

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.02.011

# 半工业磨机中钢球尺寸对黑钨矿细度和形状影响研究

石贵明, 周意超

(玉溪师范学院 化学生物与环境学院, 云南 玉溪 653100)

**摘要:**黑钨矿极易发生泥化, 导致其有效浮选成为选矿中的一个难题。在实验室球磨机中, 探讨了不同尺寸的钢球作为介质对黑钨矿细度和形状的影响, 在干磨条件下进行了6种不同球径(20、30、40、50、60、70 mm)的磨矿试验。结果表明: 各尺寸钢球介质下获得的产品粒径均随磨矿时间的增加而减小, 以 $d=70$  mm钢球为磨矿介质时, 大颗粒含量最低,  $-10\ \mu\text{m}$ 过磨颗粒含量最高。粒径比 $x_{80}/x_{20}$ 随着产品颗粒尺寸的减小先增大后减小, 且每种球径下产品颗粒越细,  $x_{80}/x_{20}$ 越平缓, 相同的磨矿时间下, 粒径比 $x_{80}/x_{20}$ 随球径的减小先增大后减小, 其中 $d=40$  mm钢球为磨矿介质的粒径比 $x_{80}/x_{20}$ 最大。中值粒径 $x_{50}$ 随球径的减小先减小后增大, 其中球径为40 mm时 $x_{50}$ 最小( $x_{50}=0.06$  mm), 但当球径小于40 mm时, 破碎混合颗粒物料的粉碎能力会减弱。当球径小于40 mm时, 粒径比 $x_{90}/x_{10}$ 越来越大, 粒径比 $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$ 随着产品颗粒粒径减小先增大后减小, 减小趋势随着球径的减小而趋于平缓, 在 $x_{50}$ 为 $0.075\sim 0.085$  mm范围内达到最大, 而在20 mm球径下,  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$ 磨矿产品尺寸几乎是不变的, 其值为20.66。产品颗粒粒径小于1 mm时, 产品颗粒球形度急剧增加, 且随着球径的减小, 球形度增加更快, 产品颗粒粒径小于0.04 mm时, 产品颗粒球形度的变化趋于平缓, 这可能是磨机内表面和球表面形成了黏附颗粒层, 0.8~0.3 mm颗粒的球形度变化趋势小于0.3 mm以下颗粒的球形度变化趋势。

**关键词:**黑钨矿; 钢球尺寸; 细度; 粒度分布宽度; 颗粒形状

**中图分类号:** TD453 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1744(2022)02-0075-10

## Influence of the Ball Size on Fineness and Shape of Wolframite in A Lab-Scale Ball Mill

SHI Guiming, ZHOU Yichao

(School of Chemical Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China)

**Abstract:** Wolframite is very apt to be slimed which caused the effective flotation of it would be a difficult problem. The different sizes of steel balls as media on the fineness and shape of a wolframite in laboratory ball mill was investigated. The grinding experiments were carried out with six different diameter balls under dry conditions. The results show that the particle size of products obtained in all sizes of steel ball media decreases with the increase of grinding time, the large particles content are the lowest while the  $-10\ \mu\text{m}$  overgrinding particles

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51964044); 云南省地方高校(部分)联合专项项目(2018FH001-051); 云南省教育厅项目(2019J0738); 云南省大学生创新创业训练计划项目(202011390028)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51964044); Yunnan Local Colleges Applied Basic Research Projects(2018FH001-051); Yunnan Provincial Education Department Project(2019J0738); Yunnan University Students Innovation and Entrepreneurship Training Program(202011390028)

作者简介: 石贵明(1982—), 男, 教授, 博士, 研究方向为磨矿分级优化, 电子废弃物利用。

通信作者: 周意超(1990—), 女, 硕士, 研究方向为磨矿分级优化与控制。

引用格式: 石贵明, 周意超. 半工业磨机中钢球尺寸对黑钨矿细度和形状影响研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 75-84.

SHI Guiming, ZHOU Yichao. Influence of the Ball Size on Fineness and Shape of Wolframite in A Lab-Scale Ball Mill[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 75-84.

content are the highest with the  $d=70$  mm steel ball as media. The particle size ratio of  $x_{80}/x_{20}$  increases first and then decreases with the decreases of the product particle size, and the finer the product particle size under each ball diameter, the gentler  $x_{80}/x_{20}$ , the particle size ratio of  $x_{80}/x_{20}$  increases first and then decreases with the decrease of the ball diameter in the same grinding time, and the particle size ratio of  $x_{80}/x_{20}$  is the largest with  $d=40$  mm steel ball. The median particle size  $x_{50}$  first decrease and then increase with decreasing ball size and which is minimum ( $x_{50}=0.06$  mm) for 40 mm, the grinding ability is weakened for crushing mixed granular materials when the ball diameter is less than 40 mm. When the ball diameter is less than 40 mm, the particle size ratio  $x_{90}/x_{10}$  becomes larger and the particle size ratio  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$  first increase and then decrease with decreasing product size and the decreasing trend become more and more flat with decreasing ball diameter, reaching the maximum when  $x_{50}$  in the range of values of  $0.075 \sim 0.085$  mm, the ratio of  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$  is almost constant for the product size and the value is 20.66 for  $d=20$  mm ball. When the product particle size is less than 1 mm, the sphericity of product particle sharply increase and increase faster with decreasing ball diameter, the product particle size is less than 0.04 mm, the change trend of sphericity of product particles become flat which it may be the formation of an adhered particle layer on the mill inner surface and ball surfaces, the sphericity change trend of particles between  $0.8 \sim 0.3$  mm is smaller than that of particles below 0.3 mm.

