

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.03.012

# 借助他方试验预测自磨/半自磨单位能量的方法

吴建明

(矿冶科技集团有限公司,北京 100160)

**摘要:** 自磨/半自磨单位能量是自磨/半自磨设备选型的主要参数。自磨/半自磨单位能量预测是自磨/半自磨流程设计的重要环节。目前自磨/半自磨单位能量大多通过现代自磨/半自磨试验方法进行预测,这些试验方法一般由专门开发的实验室试验和计算机模拟软件组成,各自形成独立的体系。然而,有一些特殊类型的自磨/半自磨单位能量预测方法不是开发自己的试验方法,而是借用 Bond 功指数试验、JKTech 落重试验、半自磨功率指数(SPI)试验等他方的现有成熟试验方法获得必要的参数,用于自己开发的预测计算方法中,以低成本享有其存在的空间和独特的优势。本文介绍了利用 Bond 功指数的方法、澳大利亚 Ausenco 公司的方法、加拿大 OMC 公司的方法和澳大利亚 DBC 公司的方法等 4 种这一类自磨/半自磨单位能量的预测方法。

**关键词:** 自磨/半自磨;单位能量;Bond 功指数试验;JK 落重试验;SMC 试验;半自磨功率指数(SPI)试验;效率系数

**中图分类号:** TD921+.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-9492(2024)03-0098-09

## Methods of Predicting Specific Energy of Autogenous and Semi Autogenous Grinding by Means of Others' Tests

WU Jianming

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

**Abstract:** Specific energy required for autogenous grinding/semi autogenous grinding (AG/SAG) is the main parameter for AG/SAG equipment selection. Prediction of specific energy required for AG/SAG is an important part of AG/SAG circuits design. At present, specific energy required for AG/SAG is mostly predicted by modern AG/SAG test methods, which are generally composed of specially developed laboratory tests and computer simulation software, each forming an independent system. However, some special types of prediction methods of specific energy required for AG/SAG do not develop their own test methods, but borrow Bond work index test, JKTech drop weight test, SAG power index (SPI) test and other existing mature test methods to obtain necessary parameters for their own developed prediction calculation methods, to enjoy its existence of space and unique superiority with low cost. This paper introduces such four kinds of prediction methods of specific energy required for AG/SAG, including the method with Bond work index, the method of Ausenco, the method of OMC and the method of DBC.

**Key words:** autogenous grinding/semi autogenous grinding (AG/SAG); specific energy; Bond work index test; JKTech drop weight test; SMC test; SAG power index (SPI) test; efficiency factor

自磨/半自磨由于生产能力强和流程简单成为矿物加工过程的重要粉碎作业方法。可靠的预测自磨/半自磨单位能量是自磨/半自磨成功应用的必要前提。自磨/半自磨单位能量是自磨/半自磨设备选型的主要参数,自磨/半自磨单位能量预测是自磨/半自磨流程设计的重要环节。20 世纪 80 年代以前,

自磨/半自磨单位能量预测主要采用半工业试验的方法,该方法消耗大量人力、物力、财力和时间。80 年代中、后期以来,出现了多种以实验室试验和计算机模拟相结合的现代自磨/半自磨试验方法,逐渐替代了以半工业试验为主的方法。这些试验方法主要有:JK 落重试验、SMC 试验、半自磨功率指数(SPI)

收稿日期:2023-11-20

作者简介:吴建明(1951—),男,山西省屯留县人,学士,研究员,主要从事粉碎技术研究。

试验、MacPherson 自磨可磨性试验、标准自磨设计(SAGDesign)试验等。这些试验方法都开发了各自的实验室试验方法和计算机模拟设计软件,这些技术都不是轻易形成的,都有一定的技术特点,开发过程凝聚了大量的技术、资金和人力投入,不是任何公司都有能力开发的。这些方法中的实验室试验方法都比较简单,一般都作了较全面的公开报道;但计算机模拟设计软件则含有较密集的技术,一般只公开基本模型和主要思路,而不公开内部程序等核心技术。因此,其他公司很难直接使用这些技术。在这种情况下,一些自磨/半自磨设计公司另辟蹊径,不是开发自己的自磨/半自磨试验方法,而是借用他方公开的成熟试验方法获得必要的参数,用于自己开发的单位能量预测方法中。这些方法避免了复杂的试验开发过程和高昂的试验开发成本,具有其独特性。它们虽然不是自磨/半自磨单位能量预测方法的主流,但由于那些主流方法的实际应用不但成本高,而且仍然存在各自的缺点,都会产生一定的误差,因此自磨/半自磨单位能量预测中往往需要采用不同的方法予以验证,从而使这些非主流方法以其较低的成本具有存在的空间和独特的优势。

## 1 利用 Bond 功指数预测自磨/半自磨单位能量的方法

### 1.1 早期的粉磨功率法

20 世纪 80 年代,原加拿大 WRIGHT 工程师有限公司开发了用 Bond 功指数预测自磨/半自磨一球磨流程所需单位能量的方法,90 年代将该方法称为粉磨功率法(Grindpower)<sup>[1-4]</sup>。这一方法不是开发自己的自磨/半自磨试验方法,而是借用 Bond 可磨性试验获得 Bond 功指数,用在自己开发的预测自磨/半自磨一球磨流程所需单位能量的经验公式中。Bond 功指数是美国 Allis Chalmers 公司的 Bond 和我国浙江大学的王仁东提出的粉碎第三理论中反映常规粉碎单位能量的参数,但粉磨功率法的开发者通过深入研究和适当处理使 Bond 功指数同样适用于自磨/半自磨单位能量的计算。

