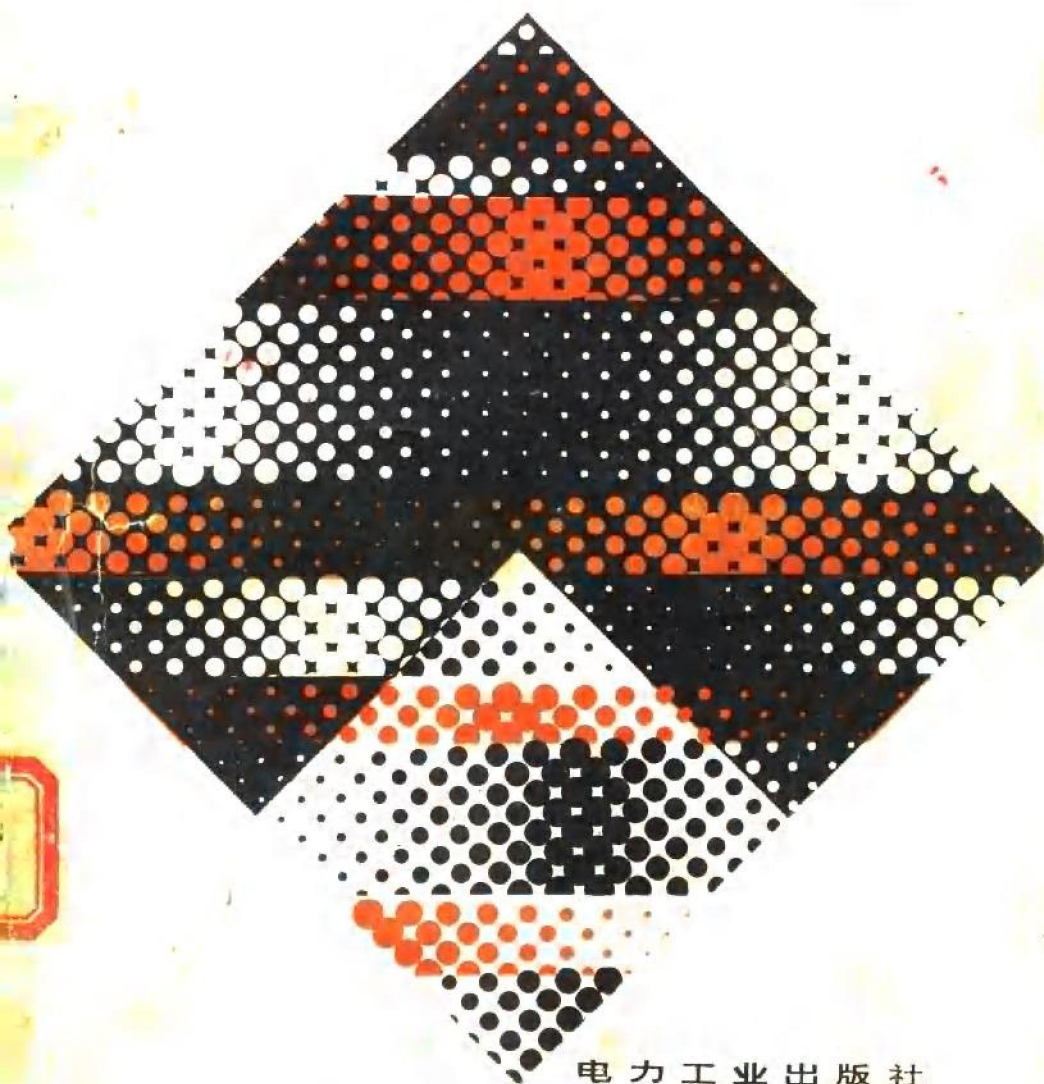


粉粒体的空气输送

〔日〕上 滝 具 贞 著

阮少明 许尚宏 蹇人鸾 译

李广泽 吴曙笛 校



电力工业出版社

粉粒体的空气输送

〔日〕上 滝 具 贞 著
阮少明 许尚宏 蹇人鸾 译
李广泽 吴曙笛 校

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

全书包括三部分内容,共分十二章。第一部分(第一至第六章)详细地阐述了空气输送的理论基础,其中包括空气输送的概况、空气的各种性质、粉粒体的特性和悬浮运动、输送管内粒体群的运动及粉粒体在管内的实际速度等内容;第二部分(第七至第十章)较详细地叙述了空气输送系统及各种输送设备的结构特点,其中包括供料器、输送管、分离器及空气压缩机等各种设备,并阐述了各种空气输送系统及设备的工作原理、性能特点及产品规范等;第三部分(第十一至第十二章)简明地介绍了设计方法和特殊的气力输送装置。

