

圆锥破碎机的多目标规划设计*

黄冬明^{1,2} 武殿梁^{1,2} 范秀敏^{1,2} 姚福生¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030;

2. 上海市网络化制造与企业信息化重点实验室 上海 200030)

摘要: 为研制符合新型层压破碎工作原理的圆锥破碎机, 基于总体平衡模型和散体物料运动学特性, 提出圆锥破碎机破碎腔型分层研究模型和腔型优化设计新方法。提出破碎机生产率计算新方法和圆锥破碎机操作模型, 建立破碎机腔型优化、生产率优化和破碎产品粒度分布优化的计算模型。研究分析基于层压破碎原理的破碎腔型、生产率和破碎产品粒度之间的相互耦合关系模型, 建立圆锥破碎机的多目标规划模型, 能够为自主研发开发新型、高效、节能的现代高能圆锥破碎机奠定理论基础。

关键词: 圆锥破碎机 层压破碎 散体物料 总体平衡模型 优化设计

中图分类号: TD451

0 前言

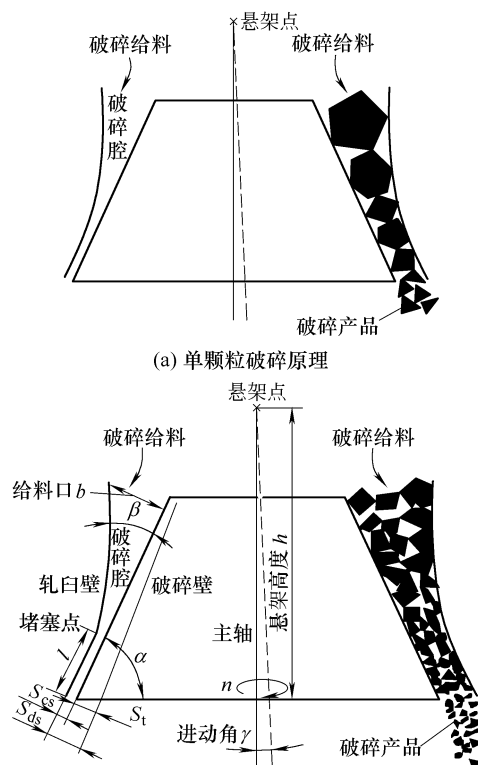
圆锥破碎机是脆性物料中细碎的主要设备, 广泛用于矿山、冶炼、水利、公路、铁路和化工等工业部门。国产圆锥破碎机于 20 世纪 70 年代仿制成功^[1], 现已广泛应用于各相应工业部门, 然而由于其设计保守, 机器笨重, 效率低, 能耗高, 严重影响相关使用部门的经济效益。近年来, 随着全球矿石品位日趋贫化, 而采矿和选矿规模不断增大, 需要处理的原矿量急剧增加, 传统圆锥破碎机已不能满足各生产部门的使用要求。国外自 20 世纪 80 年代以来, 采用层压破碎理论和现代设计方法, 对圆锥破碎机进行性能优化, 设计出集层压腔型和优越工作参数于一体的现代高能圆锥破碎机, 极大地提高了破碎机的工作性能和用户的经济效益。为缩短与国外先进水平的差距, 采用层压破碎理论和现代优化方法, 对圆锥破碎机腔型、生产率和破碎产品粒度进行多目标规划研究, 为自主研发新型、高效和节能的现代高能圆锥破碎机奠定理论基础。

1 现代高能圆锥破碎机工作原理

圆锥破碎机工作原理如图 1 所示, 破碎壁与主轴绕破碎机中心线以进动角 γ 作旋摆运动, 破碎壁不断靠近和远离轧白壁, 破碎壁与轧白壁所形成的破碎腔内散体物料不断受到挤压而破碎。

传统圆锥破碎机以单颗粒物料在破碎腔中破碎

作为其设计原则, 如图 1a 所示, 然而由于单颗粒破碎工作效率低下, 能耗高, 产品粒形多以针片状为主, 不能适应现代工业生产的需要^[1]。近年来, 国内外兴起对层压破碎原理的研究, 并设计出高效率、低能耗, 产品粒形以立方状为主的现代高能圆锥破碎机, 如图 1b 所示。所谓层压破碎, 就是物料破碎不仅限于受破碎壁与轧白壁的挤压而破碎, 而且破碎还发生在散体物料之间^[1], 从而可以极大提高破碎机工作效率, 减小能耗, 提高破碎产品质量。



(a) 单颗粒破碎原理

(b) 层压破碎原理

图 1 圆锥破碎机工作原理

*上海企业和科委资助项目(055115014)。20060307 收到初稿, 20061019 收到修改稿

为实现层压破碎，圆锥破碎机必须集良好的破碎腔型和优秀的工作性能参数于一身。破碎腔型是由破碎壁和轧白壁所组成的工作空间，是物料破碎的场所，良好的腔型可以实现物料的层压破碎，提高破碎机工作效率，降低能耗。良好的腔型必须结合优越的工作参数(摆动转速、进动角、偏心距和摆动行程等)，优越的工作参数可以有效提高破碎机生产率，改善破碎产品粒形，提高用户经济效益。

