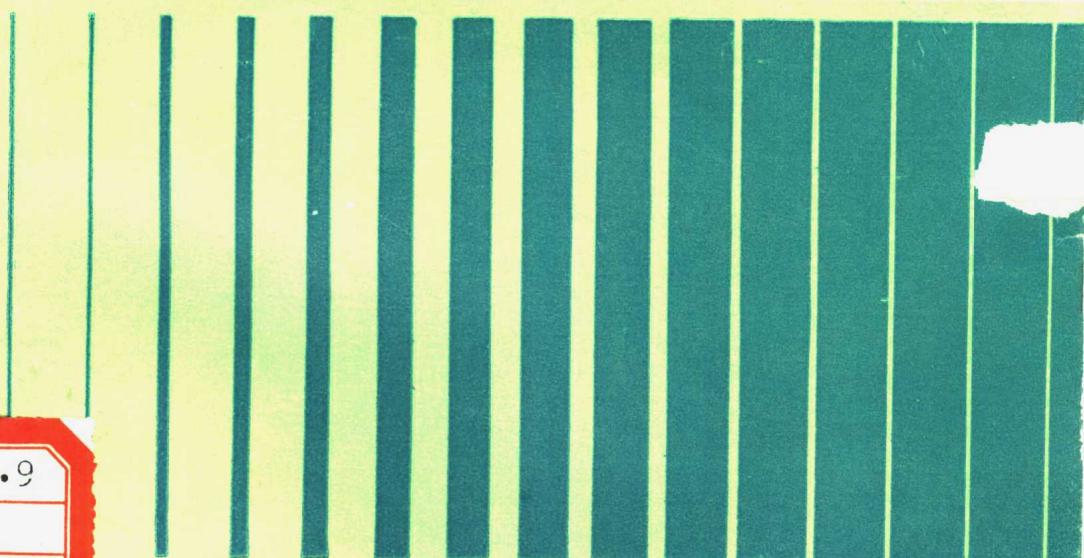


超微气流粉碎

(原理、设备和应用)

杨宗志 编



化学工业出版社

超微气流粉碎

(原理、设备和应用)

杨宗志 编

化学工业出版社

内 容 提 要

本书叙述了超微气流粉碎的原理、气流粉碎机的结构、模拟放大的设计方法、操作程序和气流粉碎技术的应用。此外，还简单地介绍了固体物料超微加工的基本知识，如颗粒形态、粒度和粒度分布的概念以及它们的测定技术；粉碎领域的一些新技术，如粉碎助剂、粉碎与其他操作的联合作业等。本书可供从事粉体物料加工的技术人员和工人阅读；对于研究、设计和制造气流粉碎机的技术人员，也有一定的参考作用。

超 微 气 流 粉 碎

(原理、设备和应用)

杨宗志 编

责任编辑：谭俊杰

封面设计：许立

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $9^{3/8}$ 字数263千字

1988年9月第1版 1988年9月北京第1次印刷

印 数 1—1,600

ISBN 7-5025-0068-5/TQ·30

定 价 2.80 元

前 言

超微气流粉碎是一种新型粉碎方式，主要用于生产超微粉体产品。

国内有关粉体加工方面的资料十分缺乏，微细加工和超微加工方面的资料，更近乎空白。因此，笔者把多年来收集的资料加以分析和整理，编成了这本小册子。

本书力求全面地介绍气流粉碎技术，即从粉体物料的一些基本概念出发，介绍气流粉碎原理，气流粉碎机的结构、设计和选型方法，操作程序，工况调整原则以及应用特点等。此外，本书还简要地介绍了超微粉碎领域里的一些新技术，如粉碎助剂的应用和气流粉碎与干燥、化学反应、混合、包覆等操作的联合作业。

由于本书大部分资料取材于国外较近期的文献，所以本书基本上反映了国外气流粉碎技术的发展水平。

本书在编写过程中，化工部涂料工业研究所副总工程师傅颖在百忙中审阅了全书，提出了一些宝贵意见。镇江钛白粉厂副总工程师王乐天提供了有价值的资料。笔者还参阅了化工部天津化工研究院等单位六十年代研制扁平式气流粉碎机的有关资料，参考了国内几家工厂引进的国外气流粉碎机的说明书。在此向有关单位和个人深表谢意。

气流粉碎技术涉及面很广，笔者对这项技术一知半解，因此书中缺点和错误一定不少，敬请专家和读者批评指正。如果本书能在提高我国粉体产品的质量，改进粉体加工工艺以及在研究和制造气流粉碎机方面有点启迪和参考作用，笔者就甚为满意了。

