

# 球磨机的合理平衡装球

崔巍 编著

——\*——

冶金工业出版社出版 (北京市灯市口甲 45 号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第 093 号

冶金工业出版社印刷厂印 新华书店发行

——\*——

1959 年 10 月第一版

1959 年 10 月北京第一次印刷

印数 2,020 册

开本 860×1163 •  $\frac{1}{32}$  • 80,000 字 • 印张 2  $\frac{22}{32}$  • 插页 3 •

——\*——

统一书号 15062·1630 定 价 0.37 元

# 球磨机的合理平衡装球

崔 巍 編 著

冶金工业出版社

球磨机是选矿厂、水泥厂、耐火材料厂及其他硅酸盐工业部门中常用的设备。在这许多厂里，球磨机生产率的提高，对提高产品数量、降低产品成本具有重大意义。

本书系统地概括了我国冶金工业选矿厂几年来推行球磨机合理平衡装球方面的经验，对进一步强化细磨过程具有一定作用。

本书不仅可以作为使用球磨机各厂的工程技术人员的参考书，还可以作为细磨工段的工人和工长的实际指导书籍。

## 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 前言                        | 1  |
| 第一章 緒論                    | 6  |
| § 1 什么是合理平衡装球             | 6  |
| § 2 苏联合理装球成就的簡介           | 7  |
| § 3 我国学习苏联合理平衡装球先进經驗的重大收获 | 7  |
| 第二章 球磨机运动的一般概念            | 9  |
| 第三章 合理平衡装球的最初装球方法         | 12 |
| § 1 在合理装球过程中需要考虑的几个問題     | 12 |
| § 2 球径大小和給矿粒度的关系          | 14 |
| § 3 矿石可磨性对合理装球的影响         | 18 |
| § 4 最初装球法                 | 19 |
| § 5 阶段磨矿的合理平衡装球           | 20 |
| § 6 最初装球种类                | 29 |
| 第四章 合理平衡补加球量方法            | 40 |
| § 1 合理平衡补加球量計算            | 40 |
| § 2 补加球量的平衡方法             | 43 |
| 第五章 装球补球的操作方法             | 50 |
| § 1 装球工具及装球、补球的操作方法       | 50 |
| § 2 清理球的意义及其操作方法          | 51 |
| 第六章 球的質量对合理平衡的影响          | 53 |
| 第七章 球的充填率                 | 57 |
| 第八章 磨矿介質                  | 60 |
| 第九章 球磨机的技术操作控制            | 64 |
| § 1 球磨机給矿的操作控制            | 64 |
| § 2 磨矿浓度及返砂量的操作控制         | 65 |
| § 3 篩析控制                  | 67 |
| 第十章 合理装球现状和今后发展方向         | 76 |
| 附表                        | 79 |
| 参考文献                      | 85 |

## 前 言

伟大的1958年我国在各个战线上取得了空前的胜利。在党中央和毛主席提出“鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义总路线”之后，大大鼓舞了全国人民的革命斗志，树立了敢想、敢说、敢做的共产主义风格。在各个生产战线上，已经出现一个技术革命和文化革命的高潮。

1959年是更大跃进的一年，是苦战三年具有决定意义的一年。为了贯彻中央在工业中以钢为纲，全面跃进和集中领导同大搞群众运动相结合的方针，选矿工业也将以飞快的速度向前发展。磨矿作业是钢铁工业、有色金属工业、煤炭工业……的选矿工艺过程中的主要过程。磨矿作业的好坏，与产品质量和国家资源的利用程度有着密切的联系。根据不同的物料特性准确地确定细磨细度，必须有高度的技术水平、熟练技巧和科学的管理制度。以有色金属的浮游选矿为例，复杂的细粒浸染多金属矿石或硫化铜矿，往往需要磨到200网目以下。这样，磨矿费用就很大，磨矿成本占整个工艺过程成本的40%左右，因此提高细磨效率，对提高精矿产量和降低选矿成本，具有重大意义。

