



## 全尾胶结充填高浓度搅拌槽的开发研制

王权升, 刘奕祺, 彭志兵, 刘排秧

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

**摘要:**为解决高浓度充填料浆常规搅拌制备所存在的水泥胶凝团聚、包裹体难以分散、料浆均匀性差等问题,开发研制新型高效的高浓度搅拌设备至关重要。文章在理论分析的基础上,得到高浓度搅拌槽搅拌功率和搅拌转速的计算公式,通过有限元分析,得到了搅拌系统的应力分布和振型模态,确定了高浓度搅拌槽的结构和主要技术参数。对 $\varnothing 2\ 500\ \text{mm} \times 2\ 500\ \text{mm}$ 高浓度搅拌槽进行了人工配矿试验,考查了搅拌时间、搅拌转速、组份配比等因素对搅拌均匀性、搅拌功率、充填体抗压强度的影响。研究表明:开发研制的高浓度搅拌槽样机满足全尾胶结充填高浓度料浆的搅拌制备要求。本文结果可为相关工程设备研究提供参考。

**关键词:**全尾胶结充填;高浓度搅拌槽;搅拌系统

中图分类号:TD853.34<sup>+</sup>3

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)10-0001-09

doi:10.13402/j.gcjs.2025.10.118

## Development of high concentration mixing tank for total tailings cementitious backfilling

WANG Quangsheng, LIU Yiqi, PENG Zhibing, LIU Paiyang

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** In order to address issues such as cementitious agglomeration, difficulty in dispersing inclusions, and poor slurry homogeneity encountered in the conventional mixing preparation of high-concentration filling slurry, the development of new, efficient high-concentration mixing equipment is crucial. Based on theoretical analysis, this paper derives calculation formulas for the mixing power and rotational speed of the high-concentration mixing tank. Through finite element analysis, the stress distribution and vibration mode shapes of the mixing system are obtained, leading to the determination of the structure and key technical parameters of the high-concentration mixing tank. Artificial ore proportioning tests were conducted on a  $\varnothing 2\ 500\ \text{mm} \times 2\ 500\ \text{mm}$  high-concentration mixing tank to investigate the effects of mixing time, rotational speed, and component ratio on mixing uniformity, mixing power, and the compressive strength of the backfill. The research results demonstrate that the developed prototype of the high-concentration mixing tank meets the requirements for mixing and preparing high-concentration slurry for total tailings cementitious backfilling. The findings of this study can provide references for related engineering equipment research.

**Key words:** total tailings cemented backfill; high concentration mixing tank; mixing system

我国作为矿业大国,年采掘量超过 50 亿吨,尾矿堆积总量近百亿吨,且每年以约 6 亿吨的速度增加<sup>[1]</sup>,传统的方法是将其堆存在尾矿库中。尾矿造成的地表水及大气粉尘污染,特别是尾矿

库坝体的垮塌,造成国家和人民生命财产的巨大损失。随着生态文明建设及绿色可持续发展战略的实施,“绿水青山就是金山银山”的理念深入人心,对尾矿的无害化处置及资源化综合利用提上

收稿日期:2025-05-28

作者简介:王权升(1985—),工程师,工程设计院副院长,从事新型高效选矿装备技术研究与应用推广工作。

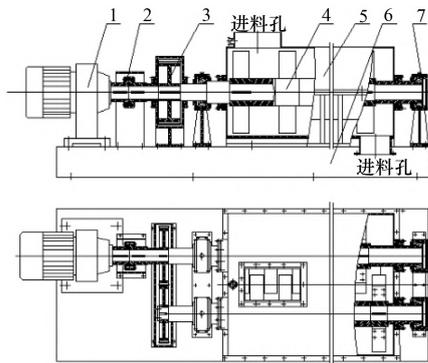
通信作者:刘排秧(1962—),正高级工程师,研究生导师,中国工程院咨询专家,从事新型高效矿业装备的开发研究及推广应用工作。

了重要议程<sup>[2]</sup>。利用全尾砂充填采空区,实现尾矿“零排放”,对保护环境、保证矿山可持续发展有非常重要的意义。

本文将通过有限元分析,确定高浓度搅拌槽的结构和主要技术参数,对高浓度搅拌槽进行人工配矿试验,考查相关因素对搅拌均匀性、搅拌功率、充填体抗压强度的影响,以期可为相关工程设备研究提供参考。

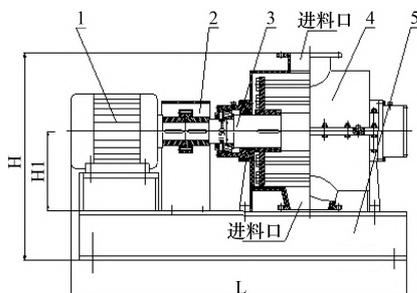
## 1 高浓度搅拌槽开发研制

高浓度充填料浆的搅拌制备是全尾胶结充填中的关键环节,能否制备出浓度适中、流动性好的充填料浆,关系到充填体的质量。目前高浓度充填料浆的搅拌制备,通常采用双螺旋搅拌机和高速活化搅拌机<sup>[3]</sup>,其结构如图 1、2 所示,存在水泥胶凝团聚、包裹体难以分散、料浆均匀性差等问题。为此,某院开发研制了一种新型高效的立式高浓度搅拌槽,并进行有关理论分析和实验研究。