本书可供各部门从事空气输送的技术人员、工人阅读参考,也可作为大专院校有关专业的参考书。

粉粒体的空气输送

[日]上滝具贞著

阮少明 许尚宏 蹇人鸾 译

李广泽 吴曙笛 校

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 10 $\frac{1}{2}$ 印张 274千字

1982年10月第一版 1982年10月北京第一次印刷

印数0001—4130册 定价1.35元

书号15036·4350

译 者 序

粉粒状的物料采用一般的机械输送，会造成粉尘飞扬，严重地恶化工作条件，污染环境。近年来密闭式空气输送受到各个部门的重视。由于空气输送克服了机械输送的缺点并且可提高输送的自动化水平、减轻体力劳动，这种输送方式得到了飞速的发展，已成为粉粒状物料输送的重要方式之一。

我国空气输送的历史很短，但近几年来在电力、冶金、矿山、码头、铸造、食品、化工、交通运输及建筑等部门，应用空气输送日益增多。

目前，国内有关空气输送方面的书籍很少，远不能满足“四化”建设的需要。我们在试验和研究空气输送粉煤灰的过程中，感到《粉粒体的空气输送》一书，既有理论基础，还有试验研究的实际成果，特别是阐述了各种空气输送系统和设备的工作原理及性能特点等，应用价值较大，因而翻译了这本书，供从事空气输送的工作人员参考。

本书由阮少明、许尚宏和蹇人鸾翻译，并由李广泽和吴曙笛校对。在本书的翻译过程中，曾得到有关单位和同志的大力帮助，谨此深表谢意。

由于我们水平所限，实践经验较少，其中一定会有不少缺点和错误，衷心希望广大读者给予批评指正。

新 版 序 言

中断很久的《粉粒体的空气输送》一书最近修订出版。为此，特向对本书给予支援的人士致以深切的感谢。

一九六一年，旧版刚出版的时候，我们曾担心是否会因售不出去而给出版社增添麻烦。因当时采用气力输送尚不普遍，同时关心这方面工作的人也不多。但是完全出乎意料，初版当年即已售完，以后几乎每年再版。

近几年来，这方面的研究工作进展很快，发现书中有很多不符合时代要求的内容，使再版时感到很困难。但因忙于其它琐事，总下不了修订的决心，就这样共出版了9次。这就好比给已经长大了的青年仍穿着少年时代不合体裁的衣服一样，总感到不是滋味，所以终于下定决心予以修订。

在修订时，曾希望旧版的共同执笔者西冈先生再次合作。但因其在公司内扩大了管辖范围，工作繁忙，予以推辞。不得已由我单独写完全书。但要说明一点，对西冈先生曾经执笔的部分，系经本人同意后加以转载，在此深表感谢。

对于再版的反映如何尚不得知，其中编入了就我所知的与空气输送有关的全部最新资料。特别是我在实验室里所做的实验和在学会所作的有关学术报告，也分别编入各章节。同时，对于作为基础知识的空气及粉粒体的性质也匀出了相当的篇幅，以便初学这方面知识的人容易理解。因此，作为空气机械或粉体工程学方面的入门参考书，对读者或许有所助益。另外，关于空气输送中的各种现象就个人拙见进行了理论分析，但不敢断言它是绝对正确的。谬误之处，如能赐教，不胜感激。

最近，虽然空气输送已有相当发展，但还有很多尚待解决的重要课题。目前，有许多人正在进行深入研究，所以这本书可能

不久就会变成过时的书籍。在此期间，如能对研究这方面问题的诸君，从本书得到几分益处，笔者将不胜欣慰。

最后，对在本书再版中给予各种协助的富田付教授，以及为搜集资料而奔忙的实验室工作人员，特别是一手承担制图的船津先生和提供许多宝贵试验数据（学会发表的部分）的粉体实验室的历届毕业生，表示衷心的感谢。