大家知道，磨矿工段的主要设备就是磨矿机。磨矿机是利用其中的破碎介质来粉碎矿石或其他物料的。因此，在磨矿时，除磨矿机转数之外，磨矿机中介质的质量、数量、形状、大小装配比例、补加方法等都对磨矿效率有很大影响。可见，要提高磨矿效率，除了研究创制新型磨矿机械（如离心磨矿机等）之外，具有现实意义的还是球磨机的合理平衡装球。目前还要在推广现有合理平衡装球经验基础上，继续研究磨矿机的超临界转数和低磨矿浓度快速磨矿法。在快速磨矿的条件下，重新考虑介质质量、数量、形状、大小装配比例、补加方法、操作方法、等等。

早在1949年我国选矿工作者，在中国共产党的正确领导下和苏联专家的无私帮助下，在球磨机合理平衡装球方面就积累了丰

富的經驗上，特別是恒仁、華銅等選礦廠先後從1953年起，在生產上便推廣了合理裝球經驗，並通過實踐和試驗研究更加豐富了球磨機合理平衡裝球經驗。

- 恒仁鉛礦選廠，在實踐中否定了在一些文獻中所說的、最初裝加100、80、60公厘三種球和只用最大的兩種球作為補加球的裝球和補球方法，並確定了合理的補加方法。

華銅選廠，在長期生產實踐中，找出在一定球磨機轉數下，裝球量 and 處理礦量有關係，批判了大球磨小，小球磨了，只補大球不補小球的科學的補加方法，創造了理論計算和實際修正相結合的裝加多種球和補加多種球的方法。這樣，球磨機長時期做到球量平衡、裝球比例平衡，保持球磨機效率逐步提高。

又一選礦廠，通過試驗糾正了過去認為，大球磨機該裝大球不該裝小球的錯誤結論，取消了125公厘大球，增加40公厘小球使磨礦效率大為提高。

我國一些選礦廠，正進行快速磨礦的工業試驗。如某廠從1959年4月起用1800×600公厘圓錐型球磨機進行超臨界轉數的快速磨礦的工業性試驗，將球磨機轉數提高到臨界轉數的111%，磨礦效率提高30%。這將為磨礦領域的技術革命掀開序幕。

本書綜合了我國冶金工業各選礦廠的合理平衡裝球經驗而寫成的，由於作者水平有限，不能全面地概括所有實踐經驗，在內容上也難免有錯誤之處，衷心地希望讀者批評指正！

本書在寫作過程中蒙陳秀山、余振、劉云山、孟翔、關德安等同志的指導與支持，又承有色金屬研究院余興遠工程師、中聯礦冶學院陳蓋副教授、我廠前任廠長王貴海同志、建築工程出版社塔拉同志在審閱手稿時提出若干寶貴意見。為此，一併在這裡向他們表示謝意。

崔 巍

## 第一章 緒 論

### § 1 什么是合理平衡装球

合理装球，又叫做鉄球合理装入。大家知道，球磨机的装球量、装球种类（装几种球）、装球比例（各种球的重量百分数）以及日常生产中的补加球量、补加种类（补加几种球）、补加比例等等，这些都对磨矿处理量和它的产品质量（即分級溢流浓度、細度）有很大影响。因此在最初装球时，必須充分掌握材料。譬如，过去的装球量、装球种类、装球比例、补加量、补加种类、补加比例以及給矿、排矿、返砂、溢流等等粒級（用标准篩把矿粒分成很多大小不同的等級叫做粒度）的全篩析。把这些資料加以整理分析便可以摸到一些規律，知道过去什么时候做对了，什么时候做錯了。根据这些資料，可以初步确定过去的球径大小和給矿粒度的关系。可以知道装球量、装球种类、装球比例同处理矿量、矿浆浓度、矿浆細度的关系是怎样的。据此可以訂出計劃，进行实验。在实验过程中要严格控制技术操作条件，找出适于矿石性質，适于給矿粒度（包括返砂粒度在內）和具体的机械条件的装球量、装球种类、装球比例。为了保持这个装球量、装球种类、装球比例的不变或少变，在日常生产中要进行合理补加磨球，使球磨机的装球量、装球种类和装球比例达到平衡。这就需要把目前合理装球工作提高一步，进行合理平衡装球。