2 圆锥破碎机腔型优化设计模型

2.1 圆锥破碎机破碎腔型分层研究模型

腔型的设计是对其结构参数进行设计。如图 1 所示，圆锥破碎机结构参数包括给料口尺寸 b 、闭边排料口尺寸 S_{cs} 、开边排料口尺寸 S_{ds} 、平行区长度 l 、破碎腔啮角 β 和动锥底角 α 。传统圆锥破碎机腔型设计依据经验公式，主要是确保破碎腔啮角小于物料与破碎壁和轧白壁的摩擦角，排料口尺寸 S_{cs} 与平行区长度满足用户要求，然而破碎效果不佳，无法实现先进的层压粉碎。基于层压破碎原理，依据破碎机的工作性能参数，结合散体物料在破碎腔中的运动学性能，对圆锥破碎机腔型进行深入的分层研究和综合分析，得到破碎腔型优化设计模型。

为提高破碎机工作性能，现代高能圆锥破碎机腔型设计都保证物料在破碎腔中以层压破碎原理工作并在排料过程中以自由下落方式通过破碎腔。根据物料通过破碎腔的自由落体运动学特性，可以对破碎腔进行分层研究，其分层情况如图 2 所示。

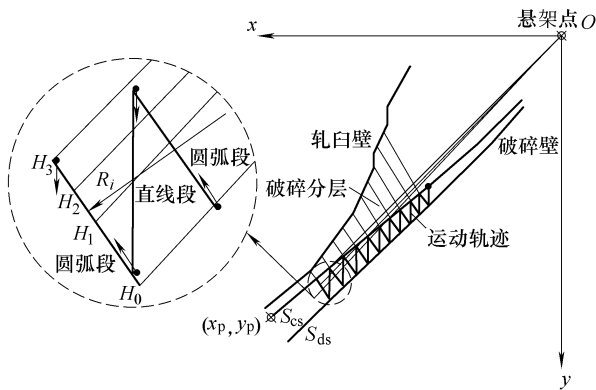


图2 破碎腔型分层研究

图 2 中粗线为单颗物料在破碎腔中运动轨迹，由自由下落的直线段与绕悬架点摆动的圆弧段组成，圆弧线段与破碎壁及轧白壁构成对破碎腔的分层。物料在破碎腔中以自由落体方式通过破碎腔，每经过一个破碎层时受到一次挤压破碎。分层线的确定可由物料在破碎层中作自由落体运动的时间求

得。对其中的任意分层 i 分析，根据散体物料在破碎腔中的运动学特性，物料自由下落可看作与物料接触的破碎壁母线自由下落，其运动方程如式(1)所示。物料受破碎壁与轧白壁挤压，沿图 2 圆弧轨迹 H_1O, H_2O 运动，其运动轨迹方程如式(2)所示。物料沿圆弧轨迹运动，运动点绕破碎机悬架点作简谐摆动，其运动方程如式(3)所示，式中 K_1, K_2 分别为图 2 中 H_1O, H_2O 斜率。联立式(1)~(3)可求解得到破碎腔各破碎带物料自由下落时间 t_i ，根据 t_i 可求得各破碎层 i 分界点 H_0, H_1, H_2, H_3 。从破碎腔堵塞点开始，依据上述方法对破碎腔进行分层研究，可得图 2 所示破碎腔型破碎分层图

$$y - y_p = \tan \alpha (x - x_p) + \frac{1}{2} g t_i^2 \tag{1}$$

$$x^2 + y^2 = R^2 \tag{2}$$

$$\arctan K_1 - \arctan K_2 + \gamma \times \cos \frac{n\pi t_i}{30} = 0 \tag{3}$$

根据总体平衡模型^[4-5]，为使破碎腔达到最佳层压粉碎效果，减小各破碎层的堵塞和待料现象，各破碎层物料质量必须相等，如式(4)所示，式(4)中 m_i 为各破碎层物料质量， m_0 为堵塞层物料质量， β_i 为第 i 破碎层啮角， μ_i 为第 i 破碎层物料填充度， μ_0 为堵塞层破碎层物料填充度。根据式(4)所示的平衡模型，可设计出无堵塞、无待料现象的曲线破碎腔型，如图 3 所示。采用曲线破碎腔型各破碎层啮角变化平缓，可以有效提高层压粉碎效果

$$m_i(n, \gamma, l, \beta_i, \alpha, \mu_i) = m_0(n, \gamma, l, \beta_0, \alpha, \mu_0) \tag{4}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

