

水泥工业粉磨

工艺技术



王仲春 编著

中国建材工业出版社

内 容 提 要

本书第一章粉磨概论系统地论述了粉碎机理、粒度特性、粉磨动力学、能耗理论、圈流原理等粉磨基本理论。第二、三章详细地比较了各种管球磨粉磨系统的特点及适应性,总结了废热利用及生产操作的基本经验;对管球磨设计的工艺参数、计算方法及工艺对结构的要求进行了全面的分析并提出了切合实际的计算公式和建议。第四、五章阐述了当今粉磨领域发展迅速的新设备辊式磨和辊压机,不仅指明了工作原理、设计参数、选型计算,而且提出了控制要点,以及出现异常问题的解决途径;评述了各种粉磨系统的特点、演变过程及发展趋向并提供了大量的应用实例。第六章介绍三代不同型式选粉机的结构特征、工艺设计、科研开发、选型应用,以及选粉机性能的评价。

本书作者是天津水泥工业设计研究院教授级高工,国家级专家,已从事粉磨工作40多年。本书是在长期实践经验的基础上总结而成的,既遵循一定的理论体系,又包容了大量的设计、开发、科研成果,有较高的理论水平和较强的实用价值。

本书可供从事水泥工业或其他有关工业粉磨工作的科研、设计院所、机械制造、生产厂矿的工程技术人员和工人参考;也可作为大专院校教师及学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水泥工业粉磨工艺技术/王仲春编著.-北京:中国建材工业出版社.1998.8

ISBN 7-80090-922-0

I. 水… II. 王… III. 水泥-粉化-技术 IV. TQ172.6

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第27240号

水泥工业粉磨工艺技术

编 著 王仲春

责任编辑 宋 彬

*

中国建材工业出版社出版(北京市西城区车公庄大街6号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京鑫正大印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 24.75 字数: 590千字

2000年6月第1版 2004年3月第2次印刷

印数: 3001—5000册 定价: 48.00元

ISBN 7-80090-922-0/TU·226

前 言

粉磨作业是水泥生产中的重要环节，无论是生料还是水泥都要通过粉磨来获得。如果燃料是煤，亦需磨成煤粉才能入窑燃烧。粉磨将直接影响到水泥生产的质和量以及技术经济指标。

水泥工业大量耗能，能耗费用占水泥成本的很大部分，其中燃料和电力各半。水泥的单位电耗约为 100~110 kWh/t，其中粉磨电耗占到 60%~70%。表 0-1 列举了各工艺系统分部电耗的比例。^[0-1]

表 0-1 水泥生产各系统分部电耗比例

工艺系统	电耗比例, %
矿山和预均比	5
生料粉磨	24
生料搅拌	6
熟料烧成及冷却	22
水泥粉磨	38
包装及发运	5

粉磨又是一种效率极低的作业，加入粉磨过程中的能量，95%~99%以上都变为热量而散失。表 0-2 是 Anselm 提供的一个实例。^[0-2]

表 0-2 球磨机功耗测定值和分配比例

消耗功的种类	功量 kWh/t	占总数%
轴承齿轮等的纯机械损失	57	12.3
随粉磨产品散失的热量	222	47.6
磨机筒体的辐射损失	30	6.4
废气带走的热量	14.4	31.4
其他损失（介质磨损、加热、噪音、振动、水分蒸发）	10	2.1
理论的粉碎功	3	0.6
合 计	466	100.0

粉磨技术的进展除了更好地适应原燃料的性能，充分满足工艺要求之外，主要围绕节能来进行。同时，单机能力不断扩大，至今已有 8000 t/d 级配套生料磨和 6000 t/d 级水泥磨。

粉磨技术包括粉磨工艺和粉磨设备两个方面。工艺是主导、设备是基础。设备要有工艺来带动，工艺要有设备来实现。

粉磨工艺的任务在于：

1. 从粉碎机理、粉磨理论及技术发展趋向出发，实施新工艺、新技术的科研、开发。
2. 根据原料特性和工艺要求，合理的选择粉磨系统，确定主机及相关辅机的配套。
3. 对粉磨设备的设计、开发提出工艺要求和工艺参数，以保证装备的工艺先进性和良好的技术经济指标。
4. 理论和实际相结合，总结操作、控制的基本经验，满足高产、优质、低耗的生产要求。