#### 1.1.1 Bond 功指数预测自磨/半自磨单位能量

粉磨功率法利用 Bond 功指数预测自磨/半自磨一球磨流程中自磨/半自磨所需单位能量的方法是:将自磨/半自磨过程从给料到最终产品按照粒度分为三段,第一段从自磨/半自磨给料粒度到相当于棒磨机给料的粒度,用 Bond 低能破碎功指数计算这段需要的能量;第二段从相当于棒磨机给料的粒度

到相当于棒磨机产品的粒度,用 Bond 棒磨功指数计算这段需要的能量;第三段从相当于棒磨机产品的粒度到自磨/半自磨产品粒度,用 Bond 球磨功指数计算这段需要的能量。然后将这三段能量相加,并乘以一个 1.25 的效率系数,以补偿自磨/半自磨与常规粉碎相比的低效性,即为自磨/半自磨需要的单位能量。粉磨功率法的自磨/半自磨经验公式为<sup>[1]</sup>:

$$E_{SAG} = 1.25 \times [10 \times W_{ic} \times (P_C^{-0.5} - F_C^{-0.5}) + 10 \times W_{ir} \times (P_R^{-0.5} - F_R^{-0.5}) \times K_R + 10 \times W_{ib} \times (110^{-0.5} - F_B^{-0.5}) \times K_B] - 10 \times W_{ib} \times (110^{-0.5} - P_{SAG}^{-0.5}) \times K_B \quad (1)$$

式中, $E_{SAG}$ 为预测的自磨/半自磨机小齿轮轴上的单位能量,kWh/t; $W_{ic}$ 、 $W_{ir}$ 和  $W_{ib}$ 为分别为 Bond 低能破碎功指数、Bond 棒磨功指数和 Bond 球磨功指数,kWh/t; $P_C$ 和  $F_C$ 分别为第一段产品和给料中 80%通过的粒度, $\mu\text{m}$ ; $P_R$ 和  $F_R$ 分别为第二段产品和给料中 80%通过的粒度, $\mu\text{m}$ ; $F_B$ 为第三段给料中 80%通过的粒度, $\mu\text{m}$ ; $P_{SAG}$ 为自磨/半自磨产品中 80%通过的粒度,对自磨/半自磨一球磨流程也就是过渡粒度  $T_{80}$ , $\mu\text{m}$ ; $K_R$ 为棒磨机效率系数  $EF$  的混合,直径系数除外; $K_B$ 为球磨机效率系数  $EF$  的混合,直径系数除外。

其中第三段的给料粒度为恒定值 110  $\mu\text{m}$ ,其余各个粒度值需要预先设定。

#### 1.1.2 用 Bond 功指数预测球磨单位能量

粉磨功率法预测自磨/半自磨一球磨流程中球磨所需单位能量的公式见式(2)。

$$E_{BM} = 10 \times W_{ib} \times (P_B^{-0.5} - P_{SAG}^{-0.5}) \times K_B \quad (2)$$

式中, $E_{BM}$ 为球磨机小齿轮轴上的单位能量,kWh/t; $P_B$ 为球磨产品中 80%通过的粒度, $\mu\text{m}$ 。

#### 1.1.3 自磨/半自磨机规格的确定

粉磨功率法还采用其 Grindpower 磨机规格确定程序,使用功率数(Power number)计算确定自磨/半自磨机规格。计算确定磨机规格的经验公式为<sup>[1]</sup>:

$$E_{Net} = P_N \times \rho_c \times D^{2.5} \times L \quad (3)$$

式中, $E_{Net}$ 为测定的磨机净功率,kW; $P_N$ 为从磨机功率测定结果计算的功率数,考虑了磨机速度和磨机筒体和两锥端内的负荷运动的所有方面:磨机负荷内的冲击破碎、磨损、磨蚀、摩擦和旋转,从磨体内发出的热和声、气流损失、磨机负荷的形状、磨机负荷重力中心位置的不确定性,磨机负荷的粒度分布和空载功率; $\rho_c$ 为磨机负荷密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $D$ 为有效磨机直径,即筒体衬板内部直径,m; $L$ 为有效磨机长度(EGL),即磨机筒体内部圆筒部分长度,m。

$$\rho_c = \left( \frac{\varphi_b}{\varphi_t} \times \rho_b + \frac{\varphi_o}{\varphi_t} \times \rho_o \right) \times (1 - \delta_v) + \rho_p \times \delta_v \quad (4)$$

式中,  $\varphi_b$ 、 $\varphi_t$  和  $\varphi_o$  为钢球、总负荷和矿石体积占磨机有效容积的体积分数;  $\delta_v$  为负荷内的空隙占负荷的体积分数;  $\rho_b$ 、 $\rho_o$  和  $\rho_p$  分别为钢球、矿石和矿浆的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

确定了需要的净粉磨功率后, 在 Grindpower 磨机规格确定程序中输入驱动类型(单小齿轮轴、双小齿轮轴或无齿轮驱动)、处理要求生产能力的预期磨机数量、预先考虑的球荷体积、磨机总体积充填率、磨机临界转速和磨机内矿浆密度等条件。