**Key words:** wolframite; ball diameter; fineness; width of distribution; particle shape

研磨广泛应用于水泥、医药、食品、化妆品、选矿等各个领域,是一个非常复杂的过程,难以精确控制<sup>[1]</sup>。在选矿过程中,黑钨矿极易发生泥化,导致其有效浮选成为选矿中的一个难题<sup>[2]</sup>。较窄的黑钨矿粒度分布往往是降低选矿能耗和最大限度提高指标的理想选择,它的影响因素不仅包括磨矿时间,还包括介质粒度和介质形状<sup>[3]</sup>。QIAN等<sup>[4]</sup>研究了实验室球磨机中介质形状对水泥熟料研磨的动力学,用 $\Phi 20$  mm钢球和 $\Phi 20$  mm $\times$ 20 mm钢锻作为介质,对六个不同粒级(-4.75+4.00、-4.00+3.35、-3.35+2.36、-2.36+2.00、-2.00+1.70、-1.70+1.18 mm)的水泥烧块进行研磨。结果表明,无论是钢球还是钢锻,水泥熟料均服从一阶磨矿动力学,钢锻的破碎率高于钢球的破碎率,主要破碎分布参数取决于初始进料粒度。TEKE等<sup>[5]</sup>介绍了方解石和重晶石矿物的干式球磨动力学研究,用标准球磨机模拟程序模拟方解石和重晶石矿物的产品粒度分布,方解石磨矿4 min,重晶石磨矿2 min后,磨矿效果均呈下降趋势,与实验数据吻合较好。OLEJNIK<sup>[6]</sup>介绍了花岗岩磨矿动力学研究的结果,该研究考虑了进料特定粒度组分的形貌和力学性能,这项研究是在一家半工艺规模的工厂进行的。试验每30 min分析一次磨矿产品的粒度组成,同时对产品颗粒进行了晶粒形状分析、微观形貌及化学成分分析。ZHAO等<sup>[7]</sup>研究了不锈钢磨矿介质对原生硫化铜矿物、黄铜矿、次生硫化铜矿物、辉铜矿与黏土矿物膨润土的不同作用机制,发现在磨矿过程中,辉铜矿被重氧化,而黄铜矿被轻微氧化。由于

矿物表面氧化程度不同,黄铜矿磨矿后仍带负电荷,而辉铜矿磨矿后带正电荷,导致与膨润土颗粒的相互作用不同。在不同的搅拌磨运行参数中,钢球尺寸对总能耗的影响最大,合适的钢球尺寸与 $F_{80}$ 和 $P_{80}$ 有关系,研磨介质必须足够大可粉碎给入磨机的最大颗粒,同时也需要足够小可将物料磨到所需的产品细度。过去的经验表明,不适当的钢球尺寸产生的能源消耗是最佳作业的两倍<sup>[8]</sup>。同样,在常规球磨机的不同运行参数中,钢球尺寸对总能耗的影响可能最大。CHEN等<sup>[9]</sup>介绍了黏土矿物在泡沫浮选中的行为,不同类型的黏土矿物通常存在于矿体中,它们对需要不同处理的浮选产生若干有害影响,一是黏土矿物覆盖在有价矿物表面,降低了有价矿物的可浮性;二是泥浆中网格结构的形成。VERRELLI等<sup>[10]</sup>说明了颗粒形状对浮选的重要性,研究结果表明,除粒度外,磨矿过程中应注意颗粒的形状。RAHIMI等<sup>[11]</sup>和GUVEN等<sup>[12]</sup>也认为表面粗糙度和形状对颗粒在浮选等各种过程中的行为起着重要作用。

从以上文献可以看出,大部分的磨矿实验研究都聚焦在硫化矿物和脉石矿物上,而对黑钨矿等氧化矿物的磨矿研究相对较少。为了控制黑钨矿的粒度和形状,本研究用滚筒式球磨机细磨混合粒度黑钨矿颗粒,研究了磨矿钢球尺寸对产品细度和颗粒形状的影响。

## 1 颗粒形状、粒度分布及产品细度的定义

在矿物加工过程中,粒径通常用某筛径筛下累

积质量分数分别为 20%、80% 的筛径来评价<sup>[13-14]</sup>,  $x$  表示磨矿产品颗粒大小, mm。  $x_{20}$  表示磨矿产品在某筛径筛下累积颗粒质量分数恰好为 20% 时, 该筛径就是磨矿产品的粒径, 它的物理意义是粒径大于该筛径的颗粒质量占 80%, 小于该筛径的颗粒质量占 20%, 其他依次类推。 粒径分布宽度通常用粒径比  $x_{80}/x_{20}$  来计算, 粒径  $x_{10}$ 、 $x_{50}$  和  $x_{90}$  用于评价固体矿物的可磨性或研磨特性<sup>[15-17]</sup>。  $x_{90}/x_{10}$  的粒径比对于表示粒径分布宽度更有用, 因为  $x_{90}/x_{10}$  的粒径比比  $x_{80}/x_{20}$  的粒径比具有更广泛的比较范围。 除了  $x_{80}/x_{20}$ 、 $x_{90}/x_{10}$ ,  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$  也可以使用<sup>[14,18]</sup>, 粒径比的降低意味着产品粒径分布的缩小。 中值粒径  $x_{50}$  在许多行业中最常用来描述被粉碎物料的产品粒度, 在本研究中用来评价被粉碎产品的细度。 球形度被用来表示磨矿产品形状<sup>[19]</sup>, 球形度是球的表面积与

相同体积的粒子的表面积之比。

## 2 实验方法

以江西大吉山钨矿手选粗精矿中提取的纯黑钨矿为研究对象, 其密度和莫氏硬度分别为  $7.18 \text{ kg/m}^3$  和 4.3。 经摇床筛分, 用非标准筛去除脉石矿物, 得到混合粒度在 10 mm 以下产品。 采用 X 射线荧光(XRF)光谱分析法进行化学分析, 其化学组成见表 1。

表 1 的结果表明, 该样品  $\text{WO}_3$  品位为 75.57%, 纯度超 98.68%。

磨矿机为中试规模的磨矿机, 内径为 0.45 m, 长度为 0.45 m。 在转速、充填率等固定参数下进行了磨矿试验。 表 2 列出了磨矿试验中磨机参数和磨矿条件。

表 1 多元素分析结果

Table 1 Multi-element analysis results of sample							/%
Elements	$\text{WO}_3$	Fe	Mn	CaO	$\text{SiO}_2$	Others	
Contents	75.57	8.90	9.38	0.91	0.28	4.96	