再具体点說，就是要按着不同的矿石性質、球磨机大小、轉数高低以及浮选对磨矿浓細度的要求进行一系列装球量、装球种类、装球比例的实验。这样来求得不断地提高磨矿指标，进而在日常生产中不断积累經驗，找出合理补加方法，經常使球磨机不断保持完成最高指标的装球量、装球种类、装球比例。补加方法要是合理，球磨机里边的球量、种类、比例是不变的。在过去几年中某些选矿厂对这方面的工作注意的不够，因而磨矿操作經常

发生变化，影响到生产任务的完成。因此，不仅在这方面要加以注意，而且要进一步研究。

## § 2 苏联合理装球成就的簡介

为什么要进行合理装球呢？因为合理平衡装球就是合理的磨矿方法的一部份，在苏联巴尔哈什选厂第二段球磨机过去使用80公厘的球，后来降到65公厘，处理矿量提高了很多。在一个处理中硬石英钼矿的选矿厂，所用的球磨机规格是 $2700 \times 2700$ 公厘，给矿粒度12公厘，磨矿细度28网目（0.6公厘），曾使用112、100、88、75及63公厘的球作过实验。当球磨机每分钟转10转时，以球径63~75公厘的球磨矿的处理矿量为最大，而用球径112公厘的球磨矿处理矿量反而减少20%。又某一大规模斑铜矿选矿厂使用3050公厘格子型球磨机，给矿粒度20公厘，溢流细度65网目（0.2公厘），最大球径以63公厘为适宜。某一处理石英脉金矿的选厂使用 $1980 \times 4420$ 公厘球磨机，给矿粒度10公厘，溢流粒度为48网目（0.3公厘），磨矿时用最大球径由75公厘减小到63公厘，则每昼夜处理矿量由1300吨提高到1365吨，提高了5.34%。

在另外一些选厂里，如第二段球磨机的给矿为0.6公厘，将补加一种50公厘球径改为补加35及25公厘两种，则它的处理矿量增高了25%同时以-200网目（小于0.075公厘）产量计算动力消耗降低了44.5%。从这些实际的例子来看，在目前减小球径增加最初装球种类，进行合理补加，乃是提高磨矿效率的基本方法。

## § 3 我国学习苏联合理平

### 衡装球先进經驗的重大收获

自从中华人民共和国成立以来，在三年经济恢复时期和第一个五年计划期间，我们由于学习苏联先进经验和苏联专家的热情帮助，冶金工业和其他工业一样有了飞跃的发展。从1950年第

四季度，原东北有色金属工业管理局，召开了选矿会议，传播了苏联合理装球经验以来，先后在东北第二铜矿选厂实行合理平衡装球，由两种球径的最初装球方法，改成多种球径的装球，磨矿效率前后对比提高38%弱。分水洗矿厂进行钢球与铁球比例关系实验，磨矿效率提高30%。某矿务局所属选厂取消了125公厘的球，改用100、80、60、40公厘球径的球使磨矿效率提高了15%以上。

自从1952年推广了合理平衡装球这一先进经验以来，在全国有色金属选矿厂，磨矿生产率都有所提高。东北地区以1952年为100%，1953年为121.5%，1954年为134%；就全国范围来说，1953年为100%，1954年为112%。由此可见，合理平衡装球在工业上的重大意义。这一先进方法不仅适用于冶金工业，也同样适用于建筑材料、化学工业等部门。

