

79.321
549

简 介

本书编译了H.E. Rose和R.M.E Sullivan等国外著名磨机专家的专题论文10余篇，这些论文着重陈述了振动磨机基本公式的推导和基础理论的创立过程，在大量试验研究的基础上，系统分析了振动磨各参数之间、各参数与物料特性及其他外部条件之间的关系，揭示了设计和选择最佳机型，实现低能耗、高效率工作的工艺和方法，全面反映了国外振动磨设计理论和试验研究的先进水平，对发展我国振动磨机的研究与生产水平有一定的借鉴作用。

24200-63



前 言

振动磨作为微粉设备，在工业生产中应用范围很广，发展前景颇为乐观，但由于国内在这方面开发与研究起步较晚，目前为止，仍未形成自己的设计与试验理论。因此，了解并借鉴国外振动磨设计的理论与试验研究情况便十分必要。

本书收集的论文反映了60年代至80年代后期国外振动磨理论与试验研究的发展进程，跨度大、范围广、内容翔实，适合振动磨行业的管理人员、专家、学者及广大用户作工具书。

本着文责自负的原则，入选译文除因出版需要，对个别文字、图表做了调整之外，基本保持译文原貌。

参加本书翻译、校对工作的同志有：侯书军、刘玲、张振祥、殷兴武、王炳志、李莉、耿树华，全书的编辑工作由张振祥负责。

由于编者水平有限，书中若有译校欠妥之处，望读者不吝赐教。

编者 1992年2月23日

42170

目 录

振动磨与振动磨矿.....	(1)
序.....	(1)
前言.....	(2)
第一章 概论.....	(8)
磨矿的目的, 磨机的类型; 回转式球磨机的局限性; 回转式和行星式球磨机; 振动球磨机; 振动磨机的类型; 开路或闭路磨矿。	
第二章 振动磨机的研磨率.....	(29)
影响研磨的因素, 量纲分析; 不同参数对研磨率的影响; 研磨率公式。	
第三章 振动磨机的研磨率(续).....	(58)
进料研磨特性的影响; “功指数”与可磨性; 振动形式对研磨率的影响; 棒与短圆柱的研磨率; 总表面生产率; 球涂层; 获得给定细度所需磨矿时间计算。	
第四章 振动磨的驱动功率.....	(82)
振动磨与振动系统; 运动方程, 阻尼; 质量阻尼; 参振质量; 耗散于填料中的功率表达式; 所需偏心块的规格, 近共振运转、轴承消耗的功率。	
第五章 振动磨的效率.....	(110)
产生新表面所需功率, 研磨效率; 内部与总效率; 研磨效率表达式; 磨机参数对研磨效率的影响; σ/ρ	

比值的 影响；近共振运转状态使总效率显著提高。

第六章 设计振动磨所需考虑的因素..... (125)

普通类型磨机的设计；近共振运转磨机的设计；
近共振运转的磨机的振幅控制；控制系统的原理；
传给地基的力；磨机系统自平衡衬板磨损；磨筒的
工作硬化，橡胶衬垫磨机，特种衬垫。

振动磨研究..... (150)

振动磨的振动形式对磨碎特性的影响..... (172)

振动磨机..... (183)

振动磨的滞留时间与产量..... (194)

振动磨磨矿时间的分布..... (199)

磨机尺寸对石灰岩用振动磨机的影响..... (213)

密集介质系统的振动研磨..... (226)

在试验基础上设计筒式振动磨机..... (246)

振动磨与振动磨矿

序

哈利·梅尔维尔 博士

硬物料细碎在工业上用途很大，细碎方法正通过研究不断得以改进。

振动研磨做为该领域较主要的一项工艺方法，长期以来未得到应有的重视。本书作者在对大量资料分析的基础上，创立了获得最高研磨率的磨机设计新理论。

如同作者以前的著作一样，本书成功地运用了量纲分析的方法。全书论述清楚，论证有力，可作为对颗粒物料特性与其他因素的关系做系统分析的研究人员和高校学生的工具书，相信该书对有关领域的研究人员会大有帮助。

H·梅尔维尔

伦敦

· 1 ·

前 言

象该类丛书的前期著作一样，本书的目的是：将有关粉体物料的性能、制造和应用等属于该领域课题的数据汇集在一起，根据作者的经验进行分析，并尽可能运用该领域的现有知识使分析结果系统化。本书所选择的课题是振动磨及相关的振动磨矿。