表 2 磨机参数和磨矿条件

Table 2 Mill characteristic and grinding conditions		
Mill	Diameter, $D/\text{m}$	0.45
	Length, $L/\text{m}$	0.45
	Volume, $V/\text{m}^3$	0.07
	Speed/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$48(\phi = 0.76)$
Critical speed/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$		63.06
Ball	Diameter, $d/\text{mm}$	70, 60, 50, 40, 30, 20
	Total mass/kg	134.40
	Bulk density/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4800
	Charge rate/%	40.00
Sample	Total weight/kg	10
Grinding time	Time/min	5, 10, 15, 20, 25, 30

\*  $\phi$  = 临界转速

磨矿介质是密度为  $4800 \text{ kg/m}^3$  的钢球, 有 6 种不同的单球直径: 70、60、50、40、30、20 mm。 实验中试样给料粒度均为 10~0 mm, 质量为 10 kg, 磨矿介质质量为 134.40 kg。 磨机的转速设置为 48 r/min, 约为临界转速的 76%。 研磨试验在干燥条件下分别进行 5、10、15、20、25、30 min。

采用泰勒标准筛干筛法和激光衍射法(丹东 Bettersize 仪器有限公司, BT-9300ST)对磨矿产品进行超声波分散后测量粒度分布。 采用数字成像颗

粒分析技术(弗尔德(上海)仪器设备有限公司, Camsizer P4)测量磨矿产品的颗粒形状。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同磨矿条件下磨矿产品的粒度分布

图 1 为样品的粒度分布, 图 2 为分别使用直径为 70、60、50、40、30、20 mm 的介质时, 磨矿产品粒度分布与时间变化的关系。

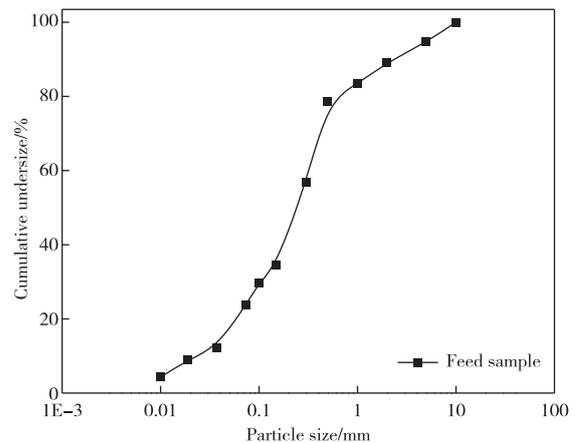


图 1 给料的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of feed sample

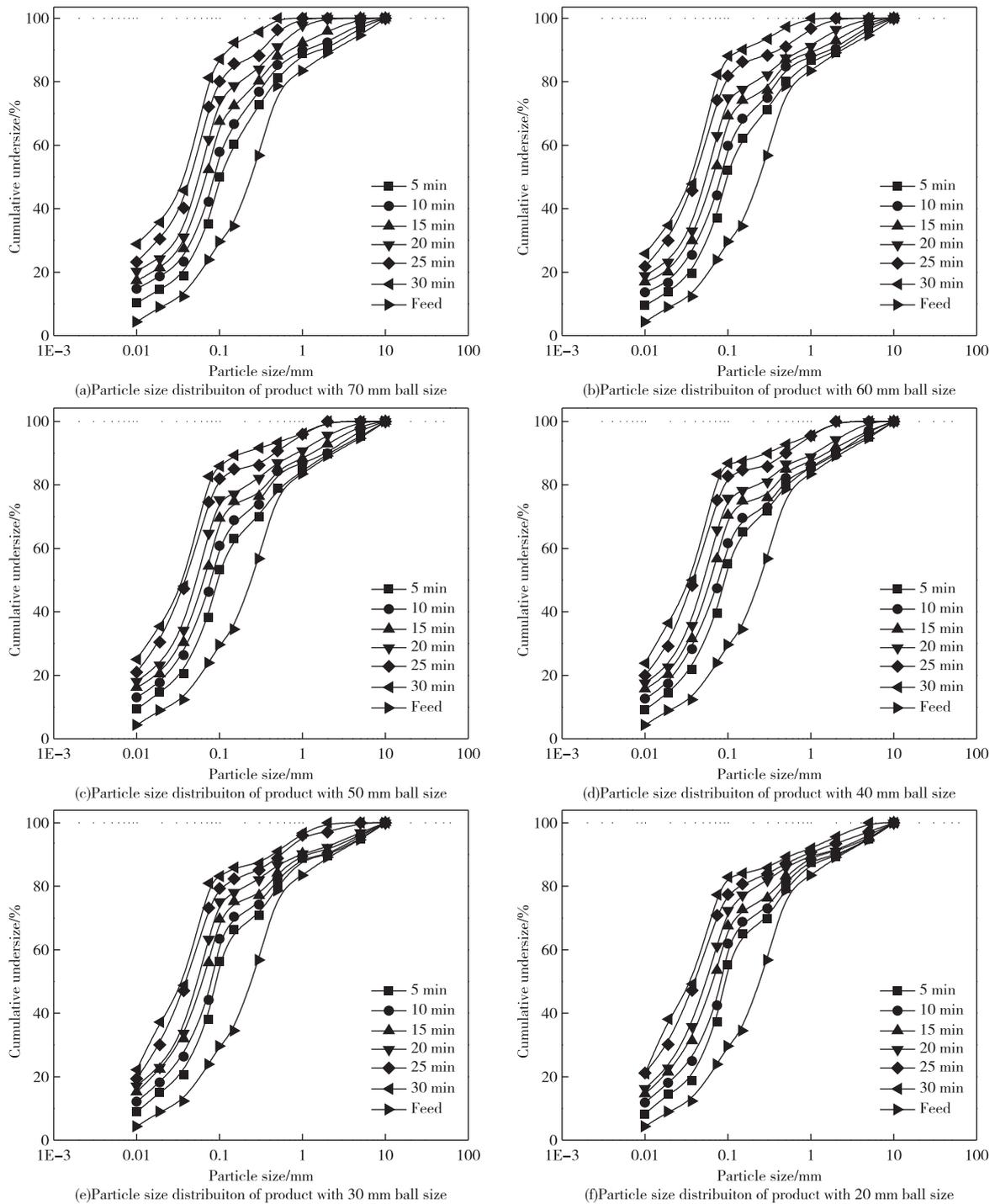


图 2 不同尺寸介质、不同磨矿时间的磨矿产品粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of ground product with varies size of steel ball