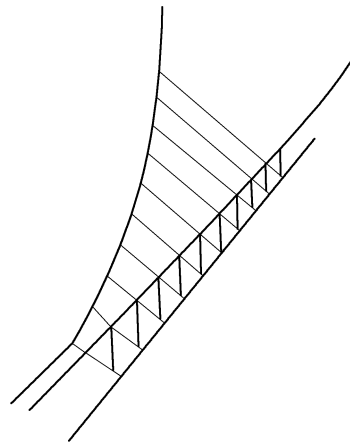


图3 根据总体平衡模型设计的理想曲线破碎腔型

2.2 基于总体平衡模型的圆锥破碎机破碎腔型优化设计模型

根据总体平衡模型^[4-5]可以求得到如图 3 所示最佳曲线破碎腔，然而由于给、排料口尺寸和破碎腔型高度的约束，整个破碎腔型不大可能完全符合

总体平衡模型, 只能近似求得。通过建立破碎腔型设计模型, 提出在破碎机工作性能参数确定前提下的破碎腔型设计新方法, 尽可能减小实际破碎腔型与理想破碎腔型的误差。通过使各破碎层物料通过量的标准差为极小来近似求解曲线破碎腔型, 如式(5)所示优化模型, 式(5)中 K_0 为破碎腔分层总数, β_{0i} 为堵塞层破碎腔啮角, μ_0 为堵塞层物料填充度, β_i 为第 i 破碎层啮角, $m_0(n, \gamma, h, l, \alpha, \beta_{0i}, \mu_0)$ 为堵塞层物料通过量, 由于堵塞层物料通过量由排料口尺寸 S_{cs} 确定, 所以当 n, γ, h, l, α 和 β_{0i} 等为一组确定值时, $m_0(n, \gamma, h, l, \alpha, \beta_{0i}, \mu_0)$ 确定, 而 $m_i(n, \gamma, h, l, \alpha, \beta_i, \mu_i)$ 为第 i 破碎层当量物料通过量

$$\min F_1(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K_0} [m_i(n, \gamma, h, l, \alpha, \beta_i, \mu_i) - m_0(n, \gamma, h, l, \alpha, \beta_{0i}, \mu_0)]^2}{K_0 - 1}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ & \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max} \\ & h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ & l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \\ & \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ & \beta_{i_{\min}} \leq \beta_i \leq \beta_{i_{\max}} \end{aligned}$$

3 圆锥破碎机生产率计算模型

圆锥破碎机生产率是评价破碎机工作性能优劣的重要标志之一。随着全球矿产的贫化, 每年需要处理的原矿量大大增加, 这对圆锥破碎机提出更高要求, 提高破碎机生产率显得尤其重要。在保证破碎产品粒形的前提下, 一般尽可能地提高破碎机生产率。传统圆锥破碎机生产率的计算一般依据经验公式或者人为对破碎腔型划分破碎带, 以堵塞层每单位时间排出物料量作为破碎机生产率。这种未考虑散体物料运动学特性与破碎机本身工作性能参数的生产率计算公式难免带来极大误差。为提高破碎机生产率计算精度, 基于散体物料运动学特性, 以散体物料通过破碎腔的运动学特性作为计算依据, 建立圆锥破碎机生产率计算模型。

散体物料一般以三种运动方式通过圆锥破碎机破碎腔: 滑动、自由落体与滑动并存、自由落体运动, 如图 4 所示^[2-3]。为了提高破碎机生产率和改善破碎产品粒形, 一般要求物料以自由落体方式通过破碎腔。基于散体物料在破碎腔中的自由落体运动

学特性, 可以推导出破碎机生产率计算模型。过图 1 所示堵塞点, 垂直于破碎机中心线作破碎机断面, 可得到如图 5 所示散体物料通过堵塞层时的速度分布图^[2-3]。图 5 中 v_{down} 部分为物料自由下落排料部分, 其速度分布按自由落体运动规律, 从零至最大 $v_{\text{max}1}$ 。 v_{up} 部分为物料随动锥摆动上升部分, 其速度变化根据动锥运动而变化, 其最大速度为 $v_{\text{max}2}$ 。根据散体物料运动学规律及动锥摆动运动规律, 分别对图 5 中 v_{down} 部分与 v_{up} 部分进行积分计算可得破碎机生产率, 其计算模型如式(8)所示, 式(8)中各参数如图 5 所示。式(6)~(8)中, $\rho(\alpha)$ 为堵塞层横切面沿动锥摆角 α 的物料堆密度, 其值等于物料密度 ρ 与该处物料填充度 μ 的乘积, r 为破碎机堵塞层沿 α 而变化的半径, R_{\min} 与 R_{\max} 为堵塞层横切面物料通过面的最大与最小半径, $R(\alpha)$ 为图 3 中内椭圆上点至外圆中心距离, α_C 为堵塞层物料在自由下落阶段动锥所转过的角度, Q_{down} 和 Q_{up} 分别为破碎腔内物料自由下落生产率与物料随动锥上拱生产率, 两者之差为破碎机生产率

$$\begin{cases} Q_{\text{down}} = \int_0^{\alpha_C} \int_{R(\alpha)}^{R_{\max}} \rho(\alpha) v_{\text{down}}(\alpha) r dr d\alpha \\ R_{\min} \leq R(\alpha) \leq R_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_{\text{up}} = \int_{\alpha_C}^{2\pi} \int_{R(\alpha)}^{R_{\max}} \rho(\alpha) v_{\text{up}}(\alpha) r dr d\alpha \\ R_{\min} \leq R(\alpha) \leq R_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