笔者四十多年来一直从事粉磨工艺的设计、开发、科研工作。通过大量的科研开发、配套设计，在基础理论和专业应用相结合方面，从生产数据出发探求实用计算方法方面，根据国内原料特点进行粉磨系统、设备的选型配套方面，经过实践反馈改进设备工艺性能、总结基本操作经验方面，积累了大量的经验。本书的内容是在笔者长期粉磨工作的经验基础上，总结编著而成。

编著中遵循：着眼现状追索历史，目的是把握演变规律，探求发展方向。以工艺为主，兼顾设备，突出设备的工艺性及粉磨系统。计算方法的选用、经验公式的推导，尽量从国内实际情况出发。既根据一定的理论体系，又包容了大量的科研、开发、设计成果，在阐明实际生产应用问题时，力求提高到机理上来分析。

本书的内容包括粉磨理论，管球磨、辊式磨、辊压机等粉磨系统的工艺参数、操作控制要点，以及选粉技术等。

本书可供从事水泥工业工厂设计，粉磨及选粉设备的科研、开发、设计以及生产厂矿的工程技术人员、工人、干部作参考。也适合于大专院校有关专业的师生作参考。

由于作者水平有限，难免有疏漏不当之处，恳请读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 粉磨概论	(1)
第一节 粉磨的基本概念	(1)
一、粉磨的意义	(1)
二、粉磨的目的	(1)
三、粉磨术语	(3)
四、粉磨设备	(4)
第二节 粉磨物料的性质	(4)
一、强度、硬度、韧性和脆性	(4)
二、水分、塑性、粘结性、干燥性	(6)
三、易碎性、辊压性	(7)
四、易磨性、磨蚀性	(8)
第三节 粉碎机理	(12)
一、单体颗粒粉碎	(12)
二、料床粉碎	(15)
第四节 粒度特性	(18)
一、单体颗粒的粒度表示方法	(19)
二、群体颗粒的粒度表示方式	(19)
三、粒度特性公式	(23)
第五节 粉磨动力学	(31)
一、经典粉磨动力学	(31)
二、现代粉磨动力学	(32)
第六节 能耗理论	(38)
一、三种代表性理论	(38)
二、统一能量粒度方程式	(42)
三、新能量粒度式的推导	(43)
第七节 圈流粉磨原理	(47)
一、选粉效率和循环负荷的关系	(47)
二、粉磨效率和循环负荷的关系	(50)
参考文献	(54)
第二章 管磨粉磨系统	(56)
第一节 管磨的发展史	(56)
一、粉碎技术的发展	(56)
二、连续式管磨的出现	(57)

三、展望	(58)
第二节 湿法生料粉磨	(59)
一、开流磨	(59)
二、圈流磨	(63)
三、粉磨系统的选定	(66)
第三节 干法生料粉磨	(69)
一、开流磨	(69)
二、圈流磨	(70)
第四节 烘干兼粉磨磨	(72)
一、风扫磨系统	(72)
二、尾卸提升循环磨系统	(74)
三、中卸提升循环磨系统	(77)
四、简化提升循环磨系统	(81)
五、选粉烘干系统	(82)
六、带有立式烘干塔的粉磨系统	(83)
七、带有预破碎的烘干兼粉磨系统	(85)
八、烘干机预烘干的粉磨系统	(87)
九、粉磨系统的选择	(88)
第五节 废热利用	(91)
一、窑尾废热能烘干的水分	(91)
二、系统的密闭锁风	(93)
三、合理设计管路	(93)
四、正确控制	(94)
五、节能效果	(94)
第六节 水泥粉磨系统	(96)
一、开流粉磨	(96)
二、圈流粉磨	(99)
三、系统比较	(103)
第七节 操作经验	(109)
一、开流磨	(109)
二、圈流磨	(110)
参考文献	(113)
第三章 管球磨的工艺参数及设计计算	(114)
第一节 磨机转速	(114)
一、临界转速	(114)
二、磨机适宜转速	(116)
第二节 磨机功率	(122)
一、磨机功率典型计算式	(123)
二、磨机功率经验式的建立	(127)