著 者

一九七四年八月

目 录

译者序

新版序言

第一章 概论	1
第一节 空气输送概况	1
第二节 空气输送的历史	4
第三节 特点	18
第四节 型式和分类	22
第二章 空气的各种性质	26
第一节 空气的各种物理常数	26
一、空气的状态方程式和常数[26] 二、大气压和表压等 各种 压	
力[29] 三、湿空气[33]	
第二节 空气状态的变化	40
第三节 空气的各种能量	45
一、按非压缩性考虑时空气的能($\gamma = \text{常数}$)[45] 二、作为压缩性	
流体时空气的能[45]	
第四节 按非压缩性考虑时输送管内的空气流	48
一、输送管内的空气流[48] 二、直管的阻力[49] 三、粗糙管的	
阻力[52]	
第五节 作为压缩性流体时的空气流	54
一、等温膨胀时的管内流动[54] 二、绝热膨胀时的管内流动[56]	
三、喷嘴出口的空气流[56]	
第六节 空气的阻抗	59
第七节 压力和流量的测定	61
一、压力的测定方法[61] 二、速度的测定方法[64] 三、流量的	
测定方法[67]	
第三章 粉粒体的特性	74
第一节 悬浮速度(沉降速度)	75
第二节 粒径和平均粒径	79
一、粒径[79] 二、平均粒径[81] 三、比表面积粒径[81]	
第三节 粒度(分布)	82

一、粒度分布的表示方法[83]	二、粒度分布函数[86]	三、粒度分布的测定方法[89]	
第四节	粉体的比重与空隙率		93
第五节	摩擦系数和摩擦角		94
第六节	贮槽内的粉粒体		96
一、粉体压力[96]	二、粉体层的空气阻力和空气压力引起的粉体压力变化[98]	三、贮槽中粉粒体的降落[101]	
第四章	粉粒体的悬浮运动		104
第一节	粒子在平行气流中的运动		104
一、单粒子的水平运动[104]	二、单粒子的垂直运动[110]		
第二节	粒子在回转气流中的运动		115
第五章	粒体群在输送管内的运动		119
第一节	粒体群在输送管道内的流动		119
第二节	粒体群在输送管内的运动方程式		120
一、水平管道内的运动方程式[120]	二、垂直(倾斜)管道内的运动方程式[122]		
第三节	粉体群在管道内的理论速度		123
一、粉体的理论水平速度[123]	二、粉体的理论上升速度[125]		
第四节	粒体群在管道内的理论速度		126
一、粒体群的理论水平速度[126]	二、粒体群的理论垂直上升速度[127]		
第五节	粉粒体在输送管道内的最终理论速度		132
一、粉体群的最终速度[132]	二、粒体群的最终速度[133]		
第六节	粉粒体在弯管中的运动		135
第七节	管道内的实际流动形式		137
一、悬浮运动的流动形式[137]	二、集团运动的流动形式[139]		
第八节	粒体的浮力和悬浮运动能量		144
一、粉粒体的浮力[144]	二、粉粒体的悬浮能量[147]		
第六章	粉粒体在管道内的实际速度		149
第一节	混合比和管内的悬浮量		149
第二节	粒体速度的测定方法		150
一、直接测定法[150]	二、间接测定法[151]	三、利用高速照像机测定的实例[154]	
第三节	粒体速度的实测值		155

