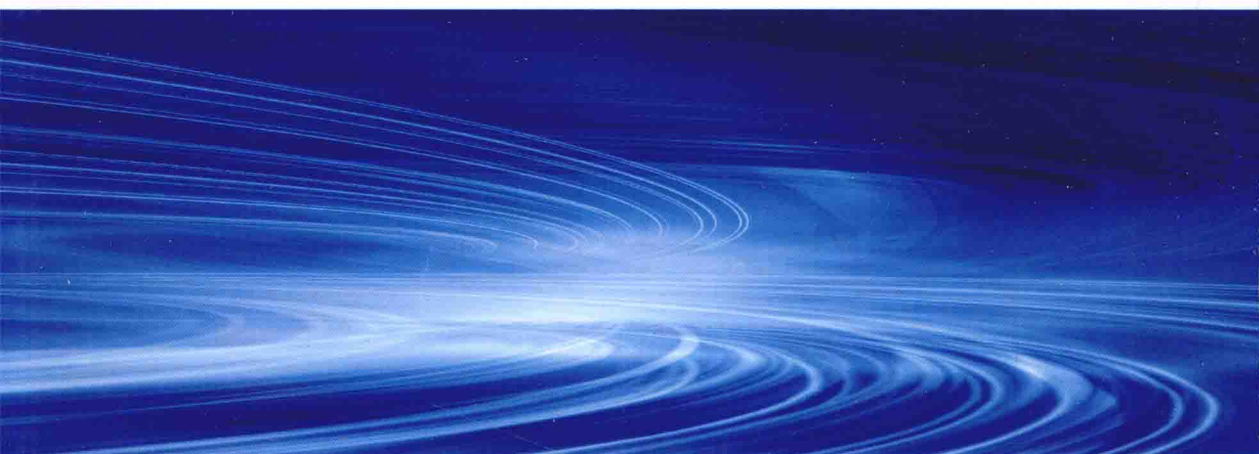


威海市海王旋流器有限公司技术丛书

XUANKUANG JISHU LUNSHU XUANJI

选矿技术论述选集

孙玉波 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

选矿技术论述选集

孙玉波 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 孙玉波 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

选矿技术论述选集 / 孙玉波著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2014. 8
ISBN 978 - 7 - 5517 - 0766 - 4

I. ①选… II. ①孙… III. ①选矿—文集 IV. ①TD9 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 188212 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024 - 83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024 - 83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳中科印刷有限责任公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 18.5

字 数: 352 千字

出版时间: 2014 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 8 月第 1 次印刷

策划编辑: 王兆元

责任编辑: 郎 坤

封面设计: 刘江畅

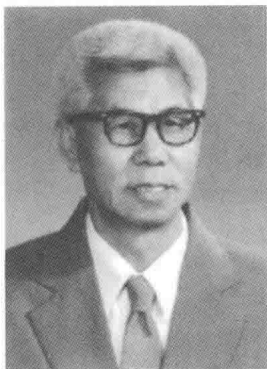
责任校对: 铁 力

责任出版: 唐敏志

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0766 - 4

定 价: 45.00 元

□ 作者简介



孙玉波，男，1929 年生于辽宁省营口市，汉族，中共党员。1952 年毕业于东北工学院选矿专业。后留校任教。现任东北大学矿物工程系教授，硕士生导师，并代行博士生导师职务。曾任系秘书、重力选矿与测试教研室主任等职。曾兼任中国有色金属学会选矿学术委员会委员。20 世纪 90 年代退休后应聘威海市海王旋流器有限公司任技术顾问。

长期从事选矿学科的教学和研究工作，主要是金属矿和煤的加工工艺。教学上曾主讲选矿学、矿石研究方法、重力选矿、重力选矿原理等课程。70 年代以后主要以重力选矿为主攻方向进行研究，在重力选矿分层理论、离心力选矿、流膜选矿等基础理论方面有较多建树。1988 年和 1989 年两次获得国家自然科学基金资助。1985 年被评为校优秀教师。截至退休，共培养 11 名硕士和 3 名博士研究生。