1—减速电机;2—联轴器;3—变向齿轮箱;  
4—螺旋轴;5—机壳;6—机座;7—轴承座。

图 1 卧式双螺旋搅拌机



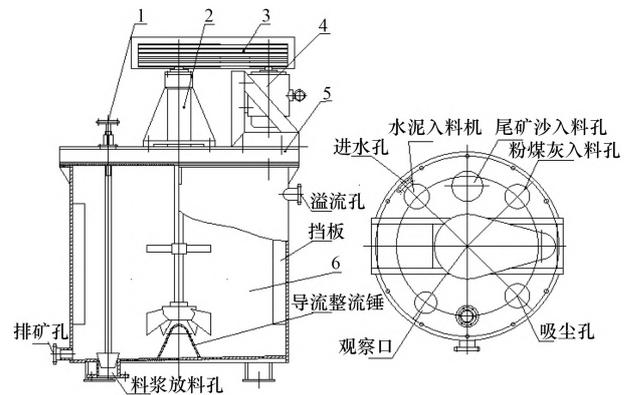
1—电机;2—联轴器;3—转子部件;  
4—机壳;5—机座。

图 2 高速活化搅拌机

### 1.1 高浓度搅拌槽的结构特点及工作原理

某院开发的高浓度搅拌槽,其结构如图 3 所

示,主要由搅拌系统、传动系统、大梁槽盖、槽体及料浆放矿阀等组成。主要特点为槽体内设有涡流挡板和导流整流锥,搅拌系统采用双搅拌轮结构。其工作原理:通过搅拌系统的旋转,使槽内料浆在搅拌轮、涡流挡板及导流整流锥的作用下,呈现上下激烈循环,实现尾砂、水泥、粉煤灰和水的充分搅拌和均匀混合,从而制备出流动性好、浓度高的均质充填料浆。



1—底流排料阀;2—搅拌系统;3—传动皮带;  
4—电机部件;5—大梁槽盖;6—槽体。

图 3 高浓度搅拌槽

### 1.2 搅拌功率的确定

#### 1.2.1 按流体力学的观点确定搅拌功率

搅拌功率与搅拌速度、搅拌器形状、搅拌轮层数  $m$ 、搅拌轮间距  $S$ 、料浆密度及槽体结构形式(有无挡板等)等有关。根据流体力学的观点,当搅拌转速为  $n$  时,对多层搅拌轮,其搅拌功率  $N(\text{kW})$ <sup>[4]</sup>:

$$N = m^{\beta} \varnothing \rho n^3 T^5 \quad (1)$$

$$\beta = 0.86 \left[ \left( 1 + \frac{S}{T} \right) \left( 1 - \frac{aS}{S - 0.9T} \right) \right]^{0.3} \quad (2)$$

$$a = \frac{(m-1) \lg m - \lg(m-1)}{\lg m} \quad (3)$$

式中:  $m$  为搅拌轮层数;  $\beta$  为与层间距  $S(\text{m})$  及搅拌轮直径  $T(\text{m})$  有关的系数;  $a$  为与层数  $m$  有关的系数;  $\varnothing$  为功率准数;  $\rho$  为料浆密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $n$  为搅拌转速,  $\text{r}/\text{min}$ 。

因全尾胶结充填料浆主要由尾砂、水泥、粉煤灰和水搅拌混合而成,是一种非均质流体,按流体力学观点确定的搅拌功率,与实际搅拌功率有较大出入。

#### 1.2.2 按搅拌扭矩确定搅拌功率

对图 4 所示的几何因素、物理参数及运转参

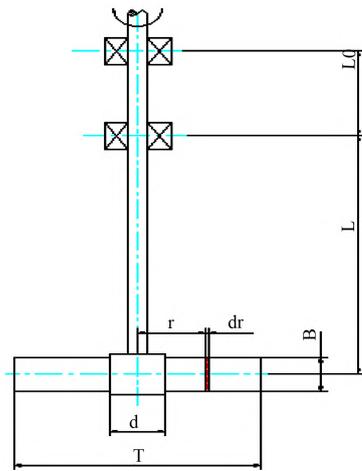


图 4 单搅拌轮搅拌系统

数明确的单叶轮搅拌系统, 可通过计算搅拌轴所受扭矩来确定搅拌功率。在叶片上取微元, 根据牛顿定律, 其微元法向力  $dF_n$  (N) 为

$$\begin{aligned} dF_n &= \rho F U^2 = \rho B dr \left( \frac{r\pi n}{30} \right)^2 \\ &= \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 \rho B r^2 n^2 dr \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $A$  为微元面积,  $m^2$ ;  $V$  为线速度,  $m/s$ ;  $B$  为叶片宽度,  $m$ 。