三、动力系数的反求·····	(131)
四、结论·····	(135)
第三节 磨机生产能力·····	(136)
一、Bond 算法·····	(136)
二、Zeisel 算法·····	(139)
三、Товоров 算法·····	(141)
四、水泥磨单位电耗计算·····	(142)
五、简化经验式·····	(145)
第四节 烘干能力·····	(149)
第五节 研磨体·····	(155)
一、研磨体的规格、性能·····	(155)
二、研磨体装载量·····	(156)
三、研磨体级配·····	(159)
第六节 磨机结构的工艺原理·····	(165)
一、长径比和分仓·····	(165)
二、烘干仓设置位置·····	(168)
三、隔仓装置·····	(168)
四、筒体衬板·····	(174)
第七节 烘干兼粉磨磨的设计及热工计算·····	(176)
一、磨机规格、性能设计·····	(176)
二、热平衡计算·····	(178)
三、磨机各点风量、风速及尺寸要求·····	(181)
四、辅机选型及系统参数·····	(184)
第八节 水泥磨的通风和冷却·····	(186)
一、通风和冷却的目的·····	(186)
二、磨内喷水·····	(189)
参考文献·····	(194)
第四章 辊式磨粉磨系统 ·····	(195)
第一节 辊式磨的历史·····	(195)
一、概 况·····	(195)
二、代表性磨机的演变·····	(196)
第二节 辊式磨的工作原理、优缺点及结构特征·····	(202)
一、工作原理·····	(202)
二、优缺点·····	(205)
三、结构特征·····	(206)
四、选粉机·····	(208)
第三节 工艺参数及国产辊磨性能·····	(210)
一、主要工艺参数·····	(210)
二、国产辊磨性能·····	(220)

第四节 生料粉磨系统	(223)
一、辊磨系统和球磨系统的比较	(223)
二、磨机规格计算	(225)
三、粉磨系统	(229)
四、操作控制要点	(237)
第五节 辊式磨在水泥粉磨中的应用	(239)
一、不同形式的水泥辊磨	(240)
二、水泥辊磨的主要改进	(246)
第六节 辊磨预粉磨技术	(249)
一、概 述	(249)
二、粉磨系统	(250)
三、实际应用效果	(255)
参考文献	(259)
第五章 辊压机粉磨系统	(260)
第一节 辊压机的发展概况	(260)
第二节 辊压机粉碎机理及主要结构	(261)
一、粉碎机理	(261)
二、主要结构	(264)
第三节 工艺参数	(265)
一、压力	(265)
二、转速	(267)
三、生产能力	(269)
四、功率	(270)
五、辊压机规格	(272)
六、循环辊压	(273)
七、辊压机系列	(277)
第四节 辊压机粉磨系统	(278)
一、系统类别和特点	(278)
二、节能效果	(282)
三、控制要点	(285)
四、问题和对策	(287)
第五节 辊压机在生料粉磨中的应用	(289)
一、物料性能的影响	(289)
二、料饼的打散与烘干	(290)
三、辊压机终粉磨和辊式磨的比较	(291)
四、应用实例	(293)
第六节 水泥及矿渣的高细粉磨	(299)
一、辊压性能试验	(299)
二、辊压机系统管磨机的设计	(301)

三、水泥粉磨应用实例·····	(303)
四、矿渣高细粉磨·····	(315)
参考文献·····	(320)
第六章 选粉机 ·····	(321)
第一节 概述·····	(321)
第二节 离心式选粉机·····	(322)
一、作用原理·····	(322)
二、工艺参数·····	(327)
第三节 旋风式选粉机·····	(338)
一、旋风式选粉机的试验·····	(340)
二、设计参数的确定·····	(345)
第四节 笼式高效选粉机·····	(356)
一、基本结构及选粉机理·····	(356)
二、选型和应用·····	(358)
三、不同型式的高效笼式选粉机·····	(363)
第五节 选粉机的性能评述·····	(368)
一、成品粒度组成·····	(368)
二、选粉效率·····	(370)
三、部分分选曲线·····	(371)
第六节 不同功能的分选设备·····	(376)
一、静态选粉机、分离器·····	(376)
二、组合式选粉机·····	(377)
三、带料饼打散的选粉机·····	(379)
参考文献·····	(383)

第一章 粉磨概论

第一节 粉磨的基本概念

一、粉磨的意义

用外力克服固体物料质点之间的内聚力，使之分裂、破坏并使其粒度减小的过程称为粉磨，它是破碎和粉磨的总称。

一般把粉碎后产品粒度大于 2~5 mm 的称破碎，产品粒度小于 2~5 mm 的称粉磨。亦有将破碎后产品粒度为 300、25、5 mm 的分别称为粗碎、中碎和细碎；将粉磨后产品粒度小于 2、0.01 mm 的分别称为粗磨和细磨。事实上破碎和粉磨的作业范围并无严格的划分。不同的工业部门和不同的学者提出的粒度范围不尽相同。