$$Q = Q_{\text{down}} - Q_{\text{up}} \quad (8)$$

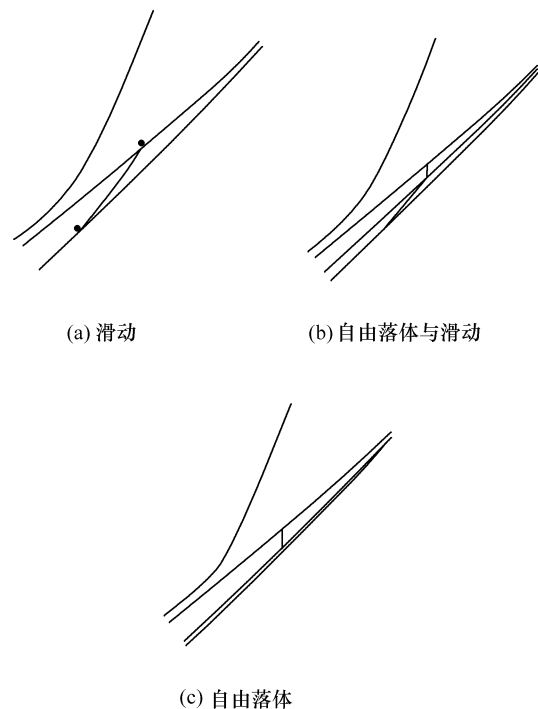


图 4 物料在破碎腔中运动方式

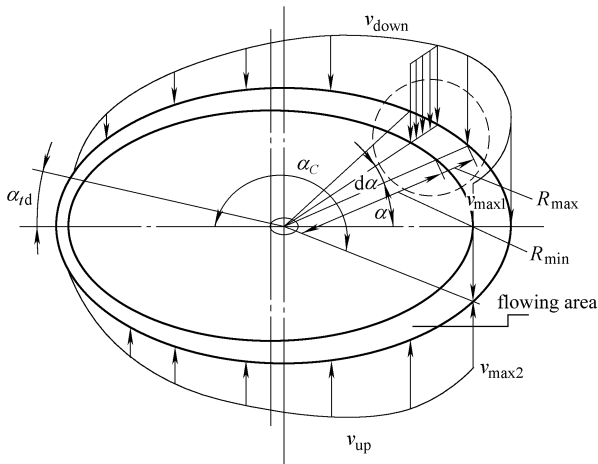


图5 堵塞点断面物料运动分布图

4 基于总体平衡模型的破碎产品粒度计算

总体平衡模型于1956年由BROADBENT等^[4-5]在“煤的破碎过程”研究中首先提出，试图利用矩阵模型来表达煤炭的粉碎过程，并由LYNCH^[6]于1977年在“碎矿和磨矿流程”研究中完善，取得良好的效果。基于总体平衡模型，对圆锥破碎机破碎过程进行深入分析，得到如图6所示的物料破碎过程模型^[2-3]。物料粉碎过程包括破碎前的给料分级 C_i 、破碎选择过程 S_i 、破碎过程 B_i 、破碎后的排料分级 C_{i+1} 。给料分级主要是小粒度物料在破碎过程中由于尺寸过小，容易处于大颗粒的空隙中，从而直接通过破碎带而得不到破碎作用。破碎选择过程 S_i 主要描述物料粉碎过程中只有部分物料参与粉碎作用，故破碎过程是选择性的，可由概率统计理论来描述。破碎过程 B_i 是破碎机对选择过程中所选中物料进行粉碎作用并描述其粉碎后粒度分布情况。分级 C_{i+1} 对该破碎层粉碎后的物料进行分级作用。图6所示的破碎过程模型可用式(9)表示

$$P_i = \{(1 - C_i) + [(1 - C_{i+1}) + (1 - C_i)C_{i+1}] \times [C_i^{-1}[B_i S_i + (1 - S_i)]^{-1} - C_{i+1}^{-1}]\} F_i \quad (9)$$

由于圆锥破碎机主要用于中细粉碎，各破碎层物料粒度尺寸相差不大，故图6中给料分级 C_i 为1，排料分级 C_{i+1} 为0，故式(9)可简化为式(10)所示

$$P_i = [B_i S_i + (1 - S_i)] F_i \quad (10)$$

物料从圆锥破碎机给料口进入破碎腔，需要经过多次粉碎事件，再经排料口排料腔外，其总体破碎过程模型是若干个图6所示单次破碎事情的总和，如式(11)所示

$$P = \prod_{i=1}^{K_0} [B_i S_i + (1 - S_i)] F_i \quad (11)$$

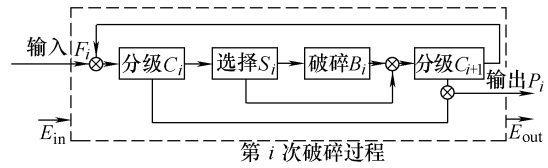


图6 圆锥破碎机物料破碎过程操作模型

式(11)中 K_0 为物料在破碎腔中的破碎事件次数， B_i 为破碎函数， S_i 为破碎选择函数， F_i 为物料给料粒度分布， B_i 与 S_i 可通过试验数据获得。瑞典查默斯理工大学学者EVERTSSON^[2-3]对圆锥破碎机选择函数 S_i 与破碎函数 B_i 进行深入研究，得到圆锥破碎机各破碎层选择函数模型和破碎函数模型，如式(12)~(14)所示。 S_{Ni} 为第 i 破碎层物料压缩率， x_{min} 为破碎产品最小粒度尺寸， x_0 为破碎物料最大粒度尺寸， x 为所需求的粒度分布(筛下百分比)