在参与生产技术研究方面也取得相当成果。应用磁-重联合流程处理鞍山式假象赤铁矿石和库存铅锌尾矿再回收利用等科研项目，完成后经鉴定通过，已分别在鞍钢弓长岭铁矿选矿厂和柴河铅锌矿选矿厂投入生产使用。研制的 FZ-85 型试验用多功能跳汰机、JC-00 型非对称周期跳汰机已作为技术转让，并被实际利用。

在学术刊物或会议上发表论文 80 余篇（独撰或合作撰写）。其中执笔的“矿泥重选新设备——振摆皮带溜槽”发表在第 13 届国际选矿会议（1978 年，华沙）文集中。国内发表的文章曾有多篇获得奖励。如“处理粗、中、细粒矿石的非对称跳汰周期曲线研究”，发表在辽宁省金属学会 1985 年选矿学组年会上（大连），被评为优秀论文一等奖。曾主编或合编专著与译著十余部。主要有主编高校通用教材《重力选矿》（初版 1982 年 7 月；修订版 1993 年 4 月，冶金工业出版社出版），两种版本均获得冶金工业部优秀教材二等奖。在编写中国版《选矿手册》和《冶金百科全书》中，均担任重力选矿部分主编任务。译著有《重力选矿法》，合译俄译中，总校订，冶金工业出版社（1957 年）；俄译中《选矿手册》干式磨矿部分，自译，冶金工业出版社（1958 年）。此外，尚有多篇英译中文章发表。

曾入选多种版本名人录辞典。1997 年被选入美国 ABI 世界杰出人物名人录《The International Directory of Distinguished Leadership》Edition 7。1988 年赴瑞典、意大利作学术访问。1992 年被澳大利亚 Monash 大学聘为博士论文评审人。

附注：本选集中各篇论文除注明作者外，其余均系孙玉波撰写。

引 言

孙玉波教授毕生从事于选矿技术的教学与研究
工作,也务精湛,尤以重力选矿学科造诣深厚.退休后应
聘来我公司担任技术顾问,为改善我公司产品的质量
和增加品种提供了有益的帮助.尤其重要的是孙
教授以其丰富的知识增强了我公司的企业文化,充
实了公司的学术底蕴.在开拓我公司的企业文化活动中
借助他历年发表的文章及表述的学术思想曾受益匪
浅,这是一项无形的财富.尽管不少文章已历经年久,
但其基本原理和学术见解至今仍不失现实意义.

为了便于传承,现选择部分著作编撰成册,作为我公
司的技术丛书予以出版,提供给业内人士借鉴参考.

山东威海市海王旋流器有限公司

董事长 黄爱秀

目 次

磨矿机处理量的模拟试验及相似关系	1
水力旋流器的原理和应用	14
闭路磨矿中旋流器的工作原则	43
工业型母子旋流器的设计及使用效果	47
重选理论研究的发展 (之一)	56
重选理论研究的发展 (之二)	66
重选理论研究的发展 (之三)	76
用相似理论研究重选分层理论的可能性探讨	84
粒群在流态化状态下按比重分层的相似性	93
关于跳汰理论问题	102
跳汰过程中筛下补加水作用机理的研究	115
粗粒动筛跳汰周期曲线的研究	123
动筛跳汰机预选酒钢块矿的研究	132
非对称脉动曲线跳汰机的研制	137
处理粗、中、细粒级非对称跳汰周期曲线的研究和分选效果	149
应用非对称周期跳汰机预选酒钢铁矿粉矿的研究	164
改进摇床运动周期曲线提高设备处理能力的研究	172

离心选矿机流膜的测定及运动规律分析	182
离心选矿机的分选原理研究	196
离心选矿机工作的相似性	
——转鼓结构参数同作业条件的关系	208
关于单锥度离心选矿机设计中结构参数的确定	227
双锥度转鼓离心选矿机改善分选效果的理论分析	236
矿泥重选新设备——振摆皮带溜槽	245
应用弱磁选-强磁选-重选联合方法处理鞍山式假象赤铁矿石的探讨	262
应该重视发展矿石预选工艺	268