学者 Hukki 提出了如下的分级办法^[1-1]，表 1-1。

表 1-1 粉碎产品粒度分级

粉碎情况	典型机械	粒度—80% μm	单耗 kWh/t
初 破	压或冲击破碎机	$10^6 \sim 10^5$	0.1~2
二 破	压或冲击破碎机	$10^5 \sim 10^4$	
粗 磨	棒 磨	$10^4 \sim 10^3$	2~4
细 磨	球磨、辊磨	$10^3 \sim 10^2$	5~20
高细磨	管 磨	$10^2 \sim 10$	20~100
超细磨	磨擦磨、气流磨	$10 \sim 1$	100~1000

二、粉磨的目的

粉磨的目的在于使物料获得必要的分散度，成为一定粒度组成的产品，以满足各工艺过程的要求。

就水泥生产过程而言，水泥生料、水泥成品对分散度的要求是不相同的。

水泥生料要满足熟料烧成的要求。众所周知：熟料烧成基本上是一种固相反应。按反应动力学原理，反应速度与颗粒大小和温度有关。

W. Jander 于 1927 年应用 Tammann 公式得出：

$$\left[1 - \left(\frac{100 - x}{100}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^2 = \frac{2DC_0t}{r^2} = k \cdot t \quad (1-1)$$

式中 x ——参与反应物质的重量百分数；

D ——扩散系数；

C_0 ——接触表面上的浓度，重量百分数；

t ——反应时间；

r ——反应粒子半径；

k ——反应速度常数。

J. H. Van't-Hoff 1884 年曾提出：

$$K = C \cdot e^{-\frac{A}{RT}} \quad (1-2)$$

式中 K ——反应速度常数；

A ——反应活化能；

R ——气体常数；

T ——反应温度；

C ——常数。

由此可知：生料的颗粒小，反应温度高，熟料容易烧成。换句话说，颗粒小，维持同样的反应速度，烧成温度就可以低一些。但是粉磨得太细又要消耗大量的能量。此外，希望生料粒度均匀，过粗的颗粒难于完全反应，过细的颗粒又易于局部过早出现液相，均对烧成不利。

由于生料中原始组分不同，其要求的分散度也不同。譬如，硅质组分中有结晶石英，由于反应速度慢，就应该磨得比石灰石更细一些。

生料的分散度通常用细度表示。不过，即使同样的细度，其粒度组成也不同。如圈流粉磨其成品粒度就比开流磨均匀，就可适当放粗些。

为此，生料的适宜细度，应该根据原料的易烧性、易磨性试验，从工艺和经济的观点，结合粉磨和烧成系统综合加以确定。在实际生产中，一般经验控制细度为 $80 \mu\text{m}$ 筛筛余 $8\% \sim 16\%$ 。

现代化的预分解窑，入窑分解率已达 85% 以上，生产稳定；现代生料辊磨物料停留时间短，产品粒度均齐。因此，生料细度就可适当选取大一点的值。

水泥熟料的粉磨任务是提供一定颗粒组成的成品。

按照反应动力学的一般原理，在其他条件相同的情况下，反应物参与反应的表面积越大，其反应速率越快。因此，提高水泥细度，增加比表面积，水泥颗粒的水化速度加快，从而达到更高的强度。

一般来说，水泥强度和比表面积之间的关系有一定的规律性。有资料介绍，在布氏比表面积 $3000 \sim 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 范围内，比表面积增加或减少 $100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，28 天耐压强度增减 $0.5 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 。但是，当比表面积超过一定限度后，强度不再增加。强度的高低最终决定于矿物组成，提高细度，主要提高早期强度，对于 3 个月后的后期强度影响不大。

根据国内的生产经验，水泥要求的比表面积如下：

425 号水泥	$2600 \sim 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$
525 号水泥	$3000 \sim 3400 \text{ cm}^2/\text{g}$

粉磨流程不同，选粉方式不同，即使比表面积相同，强度也会有所差别。圈流粉磨或高效选粉机生产的成品与开流粉磨或普通选粉机生产的成品相比，同样比表面积强度高；同样强度则可以将比表面积降低一些。其原因在于颗粒级配不同。