Grindpower 磨机规格确定程序给功率数赋值后计算初步磨机直径和  $D:L$  值(在短筒型磨机情况下为 3:1)。将这一初步直径调整到最接近的标准名义直径, 然后重新计算有效筒体长度(EGL)。输入标准磨机 EGL 并对例如磨机速度等操作条件进行略微调整, 使计算的磨机 EGL 与选择的标准 EGL 一致。在其他操作条件下重复这一过程并检查需要的净驱动功率以保证其高于粉磨需要的功率。为了确定电动机功率, 按提示输入预先考虑的最大球荷, 如果必要在较高的磨机速度下再重复。然后计算电动机功率和选择标准电动机功率。这一方法可以用于确定短筒型和长筒型自磨/半自磨机以及砾磨机规格。

需要注意的要点是, 对任何运转的自磨/半自磨机, 可以通过经控制的“突然”停车, 根据详细观察的磨机内部情况计算功率数。

## 1.2 美国 Fluor 公司预测自磨/半自磨单位能量的方法

2010 年以来, 美国 Fluor 公司对多年应用粉磨功率法的经验进行了分析和总结, 根据其结论对自磨/半自磨一球磨流程单位能量计算方法进行了全面改进。研究认为, Bond 功指数是预测半自磨一球磨流程(SAB)、半自磨一球磨一砾石破碎流程(SABC)和单段半自磨流程(SSS)中半自磨机和球磨机所需单位能量的卓越工具。然而到目前为止, 未见 Fluor 公司关于其方法计算公式的报道<sup>[3]</sup>。

### 1.2.1 用 Bond 功指数预测自磨/半自磨单位能量

Fluor 公司的方法适合以原矿为给料、以部分或全部第二段破碎产品为给料的半自磨, 以及仿效砾石破碎对半自磨单位能量的影响。Fluor 公司的方法假设半自磨机以正常的方式操作, 也就是不存在以下情况: 过多的提升板、不适当的衬板设计、堵塞格子板、过高的浓度或过小的补加球尺寸。Fluor 公司的方法计算自磨/半自磨单位能量的主要特点是:

1) 以 Bond 棒磨功指数为主, 因为 Bond 功指数棒磨机使用的钢棒充填率为 12%, 与大量的生产半自磨机的钢球充填率一致。由于 1 180  $\mu\text{m}$  Bond 棒磨功指数的计算结果与实际自磨/半自磨能量比较吻合, 因此规定新计算方法中使用 1 180  $\mu\text{m}$  Bond 棒磨功指数。在这个粒度下 Bond 棒磨功指数相当于半自磨机最大破碎速率对应的能量。1 180  $\mu\text{m}$  的给料粒度与 Morrell 方法中划分粗磨和细磨的  $F_{80}$  为 750  $\mu\text{m}$  的给料粒度相吻合, 这从另一个角度说明了选择 1 180  $\mu\text{m}$  Bond 棒磨功指数的合理性。

2) 以 Bond 破碎功指数为辅, Bond 破碎功指数在计算自磨/半自磨给料的粗粒级方面有一定作用。

3) Bond 球磨功指数对自磨/半自磨单位能量计算基本没有作用, 不再使用 Bond 球磨功指数。

4) 将半自磨机给料划分为若干粒级, 每个粒级都有一个反映该粒级破碎速率与最大破碎速率之间关系的效率系数。每个粒级需要的单位能量使用 Bond 公式以与单段球磨计算相同的方式计算, 从给料粒度向下到中间粒度 1, 从中间粒度 1 向下到中间粒度 2, 以此类推直到达到产品粒度。那么半自磨所需总单位能量等于每个粒级单位能量按该粒级质量分数加权之和, 每个粒级都代表了总的半自磨机给料和属于该粒级的效率系数。

### 1.2.2 用 Bond 功指数预测球磨单位能量

对早期粉磨功率法球磨单位能量计算方法的回顾发现, 直接使用 Bond 方法不能准确预测自磨/半自磨一球磨流程中球磨的单位能量。这是因为 Bond 方法是常规粉碎开发的, 而半自磨机排料中含有的细粒明显多于常规粉碎的球磨机给料。Fluor 公司的方法虽然仍采用 Bond 方法计算自磨/半自磨一球磨流程的球磨机单位能量, 但对计算方法进行了改进。改进的地方是将自磨/半自磨排料以 3.36 mm 的粒度分为粗粒级和细粒级两个部分, 粗粒级用 Bond 棒磨功指数计算单位能量, 细粒级用 Bond 球磨功指数计算单位能量, 并分别采用相应的效率系数, 然后将两个部分的单位能量分别乘以它们各自的质量分数, 将乘积相加就是球磨机需要的总单位能量, 也就是球磨机小齿轮轴单位能量。

近些年来, 出现了新的自磨/半自磨机—立式螺旋搅拌磨机流程。立式螺旋搅拌磨机是采用螺旋搅拌器的立式磨机, 常见的有 Vertimill 搅拌磨机和塔磨机。在这一流程中立式螺旋搅拌磨机单位能量的计算方法是: 使用 Bond 球磨功指数按照 Bond 方法计算, 然后将计算结果乘以 0.67 的系数将球磨所需

单位能量转换为立式螺旋搅拌磨机单位能量<sup>[4]</sup>。

## 2 Ausenco 公司预测自磨/半自磨单位能量的方法

在澳大利亚 Ausenco 服务有限公司基于功率预测粉碎流程单位能量的方法中,未开发自己的试验方法,而是使用现有的成熟试验,在自己开发的基于功率的粉碎流程计算程序 Ausgrind 中采用其试验结果,以预测粉碎流程单位能量。Ausenco 公司粉碎流程设计方法步骤如图 1 所示<sup>[5-6]</sup>。