由图 2 可知,各磨矿条件下获得的产品粒径均随着磨矿时间的增加而减小。以 70 mm 钢球为磨矿介质时,大颗粒含量最低,  $-10 \mu\text{m}$  过磨颗粒含量最高。结果表明,大球能更好地减少大颗粒,但也会增加过多的超细颗粒。从图 2(a~f)中可以看出,对

于不同钢球尺寸的磨矿产品,可以得到任意粒径的筛下累积质量分数。在本研究中利用 9 种不同的累积过筛质量分数 (10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%),以考察磨矿产品的细度或不同磨矿条件下磨矿产品的粒度分布。

图 3 展示了在不同钢球尺寸下,9 种累积过筛粒径与磨矿时间的关系。 $x_Q$  为筛下累积粒度分布达到  $Q\%$  时所对应的粒径,mm,其随着磨矿时间的增加而减小。对于每一个过筛粒级,随着

磨矿时间增加,磨矿产品的累积过筛粒径趋势变得平缓且磨矿速率变慢,其主要原因是干燥状态下磨机内表面和球表面形成了一层黏连颗粒层<sup>[3]</sup>。

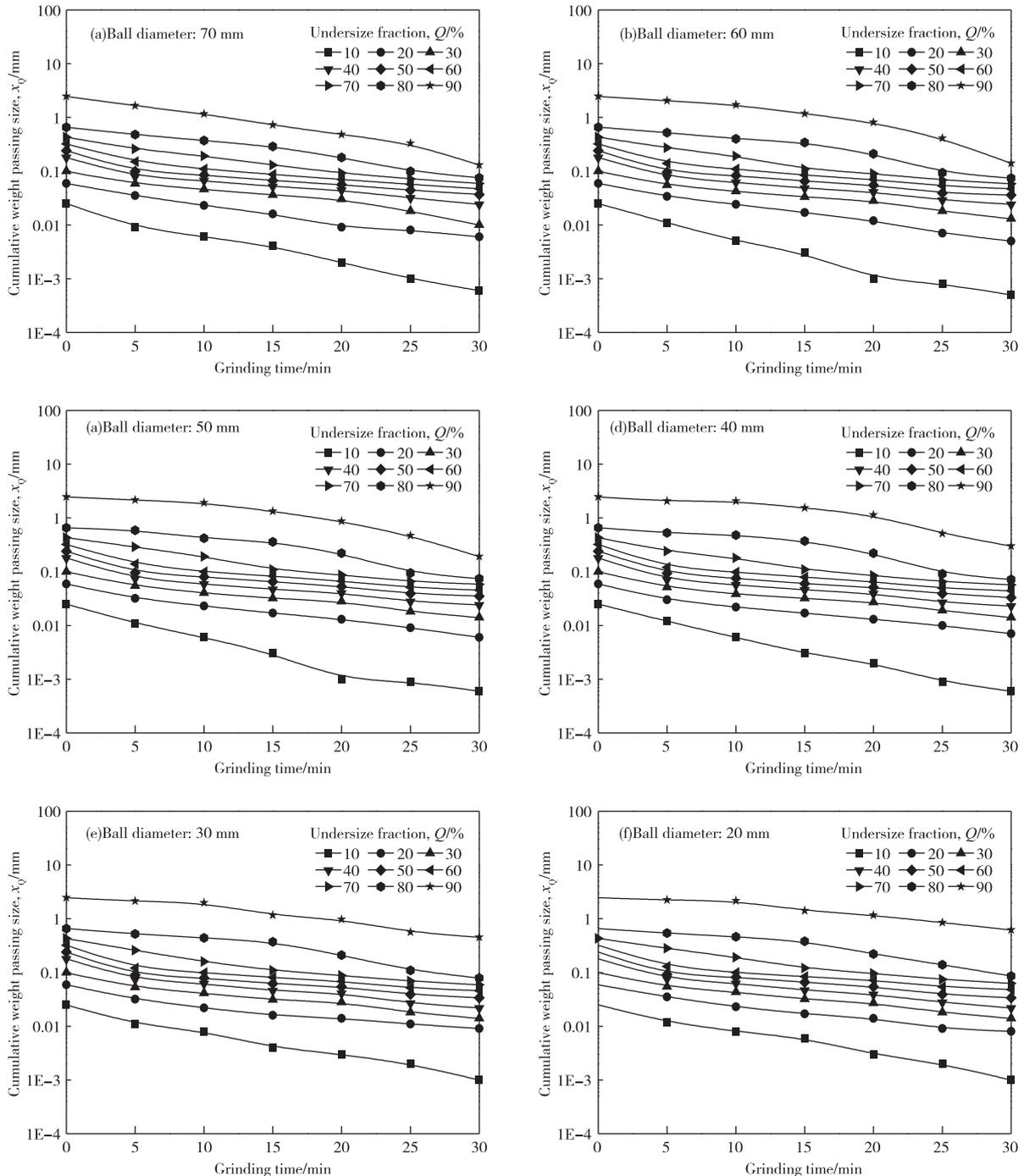


图 3 不同钢球尺寸下过筛粒径与磨矿时间的关系

Fig. 3 Relation between cumulative weight passing size and grinding time with varies ball diameter

### 3.2 粒径分布宽度

图 4 ~ 6 显示了粒径比  $x_{80}/x_{20}$ 、 $x_{90}/x_{10}$  和  $x_{90}-x_{10}$  相对于产品尺寸  $x_{50}$  (中值粒径) 的变化。

由图 4 可以看出,粒径比  $x_{80}/x_{20}$  随着产品尺寸的减小先增大后减小,各尺寸钢球介质下的趋势均趋于平缓。在相同的磨矿时间下,中值粒径  $x_{50}$  随球

径的减小先减小后增大,球径 40 mm 的  $x_{50}$  值均最小。从而可知,随着球径的减小,磨矿能力增大。但当球直径小于 40 mm 时,破碎混合颗粒物料的粉碎能力减弱。我们认为  $d=40$  mm 钢球可以有效减少中间颗粒,而  $d>40$  mm 钢球只能有效减少大颗粒, $d<40$  mm 钢球只能有效减少小颗粒,这是因为大颗粒需要更大的球的冲击力,而小颗粒需要更大的