微元切向力  $dF_t$  为

$$\begin{aligned} dF_t &= dF_n \cos\theta = \rho B r^2 dr \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 \cos\theta \\ &= \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 \rho B r^2 n^2 \cos\theta dr \end{aligned} \quad (5)$$

对回转轴心的微元扭矩  $dM_T$  ( $N \cdot m$ ) 为

$$dM_T = r dF_t = \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 \rho B r^3 n^2 \cos\theta dr \quad (6)$$

则所有叶片对转轴回转中心的总扭矩  $M_T$  为

$$M_T = K \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{T}{2}} dM_T \approx 1.7 \times 10^{-4} \rho K B (T^4 - d^4) n^2 \cos\theta \quad (7)$$

搅拌功率  $N$  ( $N \cdot m/s$ ) 为

$$N = M_T \omega \approx 1.8 \times 10^{-4} \rho K B (T^4 - d^4) n^3 \cos\theta \quad (8)$$

式中:  $T$  为搅拌轮直径,  $m$ ;  $d$  为轮毂直径,  $m$ ;  $B$  为叶片宽度,  $m$ ;  $\theta$  为叶片迎浆面倾角, ( $^\circ$ );  $K$  为叶片数量;  $n$  为搅拌转速,  $rpm$ 。

因搅拌轮的叶片宽度  $B$  与搅拌轮直径  $T$  成正比例关系, 从式(8)可知搅拌功率与搅拌轮转速的三次方和搅拌轮直径的五次方成正比。因此, 进

行搅拌系统设计时, 在满足搅拌要求的前提下, 宜采用较高的搅拌转速和较小的搅拌轮直径, 有利于减小搅拌器的功率消耗。必须指出的是, 搅拌设备的实际装机功率, 还要考虑传动效率和电动机的使用规范, 实际的装机功率  $N_d$  为

$$N_d = \frac{N}{0.85 f} = 1.2 \sim 1.25 N \quad (9)$$

式中:  $f$  为传动效率, 皮带传动和减速机传动的效率可分别按 0.95 和 0.98 来计算。

### 1.3 搅拌系统的结构

#### 1.3.1 搅拌轮层数的确定

对浆体搅拌设备而言, 搅拌系统通常采用单搅拌轮或双搅拌轮结构。当采用多层搅拌轮结构时, 需满足条件  $0.35 \leq S_i/T \leq 1$ 。搅拌轮的层数, 取决于槽内料浆的高度  $H_0$ , 层间距  $S$  可如下确定: 单层搅拌轮时,  $S_1 = 0$ , 双层搅拌轮时,  $S_2 = \frac{H_0 - 1.9T}{2}$ , 三层搅拌轮时,  $S_3 = \frac{H_0 - 2.2T}{2.74}$ 。对

$\varnothing 2500 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$  实验样机, 设计的搅拌轮直径  $T$  为 650 mm, 可得单层搅拌轮时,  $S_1 = 0$ , 双层搅拌轮时,  $S_2 = 445 \text{ mm}$ , 三层搅拌轮时  $S_3 = 237 \text{ mm}$ 。因为  $0.35 < 0.685 = S_2/T < 1$ ,  $0.35 \approx 0.36 = S_3/T < 1$ , 故搅拌系统采用双层搅拌轮。

#### 1.3.2 上下搅拌轮的结构

搅拌系统采用等径双搅拌轮结构, 上搅拌轮为 4 个斜桨叶片(图 5), 叶片迎浆面与水平面夹角为  $45^\circ$ , 其料浆流以径向流为主, 下搅拌轮为 6 个下掠式叶片, 如图 6 所示, 其料浆流以轴向流为主。

为避免沉槽, 上搅拌轮迎浆面积设计为下搅拌轮的 60% 左右, 以便把更多的搅拌功率传递到下搅拌轮, 加大下部搅拌强度。如图 7 所示, 下搅拌轮结构尺寸间的关系为

$$T = 2(R + L) \sin 60^\circ = 1.732(R + L) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} H &= (R + L) \cos 60^\circ + 0.5B \cos 45^\circ \\ &= 0.5(R + L) + 0.3536B \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $R$ 、 $L$ 、 $B$ 、 $H$  分别表示叶片根部的圆弧半径 ( $m$ )、叶片的长度 ( $m$ )、叶片大端宽度 ( $m$ )、搅拌器总体高度 ( $m$ )。