一、断面上各部位的粒体速度和悬浮量[156]	二、粒体群的平均速度[159]	三、粒体速度随 u_a 、 m 、 D 和 d 发生的变化[160]	四、粒子的加速距离[163]
第七章 供料器		165	
第一节 供料器的作用和种类		165	
一、供料器的作用[165]		二、供料器的种类[165]	
第二节 吸嘴		166	
一、固定式吸嘴[166]		二、双层圆筒型吸嘴[167]	
三、单筒型吸嘴[170]		四、吸嘴的压力损失和效率[171]	
第三节 喷射式供料器		174	
一、构造与作用[174]		二、特性[175]	
第四节 旋转给料机		178	
一、构造[180]		二、特性[182]	
第五节 螺旋泵		186	
第六节 仓泵		189	
一、仓泵的实验特性[191]		二、福勒克骚式仓泵[196]	
三、赛勒式仓泵[199]			
第八章 输送管		201	
第一节 输送管的种类		201	
一、直管[201]		二、弯管[201]	
三、分叉管、切换阀和多通阀[204]		四、挠性管[207]	
五、管接头[209]			
第二节 输送管的压力损失		210	
第三节 压损比		218	
一、压损比的定义[218]		二、空气速度和压损比[221]	
三、粉体的比重和压损比[222]		四、粒子直径和压损比[222]	
五、输送管径和压损比[223]		六、垂直管道的压损比[225]	
七、混合比大时的压损比[227]			
第四节 输送极限和最佳值		229	
第五节 管道布置注意事项		232	
第九章 分离排出设备		234	
第一节 目的和种类		234	
第二节 旋风分离器		234	
一、旋风分离器内空气与粒子的流动[236]		二、压力损失[237]	
三、分离性能[241]		四、旋风分离器各部尺寸的关系[245]	

第三节 其它分离器·····	249
一、惯性分离器[249] 二、重力分离(重力沉降)[250]	
第四节 布袋除尘器·····	251
一、构造与动作[251] 二、过滤阻力和捕集效率[254] 三、清扫方法[258]	
第十章 空气压缩机·····	260
第一节 型式和特点·····	260
一、型式[260] 二、空气压缩循环[262] 三、不同压缩过程所耗的功[263] 四、压缩效率[267]	
第二节 往复式空气压缩机·····	268
第三节 离心式(辐流式)压缩机·····	271
一、型式和特点[271] 二、叶轮的理論(无限叶片)[273] 三、有限叶片的理論[276] 四、特性曲线[278]	
第四节 回转式压缩机·····	280
一、型式和特点[280] 二、可动叶片式回转压缩机[281] 三、液封式压缩机[282] 四、罗茨式鼓风机[283]	
第十一章 空气输送装置的设计·····	286
第一节 设计的主要内容·····	286
第二节 型式选定·····	287
第三节 设备和管道布置·····	288
第四节 输送管径、混合比和空气速度·····	288
第五节 输送管的压力损失·····	293
第六节 所需要的动力·····	295
第十二章 特殊的空气输送装置·····	297
第一节 概述·····	297
第二节 空气斜槽·····	298
一、构造和特征[298] 二、理論和特性[299] 三、型式和性能[300]	
第三节 气力提升泵(垂直输送)·····	302
一、构造和特征[302] 二、输送理論和特性[303]	
第四节 喷射式供料器·····	308
第五节 高压气力输送·····	309
一、特征[309] 二、螺旋泵[310] 三、仓泵[311]	
第六节 双重管输送·····	311
第七节 粉体泵·····	312
最近的空气输送文献·····	314

第一章 概 论

第一节 空气输送概况

目前，在工业生产中物料的运送占有非常大的比重，特别是在化工、钢铁、冶金等企业，大部分动力消耗于原料或制品的运输。为了提高产品的质量和生产效率，粉体输送技术的采用日益增多。因此，合理地输送粉体便成为人们关心的问题。一般认为，中近距离的输送，可从用容器成批输送改变为散装的连续输送。

可是，即使连续输送，也必须有贮存粉粒体的容器。这些容器如表1-1所示。连续输送包括从利用皮带和料斗等的固态输送，到使物料在空气和水中作悬浮运动的流态输送等各种方法。在这些方法中，利用空气的能量来输送粉粒体的称为空气输送。其组成设备通常有下列四种：