磨矿机处理量的模拟试验及相似关系*

计算磨矿机的处理能力是选矿厂设计的重要任务之一,是保证生产平衡的重要条件。过去以可磨性为基础计算的处理能力,常与实际有较大出入,一般比实际低 15%~30%,设计能力偏于保守,以致造成投资和生产上的浪费。考虑到磨矿机的设备费约占总投资的 35%~40%,而生产费用则占了总成本的 25%~30%,故准确地计算新建选矿厂磨矿机的生产能力就成了重要的研究课题。

过去计算时所采用的矿石可磨性系数,均是在开路磨矿条件下由小型磨矿机取得的,试验条件与生产条件很不一致。这是造成偏差的主要原因。而计算时引入的各种修正系数——给矿和产品粒度系数、磨矿机直径和型式参数等,又均是引自统一的表列数据^[1]。它们脱离实际的矿石特性,因此往往更增大了计算的误差。

可靠的办法当然是在相同(或相近)规格的磨矿机中进行工业试验。但是这样做将需很大的工作量,且拖长时间。鞍山矿山设计研究院研究室为解决这一问题,曾在试验室型磨矿机组中进行了模拟试验,取得了初步效果。为使这种试验能够应用于实际,下述两个问题是必须解决的:

- (1) 如何做到试验条件与生产条件相似;
- (2) 如何将试验数据转换为生产数据。

本文将根据相似原理^[2,3]对上述问题作一些探讨。由于试验工作还只限于大孤山铁矿一种矿石,故所提供的结论公式只是初步的。不过从结果对比中可看出,磨矿机(包括自磨机)的模拟试验确是一种简单可靠的方法,值得提倡和推广。