$$S_i(s_{Ni}) = -4.1387 s_{Ni}^2 + 4.5386 s_{Ni} - 0.2456 \quad (12)$$

$$B_i(x_N, s_{Ni}) = \{1 - [-0.0095 + 0.5657(s_{Ni})]\} \times x_N^{18.9539 - 36.2309(s_{Ni})} + [-0.0095 + 0.5657(s_{Ni})] x_{Ni} \quad (13)$$

$$x_N = \frac{\log_2(x/x_{min})}{\log_2(x_0/x_{min})} \quad (14)$$

5 圆锥破碎机性能多目标规划模型的建立

现代高能圆锥破碎机的优秀性能主要体现在高效率、低能耗和整齐的破碎产品粒形，故对圆锥破碎机的优化必须兼顾层压破碎腔型，较高的生产率和整齐的破碎产品粒度分布。基于层压破碎原理、散体物料的运动学特性和总体平衡模型，建立圆锥破碎机多目标规划模型。

5.1 破碎机腔型、生产率及破碎产品粒度优化模型之间的耦合关系

破碎机腔型优化、生产率优化及破碎产品粒度优化模型之间是相辅相成、互相制约的，相互之间存在较强的耦合关系，如图7所示。腔型优化依赖于生产率优化结果，腔型优化结果同时又影响破碎腔堵塞层物料下落速度分布(图5)，进而又影响生产率优化。腔型优化与生产率优化决定破碎产品粒度优化，粒度优化反作用于腔型优化和生产率优化，故破碎机性能优化必须兼顾腔型优化、生产率优化和粒度优化的要求。

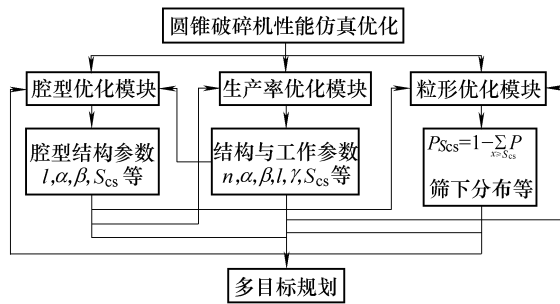


图 7 各优化模型耦合关系

5.2 圆锥破碎机多目标优化模型

5.2.1 设计变量

圆锥破碎机结构参数和性能工作参数是影响破碎机性能的关键参数。结构参数主要是破碎腔型结构参数与动锥、定锥结构参数，破碎腔型参数包括各破碎层啮角 β_i 、平行区长度 l 、给料口尺寸 b 、闭边排料口尺寸 S_{cs} ，动锥、定锥结构参数包括动锥底角 α 、定锥底角 α' 、破碎机悬架高度 h 。动锥底角 α 和定锥底角 α' ，因为平行区的存在，两者相等。给排料口尺寸 b 和 S_{cs} 已形成机械标准，可按有关手册选取。悬架高度 h 一般取动锥母线延长线与破碎机中心线交点作为悬架点，悬架点至排料口垂直距离为悬架高度，此时悬架高度 h 为定值。性能工作参数包括破碎机性能参数与破碎腔型性能参数，其中破碎机性能参数包括动锥旋摆转速 n 、进动角(偏心度) γ 、偏心距 e 、排料口摆动行程 S_t ，当破碎机结构参数与进动角 γ 确定时，偏心距 e 和排料口摆动行程 S_t 确定，破碎腔型性能参数主要是各破碎层物料填充度 μ_i ， μ_i 一般根据经验或者实测值来确定，一般取0.55~0.75，这里取堵塞层压缩终了时物料填充度为0.75。综合考虑各种影响破碎机性能的关键因素，选取破碎机旋摆转速 n 、进动角 γ 、动锥与定锥底角 α 、平行区长度 l 、破碎腔各破碎层啮角 β_i 作为设计变量，如式(15)所示

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [n, \gamma, \alpha, l, \beta_i] \quad (15)$$

5.2.2 目标函数

对圆锥破碎机性能优化必须兼顾层压破碎腔型、生产率与破碎产品粒形，故破碎机优化有三个目标函数。根据总体平衡模型，依据于破碎机工作性能参数，可以求解理想的曲线层压破碎腔型，但由于给排料口和破碎腔高度限制，实际求得的破碎腔型曲线只能近似逼近理想曲线层压破碎腔型。根据第2.2节中所述，选取各破碎层当量物料通过量的标准差作为破碎腔型优化设计的目标函数，如式

(16)所示

$$F_1(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K_0} [m_i(n, \gamma, h, l, \alpha, \beta_i, \mu) - m_0(n, \gamma, h, l, \alpha, \beta_{0i}, \mu_0)]^2}{K_0 - 1}} \rightarrow \min \quad (16)$$