撰写有关该课题的专题论文基于如下理由：

(1) 有证据表明：振动磨可以获得比常规磨机高许多倍的研磨率，因此有理由对该类磨机表现出日益强烈的兴趣。

(2) 设计合理的振动磨机的比能耗即生产单位给定物料所需能量比传统管磨机低一倍甚至更多。这又进一步证实了这种兴趣的正确性。

(3) 生产给定物料所需振动磨机的尺寸比同样功能的传统磨机的尺寸要小得多。

(4) 据作者所知，现在尚无这方面的专著，而且已发表的有关该题目的论文数量有限，这些论文加在一起也不足以覆盖这个领域。因此工作人员在决定哪种磨机适于指定用途时就非常缺乏这样的资料，因而不易做出恰当的选择。

由此可知，形势向我们提出了挑战和困难。

挑战显然是一——对一个尚未开发的领域进行全面研究。

困难在于因缺乏现成的数据而几乎无法完成这样一个综

合性的论文。尽管如此，考虑到这个课题的重要性，即使所摘出的专题论文不一定完善，只要能系统地反映出这方面的知识就会对技术进步发挥其特有的作用。

由于缺乏公开发表的数据，本书主要基于皇家学院动力科学研究所的试验研究结果，所选数据取自磨机制造商所提供的资料或直接从厂商的技术文件中摘取。

进而，由于在此以前这一领域的理论研究几乎是空白，作者不得不就该课题所涉及的各个方面创立一整套必要的理论。

在这种情况下，就不能期望所进行的分析完全没有争议或各个结论均以完整而翔实的数据为依据。

尽管如此，考虑到该领域的重要性，我们觉得这些反对意见不足以耽误这本有关该领域的小册子的准备工作。因此，分析中存在的各种缺点在为更翔实的数据取代之前还望读者予以包涵。

本书既不是教科书也不是设计指南，这个题目还未发展到这个程度，不过作者将尽力对该课题进行系统的分析，同时希望这本专题论文本身会对磨机设计人员、磨机操作人员以及所有与粉体物料生产有关的人员有所帮助，也希望本书会引起学生和普通读者的兴趣。

在此，作者谨向制造商们致以谢意，他们提供了插图和其它数据，他们的名字标在相应的插图上，只有他们的帮助和允许才能转载这些数据；向工学学士、皇家学院的研究生 David Wantling 先生致以谢意，他的几个研究成果被采纳；以及向所有参阅过的论文的作者和所有为本书的准备提出建议和批评的人们致以谢意。

最后，作者感谢科学与工业研究系给予的恩惠，他们接受本文作者之一（R·M·E·S）做为研究员，使之能够完成本书关于存在的试验研究。

H·E·R

R·M·E·S

伦敦

皇家学院

动力科学实验室

符 号

- A 一个参数
- b 平均粒径
- B 一个参数
- C 磨机填料的阻尼系数(也是一个参数)
- C_e 临界阻尼系数
- d 球径
- d₁ 激振器主轴轴颈的直径
- D 磨筒的直径
- e 自然对数
- E 雷廷格常数或新生表面能(也是一个参数)
- f 轴承压力或弹簧表面应力
- F 力
- F 磨机轴承上的作用力
- g 重力加速度
- h 球被抛起的高度
- H_a 被磨物料形成单位长度的裂纹所需的能量
- H_q 相对于石英的H值
- J 磨介充填率 $\left(= \frac{\text{球的体积} + \text{球之间的空间的体积}}{\text{磨机的容积}} \right)$
- R 一个参数, 亦为磨机弹簧的刚度系数
- K 一个参数
- l 单位质量物料的裂纹长度或磨机的长度
- m 偏心块质量
- M 磨机机体质量

M_c 磨机载荷的质量

M_g 磨介质量

M_p 磨中物料的质量

M_s 振动系统的全部（有效）质量（参振质量）

M_r 单位时间最终产品的产量

n 支撑偏心轴的轴承数量

N 转速（转/分）

P_L 轴承功耗

P_c 载荷物料功耗

P_s 新生表面功耗

P_t 磨机总功耗（ $P_c + P_s$ ）

r 偏心块的偏心距

R 质量研磨率（厘米²/克/单位时间）

R_v 体积研磨率（厘米²/厘米³/单位时间）

S 单位质量的比表面积（厘米²/克）

S_v 单位体积的比表面积（厘米²/厘米³）

t 磨矿时间

U 物料充填率 $\left(\frac{\text{物料体积} + \text{物料空隙体积}}{\text{球之间空间的体积}} \right)$

V 磨机的容积（升）

V_n 磨介的体积 $\left(= \frac{\text{磨介的质量}}{\text{磨介的比重}} \right)$

W_i 邦德“功指数” kWh/吨

X 振动系统的位移

Y 磨球接触点周围工作区的半径或振动系统的位移

Z 力矩积（ $m \times r$ ）

- α 磨机电振动的振幅(位移之半)
- β 磨机的水平振幅
- γ 磨机的垂直振幅
- δ 被磨物料的比重(克/厘米³)
- η_i 磨机的内效率
- η_0 磨机的总效率
- Δ 磨介之间的咬入角,或为一变量的有限增量
- ϵ 与球被涂层有关的参数
- θ 径向矢量的角变形
- μ 轴承的摩擦系数
- ξ 弹簧材料的比重,或磨介间的空隙率
- ρ 磨介的比重 克/厘米³
- σ 被磨物料破碎的极限应力
- ω 偏心轴或径向矢量的回转角速度
- ω_0 磨机振动系统的固有频率
- ϕ 研磨率的函数符号
- ϕ 轴承功耗的函数符号
- ϕ 填料功耗的功耗函数
- ϕ 力矩积Z的函数符号