1. 供料装置：它将粉粒体送入输送管内，一般采用能使粉粒体在气流中悬浮的供料机，装设在输送系统的始端。

2. 输送管：输送空气粉粒体混合物的管路及附属管件，相当于输送粉粒体的通道。

3. 分离机：布置在输送终点，其作用是将粉粒体从空气流中分离并排出输送管外。一般是将分离器同其下部的排出机组装成一个整体，总称为分离机。

4. 空气动力源：是输送用空气增压装置的总称，包括空气压缩机和真空泵。

这些设备的构造与布置，决定于输送管内的压力，大致可分为以下两种：

当输送管内压力低于大气压时，称为负压（吸引）式空气输送。各种设备的布置一般如图1-1所示，这种输送方式的空气动力

表 1-1 粉 粒 体 的 输 送 方 法

输 送 方 式	大 分 类	小 分 类	输 送 设 备	
成 批 输 送	水 路	河流、运河、海洋	一般船舶、专用货轮(水泥、矿石等)	
	陆 路	公 路	槽型货车、一般车辆、罐式车	
		铁 路	槽型车、罐式车	
连 续 输 送 (包括间歇输送)	连续循环	皮 带 输 送 机	水平、倾斜	
		链 式 输 送 机	斗 式	斗式提升机 板式输送机 裙式输送机
			链 式	链板式输送机(开放型) 刮板式输送机(开放型) 质流式输送机(密闭型)
			滚 式	滚链输送机(带容器)
	槽 形	往 复	摇摆式输送机	
			振动式输送机	
		推 力	螺旋输送机	
	管 路	空 气	负 压 式	空气输送
			正 压 式	空气输送
		水 力	水力输送(正压式)	

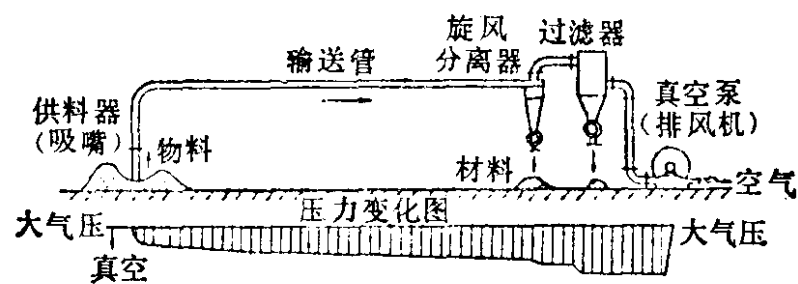


图 1-1 负压式空气输送设备布置

力源（实际上是真空泵），安装在输送装置的末端。因为是用真空泵抽吸管路里的空气，所以管内各处的压力均低于大气压，其特征如图1-1下方的图线所示，越靠近真空泵负压便越大，真空

清扫机就是这样。由此可知，由于吸入部分接近大气压，容易将粉粒体吸入，所以供料器的构造简单。但是，在输送末端的分离器附近，负压最大，当粉粒体从这里排出输送管外时，空气可能从外部漏入。因此，负压输送必需特别考虑防止从这里漏入空气。

与此相反，输送管内压力高于大气压时则称为正压式空气输送。如图1-2所示，空气压缩机设置在输送管的始端，将增压后的空气送入输送管内。从图中的压力曲线可以看出，在供料器附近压力最高，而在这里又必须将粉粒体压入管内，为了防止空气喷出，在供料器里必须有特殊的装置。可是，分离部分接近大气压力，并且是向低压的管外排出，所以其构造和工作均很简单。

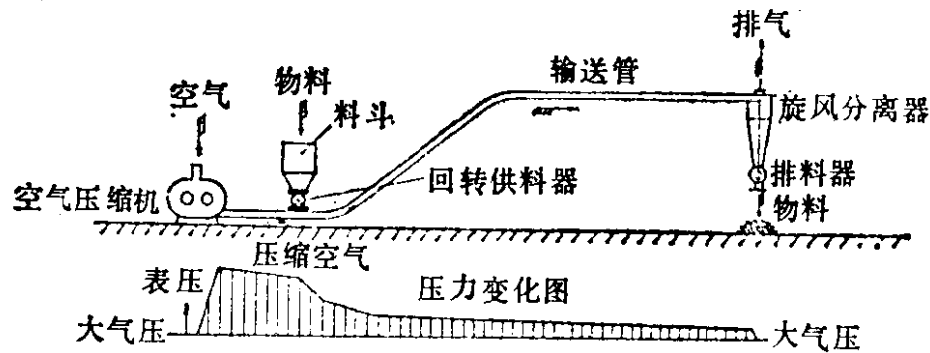


图 1-2 正压式空气输送设备布置

这样，将负压式和正压式中的供料器和分离机的构造和工作加以对比，可以看出它们的特征大体上是相反的。也就是说，负压式的供料器简单，搬移方便，分离机则是主要设备，有利于将各处的物料收集到一个地方；而正压式的供料器复杂，是输送设备的主要部分，但分离机则简单，且移动和装设容易，适合于将物料分散输送到各个地点。

