7.3 火花放电和电压波形的影响	212
7.4 高压分电场供电	223
7.5 最合理的供电	234
7.6 脉冲供电	237
7.7 电收尘所需的电压和电流	238
第八章 气流分布	241
8.1 流体的基本类型	242
8.2 紊流	245
8.3 烟道和电收尘中的气流干扰	252
8.4 气流的定量分析	256
8.5 气流分布不良对收尘效率的影响	261
8.6 气流质量的控制	266
8.7 气流模拟模型试验法	277
8.8 气体流量的测定	289
第九章 粒子的比电阻	298
9.1 比电阻的测定	299

9.2	试验室和现场的比电阻数据	304
9.3	导电的机理	310
9.4	气体调理方法	313
9.5	飞灰的比电阻	318
9.6	反电晕和火花放电	324
9.7	比电阻对收尘效率的影响	332
9.8	克服高比电阻的方法	334
第十章	粒子的返流损失	336
10.1	返流损失的检查 and 定量的测定	337
10.2	返流损失对收尘效率的影响	349
10.3	防止返流损失的方法	352
第十一章	实际设计和操作的要点	362
11.1	电收尘的技术工艺	363
11.2	电收尘的选择	363
11.3	高压供电设备	370
11.4	电晕电极和收尘电极	372
11.5	电极的震打	373
11.6	仪表和控制	374
11.7	腐蚀和绝热保温	375
11.8	电收尘性能试验	376
11.9	有关电收尘本体问题和解决办法	379
参考文献		382

第一章 绪 论

使气体中的悬浮粒子分离出来是工业领域中基本的科学技术问题之一。工业的发展和扩大，例如在冶金领域中加工处理大量的矿物和矿石，在电力生产中每年燃烧掉几亿吨的煤，单就美国而论，每年就向大气中放散5000万至1亿吨的烟雾、粉尘和微尘。

为了防止严重而有破坏性的空气污染，在许多情况下也是为了回收像铜、铅、金等有价值物质，采取有效的气体净化方法以控制这些放散物是十分重要的，否则它们就会被带进烟囱而散失在大气中。空气污染问题是随着现代文明的发展而增长起来的问题，一般来说，它是现代文明直接产生的结果。当然，自然现象如雾罩和腐败植物的散发物也会造成空气污染和大气能见度的降低，但是，最严重的空气污染源还是人为的。

气体净化方法从广义上可分为机械的方法和电气的方法两大类。机械的方法包括基本上依靠惯性力或机械力回收粒子的一切方法在内，即重力沉降法，离心分离法（或称旋涡分离法），气体洗涤法，介质过滤法（采用滤网，滤布或填料）和声波凝聚法。电气的方法指的是电收尘，它与一切机械方法的区别在于作用在悬浮粒子上而使粒子与气体分离的力，在性质上是电力而不是机械力。

这个根本的区别使得电气的方法在操作和应用上都具有无比的优越性。分离的作用力直接施之于粒子本身，而不象大多数的机械分离方法那样把作用力施之于整个气体。这种直接而又经济地对于作用力的利用说明了电气方法所需要的功率最少和对气流的阻力最小的特征。它既不像重力沉降法和惯性法那样只限于回收粗粒子，也不象介质过滤法或洗涤法那样受到气体运动阻力的限制。尽管是亚微型范围内的最细小的粒子也能用电收尘有效地

予以回收，因为有相当大的电力作用在这些粒子上。对于气体净化所能达到的程度没有根本的限制，不过在实际上，大多数电收尘设备的收尘效率都介于90~99%之间，有些则可达到99.99%。高的收尘效率，低的阻力损失，能够在高温下处理大量气体（参阅表1-2中的数据）以及能够成功地克服气体和粒子腐蚀的能力，这就是电收尘方法被广泛采纳和能够应用于许多方面的原因。

电收尘方法在性质上是物理的方法，更准确地说，应归类为电物理方法。然而，在实践中，电收尘涉及到许多科学领域，包括物理，化学，气溶胶技术，化学工程，电气工程，电子学，空气动力学，机械工程和土木工程。尽管这个方法主要是物理性质的方法，但是应指出，电收尘早期的工作和实际的发展，大部分是由化学家和冶金学家着手进行，而由柯特雷尔肇始，指出这一点是有意义的。

电收尘的实际发展与二十世纪最初十年中对于空气污染的重视程度增加是息息相关的。十九世纪末叶科学技术的突飞猛进为电收尘提供了物质条件，而由于反对空气污染蔓延的坏影响所形成的社会舆论和反应，为控制工厂企业散发的烟尘起了促进作用。在美国西部，这种社会压力特别强烈，在那里，农民和迅速发展起来的炼铜工业之间的激烈冲突经常爆发以致诉诸法律控告冶炼厂。在这样的背景条件下，一个道地的加利福尼亚人柯特雷尔贡献了他的智慧和力量来解决从烟囱废气中回收有害烟尘和微尘的技术问题，他曾在德国受教于奥斯瓦尔德（Ostwald），学习物理化学，随后又在迅速兴起的加利福尼亚大学化学系工作，被认为是最卓越的年青人。