第一章 概 论

在许多工业领域，迅速而经济地生产粉体物料是相当重要的，因此人们对这些粉体物料的加工工艺和设备进行了大量的研究。

有时可直接生产粉体物料，如从溶液中沉淀或将这些物料雾化后真空干燥。但至今，工业生产中大都是利用某种磨机将粒度较大的物料磨碎成粉体物料。

显然，通过研磨获得粉体物料是一种广泛应用的工艺方法，但伴随着研磨粉碎还有相当多的技术难题，或许这些难题还会对应用这种工艺的工业产生相当的经济压力。

比如，粉碎物料的费用常常占加工物料总费用的很大一部分，因而改进粉碎方法是非常有意义的。

同样，从技术方面看，被研磨物料的各种特性也会带来困难，而这又会被许多特种加工条件进一步复杂化，如物料只能在惰性环境中研磨、必须干磨，或要求加工过程中物料绝对不变干等等。

为了提高磨矿作业的效率，或克服某些困难，人们开发了许多研磨工艺和设备，并在为不同磨机和工艺创造最佳工作条件方向做了大量的工作。

人们从许多方面对这些问题进行了深入研究，但总的来

看，对于粉碎专题目前主要采用的还是实验方法。

在改进磨机和磨矿方法的过程中研制出的设备之一就是振动磨机，这正是本文所要研究的。

我们认为出版一本有关该专题的小册子是很有必要的，因为尽管这种磨机为迅速而经济的研磨提供了可能性，但据作者所知，其潜力尚未得到充分的研究。

将工业矿物粉碎至粉状的主要目的是：

(1) 从混合物中将有用成分与无用成分分离开。

(2) 增大物料的比表面积，以便于进行某些化学处理。

(3) 将物料粉碎至最终产品所要求的形状。

(4) 满足某些特定的市场需要。

上述第一、二、四条在选矿中是显而易见的。如选矿过程中将矿石粉碎是为了将金属成分与矿渣分离以便进行浮选或其它方式选矿，这同样有利于运送和贮存，便于装车装船。而第三条则见于药品和化妆品的生产。

对于少量物料的制备，许多类型的磨机可以满足，如球磨或砾磨，冲击磨、流体能量磨和振动磨。尽管如此，应用最多的还是球磨机。确切地说，只有在球磨机及相关的管磨机、棒磨机不能很好地满足要求时，才考虑选用其它类型的磨机。

而对于大批量物料的研磨，如水泥熟料、金属矿物等应用最广泛的还是球磨机、管磨机和棒磨机。这种情况是很容易理解的，因为象球磨机这类纯转动磨机的设计和制造都很容易，而要设计处理能力相当的其它类型的磨机常存在较大的技术问题，这些问题至今尚未得到满意的解决。

为了搞清振动磨与其它各类成熟磨机相比所显示出的优越性，有必要研究影响磨机选择的各种因素及其完成给定任务的满意程度。

鉴于被磨物料可粗略地分为两种基本类型，容易进行初步的研究。

(1) 需大量加工的低价物料。

(2) 需相对少量加工的高价物料。

第一类物料如矿石、波特兰水泥、煤、褐煤等。

有助于说明这种应用规模的例子为：一个正在东德投产的新厂，要每年从褐煤中生产300万吨的冶金焦炭，因而要求每年磨碎5000万吨的褐煤，显然由于产品的价格低，磨矿费用应尽量低。