圆锥破碎机生产率是反映破碎性能的重要参数之一，在保证物料破碎产品粒形分布的前提下，尽量提高破碎机生产率，故选择圆锥破碎机生产率作为破碎机优化的第二个目的函数，根据式(6)~(8)得到如式(17)所示的目标函数

$$F_2(X) = -Q = -(Q_{down} - Q_{up}) \rightarrow \min \quad (17)$$

散体物料破碎产品粒形分布是反映破碎机工作性能优劣的另一重要参数，改善破碎机破碎产品粒形是破碎机设计的重要内容。选取破碎产品中小于闭边排料口尺寸 S_{cs} 的破碎产品占总体破碎产品百分数 $P_{S_{cs}}$ 作为破碎机优化设计的第三个目标函数，如式(18)所示，式(18)中 F_1 为给料粒度分布， $x \leq S_{cs}$ 代表小于闭边排料口的破碎产品

$$F_3(X) = -P_{S_{cs}} = -\sum_{x \leq S_{cs}} \left\{ \prod_{i=1}^{K_0} [B_i S_i + (1 - S_i)] F_1 \right\} \rightarrow \min \quad (18)$$

5.2.3 设计约束

破碎优化设计的约束条件包括边界约束和性能约束，边界约束主要是设计变量的边界取值范围约束，如式(19)所示。性能约束主要包括保证物料以自由落体方式通过破碎腔时对破碎机旋摆速度的约束，破碎机生产率约束与破碎产品粒形分布约束，如式(20)所示

$$\begin{cases} n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \\ \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max} \\ 0 \leq \beta_i \leq \varphi \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} Q \leq Q_{\min} \\ P_{S_{cs}} \leq P_{S_{cs\min}} \end{cases} \quad (20)$$

5.2.4 多目标规划

圆锥破碎机优化设计为式(21)所示的多目标规划问题，其中

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(x) &= \min_{x \in \mathbf{R}^n} [F_1(X), F_2(X), F_3(X)]^T \\ v - \min_{x \in \mathbf{R}^n} \mathbf{F}(X) &= \min_{x \in \mathbf{R}^n} [F_1(X), F_2(X), F_3(X)]^T \\ \text{s.t.} \quad &g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \\ &h_k(X) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (21)$$

为矢量目标函数， $v\text{-min}$ 表示矢量极小化，即矢量目标函数 $F(X)$ 中各个目标函数被同等地极小化，但大多数的多目标不可能使矢量目标函数中每个目标函数都被同等地极小化，而只能得到非劣解。多目标优化方法有主要目标法、统一目标法、协调曲线法和分层序列法等。综合分析圆锥破碎机多目标优化问题，采用主要目标法，把圆锥破碎机生产率作为破碎机优化的主要目标，腔型与破碎产品粒形优化转化为一组非线性约束，得到如式(22)~(24)所示的圆锥破碎机多目标规划模型。式(24)为多目标规划的边界约束和性能约束。 $G_1(n, t_1)$ 为破碎腔堵塞层物料自由下落时间 t_1 与动锥旋摆转速 n 的关系的非线性等式约束， $G_1(n, t_1)$ 可通过联立式(1)~(3)三式而求得。 $G_2(n)$ 为保证物料以自由下落方式通过破碎腔时的最小旋摆转速 n 的约束

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [n, \gamma, \alpha, l, \beta_i] \quad (22)$$

$$F_2(X) = -Q = -(Q_{\text{down}} - Q_{\text{up}}) \rightarrow \min \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \\ \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max} \\ 0 \leq \beta_i \leq \varphi \\ G_1(n, t_1) = 0 \\ G_2(n) \leq 0 \\ F_1(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K_0} (m_i - m_0)^2}{K_0 - 1}} \leq F_{\min} \\ P_{S_{cs}} = \sum_{x \leq S_{cs}} \left\{ \prod_{i=1}^{K_0} [B_i S_i + (1 - S_i)] F_1 \right\} \leq P_{S_{cs\min}} \end{array} \right. \quad (24)$$

6 算例分析与试验验证

6.1 算例分析

为验证优化设计模型的可靠性，以国产PYB1750圆锥破碎机为算例，建立如式(22)~(24)所示的优化设计模型，模型中 φ 取物料与破碎壁和轧臼壁的摩擦角，一般为 33° ， $P_{S_{cs\min}}$ 为用户需要满足的破碎产品中小于 S_{cs} 的最小百分比，取为50%。以基于Kuhn-Tucher的非线性序列二次规划法编写优化程序^[7]，得到如表所示优化结果、图8所示破碎腔型优化结果和图9所示破碎产品粒形分

布结果。表中优化后结果，第1组数据为与传统弹簧圆锥破碎相同关键参数时对破碎机的优化，为提高破碎机性能，破碎机需要大大提高旋摆速度，这对破碎机动力性能提出很高要求。表中第2组数据至第5组数据，是改变破碎机动锥底角时对破碎机的优化结果，第6组至第9组数据是改变平行区长度时的优化结果，第10组至第12组数据，是改变破碎机进动角时的优化结果。从表可知，平行区长度减小，破碎机生产率极大提高，破碎产品粒度分布改善。这与传统圆锥破碎机设计原则不同，传统圆锥破碎机认为，平行区长度增加，破碎产品粒度改善，这是因为传统圆锥破碎机以单颗粒物料粉碎作为破碎机设计原则，因而物料破碎产品粒度需要破碎机平行区对物料进行进一步检验破碎，以达到用户粒度要求。而以层压破碎原理作为破碎机设计原则，破碎腔闭边排料口尺寸和平行区长度并不决定破碎产品粒度，破碎产品粒度可由散体物料之间的层间互相挤压而破碎得到保证。动锥底角增大，可大大提高破碎机生产率。