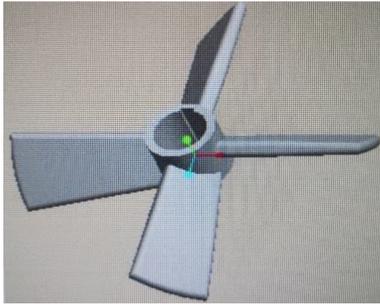


图 5 上搅拌轮

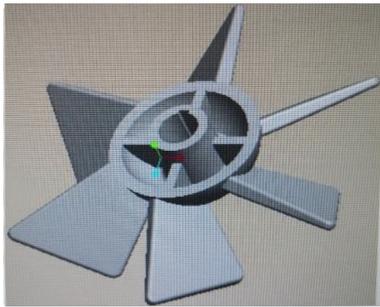
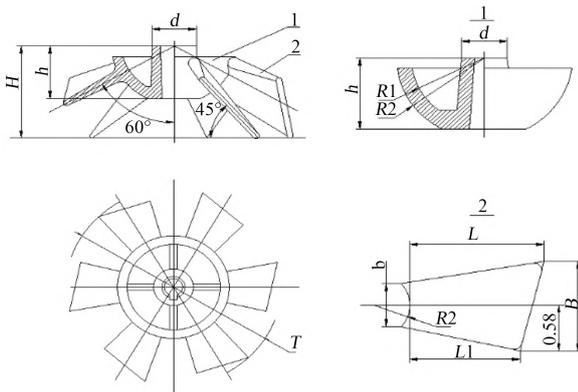


图 6 下搅拌轮



1—轮毂；2—叶片。

图 7 下搅拌轮的结构尺寸

### 1.3.3 搅拌系统的结构

搅拌系统的结构如图 8 所示，主要由大皮带轮、上下端盖、轴承、轴承座、搅拌轴、上下搅拌轮、油封、油杯油嘴等组成，搅拌轴主要弯受扭组合作用，其直径根据第三强度理论确定。

### 1.4 搅拌系统一阶临界转速 $n_{cr1}$ 及搅拌转速 $n$ 的确定

#### 1.4.1 搅拌系统一阶临界转速 $n_{cr1}$ 的确定

对多圆盘转子系统，要精确求解临界转速是较困难的。工程实际中，通常采用雷列(Rayleigh)能量法、等效质量法、经验公式法等来确定一阶临界转速。对图 8 所示的双叶轮搅拌系统，将其视为悬臂梁双圆盘系统来处理，简化后的力学模

型如图 9 所示。

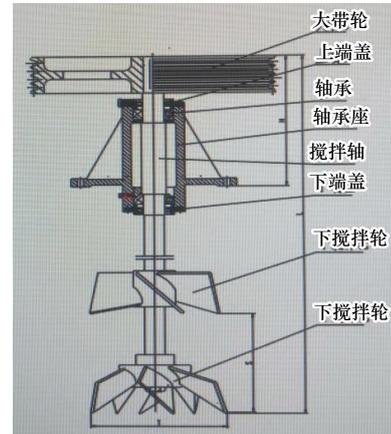


图 8 双叶轮搅拌系统

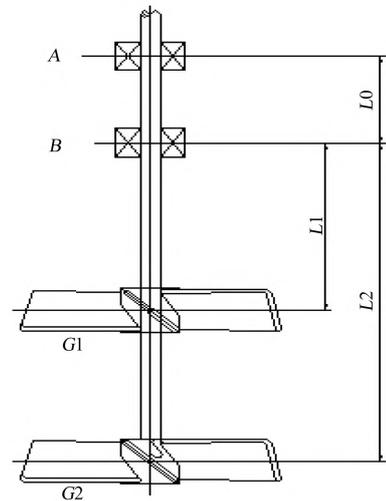


图 9 双叶轮搅拌系统简化力学模型

(1) 利用雷列能量法求解一阶临界转速。

按能量守恒定律，系统的最大势能  $U_{max}$  (N·m) 与最大动能  $T_{max}$  相等，其最大势能为

$$U_{max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n G_i Y_i \quad (12)$$

最大动能为

$$T_{max} = \frac{\omega_{cr}^2}{2g} \sum_{i=1}^n G_i Y_i^2 \quad (13)$$

整理可得：

$$\omega_{cr1} = \sqrt{g \frac{\sum_{i=1}^n G_i Y_i}{\sum_{i=1}^n G_i Y_i^2}} \quad (1/s) \quad (14)$$

式中： $G_i$ 为简化后各圆盘的质量，kg； $Y_i$ 为各圆盘的振幅，mm。为简化计算，一般以静挠度来代替。图 9 所示搅拌系统，其静挠度为

$$Y_{si} = \sum_1^2 \int_0^{L_i} \frac{M M_0}{EI} dL \quad (mm) \quad (15)$$

将静挠度代入(14)可得一阶近似临界速度 (r/min)为

$$n_{cr1} = \frac{60}{2\pi} \omega_{cr} = 29.91 \sqrt{g \frac{\sum_{i=1}^n G_i Y_{si}}{\sum_{i=1}^n G_i Y_{si}^2}} \quad (16)$$

(2) 利用等效质量法求解一阶临界转速。

对图9中的双叶轮搅拌系统,把悬臂轴和轴上两个搅拌轮的质量,分别等效转化到轴与下搅拌轮中心的交点上,得到一个集中的等效质量  $W_e$  来求解一阶临界转速。等效质量  $W_e$  等于悬臂轴的等效质量  $W_0$  加上搅拌轮的等效质量  $W_1$  加下搅拌轮本身的质量  $G_2$ 。