粉磨产品的颗粒大小与水化和硬化过程有着直接关系。研究表明，不同粒度的水泥水化速度差异很大。大于 $60\ \mu\text{m}$ 的颗粒对水泥强度的作用甚微，仅起填料的作用；而小于 $3\ \mu\text{m}$ 的颗粒的水化过程在硬化初期即已完成，所以只对其早期强度有利； $3\sim 30\ \mu\text{m}$ 的颗粒是担负检验龄期强度增长的主要粒级。对此，不同的品种对 $3\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒级的含量提出了不同要求：

普通硅酸盐水泥： $40\%\sim 50\%$

高强快硬水泥： $50\%\sim 60\%$

超高强快硬水泥： $>70\%$

三、粉磨术语

1. 粉碎比

粉碎前后粒径的比值称粉碎比。用下式计算：

$$i = \frac{D}{d} \quad (1-3)$$

式中 i ——粉碎比；

D ——粉碎前物料的粒径；

d ——粉碎后物料的粒径。

粒径可用不同的方法表示，如最大粒径、算术平均粒径、 80% 通过的粒径等。不同粒径计算出的 i 值也不一样。

2. 粉碎段

各种粉碎设备的粉碎比各有一定的范围，而且各不相同。在实际生产中，要求的总粉碎比往往较大，难于在一台设备中完成，而需经过几次破碎和粉磨才能达到要求的最终粒度。物料每经过一次粉碎，就称为一个粉碎段。

在水泥生产中，原料石灰石要从 1m 左右的块度粉碎到 0.08mm 以下，一般要采用一段或两段破碎，一段或两段磨碎。

3. 粉磨系统

粉磨系统按粉磨方式的不同，可分成开流系统和圈流系统。在粉磨过程中，物料一次通过磨机后即成为成品的称为开流。当物料出磨后经过分选，细粒部分作为成品，粗粒部分返回磨内进行再次粉磨的称为圈流。

开流系统的优点是：流程简单，设备少，投资省，操作简便。其缺点是粉碎效率低，单位电耗高。因为物料必须全部达到成品细度后才能出磨，因此，当要求产品细度较细时，已经磨细的物料会产生过粉磨，在磨内形成缓冲层，有时甚至出现粘结、包球使操作恶化。

圈流系统的优点是：可以大大减少过粉磨，使磨机产量提高，电耗降低；同时产品粒度均匀，成品细度可用调节分级设备运行参数的方法来改变。但圈流系统流程复杂，投资较大。

在圈流粉磨时，当出磨物料经过分选设备一次分选后，细粉作为成品，粗粉返回原来的磨机再粉磨的称为一级圈流系统，亦可称为一次选粉圈流系统。当一次分选后的粗粉进入另外的磨机再粉磨，其出磨物料再次经过另外的分选设备分选的称为二级圈流系统。当一次分选后的粗粉不经粉磨再次入分级设备进行二次分选，选出成品，粗粉返回磨内再粉

磨的称二次选粉圈流系统。

粉磨系统从粉磨方法来分，可分成湿磨、干磨和烘干兼粉磨。湿磨过程中要加水，产品呈浆状，称料浆。干磨过程喂入磨内的物料水分应小于1%，否则将引起粘球、糊磨、堵塞，大大降低粉磨效率。烘干兼粉磨则在系统中通入热风，使物料边烘干边粉磨，允许入磨原料水分可以适当增加。

在干法和烘干兼粉磨过程中，物料靠气体扫出粉磨区，并借助气力提升至分级设备分选的称风扫磨。物料通过机械方法卸出，然后用提升机送入分级设备分选的称提升循环磨。两种方法均有的称半风扫式磨。

粉磨系统从其产品性质来分，可分为预粉磨、终粉磨。粉磨产品作为半成品的称预粉磨。粉磨产品作为成品的称终粉磨。实际上根据半成品的粒度特性差别，预粉磨还可以进一步细分为纯预粉磨、混合粉磨、部分终粉磨等。

四、粉磨设备

水泥工业粉磨系统应用的设备主要有：管磨机、辊式磨、辊压机、选粉机。

管磨机是一个两端带有支承装置的圆筒，内装研磨介质。圆筒绕水平的中心轴线回转，研磨介质靠磨擦力被带到一定高度后降落。物料连续地通过圆筒，受到研磨介质冲击、研磨而成为合格的产品。

研磨介质是钢球的叫球磨机，研磨介质为钢棒的叫棒磨机，两者皆有的称棒球磨机。

管磨机结构的主要工艺尺寸是筒体的直径和长度，筒体长度和直径之比称长径比。管磨机按长径比来分，可分成短磨、中长磨和长磨。一般长径比小于2的称短磨，长径比3左右的称中长磨，长径比大于4的称长磨。一般短磨不分仓，中长磨为双仓，长磨为3或4仓。