## 第二章 球磨机运动的一般概念

球所以能够在球磨机里工作，是因为球磨机转动时球被带到一定的高度而下落，使矿石在球磨机里受到球的打击，和球与球之间的、球与衬板之间的摩擦作用而将矿石粉碎。

那么，球磨机应该怎样转动呢？它的转数应该多少才算合适呢？在目前是拿「临界速度」来衡量球磨机的转数是否合适。在某些国家和我国的个别选矿厂正在进行超临界速度的试验或生产，在这里不作介绍。但是首先要弄清什么是临界速度，临界速度就是当球磨机转数高到由于离心力的作用，球便紧紧地贴在球磨机衬板（或称内壁）上的某一点不动时的速度（假设球磨机里装一个球时）。在这一速度下球就不能工作，也就是不能粉碎矿石。

为了更清楚了解这一概念，你可作一简单实验；用小绳牵引小铁盒，盒中装一小球。当你用手把小铁盒倒置过来，可以想像小球会掉到地上。当你用手拿着绳的一端，摇动起来作圆周运动（见图1）时，到一定速度小球就紧紧地贴在小盒的盒底上，像水胶粘住一样，这个现象是受离心力作用的结果。

由此可见，通常能够粉碎矿石的转数，是应该小于临界速度的转数。球磨机的转数小于临界速度时，球到达衬板的某一高度后，便开始按运动方向的抛物线方向落下，例如抛石块时，石块所走的路线，是一个弧形的，这个弧形路线叫做抛物线（见图2）。球在落下时，产生很大的力量，粉碎矿石。球被带得愈高，球的质量愈好

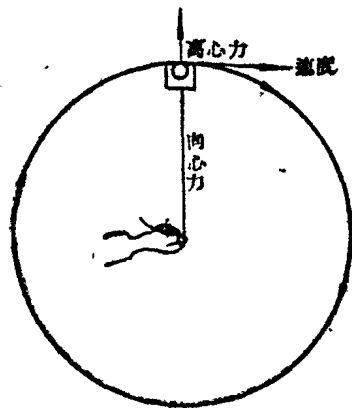


图1 圆周运动

(鋼球比鐵球好，因鋼球比重較大，所产生的冲击与磨剥作用也較大)，則球的落下速度也就愈快，在那一瞬間，所产生的动能

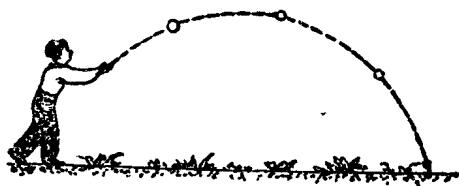


图 2 抛物线运动

(力量)也就愈大，对矿石的粉碎作用也就愈大。当然，磨矿的效率也就越会提高了。实践证明，在同一操作条件下，鋼球的磨矿效率要比鐵球高10%左右，或者更高些。从力学观点来说，由于重力加速度的关系，在处理同一种矿石、給矿粒度相同，大直径球磨机所采用的球径要比小直径球磨机所采用的球径要小些。这是相对的概念，究竟小多少，大多少，需要通过实验确定。

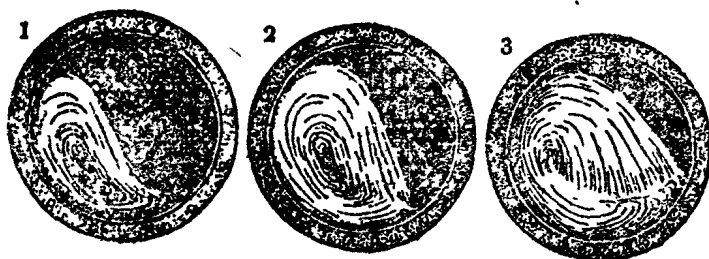


图 3 球磨机的三种不同运动状态

球在球磨机里的运动通常可分为三种情况，如图3中之1为低轉数，2为一般操作轉数，3为接近临界轉数，过去一直認為中等轉数，即临界轉数的75—88 %范围为最好，超过或低于这个轉数范围，磨矿效率都是不高的，不难理解，轉数过低不能很好的粉碎物料，但轉数加快超过上述范围时，在适宜球的充填率、球的种类、球的比例和适于該轉数的操作方法，則处理矿量不是降