1) 悬臂轴的等效质量  $W_0$  (kg):

悬臂轴的等效质量等于轴自身质量的1/4,即:

$$W_0 = \frac{1}{4} \rho \frac{\pi d^2}{4} L_2 = \frac{\pi \rho d^2 L_2}{16} \quad (17)$$

2) 上搅拌轮的等效质量  $W_1$ :

对上搅拌轮,根据转子动力学的观点,将其当作在悬臂轴轴端只有一个当量载荷  $W$  的系统来处理,其一阶临界转速为

$$n_{cr1} = 29.91 \sqrt{\frac{3EI}{L_2^2(L_2 + L_0)W}} \quad (18)$$

当悬臂轴上装有质量为  $G_1$  的上搅拌轮时,其临界转速为

$$n_{cr1} = 29.91 \sqrt{\frac{3EI}{L_1^2(L_1 + L_0)G_1}} \quad (19)$$

假设当量载荷  $W$  和质量为  $G_1$  的上搅拌轮作用是等效的,由公式(18)和(19)得上搅拌轮的等效质量  $W_1$  为

$$W_1 = \frac{(L_1 + L_0)L_1^2}{(L_2 + L_0)L_2^2} G_1 \quad (20)$$

3) 总的等效质量  $W_e$  (kg):

$$W_e = W_0 + W_1 + G_2 = \frac{\pi \rho d^2 L_2}{16} + \frac{(L_1 + L_0)L_1^2}{(L_2 + L_0)L_2^2} G_1 + G_2 \quad (21)$$

式中:  $W_e$ 、 $W_0$ 、 $W_1$ 、 $G_2$  分别总的等效质量、悬臂轴的等效质量、上搅拌轮的等效质量和下搅拌轮的等效质量, kg;  $\rho$  为轴的材料密度, kg/m<sup>3</sup>;  $d$  为轴的直径, m;  $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  分别为轴承间距、上搅拌轮质心距下轴承的长度和下搅拌轮质心距下

轴承的长度, m。

从而可得一阶临界转速  $n_{cr1}$  (rpm):

$$n_{cr1} = 29.91 \sqrt{\frac{3EI}{L_2^2(L_2 + L_0)W_e}} \quad (22)$$

(3) 利用经验公式法求解一阶临界转速。

对图9所示的双叶轮搅拌系统,其一阶临界转速的经验公式为

$$n_{cr1} = 60 \times \frac{5.1836 \times 10^4 d^2}{L_2 \sqrt{(L_2 + L_0)W_e}} \approx 3.1 \times \frac{10^6 d^2}{L_2 \sqrt{(L_2 + L_0)W_e}} \quad (23)$$

#### 1.4.2 搅拌转速 $n$ 的确定

按上述3个方法得到搅拌系统的一阶临界转速后,取其最小者并将其计为  $n_{c1}$ , 则搅拌转速  $n$  可确定如式(24)所示:

$$n \leq 0.75 n_{c1} \quad (24)$$

### 1.5 搅拌系统有限元分析<sup>[5]</sup>

#### 1.5.1 搅拌系统三维模型的建立

作用在搅拌系统上的力主要有:由于同轴度误差及搅拌轮不平衡而产生的离心惯性力  $G_d$  和料浆对搅拌轮的作用力  $F$ 、搅拌轴的扭矩等。以搅拌轴中心为  $X$  轴建立圆柱坐标系,施加载荷和约束后的坐标系和有限元模型分别如图10、11所示,网格模型如图12所示。