作者

1985年

目 录

第一章 概 述	1
第二章 粉体颗粒	9
第一节 基本定义	9
第二节 粉体颗粒的种类	11
一、原级颗粒.....	13
二、聚集体颗粒.....	15
三、凝聚体颗粒.....	16
四、絮凝体颗粒.....	18
五、最终颗粒.....	18
第三节 粉体物料粒度的重要性	19
一、化学反应速率.....	20
二、光学性能.....	20
三、分散和分散体的流变性.....	22
四、吸附性能.....	25
五、沉降速度.....	26
六、其他性能.....	26
第三章 粉体粒度测定	29
第一节 单个颗粒大小的表示方法	29
一、单个颗粒的大小.....	29
二、颗粒形状因数.....	32
第二节 粒度分布	34
一、粒度的频数分布或频率分布.....	35
二、累积频数分布或累积频率分布.....	38
三、频率分布和累积频率分布的关系.....	38
四、表征粒度分布中心趋势的特征粒径.....	40
五、表征粒度分布离散程度的特征数.....	42

第三节	平均粒径	45
一、	算术平均粒径	45
二、	几何平均粒径	45
三、	调和平均粒径	46
四、	平均表面积粒径	47
五、	平均重量粒径	47
六、	长度平均粒径	47
七、	表面积平均粒径	48
八、	重量平均粒径	48
第四节	粒度的数据整理	49
一、	表格法	50
二、	直方图法	50
三、	分布曲线和累积分布曲线法	51
四、	概率纸法	51
第五节	粒度分布函数的数学形式	52
一、	经验公式	53
二、	通用经验公式	55
三、	理论公式	56
第六节	粒度的测定方法	58
第七节	分散液的选择	63
第四章	超微气流粉碎的原理和机型	70
第一节	冲击粉碎	70
第二节	颗粒的自行分级	78
一、	机械式粉碎的分级	78
二、	自行分级原理	80
三、	影响分级粒径的因素	84
第三节	喷射式气流粉碎机	84
一、	单喷式气流粉碎机	84
二、	对喷式气流粉碎机	87
三、	特罗斯特型气流粉碎机	89
第四节	扁平式气流粉碎机	92
第五节	循环管式气流粉碎机	94

一、里达克蒂奥奈泽尔型气流粉碎机	94
二、杰托米泽尔型气流粉碎机	95
三、双循环管式气流粉碎机	98
第五章 气流粉碎机的结构	99
第一节 结构概述	99
第二节 加料装置	101
一、螺旋挤压式加料器	101
二、喷射式加料器	102
三、提高加料均匀性的措施	106
四、喷射式加料器的设计	108
第三节 喷嘴	109
一、喷嘴的型式	109
二、喷气流速度的计算	111
三、临界压强比	114
四、工质流量的计算	115
五、喷嘴的设计	116
六、喷嘴的制造和性能鉴定	122
七、喷嘴的安装	123
第四节 扁平式粉碎-分级室	126
一、短圆柱腔型粉碎-分级室	126
二、双截头圆锥腔型粉碎-分级室	128
三、分级区向中心收缩的粉碎-分级室	131
四、阶梯腔型的粉碎-分级室	132
五、带二次分级室的粉碎-分级室	133
六、结构材料和制造技术要求	134
第五节 废工质排出管和成品收集器	135
一、排气和卸料的布置方式	135
二、排气管的结构型式	138
三、成品收集器	139
第六节 耐磨衬里	141
一、粉碎-分级室内壁的磨损分布	141
二、衬里材料的选用原则	144

三、常用衬里材料	145
四、衬里的施工方法	151
第六章 气流粉碎机的模拟放大设计	159
第一节 概述	159
一、模拟放大的概念	159
二、模拟放大的意义	160
三、模拟放大的可能性	160
四、模拟放大的两种理论	162
第二节 气流粉碎机的系列构成	163
一、扁平式气流粉碎机系列	163
二、循环管式气流粉碎机系列	169
三、对喷式气流粉碎机系列	171
第三节 粉碎室基本尺寸的确定	172
一、扁平式气流粉碎机	172
二、循环管式气流粉碎机	174
三、对喷式气流粉碎机	177
第四节 立方放大法的基本原理	181
一、保证产品粒度不变的条件	182
二、生产能力与动力消耗的关系	187
三、颗粒浓度的影响	188
第七章 气流粉碎装置	191
第一节 气流粉碎装置种类	191
一、小型气流粉碎机组	191
二、空气工质的气流粉碎装置	192
三、过热蒸汽工质湿法捕集流程	195
四、过热蒸汽工质干法捕集流程	197
五、易燃易爆物料的气流粉碎系统	198
六、惰性工质气流粉碎系统	199
第二节 工质发生系统	201
一、压缩空气工质发生系统	201
二、过热蒸汽工质发生系统	205
第三节 加料系统	207