能用空气输送的物质，不仅仅是谷类和化学制品等粉粒体，纸和金属板的切削碎片和瓶塞之类的小件制品，小的空瓶和塑料瓶，以及所有轻量的小物件都可连续零散地输送。输送中粉粒体的形状虽然不会发生太大的问题，但用它输送易破碎和易磨损的物料则不适合。比重大的粉状物料也能输送，但粒径大时，空气

速度也应增大，因而便失去了实用价值。此外，易粘附和凝聚的粉粒体，可能堵塞管路，所以也不适合。

第二节 空气输送的历史

使固体或液体悬浮在空气中输送的最初尝试，始于19世纪初期（1818年）^①，那时曾用蒸汽喷射泵来输送液体。约在1866年有输送棉花和砂子等固体的例子^②。当时的气源是从用于负压式的喷射泵发展来的。近几年来，在灰尘处理等方面使用的空气输送装置中，逐渐使用了水力喷射泵，可以看出，在结构上有返回到发展初期的现象，这颇耐人寻味。

图1-3是当时空气输送装置的举例，称为克迁喷射器（Körting injector），现在的吸嘴就来源于这种最初的装置。而且约在1882~1887年期间，威列姆（A.K.William）和史密斯（L.Smith）等人用旋风分离器作成分离装置，并且使用于实际中，但详细情况不大清楚。此外，这时还研究出了图1-4所示的压入喷嘴，正压输送方式便渐渐开始出现。

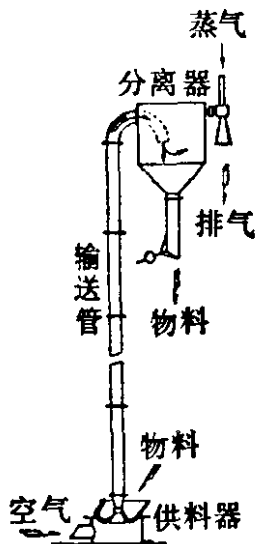


图 1-3 克迁喷射器

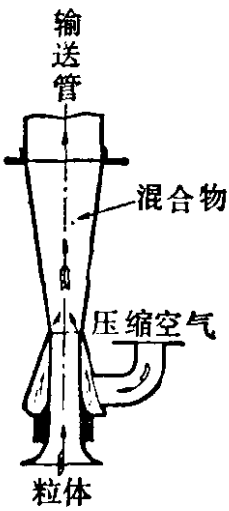


图 1-4 压入喷嘴

① G.F.Zimmer, Cassiers Engineering and Industrial Mang. June, 1919.

② G.F.Zimmer, Chem.Age, Vol.II, NO.43, Apr., 1920.

空气输送装置（负压式）达到今日的完善程度，广泛地应用于输送穀物等，则要归功于弗雷德里克·爱利奥特·多克哈姆（Frederic Eliot Dockham）（英、1891年）。他当时是伦敦密耳沃耳·多克公司（Millwall Dock Co）的总工程师，他看到港口工人罢工使装卸作业不能顺利进行，便想采用空气输送，以机械力来进行穀物装卸作业。从那时起，进行了两年各种各样的实验，经过艰苦的改造工作，终于从根本上改善了原来的装置，研究出了相当于现在的负压式空气输送机的基本形式。他首先考虑由鼓风机和压缩机组成的正压输送方式，代替低效率喷射器，但由于供料器庞大，使用不便和性能不高，在实际应用时尚欠妥当，故又重新采用了负压式。在负压式输送中，最困难的问题是分离排出机的构造，但在研究出了图1-5所示的可防止空气漏入的翻转密封(tipper seal)型装置以后，连续地排出穀物便取得了成功。同时，还研究出了如图1-6所示的吸嘴，在输送管外侧设置空气筒，吸进二次空气，以便保持同空气的一定混合比和输送量。现在，港口等处使用的装卸穀物用的负压式空气输送装置，绝大多数都是约在80年前由他研究和改良的，这样的说法并非言过其实。