摩擦概率。在相同磨矿时间下,粒径比  $x_{80}/x_{20}$  随球径的减小先增大后减小,其中  $d=40$  mm 介质的  $x_{80}/x_{20}$  最大,这种现象可能是由于  $d=40$  mm 介质对大颗粒和小颗粒均难以破碎而引起粒度分布较宽。因此,最佳钢球尺寸应综合考虑磨矿产品细度和粒度分布宽度,为解决混合颗粒的磨矿问题,最好选用混合钢球尺寸。

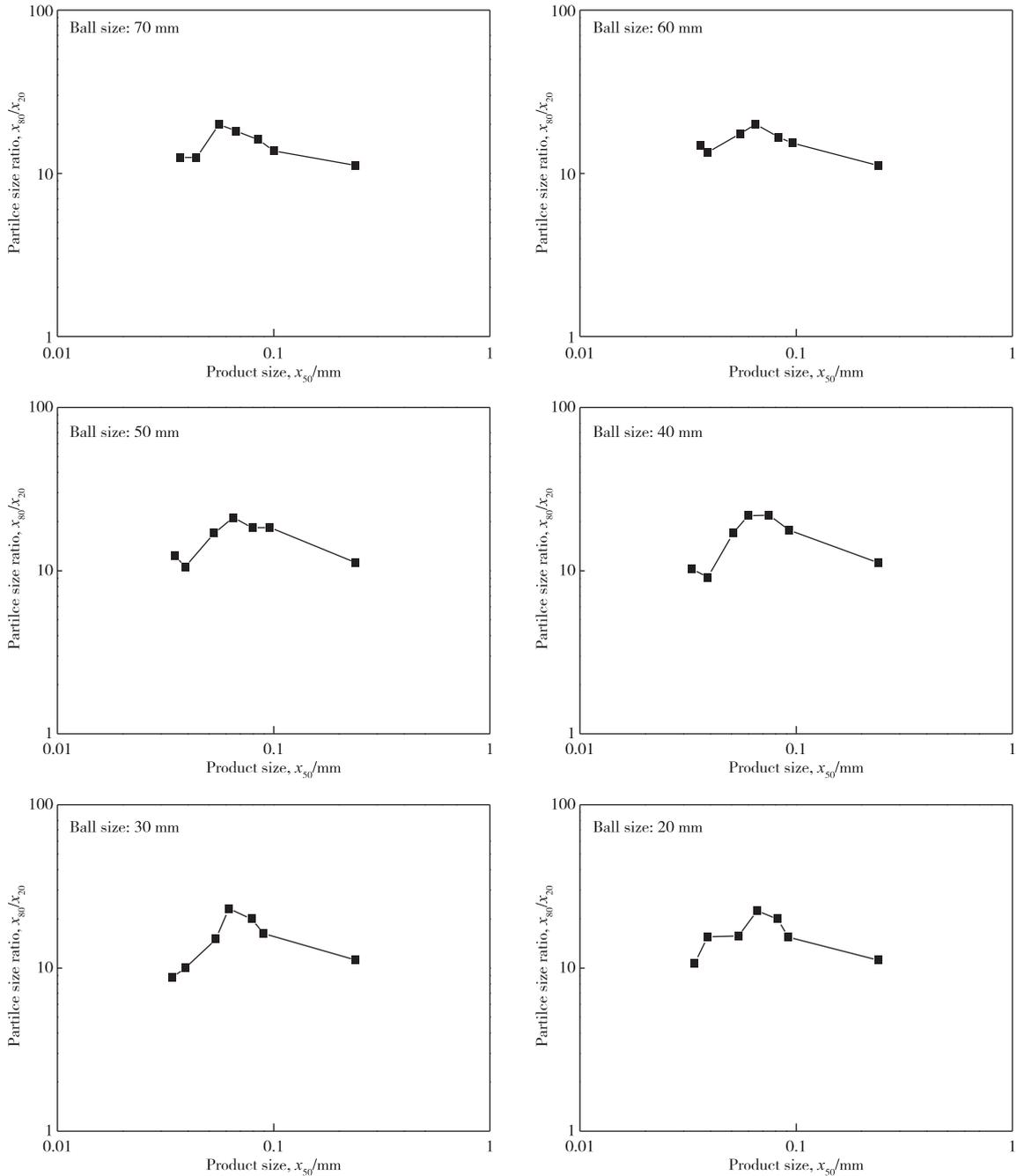


图4 磨矿产品中  $x_{80}/x_{20}$  相对于  $x_{50}$  (中值粒径) 的变化

Fig. 4 Relation of particle size ratio  $x_{80}/x_{20}$  with respect to the product size  $x_{50}$  (median particle size)

图 5 说明了不同钢球尺寸的粒径比  $x_{90}/x_{10}$  与  $x_{80}/x_{20}$  的规律相似,但当钢球直径小于 40 mm 时,粒径比  $x_{90}/x_{10}$  随  $x_{50}$  的减小而一直增大。本研究认为可能是球径过小,失去了大颗粒的粉碎能力,而对小颗粒具有较强的超细粉碎能力,增加了产品粒度分布的宽度。

从图 6 可以看出,粒径比  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$  随着产

品粒径的减小先增大后减小,减小的趋势随着钢球尺寸的减小而趋于平缓, $x_{50}$  在 0.075~0.085 mm 范围内达到最大。另一方面,当使用直径为 20 mm 钢球时,  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$  几乎不会发生变化,值为 20.66,可能是在微细研磨阶段,随着磨矿颗粒的减小,颗粒强度和黏滞力会增大从而限制了磨矿效果<sup>[3]</sup>。