一、圆盘加料器	209
二、螺旋加料器	211
三、回转加料器	212
四、电磁振动加料器	213
第四节 捕集回收系统	213
一、对捕集回收系统的要求	213
二、捕集回收系统的设置	214
三、预捕集	215
第五节 主要捕集设备	218
一、旋风分离器	218
二、袋式除尘器	219
三、卸料-锁气装置	225
四、混合式冷凝器	226
五、卧式旋风水浴除尘器	228
第六节 风力分级装置	230
第八章 气流粉碎装置的操作	235
第一节 操作方法	235
一、开车	235
二、停车	236
三、运行	237
四、排除故障	238
第二节 影响粉碎效果的操作因素	239
一、加料量	240
二、进料粒度	245
三、工质压强	248
四、工质温度	250
五、工质粘度	251
第三节 工质的选择	252
第四节 粘壁现象及其防止	254
一、粘壁现象的产生原因	254
二、防止措施	255
第五节 粉碎助剂的应用	258

一、粉碎助剂的种类	258
二、粉碎助剂的作用机理	260
三、粉碎助剂的添加法	261
第九章 超微气流粉碎技术的应用	263
第一节 气流粉碎的优缺点	263
第二节 超微粉碎	264
一、粒度优异	264
二、产品纯度高	272
三、分散性能好	273
四、颗粒活性大	275
第三节 凝聚体或聚集体的解磨	276
第四节 热敏、爆炸物料的粉碎	278
第五节 粉碎与其他操作的联合作业	282
一、粉碎与干燥的联合作业	282
二、粉碎与化学反应的联合作业	284
三、粉碎与其他过程的联合作业	285
第六节 气流粉碎的经济性	286
主要参考文献	287

第一章 概 述

现代工程技术的发展，要求许多以粉末状态存在的固体物料，应当具有极细的颗粒，严格的粒度分布，规整的颗粒外形和极低的污染程度。例如，颜料、填料、染料、医药、农药、聚合物粉末、粉末涂料、催化剂、试剂级化学品以及其他精细化工粉体产品、火箭发动机推进剂、半导体材料、高级磨料、固体润滑材料、高级电瓷材料、石墨、金属粉末、化妆品、粉末状食品等，有的要求颗粒极细，平均粒径仅数微米，甚至在1微米以下；有的要求粒度分布狭窄，产品中的极端颗粒成分（粗大的颗粒和过细的颗粒），尤其是粗大的颗粒成分，含量应当极低，甚至完全不应当含有；有的要求颗粒外表面光滑，没有棱角、凸起或者凹陷，颗粒形状应接近于球形、圆柱形、纺锤形、针形或其他规整形状；有的要求有极高的产品纯度，杂质允许含量常以百万分（ppm）计，许多白色粉体，尤其不能为带色的金属（特别是铁、铜、铬、锰、钒等）氧化物杂质所污染。

为满足这些要求，便产生了超微粉体加工技术，其中包括超微粉碎技术。

虽然像球磨机、悬辊式粉碎机（又称环滚研磨机或摆轮式研磨机，俗称雷蒙磨）、高速锤式粉碎机、离心式粉碎机、各种万能式粉碎机、振动磨等机械式粉碎装置，在某些场合下，对于硬度较低的脆性物料，也能起到某种程度的超微粉碎作用；或者，对于某些以聚集体或凝聚体形态存在的物料，也能起到某种程度的超微解磨作用。但是，这些磨机在产品细度上，或者在产品粒度分布上，或者在产品纯度上，是难以达到上述要求的。这类粉碎设备基本上用于微粉碎，于是，以超微粉碎为主要用途的气流粉碎技术，便应运而生了。

顾名思义，气流粉碎是利用气流的能量进行粉碎的。气流粉碎所

用的装置，叫做气流粉碎机。

气流粉碎机又称流能磨（Fluid Energy Mill），或称喷射磨（Jet Mill），是一种高效的超微粉碎设备。与传统的机械式粉碎机原理不同，它是利用高压气体通过喷嘴产生的高速气流所孕育的巨大动能，使物料颗粒发生互相冲击碰撞，或与固定板（例如冲击板）冲击碰撞，达到粉碎目的的。由于这种独特的粉碎原理，使气流粉碎机在结构上和操作方式上，都有许多特点。详细地分析这些特点，是本书的主要内容之一。