虽然工业烟尘问题并不是什么新问题，可是原来的收尘方法已经证明，要处理极为复杂的高温被污染的且常具有腐蚀性的大量气体是不实用的，或者是不可能的。在电气时代的最初阶段，考虑到用电力方法解决烟尘问题可能是很自然的事。其实，早在其二十多年前，英国的洛吉爵士（Sir Oliver Lodge）就曾经用过电力方法试图回收氧化铅微尘，结果这次尝试失败了。柯特雷

尔能成功地用电气方法净化气体，主要在于他认识到电收尘方法中最重要的关键是需要有更好的提供高压电源的方法。为此，他转向当时迅速发展起来的交流电领域，采用了高压变压器和同步整流机来进行电收尘试验。这样着手处理问题的方法，虽然从现代的技术观点来看是显而易见的，但在当时却是难能可贵的，可以认为这是依靠直觉而有效地解决了以往的难题的一个范例。

柯特雷尔早期的工作，特别是在施密特协助下所进行的工作，为在冶金和水泥工业中迅速广泛地采用电收尘，成功地控制空气污染奠定了基础。从本世纪二十年代到四十年代，电收尘开始应用于其它工业，此后又继续广泛地被采用。特别是从四十年代后期电收尘的发展尤为显著，在各个方面的应用都处于高潮。空气污染的控制仍然是最重要的应用领域，而从经济的角度回收有价值的粉尘和微尘也是其主要的方面。其它重要的应用方面有：燃料和化学过程产生的气体，通过净化而改善气体的质量；分级回收冷凝的蒸汽以获取化学产品和副产品，把某种有价值的或被污染的气体和蒸汽吸附在固体粒子上，然后再除去这些粒子；以及对办公室、商店和工厂的空气实行高效率的净化。

关于由气体中分离出粒子的电气方法，有几个同义语，对此略作说明可能是有意义的。“静电收尘”是个新使用的术语，其实并不如早先使用的“电气收尘”含义准确，由于收尘过程中常产生一定大小的电晕电流，所以并不是真正的“静电”。不过，在静电领域中目前的趋势是要把一切高电压、低电流的现象都包括在内。最初所使用的“电气收尘”这个词也不是固定不变的。在1904年提出的专利中，迪昂（Dion）谈到：“粒子或物质已因电流作用而沉淀。”1909年，柯特雷尔又表述成“电荷的沉淀作用”，但在1914年的论文中，他又大量使用“电气沉淀”这个词。1912年在冶炼工业中又首先使用了“柯特雷尔电收尘”的术语（译者注：由于用词不统一，似乎应根据我国实际情况对这种收尘方法规定为“电收尘”为宜）。

1.1 历史的渊源

早在公元前 600 年，希腊人就知道被摩擦过的琥珀对细粒子和纤维的静电吸引作用。库仑 (Coulomb)[1]考察了静电吸引力的大小，并于 1785~1789 年这一期间发表了论文。库仑发现的平方反比定律构成为静电学的科学基础，它也是电收尘理论的出发点。

最早的有关烟尘电力吸引的文字叙述，出自英国的宫廷内科医生威廉·吉伯特 (William Gilbert)[2]，他在有名的一篇论文中有所报导，时间是在 1600 年。吉伯特这样描述他所发现的现象：“一切东西都受电的吸引，但火焰、燃烧物体和最稀薄的空气除外……然而电却能吸引由熄灭的火花产生的烟……物体因电的吸引而向着带电体的中心成直线运动”。大约在 1745 年，富兰克林 (Benjamin Franklin) 开始研究尖端放电在“拉出电火和散开电火”方面的效果，指出这件事也是有意义的。富兰克林似乎是首先研究我们现在所涉及到的发自尖端的电晕放电和刷毛状放电现象。在 1772 年，贝卡利亚 (Beccaria)[3]对于含有大量烟雾的气体中的放电现象和电风现象也进行了试验考察。

1824 年，霍菲尔德 (Hohlfeld)[4]的试验是用具有带电尖端的电瓶来净化瓶中的烟雾，而在 1850 年，吉他 (Guitard)[5]又重复做了这样的试验，他是以烟草的烟为对象，在一个直径 9 英寸，长 18 英寸的玻璃圆筒中进行试验的。然而，霍菲尔德和吉他的试验均未能激起任何关于电收尘原理的实用性研究，而且不久就被人们忘却了。1905 年，洛吉爵士又再次进行了这一试验，他是在单独地重新发现这种现象，并在 1884 年公布了他的论文[6]之后许多年才又再进行这次试验的。还可以指出，在吉他和洛吉之间的一段时期内还曾有另外两位研究者。在 1862 年，高盖因 (Gauguin)[7]发表了可能是首次的关于同轴圆筒电极间破坏性放电试验的论文。1878 年，拉沃德 (Nahrwold)[8]用缝衣针的针尖在一个锡制圆筒中进行放电试验，他发现这种放电现象能大大加