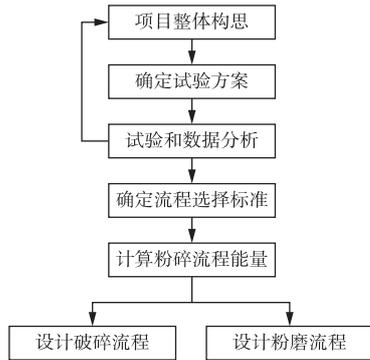


图 1 Ausenco 公司粉碎流程设计方法步骤

Fig. 1 Ausenco comminution process design procedure

### 2.1 试验及样品

按照 Ausgrind 粉碎流程计算程序输入参数的需要,进行最终产品粒度  $P_{80}$  为  $150 \mu\text{m}$  以及  $P_{80}$  不是  $150 \mu\text{m}$  时的 Bond 破碎、棒磨和球磨功指数试验,获得 Bond 破碎功指数  $W_{ic}$ 、棒磨功指数  $W_{ir}$  和球磨功指数  $W_{ib}$  (kWh/t)。进行 SMC 试验或 JK 落重试验,获得冲击粉碎参数  $A$  和  $b$ 、粒度分布指数  $t_{10}$  和落重指数  $DW_i$  (kW · h/m<sup>3</sup>)。由于 SMC 试验不使用大于  $31.5 \text{ mm}$  的颗粒,当试验介质能力很强的矿石 ( $A \times b$  值低于 35) 时,其结果可能会有偏差。因此,通常使用 JK 落重试验数据来校准 SMC 试验结果。如果产品粒度  $P_{80}$  不是  $150 \mu\text{m}$ ,能量差按照 Bond 关系计算。试验样品的性质和数量须满足试验工作的需要。

### 2.2 确定粉碎流程设计方案

在设计粉碎流程时首先要确定项目方案。确定项目方案必须考虑到矿体的位置、矿石的性质(初步特征)、当地的环境限制、产品技术要求以及水源和能源成本。在此基础上确定获得最终产品的初步加工方案,然后按照表 1 根据项目生产能力和矿石介质能力初步选择粉碎流程。

表 1 根据项目生产能力和矿石介质能力初步选择流程

Table 1 Preliminary selection of streams based on project production capacity and ore media capacity

生产能力/(Mt · a <sup>-1</sup> )	高介质能力矿石	中等介质能力矿石	低介质能力矿石
<0.5	阶段破碎—球磨	1~2 段破碎—半自磨或球磨	单段半自磨
0.5~2	阶段破碎—球磨 半自磨—球磨—砾石破碎	半自磨—球磨	单段半自磨 半自磨—球磨
1~5	半自磨—球磨—砾石破碎	半自磨—球磨 自磨—球磨—砾石破碎	单段半自磨 半自磨—球磨
5~10	半自磨—球磨—砾石破碎	半自磨—球磨 自磨—球磨—砾石破碎	半自磨—球磨
>10	半自磨—球磨—砾石破碎 阶段破碎—辊压机—球磨	半自磨—球磨—砾石破碎	半自磨—球磨

### 2.3 预测粉碎流程单位能量

Ausenco 公司粉碎流程单位能量预测方法采用 Ausgrind 粉碎流程计算程序进行设计计算,该程序的输入包括 Bond 功指数试验(Bond 破碎、棒磨和球磨功指数试验)、JK 落重试验、SMC 试验、SPI 试验和 MacPherson 试验获得的矿石破碎数据、设备几何形状、流程结构、效率系数和操作条件。输出主要是粉碎流程总单位能量和流程中各部分的单位能量。Ausgrind 程序拥有一个包含了来自许多操作,涵盖了广泛的矿石类型和生产能力的操作数据和流程类型数据库。

Ausgrind 程序计算的流程总单位能量  $E_{\text{total}}$  (kWh/t) 由式(5)计算。

$$E_{\text{total}} = [E_{150} \times (f_{\text{SAG}} - F_{\text{effect}})] \pm E_{\text{final}} \quad (5)$$

式中,  $E_{150}$  为最终产品粒度  $P_{80}$  为  $150 \mu\text{m}$  时,在不使用任何效率系数  $EF$  的情况下,按照 Bond 方法使用  $W_{ic}$ 、 $W_{ir}$  和  $W_{ib}$  计算的破碎机—棒磨机—球磨机流程需要的总单位能量, kWh/t;  $f_{\text{SAG}}$  为效率系数,是落重指数  $DW_i$  的函数,取决于矿石性质和流程结构,确定  $f_{\text{SAG}}$  的经验公式来自 Ausenco 的数据库;  $F_{\text{effect}}$  为给料粒度  $F_{80}$  的影响系数,例如当存在强烈爆破作业或第二段破碎,给料粒度较细时;  $E_{\text{final}}$  为最终产品

粒度  $P_{80}$  不是  $150 \mu\text{m}$  时,在不使用任何效率系数  $EF$  的情况下,按照 Bond 方法计算的从  $150 \mu\text{m}$  粉碎到最终产品粒度  $P_{80}$  的单位能量,  $\text{kWh/t}$ 。最终产品粒度  $P_{80}$  大于  $150 \mu\text{m}$  时取负号,小于  $150 \mu\text{m}$  时取正号。