(一) 生产磨矿机的作业考查

为了取得对比数据,试验小组首先对大孤山选矿厂二选车间 5 系统进行了生产考查^[4]。与模拟试验有关的一段磨矿考查结果如下。

* 本文作者:鞍山黑色冶金矿山设计研究院 刘玉清,刘洪琪,吴素英,姜志贤(试验研究发起并执行);东北工学院 孙玉波(执笔)。

1. 生产用球磨-分级机组设备条件

球磨机规格、型式： $\phi 2.7$ 米 $\times$ 2.1 米，格子型。

有效容积：10.7 米³。

转速：21 转/分；转速率：78.3%。

球荷充填系数：45%；最大球径：120 毫米。

材质：轧钢。

衬板型式：波浪式。

分级机： $\phi 1.2$ 米高堰式双螺旋分级机。

磨矿流程：如图 1 所示，为检查分级闭路磨矿。

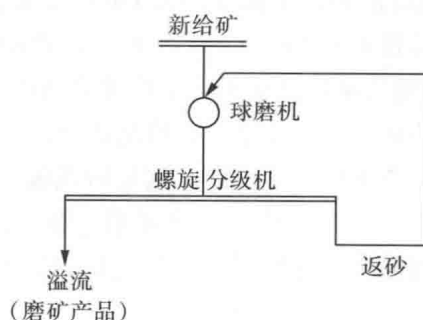


图1 生产磨矿流程

2. 生产磨矿-分级操作条件

给矿粒度：平均的粒度组成曲线见图 2，按产率 5% 计最大粒度为 25 毫米。

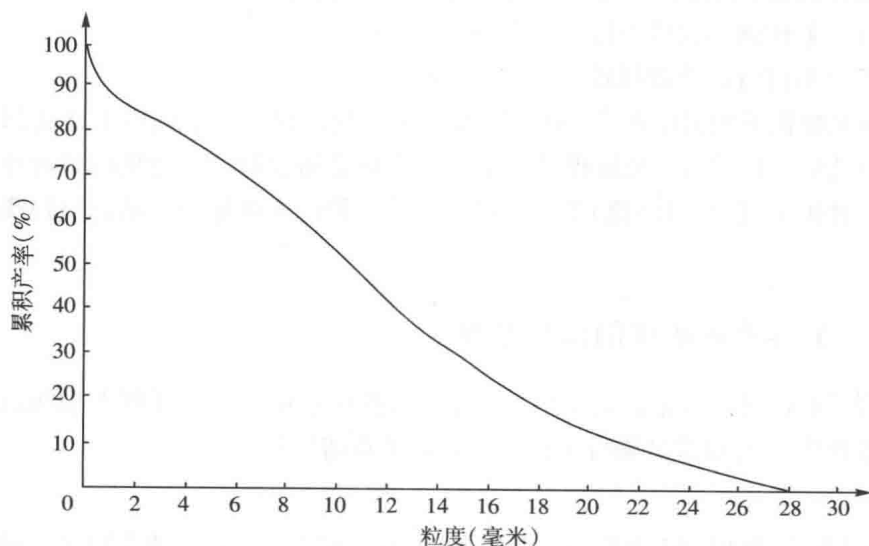


图2 生产球磨机给矿粒度组成曲线

磨矿产品粒度：分级溢流粒度组成见图3。最大粒度0.40毫米，-0.076毫米级含量为56.98%。

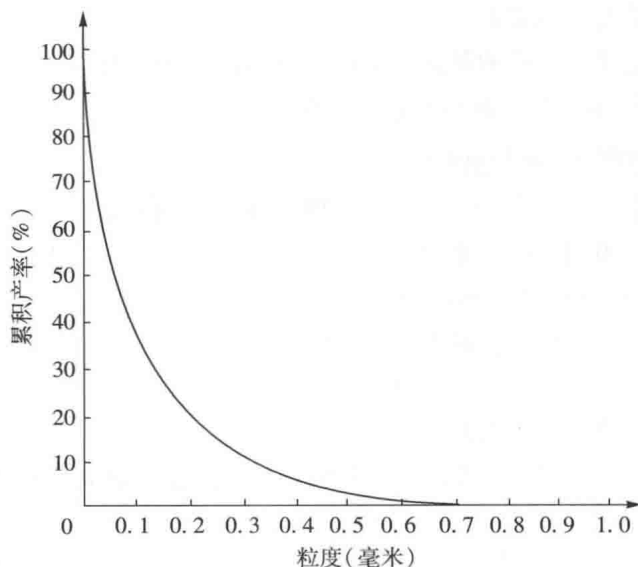


图3 生产分级机溢流粒度组成曲线

磨矿分级作业指标如表1所示。

表1

生产球磨-分级机组作业指标

测定 时间	新给 矿量 Q (吨/(台·时))	磨矿粒度(%)		按新生成 -0.076毫 米级别计 生产能力 (吨/(台· 时·米 ³))	通过能力 $\frac{Q(1+C)}{V^*}$ (吨/(台· 时·米 ³))	利用 系数 q (吨/(台· 时·米 ³))	循环 负荷 C (%)	分级效率	
		-0.3 毫米	-0.076 毫米					按-0.3 毫米计	按-0.076 毫米计
1974年4月	34.06	88.97	57.15	1.64	7.31	3.18	129.54	66.72	54.67
1974年5月	34.80	89.70	60.60	1.78	8.40	3.25	158.31	57.05	52.81
平 均	34.43	89.34	58.88	1.71	7.86	3.22	143.93	61.89	53.74

* V 为球磨机有效容积。

(二) 模拟装置与生产设备的工作相似问题

为使模拟装置与生产设备成为工作相似，必须做到以下几点。

(1) 工作的边界条件相同，在磨矿作业中应同样是闭路循环，并有近似的循环负荷量、筒体内球荷的充填系数，球体相对于筒体的提升高度(与转速率和衬板型式有关)也要大致相同，矿浆浓度也要接近，因为浓度对磨矿效率和分级粒度也有颇大影响。

(2) 模拟装置与生产设备的各工艺特性值(主要指线性长、质量及作用时

间等)要对应地成某种比例。其比例关系由过程的物理(或化学)性质决定,而不一定是简单的几何比例。在磨矿过程中矿石借破碎介质的动力作用粉碎,于是它们应遵循动力相似关系。