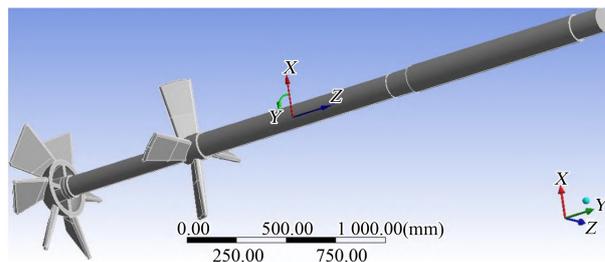


图10 模型坐标系

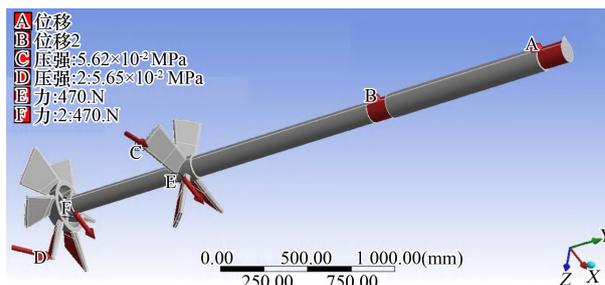


图11 施加载荷和约束

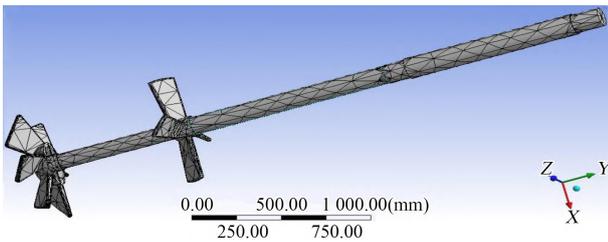


图 12 模型网格划分

### 1.5.2 搅拌系统的应力分布和振型模态

通过有限元分析计算,得到搅拌系统的等效应力、最大拉应力、最大剪应力及一阶振型模态分别如图 13~16 所示。

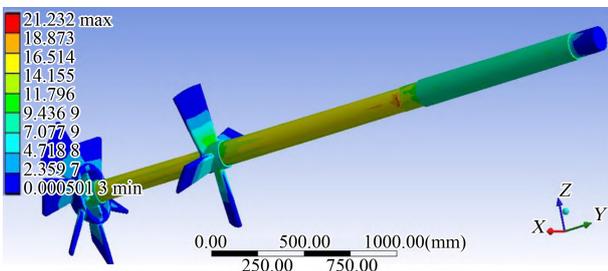


图 13 搅拌系统的等效应力

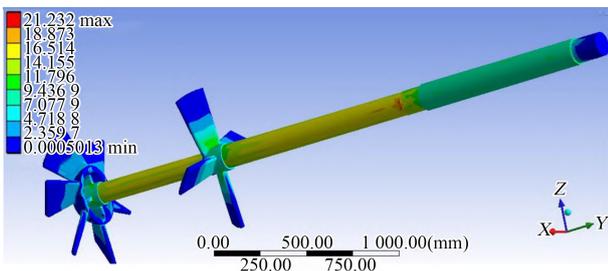


图 14 最大拉应力

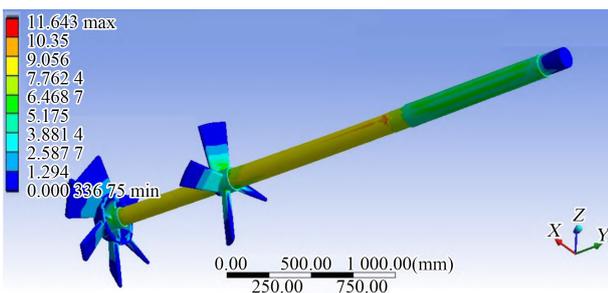


图 15 最大剪应力

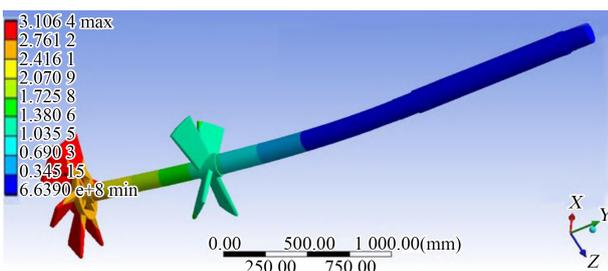


图 16 搅拌系统第一阶振型模态

## 2 高浓度搅拌槽实验研究

在某铁矿全尾高浓度胶结充填现场,对  $\varnothing 2\ 500\ \text{mm} \times 2\ 500\ \text{mm}$  高浓度搅拌槽样机进行了人工配矿性能试验研究。样机设计转速为  $210\ \text{r/min}$ ,装机功率为  $55\ \text{kW}$ 。

### 2.1 搅拌时间对料浆均匀性的影响

在搅拌转速、质量浓度相同的条件下,不同组分配比时,研究搅拌时间对料浆均匀性的影响。实测结果如表 1 所示。

可见,在质量浓度、搅拌速度相同时,随着搅拌时间的增加,溢流口处的实测浓度逐渐降低,而底流排料口处的砂浆浓度则逐渐增大,搅拌时间在  $15\ \text{min}$  左右时,槽内料浆浓度基本一致,达到配置浓度  $70\%$  并在小范围内波动,搅拌时间继续增加到  $20\ \text{min}$  以上时,浓度的变化不大。

之所以呈现这种变化,是因为作为主要充填材料的尾砂、水泥、粉煤灰均由槽体顶部加入,浆体上表面主要为带电荷的固相颗粒分散体系,各种粒子表现为悬浮状态,且局部有颗粒团聚现象,因此在搅拌早期,槽体上部的质量浓度比槽体底部的高。随着搅拌时间增加,强烈的搅拌混合与剪切作用使各种粒子与水的接触更加充分,并且在尾砂颗粒与水泥胶粒的激烈碰撞和擦洗过程中,尾砂颗粒表面逐渐变得湿润,水泥颗粒表面不断脱落而露出新的水泥表面,大大增加了水泥的水化程度,促进了水泥颗粒的弥散,水化硅酸钙凝胶大量生成。由于颗粒间的亲合作用,水泥及粉煤灰粒子便黏附在湿尾砂表面形成一层坚固密实的“壳”,这样不仅使尾砂表面水灰比降低,形成水灰比梯度,而且使水泥充分分散黏附于湿尾砂表面,最终达到砂浆充分混合和均匀弥撒的目的。从实验结果看,搅拌时间在  $15\ \text{min}$  左右为宜。