低，而是提高。电量、球量、衬板等消耗不是增多，而是减少。某矿务局选厂铅锌工段，从1958年5月分起，曾使用1800×600公厘圆锥型球磨机，处理给矿粒度9公厘筛上17.5%~23.5%，65网目磨矿，中等硬度的铅锌硫化矿石。由临界转数的70%提高到89.4%，94.35%，111%，则处理矿量由100%，提高到121%，140%，150%。电量、球量、衬板消耗量，都有所下降。〔20〕

苏联某选厂将1930×4900公厘球磨机的转数由临界速度的69%提高到79%，装球量由50%降到37%，小于0.02公厘的磨矿产品增加4%，磨矿效率增加7%。在另一个实验中，将临界速度60%提高到79%使产量增加7%。另一选厂，使用1930×2200公厘球磨机，转数每分钟由22转提高到24.6转，按临界速度来说，由71.0%提高到78.5%，处理矿量提高了10%，再提高到27.7转（即临界速度的89.5%），不但处理矿量增加不多，反而动力消耗增加了10~15%。经验说明，适当的转数一般是临界速度75~88%，超过或低于这个范围，磨矿效率是不高的。

### 第三章 合理平衡装球的最初装球方法

#### § 1 在合理装球过程中需要考虑的几个问题

合理平衡装球的最初装球方法是合理平衡装球的最基本的方法。因此，工长、磨矿技工必须重视这一工作，并要与厂的研究室密切合作，搞好这一工作。这是正规作业，提高磨矿效率、提高金属回收率的有力保证之一。

进行合理装球之前，必须进行一系列的调查研究工作。首先应该了解球磨机的容积大小、转数高低；也就是说要知道每分钟转数多少转，是临界速度的百分之多少。分级机型式、耙齿高低、冲程、耙架轨迹运动情况是否正常、分级机各部件坚固程度、各部件的规格与处理能力是否相称，这些都需要知道。

测定容积，是为了便于考虑和确定装球量。测定转数是为了计算临界转数，也就是为了便于考虑装球量和临界速度之间的关系。至于分级机的型式和规格似乎已是在设计阶段解决了的问题，而且也与合理平衡装球关系不大。但是，知道这些情况实际上是有好处的，特别是一些旧厂。例如，耙齿高低、耙架轨迹、主要部件的完整性，都会影响分级效果和设备的运转情况。了解分级机的型式可以判断它的技术能力和考虑返砂量。例如，螺旋分级机比直线型耙式分级机能力大。道尔 F 型分级机比道尔 D 型分级机能力大些。如果使用水力旋流器作分级则必须考虑水力旋流器之沉砂口大小和球磨机排矿最大粒度是否适应砂泵的要求。因为水力旋流器的给矿浓度与其分级效率有关。因此在球磨机排矿口处必须添加大量清水，调节水力旋流器给矿的浓度（如图 4）。

另一方面，在合理装球前后必须进行对球磨机给矿、排矿、返砂、溢流进行筛析和水析（一般标准筛最小的孔径是 0.06 公厘（即 240 网目），再小的粒度就作不了，因此采用沉降分离法，对于细矿进行分级，这种分级方法叫水析。为了知道有用金属的