工作相似是模拟试验的基础。下面列出鞍山矿山设计院试验用磨矿机组的设备条件和操作制度^[4],并判断它们的相似性。

1. 试验用球磨-分级机组设备条件

球磨机规格、型式: $\phi 230$ 毫米 $\times$ 500 毫米,长筒溢流型。

有效容积: 20 升(0.02 米³)。

转速: 84 转/分; 转速率: 95%。

球荷充填系数: 40%; 最大球径: 50 毫米。

材质: 铸铁。

衬板: 无,筒内壁为光滑面。

分级设备: 实验室型单螺旋分级机,用调节溢流堰高度控制分级产品粒度。

磨矿流程: 与生产相同,见图 1。

2. 试验的磨矿-分级作业条件

给矿粒度: 最大 6~7 毫米,见图 4;

产品粒度: 随处理量而不同,见图 5 及表 2。

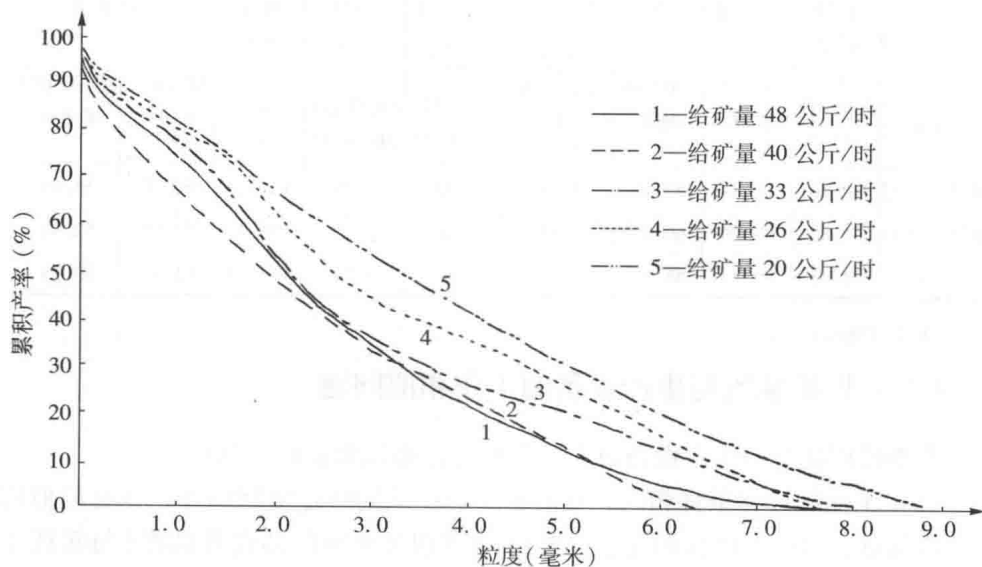


图 4 小型模拟试验给矿粒度组成

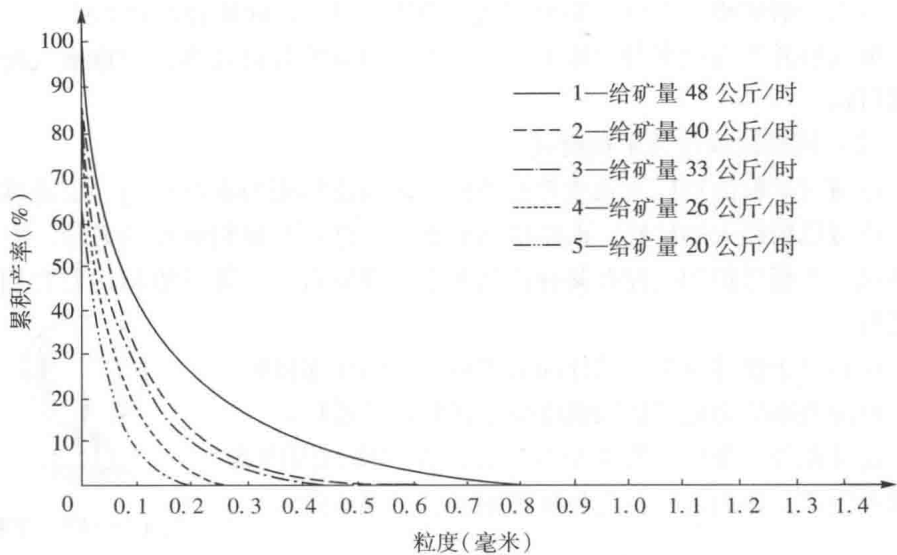


图5 小型模拟试验产品粒度组成

表2 模拟试验装置实测处理能力与给矿、产品粒度指标

序号	处理能力			给矿粒度		产品粒度		粉碎比例数	
	给矿量 Q (公斤/时 (台·时))	利用系数 q (吨/(时·米 ³))	$\lg q$	-0.076 毫米粒 级含量 (%)	最大粒度 d' (毫米)	-0.076 毫米粒 级含量 (%)	最大粒度 d'' (毫米)	$\frac{d''}{d'}$	$\lg \frac{d''}{d'}$
1	48	2.4	0.3802	9.44	6.0	49.56	0.55	0.0916	$\bar{2}9619$
2	40	2.0	0.3010	11.55	5.7	56.28	0.31	0.0544	$\bar{2}7356$
3	33	1.65	0.2175	8.06	7.0	63.75	0.27	0.0386	$\bar{2}5866$
4	26	1.3	0.1139	6.79	7.0	76.37	0.18	0.0257	$\bar{2}4099$
5	20	1.0	0.0000	5.72	8.0	82.00	0.13	0.0163	$\bar{2}2122$