自磨/半自磨流程单位能量  $E_{\text{SAG}}$  ( $\text{kWh/t}$ ) 用下式计算:

$$E_{\text{SAG}} = E_{\text{BC}} \times K \tag{6}$$

式中,  $E_{\text{BC}}$  为基本半自磨单位能量,是矿石介质能力 ( $DW_i$ ) 的函数;  $K$  为调整系数,包括长径比系数、球荷量 (%) 系数、给料粒度系数和砾石循环量 (%) 系数等。当设备和操作条件如长径比、球荷量、给料粒度和砾石破碎机特性等与基本半自磨流程不同时对单位能量进行调整。

砾石破碎机单位能量使用供应商的数据单独计算。

球磨流程单位能量等于粉碎流程总单位能量  $E_{\text{total}}$  减去自磨/半自磨流程单位能量  $E_{\text{SAG}}$  的差值。

$$E_{\text{BM}} = E_{\text{total}} - E_{\text{SAG}} \tag{7}$$

### 3 加拿大 OMC 公司预测自磨/半自磨单位能量的方法

加拿大 Orway 矿物咨询公司 (OMC) 采用基于功率的方法 (Power-based approach) 预测粉磨流程单位能量。该公司未开发自己的试验方法,而是利用一些现有的其他公司的成熟试验方法,在自己开发的 OMC 功率模型软件中采用上述试验结果,以预测粉碎流程单位能量。该公司粉磨流程设计方法步骤如图 2 所示<sup>[5,7]</sup>。

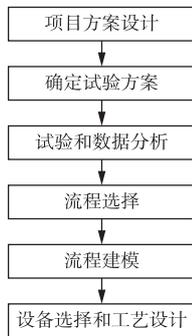


图 2 OMC 公司粉磨流程设计步骤  
Fig. 2 OMC grinding process design steps

### 3.1 试验及其样品

试验目的是了解矿体的抗粉碎能力和磨损特性。试验样品的选择是由试验目的和内容决定的。选择样品时须考虑矿石类型、是否存在多个矿床、矿脉和/或晶体、岩石类型变化、沉积层深度、矿石品位、采矿方法和采矿计划等因素。钻探岩芯经常作为适宜的样品材料,其数量和类型取决于试验研究要求、矿体的规模和复杂性、项目进度和预算以及项目风险状况。

试验工作分为三个阶段:第一阶段在项目开始时确定项目范围和初步工程评估,在此期间根据已知的主要岩石类型选择综合样品;第二阶段进行预可行性和可行性研究,试验确定矿石抗粉碎能力、岩石特性、岩石类型与矿化作用之间的关系,以预测磨机生产能力和估计最终操作成本,这个阶段根据储层金属和储层岩石岩性的分布,从母体岩芯群中选取岩芯子样品,取样必须具有代表性和空间分散性;第三阶段为工程采购和施工管理 (EPCM) 阶段,进行额外的试验工作以降低设备采购的风险,特别关注的是在项目完成回收期之前的操作年限,这个阶段根据空间代表性和/或矿山生产周期采集样品。

OMC 公司采用一套称为先进介质能力试验 (Advanced Media Competency Test, AMCT) 的试验方法。这套试验方法中的试验并非该公司自己开发的,而是利用现有的成熟试验方法。对于钻探岩芯样品,根据粉碎流程结构和岩芯数量和粒度,采用原 Allis Chalmers 公司的自磨介质试验和 Bond 功指数试验 (包括冲击、棒磨、球磨和金属磨损)、无约束抗压强度试验 (UCS)、SMC 试验和 JK 落重试验 (DWT)。对于软质的、角砾状矿石类型的或非均质的矿石也采用 SPI 和标准自磨设计试验结果。试验样品的性质和数量须满足上述试验工作的需要。

### 3.2 粉碎方案设计和流程选择

粉碎方案设计需要考虑矿体的位置、地质情况和矿体类型、可利用的水和环境限制条件以及基础设施的获得。影响粉碎流程选择的主要因素是要求的生产能力、矿石特性的影响以及产品粒度。表 2 所示为生产能力、粉磨粒度和矿石特性与可供选择的粉碎流程之间的关系。

表2 生产能力、粉磨粒度和矿石特性与可供选择的粉碎流程之间的关系

Table 2 Relationship between production capacity, grinding size and ore characteristics and alternative comminution circuit

矿石特性	磨损特性	产品粒度	可供选择的粉碎流程		
			生产能力<4 Mt/a	4 Mt/a<生产能力<8 Mt/a	生产能力>8 Mt/a
软质	非磨蚀性	细	单段半自磨 洗矿-球磨	半自磨-球磨 洗矿-球磨 单段半自磨	半自磨-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎
		粗	单段半自磨 洗矿 棒磨	单段半自磨 洗矿	半自磨-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎
	非磨蚀性	细	单段半自磨 三段破碎-球磨 半自磨-球磨	半自磨-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨
		粗	单段半自磨 棒磨	半自磨-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨
中等介质能力和功指数	非磨蚀性	细	单段半自磨 半自磨-球磨 自磨-球磨 自磨-球磨-砾石破碎	单段半自磨 半自磨-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 自磨-球磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-砾磨
		粗	单段半自磨 单段半自磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎	单段半自磨 半自磨-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-砾磨
	非磨蚀性	细	单段半自磨 三段破碎-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨
		粗	单段半自磨-砾石破碎 单段自磨-砾石破碎 三段破碎-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎 两段破碎-单段半自磨 棒磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎
强介质能力和功指数	非磨蚀性	细	单段半自磨 自磨 三段破碎-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎 辊压机-砾磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-砾磨
		粗	单段自磨-砾石破碎 单段半自磨-砾石破碎 两段破碎-单段半自磨 半自磨-球磨-砾石破碎 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎 辊压机-砾磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-砾磨
	磨蚀性	细	单段半自磨 自磨 三段破碎-球磨 半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎 辊压机-砾磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-砾磨
		粗	单段自磨-砾石破碎 单段半自磨-砾石破碎 两段破碎-单段半自磨 半自磨-球磨-砾石破碎 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 自磨-砾磨-砾石破碎 辊压机-砾磨	半自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-球磨 两段破碎-半自磨-球磨-砾石破碎 砾石破碎 自磨-球磨-砾石破碎 辊压机-砾磨