从表可知，当动锥底角从 40° 提高 54° 时，破碎机最大生产率从 650 t/h 提高到 $1\,009 \text{ t/h}$ ，但破碎产品粒度下降，小于排料口物料所占总破碎产品百分比从 61.9% 下降到 56% 。进动角大些有利于提高破碎机生产率与改善破碎产品粒形分布，但对破碎机整机动力性能要求高些。进动角减小，破碎机整机动力性能改善，但破碎机生产率下降，产品粒形下降，为保证破碎机产品粒形，动锥旋摆转速必须提高。当破碎机结构与进动角确定，破碎机偏心距和排料口摆动行程确定，偏心距和排料口摆动行程增大，将提高破碎机生产率和改善破碎机破碎产品粒形分布，但对破碎机动力性能提出更高要求。动锥旋摆转速是影响破碎机性能的重要参数，旋摆速度太小，物料将会以滑动形式通过破碎腔，破碎机生产率大大下降，旋摆转速太大，物料几乎无法通过破碎腔型，就更谈不上改善破碎机性能，故破碎机旋摆转速存在一个最佳值。当破碎以最佳旋摆转速工作时，破碎机生产率大大改善，破碎产品粒度分布得到保证。表中各组数据均可作为现代高能圆锥破碎机的设计参数，具体采用那组数据，可根据具体情况具体分析，综合考虑用户对生产率、破碎产品粒形及破碎机整机动力性能要求。

表 PYB1750 圆锥破碎机多目标规划计算结果

设计变量约束范围	生产率 $Q/(t \cdot h^{-1})$	破碎产品中 小于闭边物 料口尺寸 S_{cs} 的破碎产品 占总体破碎 产品的百分 数 $P_{S_{cs}}/\%$	摆动转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	平行区长度 l/mm	动锥底角 $\alpha(^{\circ})$	进动角 $\gamma(^{\circ})$	偏心距 e/mm	行程 S/mm	平均啮角 $\beta_{up}/(^{\circ})$		
优化前	传统弹簧圆锥	280~480	20.0	245	150	40	2.0	21.5	75.0	23.6	
1	关键参数相同	348~602	56.0	455	150	40	2.0	25.6	79.7	20.3	
2	改变动锥底角	393~650	61.9	455	100	40	2.0	25.6	79.7	20.3	
3		500~802	61.4	369	100	46	2.0	31.6	88.0	20.9	
4		590~928	60.0	319	100	50	2.0	36.4	95.0	20.8	
5		646~1 009	56.0	318	100	54	2.0	42.0	104.0	20.7	
优	试验验证	613~985	49.6	318	100	54	2.0	42.0	104.0	20.7	
化	6	427~719	56.0	383	150	45	2.0	30.5	86.0	22.4	
后	7	改变平行区长度	480~774	62.0	383	100	45	2.0	30.5	86.0	20.1
8	534~830		67.0	383	50	45	2.0	30.5	86.0	20.1	
9	590~886		67.0	383	0	45	2.0	30.5	86.0	17.7	
10	534~811		69.0	403	0	45	1.8	27.5	77.8	17.5	
11	改变进动角	479~735	66.0	428	0	45	1.6	24.4	69.0	17.7	
12		423~658	62.0	457	0	45	1.4	21.4	60.5	17.9	