速大气中粉尘沉淀或回收的过程。他还试验过在圆筒内壁涂敷甘油以便使回收的粉尘附着于圆筒壁上；这可能是第一次认识到使干燥的粉尘粒子积存于收尘电极表面上的困难性。

最初把洛吉爵士的研究成果用于工业化电收尘是沃克(A.O. Walker)和哈金斯(W.M.Hutchings)[9]于1885年在北威尔士的巴基尔特(Bagilt)一座炼铅厂中进行的。试验装置的示意图见于哈金斯发表的论文中，如图1-1所示，在铅炉烟道中安装有金属的尖端系统，用两台威姆赫斯特(Wimhurst)感应起电机供电，起电机圆盘直径为5英尺；每台起电机由一台1马力的蒸汽机带动。这套装置的试验结果失败了，其原因一部分是由于这

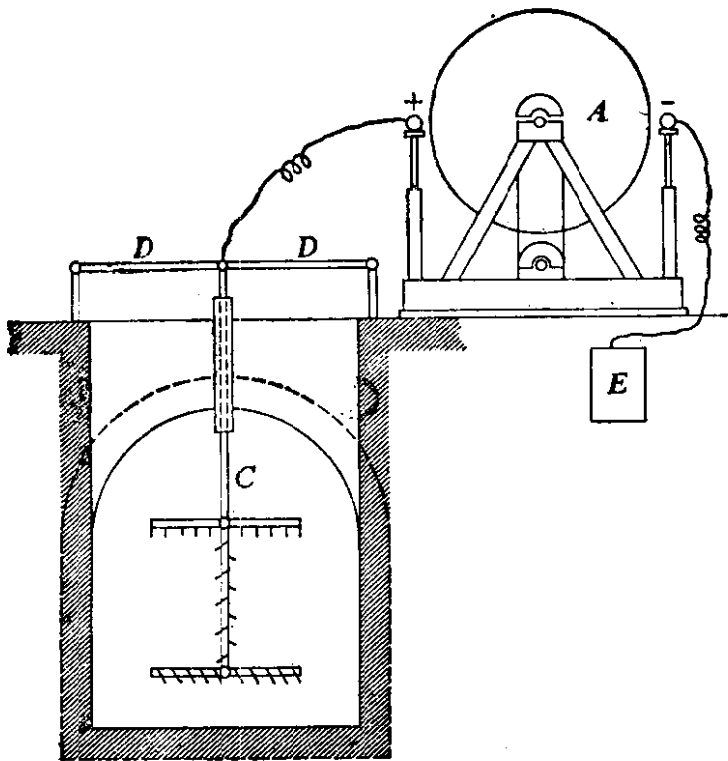


图 1-1 A.O.沃克1886年发表在美国专利(No.342548)上的最早的电收尘装置示意图

种产生高压电的方法太原始，一部分则是由于不幸选择了铅微尘作为初次尝试的对象。铅微尘具有很高的绝缘性能，而且粒子又是极为细小和分散，它是一种最难用电收尘回收的弥散体。

正如早期研究工作中经常见到的情况一样，差不多就在同一时间，另一位研究者，德国布拉克维(Brackwede)的卡尔·穆

勒 (Karl Moeller)[10]单独地重新发现电收尘方法并获得了专利。他的想法显然是来自拉沃德的论文。不过,穆勒的专利是在沃克第一个专利之后几个月发表的。在洛吉的研究工作之后几年中也有一些论文和专利发表,而洛吉本人在1903年发表的另一个专利中提出了使用新型水银弧整流器为电收尘提供高压直流电。然而,这项研究并没有进入工业化阶段,以致电收尘的发展仍停留在1885年那样的属于一种新奇而引人入胜的试验室试验水平。

柯特雷尔早期的研究试验成果

柯特雷尔对于气体净化的研究并不是从科学研究的角度出发,而是从解决冶炼厂造成的空气污染以满足公众的需要出发。他最初的研究工作并不是用电气方法来解决这个问题,而是采用较普通的利用一般离心力方法的旋涡收尘器。关于使柯特雷尔转而采用电气方法的过程,还没有见到明确的记载。然而,我们可以肯定,旋涡收尘方法未能满足他的要求。此外,柯特雷尔的研究工作正是处在气体放电的研究试验十分活跃,而且高压交流技术突飞猛进的时代。