由动能公式可知，为了达到超微粉碎的目的，气流粉碎用的气流，必须具有很高的速度，才能具有很大的能量。根据所选用的气体种类、气体进入喷嘴时的压强和温度以及喷嘴型式不同，从喷嘴出来的气流速度，可为亚声速、等声速和超声速。一般气流速度为200~500米/秒，有的甚至高达800~1000米/秒或更高些。由气体动力学可知，要产生这样高的气流速度，必要条件是在进入喷嘴之前，气体要具有很高的初始压强，并且还要采用先进腔型的喷嘴。最常采用的气体是过热水蒸汽和压缩空气。虽然一些惰性气体，如氮气、二氧化碳等也有采用，但它们主要用于热敏性和易燃易爆物料的粉碎。过热水蒸汽压强一般都在10公斤/厘米²以上，而压缩空气则多在7公斤/厘米²以下。

由于气流具有巨大的动能，并且已粉碎的颗粒在气流中能自行按颗粒大小进行分级，所以气流粉碎的产品，具有颗粒细、粒度分布狭窄、颗粒表面光滑、颗粒形状接近球形、产品纯度高、活性大、分散性好等一系列特点。

气流粉碎技术在现代加工工业中占有重要的地位，其应用范围已涉及到许多工业部门。它主要用于加工成品粒度小于5微米甚至小于1微米的粉体物料。据称，气流粉碎在颜料、农药、化妆品等物料的干法超微粉碎中，具有不可取代的地位。

由于小型气流粉碎机体形小巧，又没有运动部件，故广泛用于试验室中，成为试验室制备各种微粉或超微粉体的主要粉碎设备之一。

气流粉碎的主要缺点是能量消耗大，粉碎成本较高。这是一般的

说法。但是，也有人认为，由于气流粉碎成品的颗粒很细，比表面积很大，这样，产生同样数量新表面所消耗的能量，反而比机械式粉碎方式低。根据粉碎物料的物理-机械性能和产品细度的不同，气流粉碎每粉碎1吨物料，约需要100~1000度电。因此，气流粉碎应主要用于粉碎成品粒度要求很高、纯度要求很严的物料。这类物料是不适宜于用机械式粉碎机粉碎的。有些贵重物料，它们的粒度要求很严，而粉碎成本在产品成本中所占的比重又极小，这时，采用气流粉碎更具有极大的优越性。有些廉价的物料如天然颜料和天然无机矿物，气流粉碎大大地提高了产品细度，扩大了它们的应用范围，提高了它们的“身价”，这时采用气流粉碎也是合理和必要的。

工业上大规模地采用气流粉碎，是在第二次世界大战之后的工业技术大发展的时代。但是，利用气流的能量进行冲击粉碎的想法，却在很早以前就产生了。

1882年，戈斯林（Goessling）提出了第一篇关于利用气流动能进行粉碎的专利。他所提出的气流粉碎机的机型，是单喷式气流粉碎机，即喷气流使物料颗粒加速并喷向一个固定的冲击板（靶板），借助于物料颗粒与冲击板之间的碰撞达到粉碎的目的。

1917年和1927年，威洛比（Willoughby）提出了对喷式气流粉碎机的专利。他用另一喷嘴取代上述的冲击板，使物料颗粒在双向对喷气流中加速冲击而粉碎。由于威洛比的专利，气流粉碎机的实用化向前迈进了一大步。

1936年，安德鲁（Andrew）提出了不仅能进行粉碎，而且能将已粉碎的颗粒按大小自行分级的扁平式气流粉碎机专利。从此气流粉碎机的结构水平大大地提高了一步。安德鲁所提出的扁平式气流粉碎机，在美国首次制造，商品名称叫做“迈克勒奈泽尔”（Micronizer），后人称这种具有实用化的扁平式气流粉碎机，为第一代气流粉碎机。至今，这种气流粉碎机仍然是应用最广的机型之一，而Micronizer这一商品名称，竟成了扁平式气流粉碎机的代名词。