### 3.3 粉碎流程单位能量的计算

OMC 公司基于功率的方法利用其 OMC 功率模型软件进行粉磨流程建模和确定磨机规格。OMC 功率模型软件是基于单位粉磨能量进行流程计算的公司内部软件。该软件包括三个计算自磨/半自磨机单位能量( $E_{SAGi}$ )的模型和四个总流程单位能量( $E_{TOT}$ )的模型。

自磨/半自磨一球磨流程总单位能量  $E_{TOT}$  (kWh/t)由式(8)计算。

$$E_{TOT} = 10 \times W_b \times [(75^{-0.5} - 150000^{-0.5}) \times f_{SAG} - (F_{80}^{-0.5} - 150000^{-0.5}) - (75^{-0.5} - P_{80}^{-0.5})] \quad (8)$$

式中,  $f_{SAG}$  为效率系数, 给料粒度  $F_{80}$  为 150 mm 和产品粒度  $P_{80}$  为 75  $\mu\text{m}$  时, 粉磨流程所需功率与理论上需要的功率即 Bond 球磨功指数  $W_b$  之比。由实验室矿石特性试验确定  $f_{SAG}$  时, 主要根据  $W_{ib}$  和  $t_{10}$ 。  $t_{10}$  可由 SMC 试验和 JK 落重试验结果中的参数  $A, b$  或 Allis Chalmers 公司自磨介质试验结果的一 6 mm 确定。  $f_{SAG}$  有所有权;  $F_{80}$  为给料中 80% 通过的粒度,  $\mu\text{m}$ ;  $P_{80}$  为产品中 80% 通过的粒度,  $\mu\text{m}$ 。

自磨/半自磨流程单位能量  $E_{SAG}$  (kWh/t) 使用 OMC Multivariabie 模型公式(9)计算。

$$E_{SAG} = a \cdot (A \times b)^c \cdot F_{80}^d \cdot (1 + g(1 - e^{-h \cdot \varphi}))^{-1} \cdot \Psi^i \cdot f(A_r) \cdot f(K) \quad (9)$$

式中,  $E_{SAG}$  为自磨/半自磨机小齿轮轴所需单位能量, kWh/t。对于无齿轮驱动磨机为驱动筒体所需单位能量;  $A \times b$  为表观函数, 由 SMC 试验或 JK 落重试验结果获得;  $F_{80}$  为给料中 80% 通过的粒度,  $\mu\text{m}$ ;  $\varphi$  为钢球充填率;  $\Psi$  为磨机临界转速;  $f(A_r)$  为磨机长径比函数;  $f(K)$  为流程中的砾石破碎机函数;  $a, c, d, g, h, i$  为经验常数, 使用 OMC 数据库中的数据拟合。

球磨流程单位能量是自磨/半自磨一球磨流程总单位能量  $E_{TOT}$  减去自磨/半自磨流程单位能量  $E_{SAG}$  的差值。

## 4 澳大利亚 DBC 公司预测自磨/半自磨单位能量的方法

澳大利亚 Don Burgess Consuting and Technical Services(DBC)公司开发的 DBC 方法根据 Bond 第三理论公式计算自磨/半自磨单位能量。这一方法也没有开发自己的试验方法, 而是借用 Bond 功指数试验和 JK 或 SMC 落重试验方法<sup>[8]</sup>。DBC 方法将整个自磨/半自磨过程按照粒度划分为几个阶段, 分别用不同的 Bond 功指数代入 Bond 第三理

论公式计算单位能量。从自磨/半自磨给料粒度到 25 mm 用 Bond 破碎功指数计算; 从 25 mm 到 3 mm 用 JK 落重试验参数  $A \times b$  值转换的 Bond 棒磨功指数计算; 从 3 mm 到 1 mm 用 Bond 棒磨功指数计算; 从 1 mm 到过渡粒度  $T_{80}$  (最细 75  $\mu\text{m}$ ) 用 Bond 球磨功指数计算; 如果可获得 JK 磨蚀试验参数  $t_a$  值, 可将其转换为 Bond 球磨功指数, 用于指导计算。然后将几个阶段计算的单位能量相加即为自磨/半自磨总单位能量。JK 落重试验参数  $A \times b$  值转换为 Bond 棒磨功指数的关系见图 3, JK 磨蚀试验参数  $t_a$  值转换为 Bond 球磨功指数的关系见图 4。