柯特雷尔最初的试验工作[11]是在试验室中所进行的小型试验。他使用了一个火花线圈,并在一个空腔中安装着几个尖端放电点,其试验结果很好。为了增加处理烟气的能力,他增加了放电点,结果发现电晕放电或刷毛状放电只是从放电点处逐个地发生,在同一时间内只有一、二个放电点发生放电现象(由于火花线圈的功率不足)。为了解决这个问题,柯特雷尔偶然发现纱包线能在其表面上产生连续的辉光,于是想出用半导体纤维材料制做一种带有绒毛的电极,它实际上形成许多小的放电点。这种绒毛电极在其整个表面上产生出十分均一的电晕,尽管火花线圈提供的功率较低,也能产生这样的电晕,这是用原来的增加放电点的方法所不能办到的。

柯特雷尔认识到试验工作需要有一个更好的高压电源,在1906年他转而使用了新研制出来的同步机械整流机[12]和高压交流变压器。然而,当时变压器所能达到的电压只有10~15千伏左

右，所以要在整个放电电极长度上获得适当均一的电晕，绒毛电极仍然是一个重要的部件。首次使用同步整流机的试验是在1906年加利福尼亚大学进行的，所用设备是小型电收尘，并用它来回收每分钟几立方英尺烟气中的硫酸雾。在首次试验中选定硫酸雾为回收对象是很幸运的，因为这种物质易于用电收尘回收，但是使用当时的机械收尘和湿式收尘方法却无能为力。由于试验结果十分令人满意，不久就建立了工业化的电收尘装置，首先是在距贝克莱海湾几英里的平诺（Pinole）一个火药厂，随后又在附近的塞尔拜冶炼厂（Selby Smelter）安装了电收尘，因为在当时该厂正卷入一场尖锐的空气污染的纠纷之中。这首先安装的工业化电收尘，虽然在结构上简陋一些，但大体上是无误的。塞尔拜

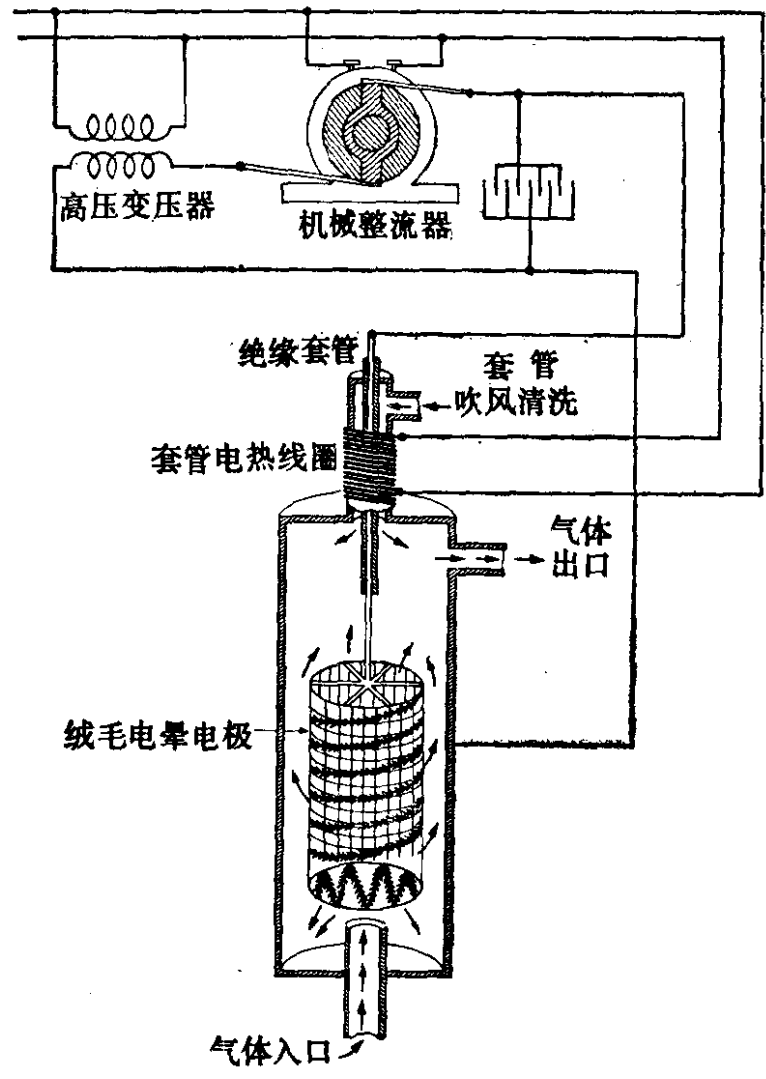


图 1-2 柯特雷尔1908年发表的第一个电收尘专利(No. 895729) 中的示意图