(1) 关于边界条件一致性判断

试验采用闭路磨矿流程,基本的边界条件达到了一致性要求。两种球磨机的转速率、衬板型式、充填系数有所不同。考虑到在试验球磨机内壁为光滑面的情况下,提高转速率将会补偿因球体下滑而损失的提升高度,同时适当减小充填系数,也有助于抵消球荷下滑产生的磨剥作用。这些参数综合作用的结果,可以认为与生产球磨机的效应是一致的。

磨矿是在球磨机径向断面上发生的动力粉碎过程,筒体的轴向长度对这一过程没有直接影响。故直径与筒体长度的比值可以不要求与生产球磨机相一致,只要筒长对产品粒度组成影响不太大就可以。试验球磨机的型式为溢流

型,与生产磨矿机不相似,鉴于它是次要影响因素,此处暂忽略不计。

分级机并不直接参与粉碎工作,只要有相应的分级效率,与球磨机配套工作就可以。

(2) 模拟试验时给矿粒度确定

球荷对矿粒的粉碎方式主要有两种,即撞击作用与碾磨作用。工业球磨机内大球可以粉碎大的矿粒,而模拟球磨机内小球则只能粉碎小的矿粒。它们的线性尺寸不相等但却应存在某种比例关系,即应有一个等量值制约着它们的不等量值。

矿石属于脆性材料,球体撞击矿粒是单向压缩过程。当矿粒的内部应力超过极限强度时,矿粒即被破坏。

物体在外力作用下发生形变,在弹性限度范围内遵从胡克定律,即内部应力与长度的相对变化成正比^[5]:

$$\frac{p_n}{\frac{\Delta L}{L}} = E \quad (1)$$

式中: p_n ——物体单位横断面上所受的压力,即应力。

$\frac{\Delta L}{L}$ ——物体的相对变形量,即应变; L 为物体原有长度, ΔL 为被压缩变形长度。

E ——杨氏模数,与物体性质有关。

式(1)表示物体的应力与应变之间存在着线性关系。但根据岩石力学研究^[6],岩石受力变形对应力与应变之间存在着接近直线的曲线关系,如图7所示。当应力达到某极限强度 p_K 时,即被破坏。几乎不存在一般弹性材料的范性变形区域。对于组织致密的矿石可以与岩石同样对待。图7中连接曲线上端点与 O 点,得到一直线,可以假定地认为矿石是沿着这一条直线达到破坏点