### 2.2 搅拌转速对料浆均匀性的影响

在质量浓度、搅拌时间相同的条件下,不同组分配比时,搅拌速度对料浆均匀性的影响,实测结果如表 2 所示。由表 2 可见,质量浓度、搅拌时间相同时,相同组份比的料浆,搅拌转速越高,料浆的均匀性越好,但运行电流越大,意味着搅拌功率越大。因此在满足料浆均匀性要求的前提下,宜选用较低的搅拌转速,以  $210\ \text{r/min}$  为宜。

表1 搅拌时间对料浆均匀性的影响

水泥:粉煤灰:尾沙	质量浓度/%	搅拌转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	实测质量浓度/%		搅拌时间/min
			溢流孔处	底流口处	
1:2:6	70	210	72.6	68.5	5
	70	210	71.5	69.3	10
	70	210	70.3	70.5	15
	70	210	68.8	70.3	20
	70	210	69.3	70.1	25
1:2:8	70	210	72.4	68.5	5
	70	210	71.5	69.1	10
	70	210	70.4	70.3	15
	70	210	69.5	70.5	20
	70	210	69.8	70.2	25
1:2:10	70	210	72.4	69.4	5
	70	210	71.5	70.9	10
	70	210	70.2	70.1	15
	70	210	69.4	69.5	20
	70	210	69.8	69.7	25

表2 搅拌速度对料浆均匀性的影响

水泥:粉煤灰:尾沙	质量浓度/%	搅拌时间/min	实测质量浓度/%		电流/A	搅拌速度/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )
			溢流孔处	底流口处		
1:2:6	70	15	70.5	70.8	50	190
	70	15	70.3	70.5	80	210
	70	15	70.1	70.2	98	230
1:2:8	70	15	70.6	71.2	62	190
	70	15	70.4	70.3	83	210
	70	15	70.3	70.4	110	230
1:2:10	70	15	70.7	71.6	64	190
	70	15	70.2	70.1	86	210
	70	15	70.3	70.5	113	230

### 2.3 组分配比对料浆均匀性的影响

在搅拌速度、搅拌时间相同的条件下,将不同组分配比的物料配制成质量浓度分别为65%、70%和75%的砂浆,分别测定底流排料口和上部溢流口的实际砂浆质量浓度来考察组分配比对料浆均匀性的影响,其实测结果如表3所示。由表3可知:组分配比相同时,料浆质量浓度越高,溢流孔和底流排料口处的浓度相差越大,料浆的均匀性越差;质量浓度相同时,组分配比越大,溢流

孔和底流排料口处的浓度相差越大,料浆的均匀性越差。这主要是因为,质量浓度越高组分配比越大,料浆的流动性越差。

搅拌转速为210 r/min时,槽体中心及周边浆体的流动如图17所示。由图可知:在槽体中心有明显的有凹陷旋涡,旋涡直径约为500 mm;在槽体周边,浆体呈鱼鳞花,伴有少量翻滚,粗颗粒在槽体内壁挡板和底部导流锥的作用下,被冲击翻腾至上层浆体,再向轴心往复循环;各组分在

表 3 不同组分配比对搅拌均匀性的影响

水泥:粉煤 灰:尾沙	质量浓 度/%	实测质量浓度/%		搅拌时间/ min	搅拌转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )
		溢流孔处	底流口处		
1:2:6	65	64.2	66.2	15	210
	70	68.6	71.5	15	210
	75	73.5	76.7	15	210
1:2:8	65	64.1	66.5	15	210
	70	68.4	71.8	15	210
	75	73.2	77.5	15	210
1:2:10	65	63.9	66.8	15	210
	70	68.6	71.5	15	210
	75	73.2	77.6	15	210



图 17 槽体中心及周边料浆流迹

槽体内激烈循环流动,没有沉积在槽体底部,搅拌混和效果好。

#### 2.4 组分配比及搅拌转速对搅拌功率的影响

不同组分配比的料浆,经过 15 min 的搅拌达到稳定工况后,测定实时运行电流,其实测结果如表 4 所示。

表 4 中的功率根据公式(25)求得:

$$N = \sqrt{3} \eta IU \cos \varnothing \quad (25)$$

式中:  $I$  为实测工作电流, A;  $U$  为电压(380 V);  $\cos \varnothing$  为电机功率因数,取 0.81;  $\eta$  为电机效率,取 0.928。

可得:

(1) 当组分配比相同时,浓度越高,功率消耗越大;组分配比越大,功率消耗越大。

(2) 当组分配比为 1:2:6、搅拌转速分别为 190、210、230 r/min 时,实测的消耗功率分别约为装机功率的 50%~63%、68%~76%、81%~93%;当组分配比为 1:2:8、搅拌转速为分别为 190、210、230 r/min 时,实测的消耗功率分别约为