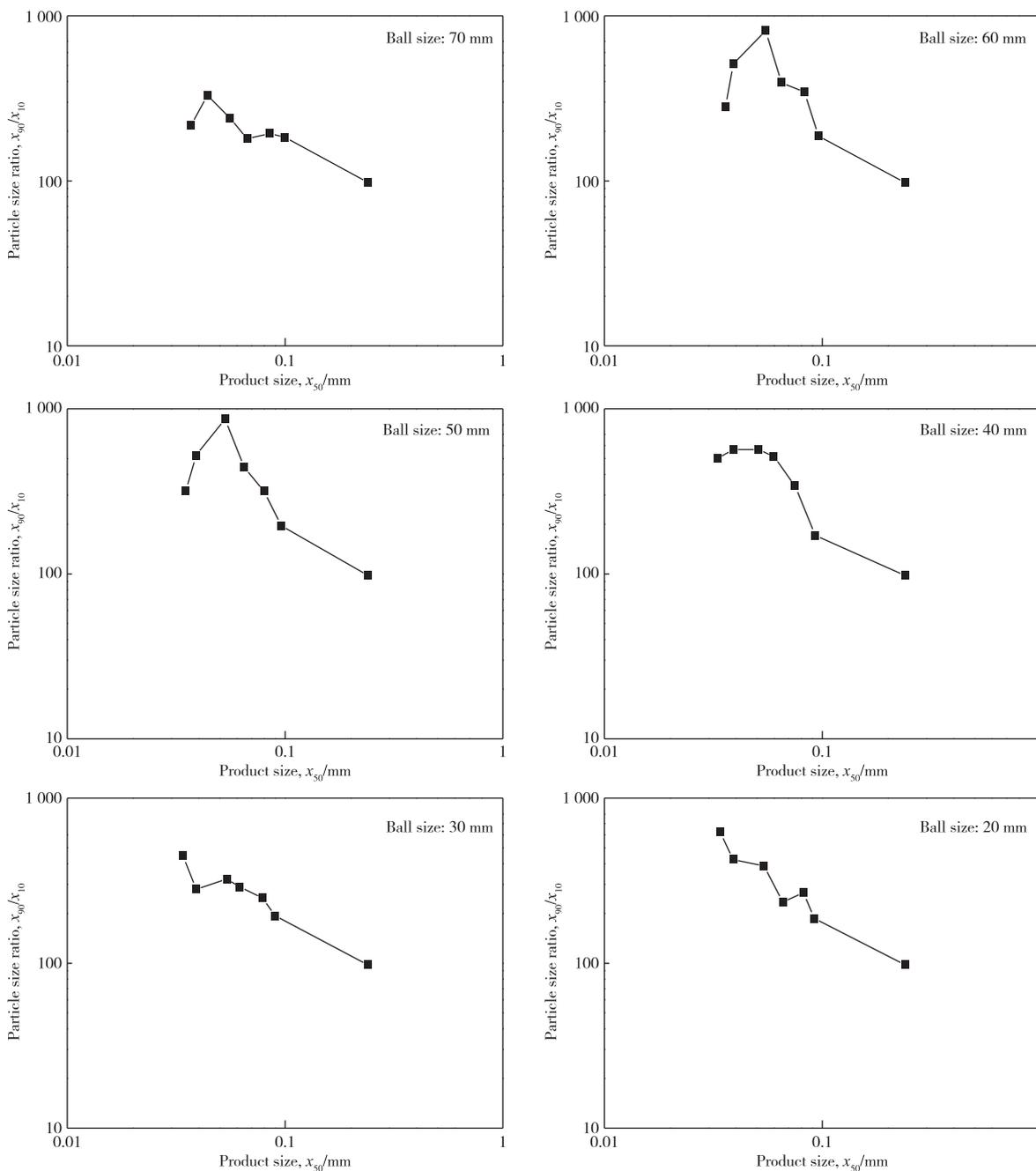


图 5 磨矿产品中  $x_{90}/x_{10}$  相对于  $x_{50}$  (中值粒径) 的变化

Fig. 5 Relation of particle size ratio  $x_{90}/x_{10}$  with respect to the product size  $x_{50}$  (median particle size)