图6 球体撞击矿粒

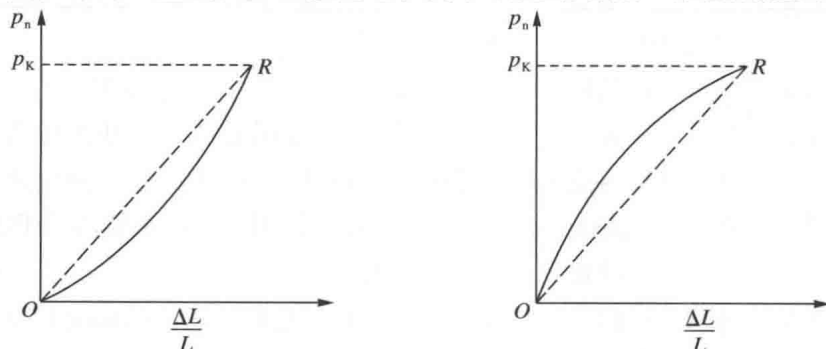


图7 岩石受压应力与应变关系

的, 直线的斜率相当于杨氏模数。对于同一种矿石, 当它的内部结构不随粒度表现有差异时, 则应具有同样的极限强度 p_K 和杨氏模数 E 。

球体在压缩矿块过程中作功, 达到破碎前所作的总功等于矿块平均受力大小与变形长度的乘积, 此时因 $p_n = p_K$, 故得

$$A = \frac{1}{2} p_K \cdot S \cdot \Delta L \quad (2)$$

式中: A ——球体压缩矿块达到破碎时所做的功;

S ——矿块平均横断面积。

将式(1)代入式(2), 整理得

$$A = \frac{p_K^2 V}{2E} \quad (3)$$

式中: $V = L \cdot S$ ——矿块体积。

当球体以碾磨作用粉碎矿粒时, 作用力沿切线方向施加于矿粒表面, 使之发生切向变形。与压缩的过程相仿, 可以导出碾磨矿粒所做的功为

$$B = \frac{t_K^2 V}{2G} \quad (4)$$

式中: B ——球体碾磨矿粒达破碎时所做的功;

t_K ——矿粒切向变形的应力极限强度;

G ——矿石的切变模数。

性质一定的矿石, 式(3)及式(4)中的 p_K , E , t_K , G 均为常数。故知, 不论球介质以撞击形式抑或以碾磨形式粉碎矿粒, 其所做之功均与矿粒体积成正比。对于某个矿粒, 在一定的操作制度下, 两种粉碎作用发生的概率应是一定的。故可综合地写成

$$w = K_1 V = K_1 K_2 d^3 \quad (5)$$

式中: w ——球体粉碎矿粒的有用功耗;

d ——矿粒直径;

K_1 ——系数, 与矿石性质和操作制度有关;

K_2 ——矿粒体积与 d^3 间比例系数。

矿粒因被压缩或切向变形而获得势能, 粉碎后转化为热能消失在矿浆中。

球体的作功能力主要取决于本身下落前所具有的位能(还有部分抛出速度的动能)。球体借磨矿机的回转提升至一定高度, 所具有的位能 w' 与球磨机直径成正比例:

$$w' = Mgh = \frac{\pi l^3}{6} \cdot \delta \cdot g \cdot K_3 D \quad (6)$$

式中: M ——球体质量;

l ——球体直径;
 δ ——球体密度;
 h ——球体提升高度;
 D ——球磨机内径;
 K_3 ——比例系数;
 g ——重力加速度。

w 与 w' 在极限情况下应当有着对应的等值关系, 故在式(5)及式(6)中的各常数值合并写成 K_4 后可以得到

$$l^3 \delta D = K_4 d^3 \quad (7)$$

式(7)即磨矿机在相似条件下工作时, 从个别球体考虑的球体直径 l 、密度 δ 、磨矿机内径 D 与给矿粒度 d 之间的相似关系, 它们被一个不变量 K_4 联系在一起。如试验用球磨机为 1, 生产用球磨机为 2, 则应存在下列比例关系:

$$\frac{l_1^3 \delta_1 D_1}{l_2^3 \delta_2 D_2} = \frac{d_1^3}{d_2^3} \quad (8)$$