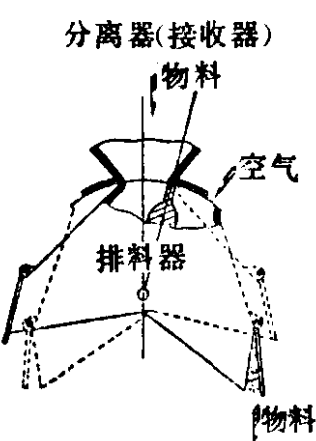


图 1-5 翻转密封排料机

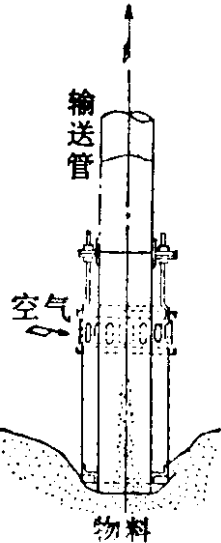


图 1-6 杜克哈姆吸嘴

这种杜克哈姆（Duckham）型空气输送装置，用来装卸穀物受到欧洲各地的重视，特别是在粮食输入国，如英国、荷兰和德国等，相当普及和发达。以后，丹麦赛克公司（Seck Co.）

表 1-2

采 用 空 气 输

物 料 名 称		物 料 物 理 性 质			
		真 实 比 重 (吨/米 ³)	视 在 比 重 (吨/米 ³)	形 状	平均粒径
金 属、 矿 产 品	铝 粒	11.34	6.7	球 状	100微米
	矿 石	6.2	2.4	片 状	0.01毫米
	钛 铁 矿	4.5	1.0~1.05	球 状	10 微 米
	钛 铁 矿	4.5	1.0~1.05	球 状	10 微 米
	氧 化 铝	3.9	0.8~1.2	—	30 微 米
	水 泥	3.15	1.2~1.3	片 状	25 微 米
	水 泥	3.1	1.4	球 状	18 微 米
	水泥原料	2.8	1.0	—	20 微 米
粮 食、 饲 料	飞 灰	2.0	0.8	—	44 微 米
	可 可 豆	1.2	0.6~0.7	椭 圆	12 毫 米
	玉 米	—	0.75	椭 圆	10 毫 米
	大 豆	—	—	球 状	—
	大 豆	—	—	椭 圆	—
	大 豆	—	—	—	—
	脱脂大豆	0.8	0.4	圆 板 状	5 毫 米
	脱脂大豆	—	0.43	圆 平 状	4*
	脱脂大豆	0.8	0.4	片 状	5 毫 米
	饲料原料	—	0.5	不 规 则	4 毫 米
	蒸 小 麦	—	0.4	椭 圆	4 毫 米
	小 麦	—	0.65~0.85	椭 圆	3~4毫米
	小 麦	1.2	0.8	椭 圆	3 毫 米
	小 麦	1.2	0.8	椭 圆	3 毫 米
	曲 子	—	—	球 状	—
	曲 子	—	0.38~0.42	—	—

送 的 实 例

	空 气 输 送 装 置						
安息角 (度)	输 送 量		管 径 (毫米)	距 离		弯头数 (个)	切换阀数 (个)
	常用 (吨/时)	(最大)		水 平 (米)	垂 直 (米)		
64	1.0	(1.3)	35	10	12	10	6
46	0.2	(0.5)	95	15	30	6	—
10	9.0	(9.6)	150	49.6	22.5	4	—
10	7.5	(8.5)	150	50	24.5	3	0
42	8	(12)	155.2	100	20	2	1
35~40	56	(60)	10"	500	30	9	5
39	300	(—)	254.2	145	4	5	8
34	10	(60)	152	88.6	11.4	2	2
—	10	(10)	90~150	550	10	—	5
—	0.5	(0.6)	67.9	7	4	2	0
45	75	(90)	150	6	14	2	0
—	4.5	(—)	90	145	20	2	2
—	3	(—)	100	31	9(45°)	2	4
—	7	(7.5)	150	100	8	3	—
30	6.7	(6.7)	100	20	15	2	0
22	6	(7)	130	120	15	9	0
30	8	(9)	6"	320	16	31	27
50	15	(20)	125	6	24	3	4
27	10	(13)	250	30	15	2	0
27	15	(16)	155	90	8	3	0
26	9	(12)	150	50	5	3	0
26	13	(18)	131	140	15	4	0
—	7	(12)	155.2	135	3	5	0
43	8	(10)	180	180	3	7	—