装机功率的 53%~60%、70%~79%、92%~104%;当组分配比 1:2:10,搅拌转速分别为 190、210、230 r/min 时,实测的消耗功率分别约为装机功率的 54%~63%、72%~81%、95%~108%。

(3) 对上述 3 种组份比,当质量浓度为 70%,搅拌转速为 210 r/min 时,实测的消耗功率约为装机功率的 72%~77%,说明在此搅拌转速下,55 kW 的装机功率能满足搅拌要求。

#### 2.5 组分配比对充填体强度的影响

各组份按一定的配比配制成质量浓度为 65%、70%、75% 的料浆,在 210 r/min 搅拌转速下搅拌 15 min,将料浆制成标准试验模块,脱模后经 7、30、60 d 常温养护,分别测得其单轴抗压强度,实测结果如表 5 所示。

可得:

(1) 当组分配比相同时,质量浓度越高,抗压强度越大,质量浓度以不低于 70% 为宜。

(2) 质量浓度相同时,随着组分配比的增大,抗压强度减小,组分配比 1:2:6 时,其下降幅度最小。

(3) 质量浓度相同时,组分配比越大,抗压强度越低;随着养护时间的延长,前期其抗压强度均有下降,到一定时间后,抗压强度不再下降趋于稳定。

(4) 无粉煤灰时抗压强度的下降幅度远比有粉煤灰时大,这主要是因为随着养护时间的延长,充填体体积逐渐膨胀,压力增大,粉煤灰的多孔结构可为充填体提供压缩变形空间,保证充填体后期不会因为膨胀而发生崩解,解决充填体由于

表4 不同组份配比及搅拌转速对搅拌功率的影响

水泥:粉煤灰:尾沙	质量浓度/%	搅拌速度190 r/min		搅拌速度210 r/min		搅拌速度230 r/min		搅拌时间/min
		电流/A	功率/kW	电流/A	功率/kW	电流/A	功率/kW	
1:2:6	65	56	27.7	76	37.6	90	44.5	15
	70	59	29.2	80	39.6	98	48.5	15
	75	63	31.1	85	42.1	105	51.2	15
1:2:8	65	59	29.2	78	38.6	102	50.5	15
	70	62	30.7	83	41.1	110	54.4	15
	75	67	33.1	88	43.5	116	57.4	15
1:2:10	65	60	29.7	80	39.6	106	52.4	15
	70	64	31.2	86	42.5	113	55.9	15
	75	70	34.6	90	44.5	120	59.4	15

表5 组份比对强度的影响

水泥:粉煤灰:尾沙	质量浓度/%	抗压强度/MPa			抗压强度下降幅度/%		搅拌速度/(r·min <sup>-1</sup> )	搅拌时间/min
		7 d	30 d	60 d	30 d	60 d		
1:0:6	65	0.65	0.45	0.43	30.7	4.0	210	15
1:2:6	65	0.47	0.41	0.41	12.7	0	210	15
1:2:8	65	0.39	0.33	0.33	15.4	0	210	15
1:0:6	70	1.55	1.10	1.08	29.0	1.8	210	15
1:2:6	70	1.04	0.90	0.90	13.5	0	210	15
1:2:8	70	0.79	0.68	0.67	13.9	1.5	210	15
1:0:6	75	1.63	1.16	1.14	28.8	1.7	210	15
1:2:6	75	1.35	1.15	1.15	14.8	0	210	15
1:2:8	75	1.09	0.92	0.91	15.6	1.0	210	15

膨胀导致强度降低的问题。因此,在全尾高浓度胶结充填中,适当加入粉煤灰是必要的。

### 3 结论

(1) 对搅拌系统进行了搅拌扭矩的分析研究,确定了高浓度搅拌槽的搅拌功率,建立了搅拌系统的简化力学模型,用能量法、等效质量法、经验公式法得到了搅拌系统一阶临界的计算公式。

(2) 建立了搅拌系统有限元分析模型,确定了边界条件及约束,得到了搅拌系统的应力分布和振型模态。

(3) 对样机进行了人工配矿性能试验,实验研究了搅拌时间、搅拌速度、料浆组分对料浆均匀性、搅拌功率及料浆组分对充填体强度的影响,

表明开发研制的高浓度搅拌槽样机满足全尾胶结充填高浓度料浆的搅拌制备。

### 参考文献:

- [1] 何哲祥,田守祥,隋利军. 矿山尾矿排放现状与处置的有效途径[J]. 采矿技术,2008(3):78-80.
- [2] 杨建桥,黄德镛. 矿用充填料搅拌机研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊. 2011(5):61-63.
- [3] 周爱民. 矿山废料胶结充填[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [4] 朱凯. 全尾充填高浓度砂浆搅拌槽的设计研究[D]. 长沙:长沙矿冶研究院,2013.
- [5] 李兵,何正嘉,陈雪峰. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]. 北京:清华大学出版社,2011.