1940年，基德韦尔（Kidwell）和斯蒂法诺夫（Stephanoff）提出了另一种结构形式的气流粉碎机，即等圆截面的循环管式气流粉碎

机。这种气流粉碎机也具有自行分级性能，首次在美国出现时的商品名称，叫做“里达克蒂奥奈泽尔”（Reductionizer）。

自1941年以来，斯蒂法诺夫发表了一系列专利，阐述了一种结构更新颖的变截面的循环管式气流粉碎机。1946年，根据他的专利，在美国制成了这种气流粉碎机，商品名称叫做“杰托米泽尔”（Jet-O-Mizer），是目前应用最广的机型之一，世人称为第二代气流粉碎机。

1956年，特罗斯特气流粉碎机公司（Trost Jet Mill Co.）开发了一种新型的气流粉碎机，称为“特罗斯特”（Trost）型气流粉碎机。这种气流粉碎机的粉碎部分，采用对喷式气流粉碎原理，而颗粒分级部分，采用扁平式气流粉碎机的自行分级原理。

除上述的一些定型的气流粉碎机机型外，国外一些公司还设计了一些特殊结构的气流粉碎机，如直管式气流粉碎机、沸腾床式气流粉碎机等。这些气流粉碎机大都为某些专门用户设计的。

虽然大多数气流粉碎机的基本机型在第二次世界大战以前都已提出来了，但是由于初期的气流粉碎机在结构和性能上还存在一些问题，更主要的是当时工业技术水平不高，对各种超微粉体的需要并不迫切，所以那时气流粉碎技术并没有获得太多的应用。

第二次世界大战以后，科学和技术的日新月异发展，对各种粉体物料的粒度和纯度，提出了越来越严格的要求。因此，迫使人们去进一步改进气流粉碎技术，使气流粉碎机的结构和性能大大地向前发展了，满足了各用户的需要。六十年代到七十年代，在粉碎和颗粒分级方面，气流粉碎的专利文献，比其他任何一种粉碎方式都多。八十年代以来，国外有关气流粉碎技术的文献量有所减少，说明气流粉碎技术已处于成熟期。但是，若干发展中国家开始重视气流粉碎技术的开发。

长期以来，气流粉碎的机理研究大大落后于实践。第一个在研究气流粉碎机理方面取得重大成就的人，是联邦德国的鲁姆夫（Rumpf）教授，他在五十年代末和六十年代初，发表了一些论文，对气流粉碎技术的发展，起了很大的作用。日本田中达夫、神保元二等人，对气流粉碎理论的探讨，也做了许多工作。

分析国外气流粉碎的文献，便可以看出，国外气流粉碎技术的基本发展方向是：消除产品中的粗大颗粒，进一步改进产品的粒度分布；提高粉碎的能量利用率，降低能耗；设备的大型化；扩大气流粉碎机的功能；粉碎助剂在气流粉碎中的应用。

消除产品中的粗大颗粒，是超微粉碎的主攻方向之一。虽然从理论上讲，气流粉碎机能自动地使已粉碎的物料按所需要的颗粒大小进行分级，不合格的粗大颗粒能自动地返回粉碎区再进行粉碎，直到合格为止。但是，实际上，由于粉碎区里待粉碎的物料也是很细的，它们在气流中的浓度很高，逸散能力很强，个别大颗粒不经粉碎或未达到预定粒径，便飞出粉碎区，落于成品中，使成品粒度分布，在大颗粒方向上变宽。尽管这种大颗粒数量十分有限，但却能严重影响产品质量。

为了消除产品中的粗大颗粒，可以采用降低加料量的方式来缓和逸散现象，以及采用多道粉碎的方式来降低每道粉碎的粉碎比等。但这都要降低设备的生产能力，增加动力消耗。根本的解决办法是改进气流粉碎机的结构，如采用特种腔型的粉碎-分级室，采用超声速喷嘴，改进加料系统的结构等。

粉碎作业的能量利用率一向很低。例如，大型球磨机的能量利用率仅为0.6%，一般气流粉碎机为2%。大量的能量都以热能、声能等形式消失了。

提高气流粉碎的能量利用率的主要途径是提高气流速度。国外近些年来出现的所谓超声速气流粉碎机，气流速度可高达几马赫。超声速气流粉碎机的能量利用率，可达到10%，正在向20%这一目标前进。

气流粉碎是精细加工过程，过去，其主要服务对象是一些精细贵重的物料。因为这类物料产量一般不大，故气流粉碎机的生产能力，比其他粉碎设备要小得多。

设备的大型化有许多好处。根据气流粉碎的模拟放大理论可知，气流粉碎机生产能力，至少与动力消耗的平方成正比。这就意味着，设备越大，单位粉碎产品的动力消耗越少。故设备大型化是降低动力