辊式磨是根据料床粉磨原理，应用相对运动的磨辊和磨盘碾磨装置，使物料挤压、研磨而粉碎的机械，内设选粉设备。过去应用弹簧加压，现代辊磨规格加大用液压加载。

辊式磨一般按制造公司的名称或商品名称来命名。它们之间的主要区别在于磨辊和磨盘的形状以及相互搭配的方式。

辊压机亦是根据料床粉碎原理设计的，设有两个慢速的相向运动的压辊，其中一个固定一个可以滑动，给滑动辊以作用力，物料连续的喂入并通过双辊间隙，因受压而粉碎。

辊压机一般用作预粉磨，但亦可作为终粉磨设备。

选粉机是利用颗粒在气体中的阻力、惯性力和离心力之间平衡的原理而使颗粒分级的设备。它本身虽不起粉磨作用，但可以使出磨机的产品进行分级，减少过粉磨，更好地控制成品粒度，节省能量。

较早的选粉机为离心式选粉机，60年代出现了旋风式选粉机，80年代发展了原理相近而形式相异的高效笼式选粉机。

第二节 粉磨物料的性质

一、强度、硬度、韧性和脆性

1. 强度

强度是指物料抗破坏的阻力，一般用破坏应力表示。随破坏时施力方法的不同，可分成抗压、抗剪、抗弯、抗拉强度等。

物料的破坏应力以抗拉为最小。它只有抗压应力的 $1/20 \sim 1/30$ ，抗剪应力的 $1/15 \sim 1/20$ ，抗弯应力的 $1/6 \sim 1/10$ 。

同一种物料，强度与其粒度有关。粒度小时内部宏观和微观的裂纹少，因而强度高。因此检验时均用一定大小的试块，即使如此，强度也会有所波动。

2. 硬度

硬度是指物料抗变形的阻力。一般非金属材料用莫氏 (Moh) 相对硬度表示。用刻痕法测定，分成 10 个等级，金刚石最硬为 10，滑石最软为 1。如表 1-2 所示。

硬度的量化值随不同的测试方法而有所不同，大都用于金属材料，一般有以下几种：

表 1-2 莫氏硬度表

等 级	物 体	普 通 实 测
1	滑石、石墨	打印纸
2	岩盐、石膏	
3	方解石	2.5 是指甲硬度
4	荧 石	4 是铜币硬度
5	磷 灰 石	
6	长 石	6 是窗玻璃硬度
7	石 英	6.5 是水果刀硬度
8	黄 晶	
9	蓝 宝 石	
10	金 刚 石	

布氏硬度 (HB)，用淬硬钢球或合金球压入物体表面，保持一定时间待变形稳定后卸载，以压痕面积除载荷，用所得之商 N/mm^2 (一般不标注) 表示。

洛氏硬度 C 级 (HRC)，用 1471N 载荷，将顶角为 120° 的圆锥形金刚石压头，压入物体表面，取压痕的深度来计算硬度的大小。HRC 值大约相当于 0.1HB 值。

维氏硬度 (HV)，用 49.03~980.7N 以内的载荷，将顶角为 136° 的金刚石四方角锥体压入物体表面，以其压痕面积除载荷所得之商 N/mm^2 表示。

肖氏硬度 (HS)，以一定量的冲头，从一定高度落于试样表面，以冲头回跳高度表示硬度的量度。

一般来说，强度大的物料其硬度也高，所以有时称这种物料为坚硬物料，反之称为软物料。

3. 韧性和脆性

韧性和脆性是两个对应的性质。韧性表征物料抗断裂的阻力。它们与强度之间的关系，1979 年 Lawn 和 Marshall 定义为：^[1-2]

$$I_b = H/K_c \tag{1-4}$$

式中 I_b ——脆性指数；

H ——硬度；

K_c ——韧性值。

I_b 值决定于应用的荷载，借助维氏仪测得的典型值如表 1-3。

表 1-3 典型的硬度、韧性和脆性值

物 料	硬度 H (GPa)	韧性 K_c (MPa $m^{1/2}$)	脆性 H/K_c ($\mu m^{-1/2}$)	临界荷载 F^* (N)	临界裂缝长 a^* (μm)
中强度钢	5	50	0.1	800000	12000
NaCl (单晶)	0.24	0.4	0.6	30	330
Al ₂ O ₃ (掺 MgO)	12	4	3	2	12
SiC (热压)	19	4	5	0.6	5
SiO ₂ (玻璃)	6.2	0.7	9	0.02	1.5
Si (单晶)	10	0.6	17	0.002	0.4