根据式(8)应可算出模拟试验设备的给矿粒度。例如, 对于本次试验, 按前列数据, 生产球磨机参数: $D_2 = 2.5$ 米(扣除衬板厚度), $l_2 = 120$ 毫米, $\delta_2 = 7.8$ 克/厘米³, $d_2 = 25$ 毫米。试验球磨机参数: $D_1 = 230$ 毫米, $l_1 = 50$ 毫米, $\delta_1 = 7.4$ 克/厘米³, 则给矿粒度 d_1 应为

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{50^3 \times 7.4 \times 230}{120^3 \times 7.8 \times 2500}} \times 25^3 = 4.6 \text{ (毫米)}。$$

实际采用的给矿粒度为 6~7 毫米, 比计算值大, 但仍可作为模拟试验用。原因是在推导式(8)时采用了临界条件 $w = w'$ 。而实际上, 球体的位能在两种球磨机内均远大于破碎矿粒所必需的动能。从极限条件考虑, 只要 $w \neq w'$, 则对应于该条件的给矿粒度就是允许的。给矿的极限粒度可由 p_K , E 或 t_K , G 的实际值按 $A = w'$ 或 $B = w'$ 关系算出。不过, 在实际工作中, 勿须作这样的计算, 而只按式(8)算出对应的粒度就可以了。有一些偏差在下述生产能力转换式(17)中还要作校正。

(三) 模拟试验生产能力转换式

球磨机内整个球荷对整个给入矿石的粉碎作用与单个球体的作用类似。一部分矿粒将在球荷的撞击作用下粉碎。设单位时间内被击碎的矿粒总体积为 $\sum V_A$, 球荷所消耗有效功率为 W_A , 则由式(3)可得到如下关系:

$$W_A = \sum \frac{p_K^2 V_A}{2E} = \frac{p_K^2 \sum V_A}{2E} \quad (9)$$

如单位时间内被碾碎的矿粒体积为 $\sum V_B$, 相应的球荷有效功率为 W_B , 则有

$$W_B = \sum \frac{t_K^2 V_B}{2G} = \frac{t_K^2 \sum V_B}{2G} \quad (10)$$

上两式之和 $W_A + W_B = W$, 为球荷粉碎矿粒的总有效功率, 而 $\sum V_A + \sum V_B = \sum V$, 则为单位时间球磨机的给矿体积, 即体积处理量。

由于 W_A 为 W 的一部分, $\sum V_A$ 与 $\sum V_B$ 又各可写成

$$\sum V_A = K_A \sum V, \quad \sum V_B = K_B \sum V$$

且

$$K_A + K_B = 1$$

故由式(9)和式(10), 经过相似转换, 可以得出两个与磨矿有效功率有关的无因次准数:

$$\frac{WE}{p_K^2 \sum V}, \quad \frac{t_K^2 K_B E}{p_K^2 K_A G}$$

考虑到给矿和磨矿产品粒度也是影响功率的重要参数, 故再引入无因次准数粉碎比 $\frac{d'}{d''}$ (d' 为给矿粒度, d'' 为磨矿产品粒度)。写出磨矿过程的准数方程如下:

$$\Phi \left(\frac{WE}{p_K^2 \sum V} \cdot \frac{t_K^2 K_B E}{p_K^2 K_A G} \cdot \frac{d'}{d''} \right) = 0 \quad (11)$$

写成指数函数形式, 则有

$$\frac{WE}{p_K^2 \sum V} = C_1 \left(\frac{t_K^2 K_B E}{p_K^2 K_A G} \right)^m \left(\frac{d'}{d''} \right)^n \quad (12)$$

式中: C_1 ——比例系数, 其他符号同前。

将给矿体积 $\sum V$ 换成给矿重量 Q , 其关系为

$$Q = \sum V \cdot \gamma \quad (13)$$

式中: γ ——矿石的重度。

将式(12)式中的各常数项合并到一个新的常数值 C_2 中, 则得

$$W = C_2 Q \left(\frac{K_B}{K_A} \right)^m \left(\frac{d'}{d''} \right)^n \quad (14)$$

式(14)中 C_2 包括了 p_K , t_K , E , G 和 γ 各项值, 是一个反映矿石性质的