消耗的有效途径之一。而且，随着科学和技术的发展，超微粉体需要量会越来越大，客观上要求气流粉碎机的大型化。目前国外气流粉碎机大型化已取得相当进展。有人预测，到2000年前后，人们将能设计和制造粉碎细度在30微米以下，生产能力高达100吨/小时的大型化微粉碎气流粉碎机，以及产品比表面积高达50米²/克，生产能力达到10吨/小时的大型超微气流粉碎机。

关于扩大气流粉碎机的功能，除将气流粉碎技术由传统用户——精细产品，引向廉价大宗物料（如非金属矿物等），以及一些过去被认为不大适宜于气流粉碎的物料，如塑性物料、韧性物料和纤维状物料以外，就是向多工序联合作业的方向发展。例如，将气流粉碎与脱水、干燥、煅烧、包覆、消毒、脱臭、化学反应、晶型转化等工序，合二而一地在—台气流粉碎机上同时进行，既简化了工艺过程，又节省了能耗和投资。

气流粉碎过程中采用粉碎助剂，是第二次世界大战后粉碎领域里的一项重大进展，也是今后重点开发的内容之一。粉碎助剂不仅能提高粉碎细度，降低能耗，提高气流粉碎机的生产能力，而且还会改善产品颗粒的表面形态，改善产品的质量。

为了改善粉体物料的粒度，我国曾于六十年代初，开始研制气流粉碎机，并取得了一定成绩。所设计的小型扁平式气流粉碎机和小型等圆截面循环管式气流粉碎机，在染料、颜料、石墨等行业上应用，效果也较好。但是，目前我国的气流粉碎机设计和制造水平，与国外差距较大，也与国内的实际需要不相称。尤其是气流粉碎的推广应用工作做得不够，许多应当使用气流粉碎机粉碎的物料，目前仍采用机械式粉碎机粉碎，致使我国许多粉体产品的粒度差距较大。加快气流粉碎技术的开发步伐，尽早地建立我国的气流粉碎机设计能力和制造能力，大力扩大气流粉碎的应用范围，已是一项急待解决的任务。

世界气流粉碎机主要生产厂家如表1-1所示。

表 1-1 世界气流粉碎机主要生产厂家

公司名称	地址	生产的机型
斯特蒂文特磨公司 (Sturtevant Mill Co.)	美国 马萨诸塞州 波士顿	2~42 英寸 (50.8~1066.8 毫米) 扁平式气流粉碎机
喷射微粉磨公司 (Jet Pulverizer Co.)	美国 新泽西州 巴尔米拉	1~42 英寸 (25.4~1066.8 毫米) “迈克勒马斯泰尔” (Micro-Master) 型扁平式气流粉碎机
流能加工和装备公司 (Fluid Energy Processing & Equipment Co.)	美国 宾夕法尼亚州 费城	“杰托米泽尔”型循环管式气流粉碎机 “迈克勒杰特” (Micro-Jet) 型扁平式气流粉碎机, “西克勒杰特” (Cyclo-Jet) 型气流粉碎机, “杰托德赖尔” (Jet-O-Drier) 型和 “迈克勒德赖尔” (Micro-Drier) 型气流粉碎-干燥机
普拉斯特默公司 特罗斯特气流粉碎机分部 (Plastomer Inc., Trost Jet Mill Division)	美国 新泽西州 穆尔斯敦 (Moorestown)	“特罗斯特”型气流粉碎机
唐纳德逊公司马亚克分部 (Donaldson Co., Majac Division)	美国 宾夕法尼亚州 沙普斯堡	“马亚克” (Majac) 型对喷式气流粉碎机和 “马亚克” 型单喷式气流粉碎机
粉碎工程公司 (Reduction Engineering Corp.)	美国 新泽西州 纽瓦克	“里达克蒂奥奈泽尔”型循环管式气流粉碎机
阿尔杰特装备公司 (Aljet Equipment Co.)	美国 宾夕法尼亚州 威洛格罗夫	“帕尔瓦杰特” (Pulva-Jet) 型循环管式气流粉碎机和 “瑟玛杰特” (Therma-Jet) 型气流粉碎-干燥机
佩恩索尔特有限公司 (Pennsalt Ltd.)	英国 英格兰 萨里郡 坎伯利	2~36 英寸 (50.8~914.4 毫米) “佩恩索尔特” (Pennsalt) 型扁平式气流粉碎机