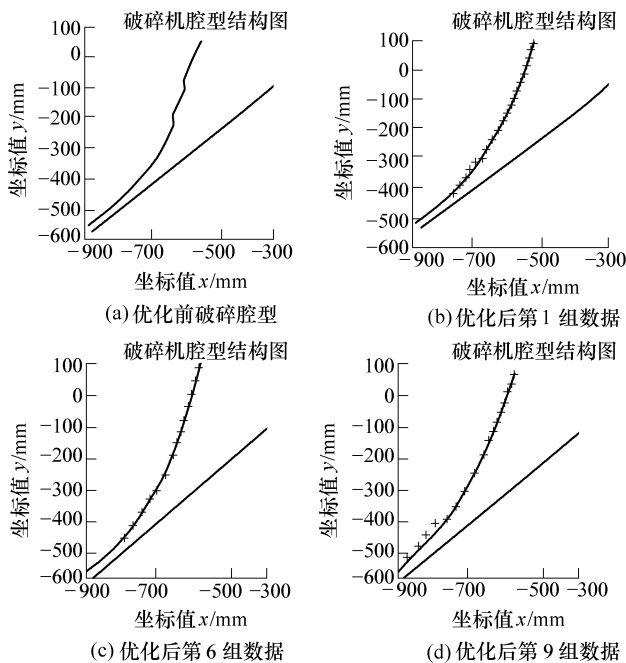


图8 破碎腔型结构

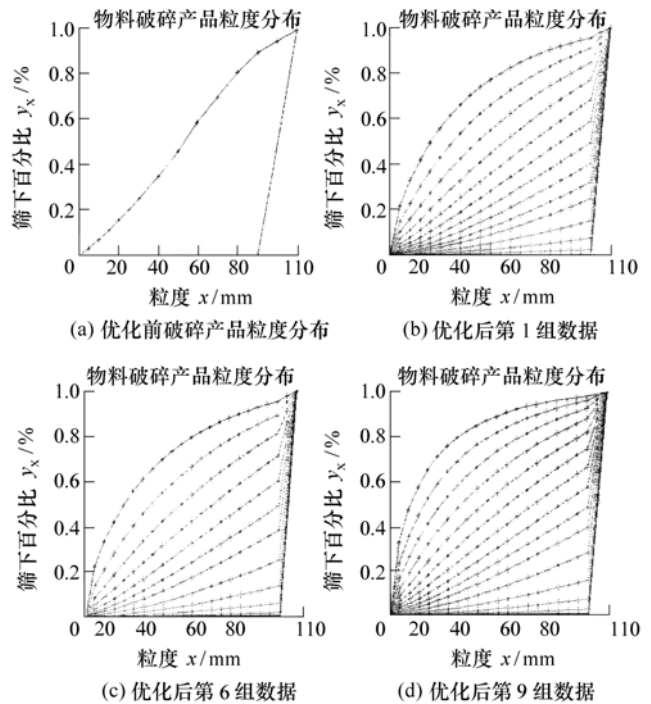


图9 各次破碎事件的破碎产品粒形分布

6.2 试验验证

为验证圆锥破碎机多目标规划设计模型可靠性,与上海某破碎机生产厂家合作,根据该破碎机厂家和用户要求,采用表中优化计算结果的第5组数据对PYB1750圆锥破碎机进行改进设计。对改进设计后的PYB1750圆锥破碎进行破碎试验,得到如表中所示的实测数据。

如表中试验数据所示,生产率得到极大提高,破碎产品粒度极大改善。破碎机生产率从优化设计

前的480 t/h提高到优化设计后的985 t/h,小于排料口破碎产品粒度从改进设计前的20%提高到改进设计后的53%。改进设计后的PYB1750圆锥破碎机实测生产率小于理论优化值1 009 t/h,小于排料口破碎产品所占百分比小于理论值的56%,其原因是试验中给料粒度分布情况和给料是否均匀及破碎机工作环境与理论模型中的前提假设存在偏差,但从总体上来说,仿真优化结果与改进设计后的破碎机试验结果吻合良好,破碎机性能得到极大提高,从而验证了多目标规划模型的正确性和可靠性。

7 结论

(1) 基于总体平衡模型和散体物料运动学特性,提出圆锥破碎机破碎腔型分层研究模型和新型腔型设计方法,建立破碎腔型优化设计模型。

(2) 提出基于散体物料运动学特性的破碎机生产率计算模型,建立破碎机生产率优化模型。

(3) 基于总体平衡模型和圆锥破碎机操作模型,建立圆锥破碎机破碎产品粒形优化模型。

(4) 建立圆锥破碎机腔型、生产率及破碎产品粒度的多目标综合优化模型,并进行具体型号产品的算例分析,为自主研制新型、高效、节能的现代液压圆锥破碎机奠定理论基础。

(5) 圆锥破碎机多目标规划模型应用于某破碎机生产厂家,取得良好效果,验证了模型的正确性与可靠性。

参 考 文 献

- [1] 朗宝贤. 圆锥破碎机[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] EVERTSSON C M. Cone crusher performance[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2000.
- [3] EVERTSSON C M. Output prediction of cone crushers[J]. Minerals Engineering, 1997, 11(3): 215-231.
- [4] BROADBENT S R, CALLCOTT T G. Coal breakage processes, I. A new analysis of coal breakage processes[J]. J. Inst. Fuel, 1956, 29(12): 524-528.
- [5] BROADBENT S R, CALLCOTT T G. Coal breakage processes, II. A new analysis of coal breakage processes[J]. J. Inst. Fuel, 1956, 29(12): 528-539.
- [6] LYNCH A J. Mineral crushing and grinding circuits[M]. Elsevier: Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
- [7] 孙靖民. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.

DESIGN FOR MULTIOBJECTIVE PLANNING OF CONE CRUSHER

HUANG Dongming¹ WU Dianliang^{1,2}

FAN Xiumin^{1,2} YAO Fusheng¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030;

2. Major Laboratory of Network Manufacturing and
Information Enterprise of Shanghai,
Shanghai 200030)

Abstract: A new design method of cone crusher chamber based on interparticle breakage and population balance model is put forward and the chamber optimization model is built up. The output calculation method and optimization model of cone crusher based on kinematic character of granular material are put forward. The size distribution and optimization models based on population balance model are put forward. Besides, multiobjective planning of crushing chamber, output and size distribution is built up, which settles down the theoretical basis for developing new style, high efficiency, energy-saving cone crusher. Moreover, the multiobjective planning of cone crusher is also used to improve the existed cone crusher by crusher manufacturer and the validity and reliability are verified by the related full scale tests.

Key words: Cone crusher

Interparticle breakage

Granular material

Population balance model

Optimization design

作者简介: 黄冬明,男,1978年出生,博士研究生。主要研究方向为虚拟产品开发和虚拟样机技术。

E-mail: hdm106@sjtu.edu.cn