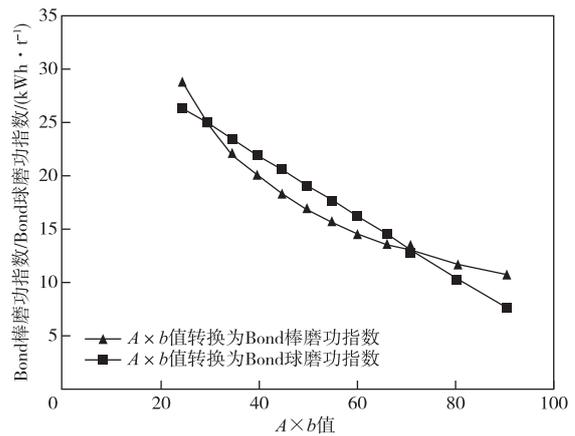


图 3  $A \times b$  值替换为 Bond 功指数的关系

Fig. 3  $A \times b$  value replaced by the relation of Bond work index

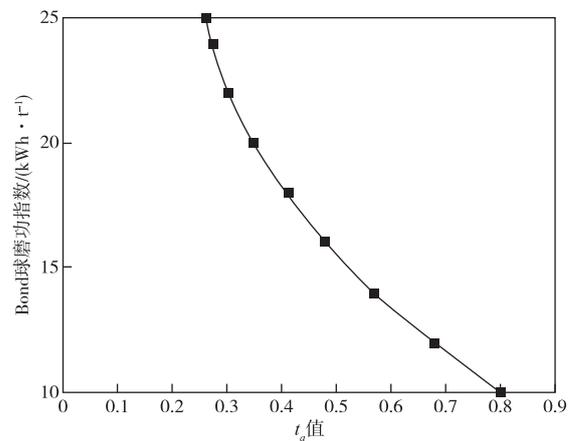


图 4  $t_a$  值转换为 Bond 球磨功指数的关系

Fig. 4 Relationship between the conversion of  $t_a$  value to Bond ball milling work index

DBC 方法采用 Bond 方法计算自磨/半自磨单位能量, 计算中未使用 Bond 方法的 8 个效率系数, 而是使用一个自磨/半自磨效率系数。自磨/半自磨效率系数与过渡粒度  $T_{80}$  有关, 由图 5 查得。

按照上面方法计算的自磨/半自磨单位能量仅

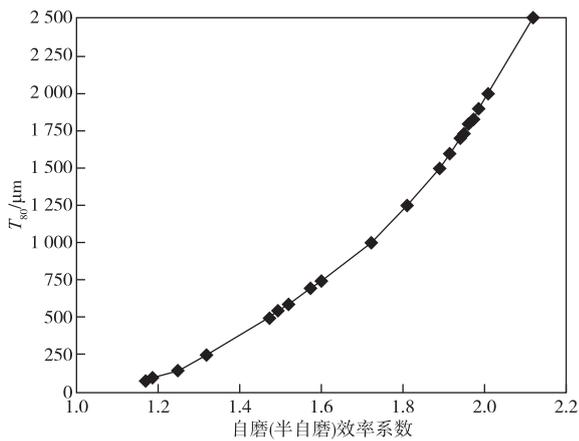


图5 在物料密度为  $2.78 \text{ kg/m}^3$ 、 $A \times b$  值为 40 的条件下,自磨(半自磨)效率系数与  $T_{80}$  的关系

Fig. 5 Relationship between efficiency coefficient of autogenous grinding(semi-autogenous grinding) and  $T_{80}$  under the condition that the material density is  $2.78 \text{ kg/m}^3$  and  $A \times b$  value is 40

适用于基本自磨/半自磨条件下,即短筒型自磨/半自磨机、没有砾石破碎机、物料密度为  $2.78 \text{ kg/m}^3$ 、 $A \times b$  值为 40。如果所计算的自磨/半自磨条件有所不同,则还需要进行以下修正。

1)如果物料密度  $S_g$  不是  $2.78 \text{ kg/m}^3$ ,那么密度的变化对自磨/半自磨单位能量将会造成影响,需要在计算的自磨/半自磨单位能量上增加密度变化对自磨/半自磨单位能量造成的影响  $E_{SG}$  (kWh/t)。 $E_{SG}$  由式(10)计算。

$$E_{SG} = E_{750} \times (2.78/S_g)^{0.23} - E_{750} \quad (10)$$

式中, $E_{750}$  为  $T_{80}$  为  $750 \mu\text{m}$  时的自磨/半自磨单位能量,kWh/t; $S_g$  为物料密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

2)如果  $A \times b$  值不是 40,意味着物料更硬或更软,这将影响自磨/半自磨单位能量。当  $T_{80}$  小于  $150 \mu\text{m}$  时,需要对计算的自磨/半自磨单位能量按照图 6 进行修正。

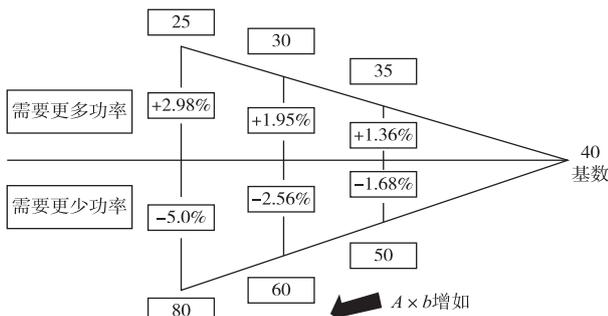


图6 自磨(半自磨)单位能量随  $A \times b$  值的变化

Fig. 6 Variation of unit energy of autogenous grinding(semi-autogenous grinding) with  $A \times b$  values