分布特性，必要时还得对各个粒级进行化学分析。此外还要注意对本厂磨矿方面资料（如过去对球的管理情况，装球量，装球种

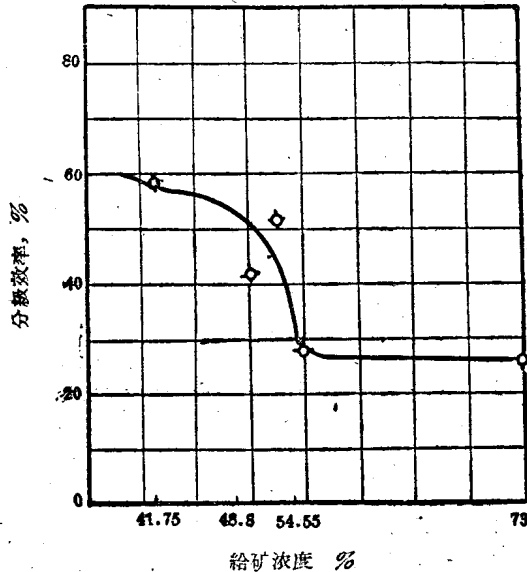


图 4 水力旋流器給矿浓度与分級效率关系

类，装球比例，补加方法以及先进的操作方法等）进行蒐集，通过整理分析，找出經驗教訓，同时还必須和老工人进行研究和查找有关的文献資料。

列入准备工作的重要一項是清理球和倒球的时间安排問題。清理球一般是在球磨机更換大小齿輪、軸瓦、衬板等計劃預修时进行的。根据具体情况对球的准备工作一般分为两种形式：一种是具有丰富的合理平衡装球經驗的选厂，基本上找到了装球和补球规律，繼續搞合理平衡装球的目的，是为了检查和驗證既往的装球、补球是否正确，或者是按期清除碎球，以稳定磨矿效率在較高的水平上。在这种情况下，检修前可以根据既往可靠的技术資料和操作經驗，預先把球配好。当把球磨机原有的旧球倒出来以后，把已配好的球装在球磨机里。待检修完了后，有时間和有必要进行清理检查，則可詳細的进行清理，把球进行分类，以備

校驗过去装球的正确性。經過分类，过秤和分析，以便于下次装球时改进工作。也可以把这些清理的球作为日常补加之用。清理出的碎球可以报废；第二种选矿厂是合理装球經驗尚不够完整。装球量、装球种类、装球比例，尚不能肯定下来，因而磨矿效率不高或者說不太稳定，这样就必須在計劃預修时来清理球。在检修开始时首先組織人力把球倒出来，进行选別分类、称量、通过清理馬上就可以知道球量、种类、比例、碎球率、等等。以此再与清理前的篩分資料进行对照，便可以了解在这次清理前球磨机效率高低的基本原因。再与該期最初装球比較，可以了解装球量、装球种类和装球比例，是否有了变化，从而有助于研究补加方法，并給下期装球提出可靠的資料。

## § 2 球径大小和給矿粒度的关系

球径大小和給矿粒度的关系，有很多理論公式来表示。奥列夫斯基的公式是以給矿粒度大小和磨矿产品粒度（即溢流細度）两因素考虑装球問題的：

$$D = 6(\log d_k) \sqrt{d}, \quad (1)$$

式中  $D$ ——球的直径（公厘）；

$d$ ——給矿粒度大小（公厘）；

$d_k$ ——溢流細度， $\mu$ （公忽，即  $\frac{1}{1000}$  公厘）。

設給矿粒度为 12 公厘， $d_k$ （溢流細度）为  $75\mu$ ， $200\mu$ ， $300\mu$ （即 200 网目、65 网目、48 网目），求其最小球径？按公式（1）可得：

$$D_{75} = 11.2 \sqrt{12} = 39 \text{ 公厘},$$

$$D_{200} = 13.9 \sqrt{12} = 48 \text{ 公厘},$$

$$D_{300} = 14.8 \sqrt{12} = 51 \text{ 公厘}.$$

从上面的計算結果知道，当給矿粒度为 12 公厘、磨矿粒度为 200 网目时，最小球径为  $39 \text{ 公厘} \div 40 \text{ 公厘}$ 。磨矿粒度为 65 网目时，最小球径为 48 公厘。48 网目时，需要 51 公厘。奥列夫