所幸，该类产品的粒度并不太细，采用较简单的磨矿工艺就足够了。

如前所述，对该类材料的研磨，应优先选用装球量不多的回转磨机。

通过大量物料所需的大直径磨机就使球或其它装量不多的磨介从足够的高度落下以实现足够的粉碎，而且这类磨机结构简单，易于维护。

但应予以注意的是，一般认为该类磨机的电力费用，更换磨损件费用（球和内衬）及一般的折旧费和杂费大致相等，也就是每项构成了磨机运转费用的三分之一。

因此，在该领域，若一种磨机欲与回转磨机竞争必须具有较低的功耗和钢耗，而且产量相同时磨机尺寸应较小，且不增加机器的复杂性。

显然，振动磨若能以较低的费用处理大量的物料，就将

成为这个领域唯一有可能与回转磨竞争的设备。

是否单台振动磨能象管磨机那样处理等量的物料值得怀疑，但振动磨比管磨机占地面积小则不容否认。

有证据使我们相信振动磨的钢耗及备件费用要低得多，而且后面将会看到比能耗也低得多。

这些经济（或成本）优势是否足以证明振动磨可广泛应用于这个领域需进一步研究，不过振动磨在“超细”水泥和白水泥的生产中有一定市场，前者用量较少，用一般研磨技术生产又比较困难，后者则要求研磨过程中尽量避免内衬和磨介的磨损。

第二类物料诸如医药、颜料、磨料、粉末冶金、陶瓷等用量少但价格很高，因而磨矿的费用对最终产品的价格不起决定作用。

在这种情况下，决定选择方案的是技术因素而不是经济因素，技术因素通常包括好几个。

首先看药品和颜料的研磨。

该类物料并不特别难磨而要求产品极细，为此常采用小型磨机进行长时间的间断研磨，如加工药品，磨机在两次研磨之间尤其要易于清理和消毒，在这方面球磨机即可满足要求。

振动磨机也能象间断球磨机那样易于清理，而且后面将会看到，其研磨速率为常规球磨机的许多倍。

对于难磨物料如磨料或碳化钨的加工情况就不同了。

在这种情况下，为了获得合理的研磨速率就需要大直径的磨机，而大型磨机加工少量物料显然是不合适的，所以常采用中型回转磨，而中型回转磨所需的研磨时间会长达上百

小时。

为了提高研磨速率，研制了象行星磨和回转磨那样的特种球磨机，但改进效果并不明显。

对于细磨，曾有人推荐流体能量磨，但其金属磨损较严重，比能耗也太高，所掌握的情况表明，它的比能耗高达几百个千瓦·小时。

再者，在研磨过程中粒状物料悬浮于流体中，研磨后就必须用浓缩设备将这些物料从流体中分离出来。

这种对流体依赖性就限制了在可控的环境下进行研磨的可能性，更不可能进行真空研磨。

振动磨机擅长于硬物料的研磨，这与上述磨机的局限性形成了鲜明的对照。

振动磨可达到较高的研磨率，这点可援引金属粉末的研磨这个例子加以说明。用球磨机研磨金属粉末需300个小时，而用振动磨仅需研磨60小时就行了。现有资料表明，研磨时间还可进一步缩短至20个小时。

另外，作者在对刚玉这类材料进行研磨时发现，振动磨可以毫无困难地对这些物料进行快速研磨。

与上述其他类型的磨机的局限性形成鲜明对照的另一点是：振动磨的机体仅以很小的幅度（几个毫米）摆动而不是转动，因此便于在高真空或可控环境下工作。

进而，振动磨的机体可装上冷却套以实现低温磨碎，也可装上炉具以实现高温磨碎。

振动磨可在控制环境下工作的可能性是振动磨矿方法所具有的特色之一。

另一个重要因素是振动磨生产的颗粒具有粗糙的外形，

而具有松散介质的回转磨所生产的颗粒则近似为圆形。

这一点对于磨料、催化剂等要求形状粗糙物料的粉碎显得尤其重要。

适用于粗碎的机器有多种，如辊式破碎机、圆锥破碎机、颚式破碎机等，后面将会看到振动磨作为主要用于细碎的设备是不适于进行粗碎的。因此，将振动磨与常规破碎机对比是没有意义的。

因此，必须从细磨的角度对振动磨进行研究。

当然，也有介于中间的情况，如瓷片的研磨。但是没有市场的瓷体高频电容不大可能通过降低磨碎成本打开市场，尽管如此，仍期望振动磨能用于解决这类问题。因为磨介的剧烈运动极有可能形成良好的分散，从而制成非常均匀釉浆，这种均匀性必会使陶瓷体具有良好的电学特性。

由此可以看出：在工业研磨中，球磨机家族占有非常重要的地位。

因而有必要探讨影响球磨机发展的因素，克服这些局限性的影响正是振动磨机研究的主要方向。

因为球磨机家族的任一成员均是绕水平轴转动的圆筒结构，显然，如果磨介能固定在筒壁上就不会有滑动，而当其转速达到一定值时，磨介就会随筒体一起转动产生“离心”。出现这种现象的速度取决于磨机筒壁的直径和重力加速度，该速度称为临界转速用 N_c 表示，使物体的离心力与向下的重力相等，因而有：

$$N_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{2g/D} \quad (1.1)$$

式中 N_c 表示临界转速，单位是转/分， D 是磨机直径，单位