应用脆性指数可以对物料进行分类。高脆性指数的物料容易粉碎。低脆性指数的物料难于粉碎，因为它们的韧性和塑性好。

二、水分、塑性、粘结性、干燥性

1. 水分

物料的水分包括结晶水和表面水，而影响粉磨作业的主要是表面水，所以一般讲物料的水分就是指表面水。

在干法粉磨时，必须将物料的水分烘去才能入磨；在烘干兼粉磨时，各种不同的系统均对物料的水分有一适应的范围，因此水分是选择粉磨系统的重要指标。

物料的水分大小与物料的性质和粒度大小有关。硬质和粒度大的物料水分小，如碎后纯石灰石即使从水中取出，其水分也不会超过 3%。软质和粒度小的物料水分大，如粘土视其所含 $<5 \mu m$ 的粘粒多少，水分可波动于 8%~30%。

2. 塑性

塑性是指“在变形力的作用下，物料改变形状而不破裂的特性”。所以塑性与韧性相类似。塑性高的物料也难于粉碎。

对于粘土质物料随着含水量的变化可分别处于流动状态、可塑状态和半固体状态或固体状态。粘土处于可塑状态时的上限水分称流限，下限水分称塑限。流限和塑限之差称塑性指数。它标志着可塑状态时含水量的变化范围和可塑性强度。塑性指数是对粘土分类的重要指标。一般来说塑性指数高的粘土含水量亦大。干燥以后就失去可塑性。

3. 粘结性

粘结性是指物料本身或与他物粘结的特性。粘结性主要是由细小的粘土矿物颗粒与水结合，形成胶质状态，产生强有力的粘合作用所形成。因此干燥物料就失去粘结性。

粘土质原料或石灰石中夹有裂隙土，如果粘结性特大，往往在干法破碎、贮存、粉磨、运输过程中产生粘结、堵塞，恶化操作，所以即使系统的烘干能力可以适应物料的水分，也须进行预烘干。

4. 干燥性

干燥性是指物料在烘干过程中是否容易脱水的特性。由于物料的物理化学性质不同，粒

度大小不同,即使水分一样,其脱水速度也是不一样的。

干燥性一般用脱水速率表示。可以用热天平求得。图 1-1 是我们对管庄粘土和太原粘土所做的试验。试验时,维持气流速度一定,试样不分散,置于一个小容器中。

从图 1-1 可知:在开始阶段失水速率快,后期变慢,直至终止。无论温度高低,太原粘土的干燥性均好于管庄粘土。

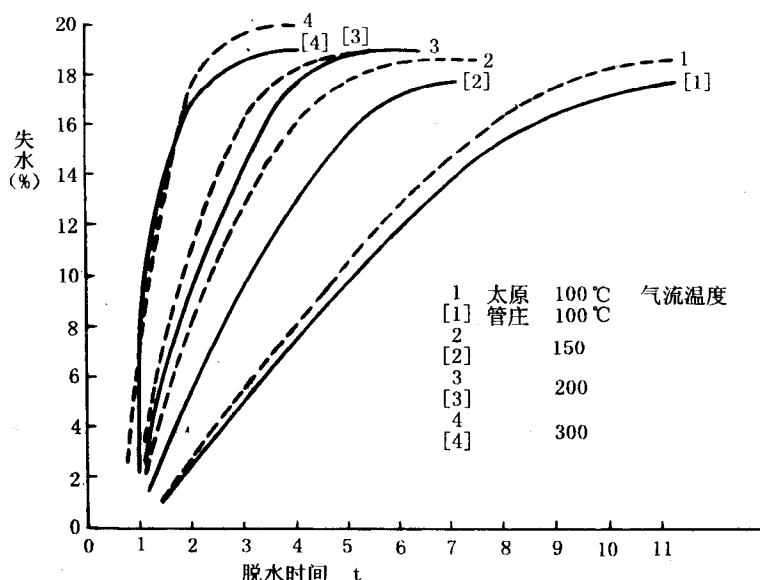


图 1-1 粘土脱水曲线

Polysius 公司用模型烘干机进行气流烘干失重试验来求得干燥性。

三、易碎性、辊压性

1. 易碎性

易碎性是表示物料破碎难易程度的特性。随试验方法的不同,其值也不一样。

KHD 公司采用的方法是用 6 kg 5~18 mm 的试样喂入 $\phi 140\text{mm} \times 70\text{ mm}$ 单转子反击式破碎机,转子设有 2 个 200g 重的反击板,碎后物料进行 1 mm 筛筛析,其筛余值表示易碎性。筛余值大表示难碎,筛余值小表示易碎。