斯基公式所計算的球径比实际要小些。我們常常应用的理論公式是拉苏莫夫公式，这一公式以球径与給矿粒度的 $n$ 次方成比例的思路导来的。經過多次实验研究提出了如下公式：

$$D = i\sqrt[n]{d} \quad (2)$$

式中  $D$ ——与給矿粒度大小相应的球径（公厘）；

$d$ ——給矿粒度（公厘）；

$i$ ——鋼球球径系数。

根据各种資料記載，鋼球球径系数 $i$ 对水泥熔块大約是13，对中硬矿石为32.5，我国有色金属矿山各选厂现在和过去所使用鉄球，球径系数一般采用40~50，其通式如下：

$$D = id^n \quad (3)$$

綜合各选矿厂經驗証明，当給矿粒度10~12公厘的中硬矿石、使用鑄鉄球时，最大的球径为100公厘，最小的球径为40~30公厘。现将我所熟悉的几个选矿厂的实践結果，列举如下：

东北第二銅矿选厂：

設100公厘鉄球适于处理10公厘級別矿石，最小的30公厘鉄球适于0.2公厘級別矿石，代入下列方程式中：

$$\begin{cases} 100 = i(10)^n & (1) \\ 30 = i(0.2)^n & (2) \end{cases}$$

①÷②两边取对数，

$$\log 3.33 = n(\log 10 - \log 0.2)$$

$$\therefore n = \frac{\log 3.33}{\log 10 - \log 0.2} = 0.307475$$

将 $n$ 值代入①式中則：

$$100 = i(10)^{0.307475}$$

两边取对数

$$\log i = \log 100 - 0.307475 \log 10$$

$$\log i = 2 - 0.307475$$

$$\therefore i = 49.3$$

因此;

$$D = 49.3 \times d^{0.307475}$$

求 90 公厘球径的适应级别的粒度:

$$90 = 49.3d^{0.307475}$$

两边取对数:

$$0.307475 \log d = \lg 90 - \lg 49.3$$

$$\log d = \frac{1.9542 - 1.6928}{0.307475} = 0.85$$

$$\therefore d = 7.08 \text{ 公厘}$$

用同样方法可以求出 80、70、60……球径的适应级别粒度。其计算结果如表 1 所示。某矿务局选厂在使用铁球时期, 球径和给矿粒度之关系如表 2 所示。

表 1

球径和给矿粒度的关系

| 球 径<br>(公厘) | 给矿粒度 (公厘)       |
|-------------|-----------------|
| 100         | 10.00 (8—12)    |
| 90          | 7.08 (6—8)      |
| 80          | 4.51 (3.5—5)    |
| 70          | 3.13 (2.5—3.5)  |
| 60          | 1.89 (1.5—2)    |
| 50          | 1.05 (0.8—1.3)  |
| 40          | 0.40 (0.3—0.45) |
| 30          | 0.20 (0.15—0.3) |

表 2

球径大小和给矿粒度的关系

| 球 径<br>(公厘) | 级别粒度 (公厘)        |
|-------------|------------------|
| 100         | 12.00 (9.6—14.4) |
| 90          | 7.83 (6.3—9.4)   |
| 80          | 4.87 (3.9—5.8)   |
| 70          | 2.48 (2.3—3.4)   |
| 60          | 1.53 (1.2—1.8)   |
| 50          | 0.56 (0.45—0.67) |
| 40          | 0.30 (0.24—0.36) |

从上述这些公式中可以得出共同的结论: 给矿粒度大, 即进行粗磨时, 需要用大球; 给矿粒度小, 进行细磨矿, 则需要小球。

在某选矿厂, 计划给矿粒度 +12 公厘占 10—15%, 按这一粒度进行合理装球, 由于碎矿车间发生了事故, 给矿粒度放大到 25 公厘, 则磨矿机工作失常球磨机效率突然下降了 20% 左右。

臥龙泉选矿厂使用 2400 × 900 公厘球磨机, 处理石英脉的萤石矿, 给矿粒度 12 公厘, 当开工生产时, 单用 100 公厘大球, 溢