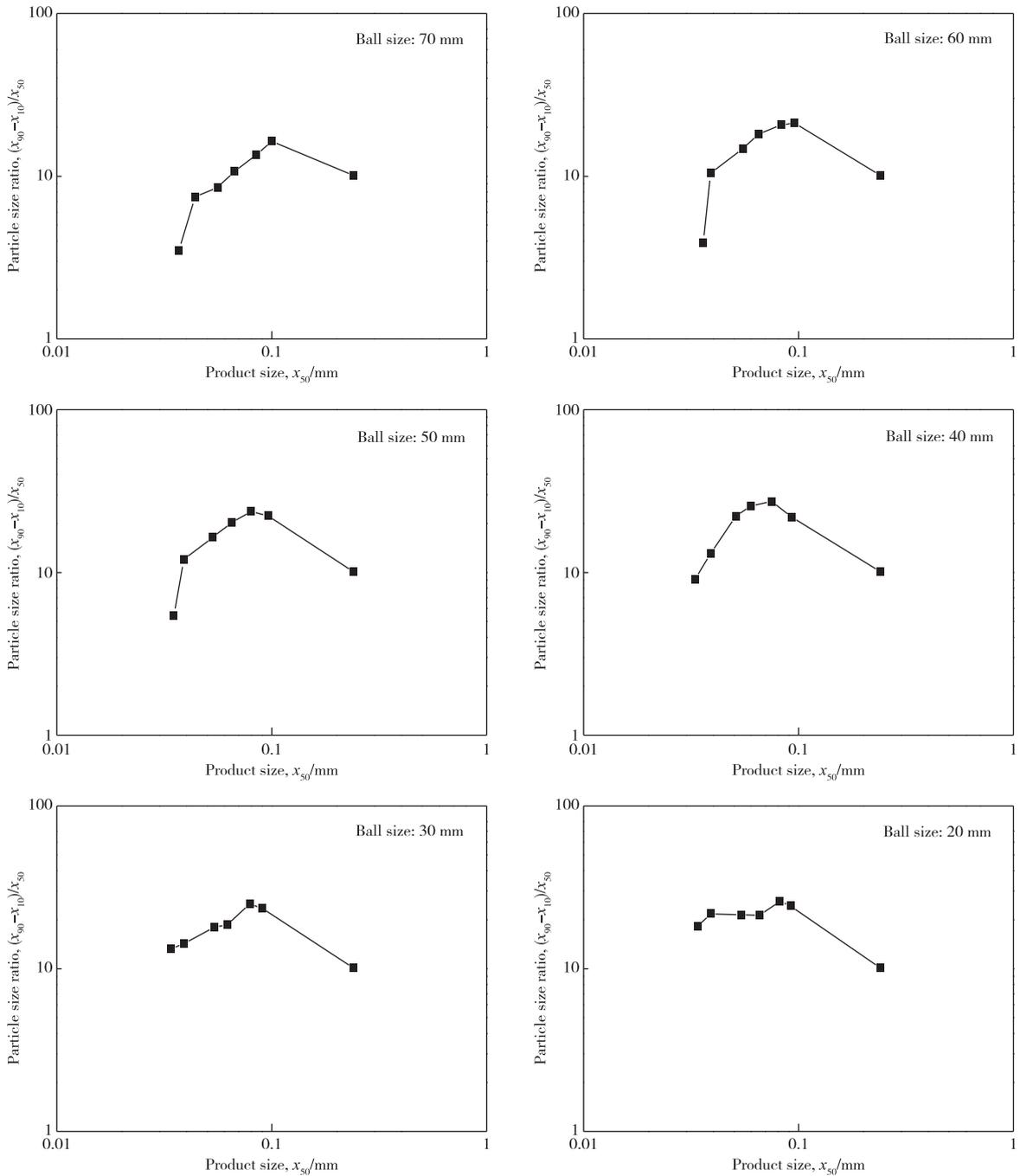


图6 磨矿产品中  $x_{90}-x_{10}$  相对于  $x_{50}$  (中值粒径) 的变化

Fig. 6 Relation of particle size ratio  $x_{90}-x_{10}$  with respect to the product size  $x_{50}$  (median particle size)

### 3.3 磨矿产品颗粒形状

图7为磨矿时间为15 min时,各尺寸钢球的磨矿产品颗粒形状结果,横坐标为产品颗粒尺寸,纵坐标为球形度。

从图7可以看出,磨矿产品球形度在5~1 mm颗粒之间随着钢球尺寸的减小而减小。球形度在5~1 mm之间下降,主要原因可能是冲击力占主导地位,磨矿产品被冲击力破碎后形状变得失圆。

当产品粒径小于1 mm时,产品颗粒的球形度急剧增加,且随着钢球尺寸的减小,球形度增加得更快。结果表明:当颗粒小于1 mm时,磨削力占优势,使颗粒球形度变大;球形度随磨削概率的增大而增大,而磨削概率随钢球尺寸的减小而增大。当产品粒径小于0.04 mm时,产品颗粒球形度的变化趋势趋于平缓,这可能是在磨机内表面和球表面形成黏附颗粒层。0.8~0.3 mm的球形度变

化趋势小于 0.3 mm 以下的球形度变化趋势,产生这种趋势的原因目前尚不清楚,可能的解释是 0.8~0.3 mm 位于冲击力和磨削力的边界之间,冲击力不能充分发挥作用,而磨削力也不能充分发挥作用。

最后,钢球尺寸对球形度有一定的影响,且这种影响与颗粒尺寸成正比。但在一般浮选要求的粒度下,钢球尺寸对球形度的影响较小,只能考虑钢球尺

寸对细度的影响。

从磨矿粒度和粒度分布来看,使用小钢球是磨矿较为有效的操作条件,容易获得较窄的粒度分布,采用大的钢球,磨矿产品粒径分布较宽。在球磨机中,不同尺寸钢球在磨细较细的颗粒中会产生相对较好的球形度,而在较粗的颗粒中会产生较小的球形度。希望本研究的结果能够为矿物工程、水泥加工或其他粉体加工的工业领域提供参考。