3)如果使用长筒型磨机,那么由于长筒型磨机效率低于短筒型磨机,需要在计算的自磨/半自磨单位能量加上单位能量乘以低效系数进行修正。如果磨机的内部长度与直径之比  $L/D$  为  $0.7 \sim 0.9$ ,低效系数取 5%;如果磨机的  $L/D$  大于  $0.9$ ,低效系数取 7.5%。

## 5 结论

本文介绍了 4 种借助他方试验预测自磨/半自磨单位能量的方法。原加拿大 WRIGHT 工程师有限公司和美国 Fluor 公司利用 Bond 功指数与自磨/半自磨单位能量之间的关系进行预测。澳大利亚 Ausenco 公司采用 Ausgrind 粉碎流程计算程序进行预测,该程序输入了 Bond 功指数试验、JK 落重试验、SMC 试验、SPI 试验和 MacPherson 试验获得的矿石破碎数据。加拿大 Orway 矿物咨询公司(OMC)采用原 Allis Chalmers 公司的自磨介质试验和 Bond 功指数试验、无约束抗压强度试验(UCS)、SMC 试验、JK 落重试验(DWT)、SPI 试验和标准自磨设计试验等结果进行预测。澳大利亚 Don Burgess Consulting and Technical Services(DBC)公司借用 Bond 功指数试验和 JK 或 SMC 落重试验方法,根据 Bond 第三理论公式计算自磨/半自磨单位能量。其中所借用的试验方法都是现有成熟的和公开报道的。这些预测自磨/半自磨单位能量的方法在试验结果的应用和数学模型的推导方面有着各自不同的思路和特点,对于自磨/半自磨流程设计和单位能量计算都有值得借鉴之处。

### 参考文献

- [1] BARRATT D J. An update on testing, scale-up and sizing equipment for autogenous and semi-autogenous grinding circuits[C]//MULAR A L, BARRATT D J, KNIGHT D A. Proceedings of an International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology 1989. Vancouver: University of British Columbia,1996:25-46.
- [2] BARRATT D, SHERMAN M. Selection and sizing of autogenous and semi-autogenous mills[C]//MULAR A L, HALBE D N, BARRATT D J. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control Proceedings. New York: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.,2002:755-782.
- [3] SHERMAN M. Bond is back! [C] // MAJOR K, FLINTOFF B C, KLEIN B, et al. Proceedings of International Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology

2011. Vancouver: Canadian Institute of Mining and Metallurgy,2011;1-13.

[4] SHERMAN M, The bonds that can't be broken[C]// KLEIN B, MCLEOD K, ROUFAIL R, et al. Proceedings of an International Semi-Autogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology 2015. Vancouver; the Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering of the University of British Columbia, the Canadian Mineral Processors of Canadian institute of Mining, Metallurgy and Petroleum and the Canadian Mining Industry Research Organization,2015: 1-11.

[5] MORRELL S. Chapter 3. 12 Testing and calculations for comminution machines [ C ]//DUNNE R C, KAWATRA S K, YOUNG C A. SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook, Vol. 1. New York: Society for Mining, Metallurgy & Exploration,2019;529-565.

[6] LANE G, FOGGIATTO B, BUENO M. Power-based comminution calculations using ausgrin [ C ]//

ÁLVAREZ M, DOLL A, KRACHT W, et al. Proceedings of 10th International Mineral Processing Conference—Procemin 2013. Santiago: The Mining Engineering Department, Universidad de Chile, Gecamin,2013;1-13.

[7] SCINTO P, FESTA A, PUTLAND B. OMC power-based comminution calculations for design, modelling and circuit optimization[C]// BLATTERP, ZINCK J. Proceedings of 47th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference. Ottawa; Canadian Institute of Mining Metallurgy & Petroleum,2015:271-285.

[8] BURGESS D. A method of calculating autogenous/ semi-autogenous grinding mill specific energies using a combination of Bond work indices and Julius Kruttschnitt parameters, then applying efficiency factors[C]// Proceedings of the 11th Mill Operators' Conference. Hobart; Australasian Institute of Mining and Metallurgy,2012;37-44.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 97 页)

[11] 陈思雨,刘四,陈章鸿. 我国重晶石选矿与提纯研究现状及展望[J]. 矿产保护与利用,2020,40(6):33-39.  
CHEN Siyu, LIU Siqing, CHEN Zhanghong. Present situation and outlook of barite flotation and purification in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(6):33-39.

[12] 严伟平,曾小波,杨耀辉. 四川某稀土尾矿综合回收利用的选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2019(4): 9-15.  
YAN Weiping, ZENG Xiaobo, YANG Yaohui. Study on beneficiation test of comprehensive recovery and utilization of a rare earth tailings in Sichuan province [ J ]. Nonferrous Metals ( Mineral Processing Section ), 2019(4):9-15.

[13] 肖舜元,欧阳林莉,翟旭东,等. 提高某含重晶石萤石矿回收率试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2023(1): 152-157.  
XIAO Shunyuan, OUYANG Linli, ZHAI Xudong, et al. Study on improving comprehensive recovery and utilization of a barite-fluorite associated ore [ J ]. Nonferrous Metals ( Mineral Processing Section ), 2023(1):152-157.

(本文编辑 刘水红)