易碎性和易磨性之间没有规律性的关系。有些物料易碎也易磨,但也有易碎难磨或难碎易磨的情况。但是物料易磨性相同,难碎物料在粉磨时能耗亦高,相反易碎物料能耗低。

2. 辊压性

辊压性表示物料辊压效果的特性。一般通过试验辊压机进行试验。将一定粒度的物粒喂入试验设备,在规定的参数条件下进行辊压,测定辊压前后的粒度组成变化和易磨性值的变化,以此来评价辊压效果。

天津院的试验设备规格为 $\phi 400 \times 100\text{ mm}$ 。2×22 kW 三相交流电机,辊速 55 r/min, 1.15m/s。辊间压力 30~180 MPa,试验选用 90 MPa 和 150 MPa 两档。喂料粒度 <15 mm。压后料饼先进打散机打散后再筛析。试验时测定消耗电量,计算出单位辊压电耗值。

四、易磨性、磨蚀性

1. 易磨性

易磨性是表示物料粉磨难易程度的特性。球磨易磨性和辊磨易磨性的测试方法差别很大，分别说明如下。

球磨易磨性常用的方法有下列几种：

(1) 中国标准方法

对于球磨易磨性我国已制订了《水泥原料易磨性试验方法》的国家标准 (GB9964-88)。该方法基本参照 Bond 法制订。

具体的做法是：取代表性试样约 10kg，用颚式破碎机全部破碎到 3.15 mm 以下，在 105℃ 下烘干，缩分出约 500g，用筛分法求出粒度分布曲线，以确定其 80 μm 以下的百分含量及入磨物料 80% 通过的粒径。将配好的试样在松散状态下取 700ml，称重后置于 φ305×305 mm 球磨机中。第一次试验时，磨机转数取 100~300 转，视物料的易磨性而定，易磨者取低值，反之取高值。待磨机转完预定转数后，将磨内物料全部卸出，用 80 μm 筛过筛，筛上量倒回磨机，筛下量为成品不再回磨，而以相等量的新鲜试样代替置于磨内，保持总量不变。按第一次试验求得的磨机每转实际成品量 (G 值) 以及要求达到平衡时 (循环负荷 250%) 所需的成品量，计算出第二次试验时的磨机转数，继续进行试验，重复上述步骤，直到每次试验的 G 值均很接近的平衡状态。以最后 2~3 次试验的 G 值求其算术平均值，按下式求得粉磨功指数：

$$W_i = \frac{44.5 \times 1.10}{P^{0.23} G^{0.82}} \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right] \quad (1-5)$$

式中 W_i ——粉磨功指数，kWh/t；

P ——试验用成品筛的筛孔尺寸，80 μm；

G ——试验磨机每转产生的成品量，g/r；

P_{80} ——成品 80% 通过的筛孔尺寸，μm；

F_{80} ——入磨试样 80% 通过的筛孔尺寸，μm。

功指数 W_i 的物理意义是从理论喂料尺寸粉磨至成品 80% 通过试验筛筛孔尺寸时所需的功。所以试验筛孔径不一样得出的 W_i 值也不相同。国外试验筛孔径一般为 75 μm，较之我国应用的 80 μm 为小。因此同样物料国外做的 W_i 值要大于国内所得，这一点值得注意。此外有些国家 W_i 值用英制表示，应用时需要换算。

(2) Hardgrove 法

这种方法主要用于测定煤，应用哈氏指数 HGI 表示。该方法首先由 Hardgrove (1932) 推出，现在美国 ASTM 已制定了标准，D409-71。

试验用具如图 1-2 所示。主要有一个静止的钢碗，8 个 φ25.4 mm 钢球和一个旋转的上粉磨环所组成。上环总荷重 29.1kg，垂直压于钢球上，转速为 20 r/min。试验时在碗内放入 50g 粒度 1.18 mm 至 600 μm 之间的物料，令上环转动 60 转，取出试样，用 75 μm 标准筛筛分，称量筛下物 W ，将此与 HGI 为 40、58、83 和 107 的 4 个标准试样所得的筛下物