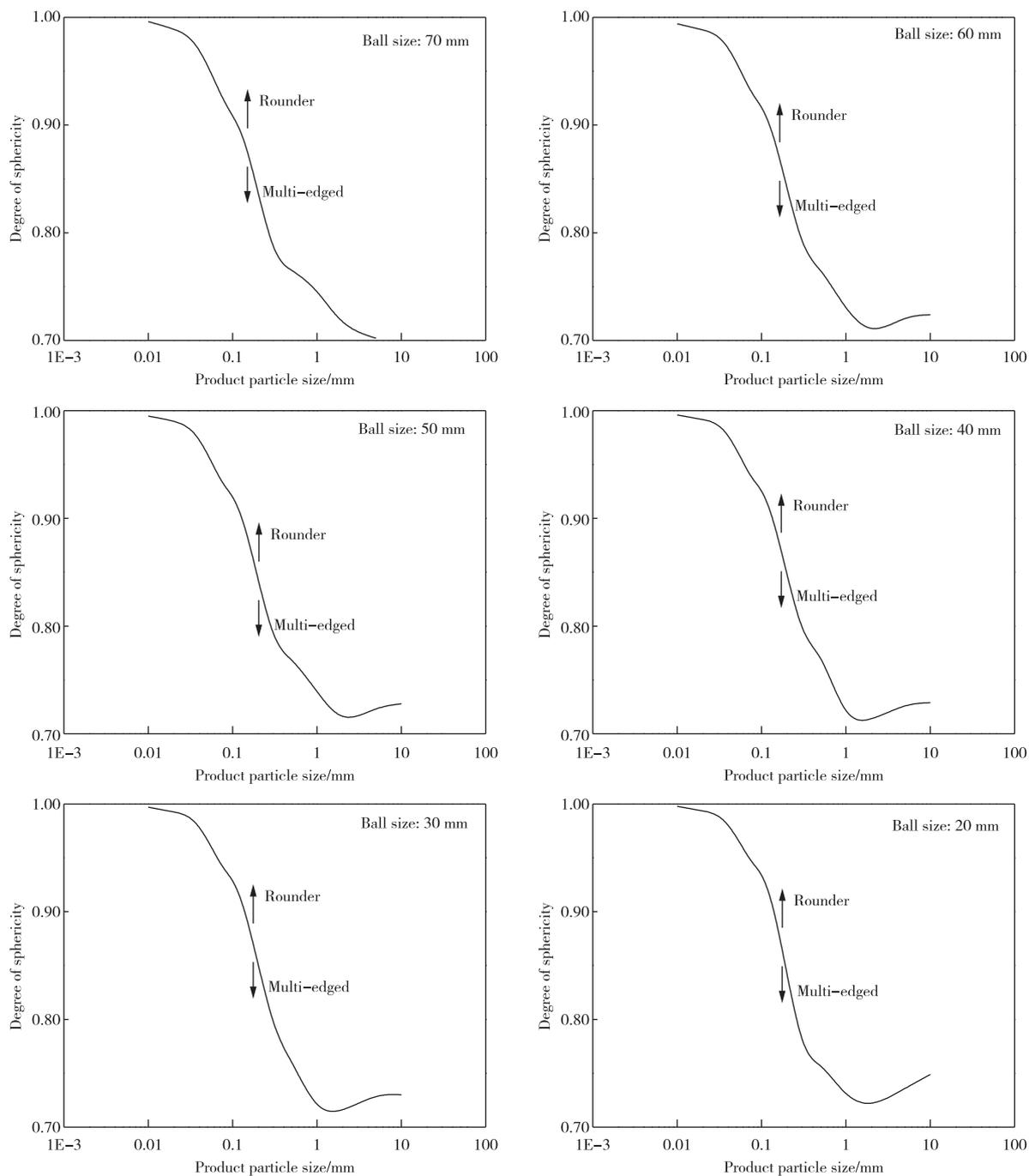


图 7 不同尺寸介质磨矿产品的球形度

Fig. 7 Particle roundness of product sample

## 4 结论

1)各磨矿条件下获得的产品粒径均随磨矿时间的增加而减小。以  $d=70$  mm 钢球为磨矿介质时,大颗粒含量最低,  $-10\ \mu\text{m}$  过磨颗粒含量最高。

2)粒径比  $x_{80}/x_{20}$  随着产品尺寸的减小先增大后减小,各钢球尺寸下的趋势均趋于平缓。中值粒径  $x_{50}$  随钢球尺寸的减小先减小后增大,其中  $d=40$  mm 时最小 ( $x_{50}=0.06$  mm),磨矿能力最强;当钢球尺寸大于或小于 40 mm 时,破碎混合颗粒物料的粉碎能力减弱,  $d=40$  mm 钢球可以有效减少中间颗粒,而  $d>40$  mm 钢球只能有效减少大颗粒,  $d<40$  mm 钢球只能有效减少小颗粒,这是因为大颗粒需要更大的球的冲击力,而小颗粒需要更大的摩擦概率。在相同磨矿时间下,粒径比  $x_{80}/x_{20}$  随钢球尺寸减小先增大后减小,其中  $d=40$  mm 钢球的  $x_{80}/x_{20}$  最大,这种现象可能是由于  $d=40$  mm 介质对大颗粒和小颗粒均难以破碎引起分布粒度较宽。当  $d<40$  mm 时,  $x_{90}/x_{10}$  越来越大。因此,最佳钢球尺寸应综合考虑磨矿产品细度和粒度分布宽度,为解决混合颗粒的磨矿问题,最好选用混合钢球尺寸。

3)粒径比  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$  随着产品粒径的变小先增大后减小,减小的趋势随着钢球尺寸的减小而趋于平缓,  $x_{50}$  在  $0.075\sim 0.085$  mm 范围内达到最大。另一方面,当使用  $d=20$  mm 钢球时,  $(x_{90}-x_{10})/x_{50}$  几乎不会发生变化,其值为 20.66,可能是因为在微细研磨阶段,随着磨矿颗粒的减小,颗粒强度和黏滞力会增大从而限制了磨矿效果。

4)在  $5\sim 1$  mm 颗粒之间产品球形度随着钢球尺寸的减小而减小。当产品粒径小于 1 mm 时,产品颗粒的球形度急剧增加,且随着钢球尺寸的减小,球形度增加更快。当产品粒径小于 0.04 mm 时,产品颗粒球形度的变化趋势趋于平缓,这可能是在磨机内表面和介质表面形成黏附颗粒层。 $0.8\sim 0.3$  mm 颗粒的球形度变化趋势小于 0.3 mm 以下颗粒的球形度变化趋势。

### 参考文献:

- [1] YEKELER M, OZKAN A, AUSTIN L G. Kinetics of fine wet grinding in a laboratory ball mill[J]. Powder Technology, 2001, 114(1-3): 224-228.
- [2] YU Y, MA L, CAO M, et al. Slime coatings in froth flotation: A review [J]. Minerals Engineering, 2017, 114: 26-36.
- [3] KOTAKE N, KUBOKI M, KIYA S, et al. Influence of dry and wet grinding conditions on fineness and shape of particle size distribution of product in a ball mill[J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(1): 86-924.
- [4] QIAN H Y, KONG Q G, ZHANG B L. The effects of grinding media shapes on the grinding kinetics of cement clinker in ball mill [J]. Powder Technology, 2013, 235: 422-425.
- [5] TEKE E, YEKELER M, ULUSOY U, et al. Kinetics of dry grinding of industrial minerals: calcite and barite [J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 67(1): 29-42.
- [6] OLEJNIK T P. Grinding kinetics of granite considering morphology and physical properties of grains [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2012, 48(1): 149-158.
- [7] ZHAO S L, PENG Y J. The oxidation of copper sulfide minerals during grinding and their interactions with clay particles [J]. Powder Technology, 2012, 230: 112-117.
- [8] JAN D B. Energy use of fine grinding in mineral processing [J]. Metallurgical and Materials Transactions E, 2014, 1E: 8-19.
- [9] CHEN X M, PENG Y J. Managing clay minerals in froth flotation-A critical review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 39(5): 289-307.
- [10] VERRELLI D I, BRUCKARD W J, KOH P T L, et al. Particle shape effects in flotation, Part 1: Microscale experimental observations [J]. Minerals Engineering, 2015, 58: 80-89.
- [11] RAHIMI M, DEGHANI F, REZAI B, et al. Influence of the roughness and shape of quartz particles on their flotation kinetics [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(4): 284-289.
- [12] GUVEN O, ÇELİK M S. Interplay of Particle Shape and Surface Roughness to Reach Maximum Flotation Efficiencies Depending on Collector Concentration [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2016, 37(6): 412-417.
- [13] POLKE R, KARBSTEIN H, MÜLLER F. Producing suspensions with steep particle size distributions in fines ranges [J]. Aufbereitungs-Technik, 1995, 36: 464-473.
- [14] KARBSTEIN H, MÜLLER F, POLKE R. Scale-up for grinding in stirred ball mills [J]. Aufbereitungs-Technik, 1996, 37: 469-479.