

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.007

基于水煤浆湿法磨矿的球磨机磨腔流场分析

李 宁, 褚金林, 毛亚郎, 孙 毅

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

摘 要:水煤浆是一种新型煤基流体洁净环保染料,其最常用的制备技术为球磨机湿法磨矿工艺。利用计算流体力学(CFD法)对水煤浆湿法磨矿时球磨机磨腔进行数值模拟,得到钢球和煤浆在磨腔底部及泻落区域体积浓度大,在抛落区域体积浓度小;体积浓度梯度大小与体积浓度相反;钢球在脱离点与抛落终点附近存在较大的压强与压强梯度;当粘度或磨腔转速一定时,随着一方增加,混合物平均湍动能和平均湍流耗散率都先增大后减小,存在一个最大值。图9参10

关 键 词:水煤浆;球磨机;湿法磨矿;计算流体力学(CFD)

中图分类号:TD453;TP391.77

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2012)06-0024-05

Analysis of the Flow Field in Ball Mill Chamber Based on Coal Water Mixture Wet Grinding

LI Ning, CHU Jinlin, MAO Yalang, SUN Yi

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Coal water mixture is a new type of clean environmental protection dye of coal based fluid, the most common preparation technology is a wet grinding process of ball mill. The numerical simulation of coal water mixture wet grinding was done with computational fluid dynamics (CFD) in ball mill chamber, the results show that the larger volume concentration of ball and coal slurry are in the grinding chamber bottom and shed region and the smaller volume concentration are in the throw region, the volume concentration gradient is just the opposite; Larger pressure and pressure gradient of ball exist near separation points and throw endpoints; when the viscosity or grinding chamber speed are fixed, either one increases, the average turbulent kinetic energy and the average turbulent dissipation rate of mixture are all start with increasing, then decreasing and so with a maximum value. [Ch, 9 fig. 10 ref.]

Key words: coal water mixture; ball mill; wet grinding; computational fluid dynamics (CFD)

0 引言

水煤浆是20世纪70年代末国际石油危机时出现的一种煤炭高新技术产品,是一种新型煤基流体洁净环保染料,其制备工艺简单、实现了煤无需化学转化,只经物理加工即可为液态燃料,其最常用的制备技术为球磨机一段湿法磨矿工艺^[1]。

水煤浆湿法磨矿作业与一般的湿法作业既有相似

点,又有其特有的性质。球磨机湿法作业时,磨腔内部并不是一般的冲击碰撞和研磨^[2],内部的固液两相流动情况是非常复杂的,且基于欧拉模型的湿法粉碎和以往的干法破碎有很大的区别,以往的干法破碎总结出来的能耗规律不再适用,流场对粉碎的效果所起的作用还不是很清楚。因此,针对球磨机水煤浆湿法作业时的真实情况,运用计算流体力学 Fluent 软件,选用

收稿日期:2011-10-12;修回日期:2011-12-14

基金项目:浙江省自然科学基金(LZ12E05002)

作者简介:李宁(1986),女,陕西咸阳人,浙江工业大学硕士研究生,主要从事机械产品有限元分析、流体分析。通信作者:孙毅, E-mail: sunyi@zjut.edu.cn

欧拉、标准 k - ϵ 湍流模型,从气-固-液三相出发,对球磨机磨腔内部的能耗规律进行研究很有必要。

1 球磨机磨腔固液数值模拟

1.1 磨腔流场数学模型

一般来说,描述流体流动^[3]的基本方程为质量、动量、能量守恒方程^[4]。其中

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{\mu}) = 0 \quad (1)$$

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{\mu}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{\mu}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \bar{\mu}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4)$$

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho i \bar{\mu}) = \operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad} T) - p \cdot \operatorname{div}(\mu) + \phi + S_i \quad (5)$$

式中

$$\phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda (\operatorname{div} \bar{\mu})^2 \quad (6)$$

式(1)至(6)中,所涉及参数的含义是

$$\bar{\mu} = u\bar{i} + v\bar{j} + w\bar{k} \quad (7)$$

其中, u, v, w ——流体在 x, y, z 坐标方向的分量;
 ρ ——流体密度; μ ——流体动力粘度; i ——流体内能; k ——导热系数; T ——流体温度; p ——流体压力;
 λ ——第2黏性系数; S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} ——流体源; S_i ——热源。

$\operatorname{div}(\bar{\mu})$ 为矢量 $\bar{\mu} = u\bar{i} + v\bar{j} + w\bar{k}$ 的散度,定义为

$$\operatorname{div}(\bar{\mu}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}。$$

1.2 球磨机磨腔中的液固流动

1.2.1 简化与假设

考虑到球磨机中磨腔中流体的复杂性^[5],为方便对流体流动细节进行研究,在建立数学模型前,需对实际磨腔内部做一些简化:

1) 不考虑流体与壁面摩擦产生的热效应;

2) 磨腔内流体流动处于湍流状态;

3) 假设流场恒温,不考虑能量传递;

4) 固相颗粒均为球形颗粒。

1.2.2 数值模拟

1) 三维造型

文中以 $\varnothing 600 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ 实验磨机为对象进行水煤浆湿法磨矿磨腔内部的固液流动分析。利用 ANSYS Workbench 的几何建模模块—DesignModeler 自底向顶进行球磨机磨腔建模,其三维造型后的截面图如图1。根据实验室试验研制的实验磨机规格建模,取磨机筒体直径为 $D = 600 \text{ mm}$ (筒体壁厚为 5 mm),其轴向破碎长度为 $L = 900 \text{ mm}$ 。根据文献[6]中描述的凸棱衬板的相关设计及尺寸选取原则,取凸棱坡角 30° ,凸棱顶宽 14 mm ,凸棱高度 13 mm ,圆周方向放置8块衬板。

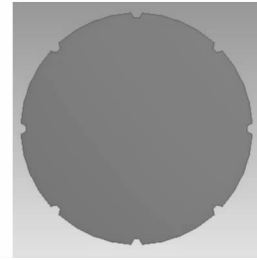


图1 磨腔内部流场截面图

Figure 1 Flow field of grinding chamber

2) 网格生成

采用扫略对计算区域进行了六面体网格的划分,为获得较好的初始网格条件,采用精细精度,生成较高网格质量的网格系统,如图2和图3所示。计算区域内,网格总数为115 414个。

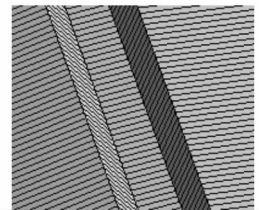
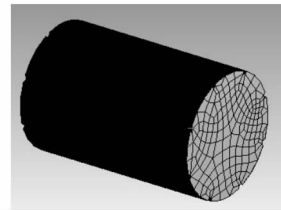


图2 球磨机磨腔
内部流场网格

图3 衬板处网格
Figure 3 Liner's grid

Figure 2 Flow field's
grid of grinding chamber

3) 数值格式及材料模型

对球磨机磨腔内流场进行网格划分及质量检测后,设置其求解器为 Pressure-Based,速度为 Absolute,时间为 Transient,考虑 y 方向重力加速度为 -9.81 m/s^2 。

s^2 。选择湍流模型为标准 k - ϵ 、隐式欧拉模型,根据磨腔内部实际情况,磨腔内充填钢球与煤浆,未填充钢球与煤浆的部位为空气,所以选其欧拉相数为 3 相。

材料模型在 FLUENT 材料模型库中选取和自己设定,在材料模型中选择 air,密度和黏性采用默认值;球磨机湿法磨煤^[7]时,取充填煤浆密度为 $1\,228\text{ kg/m}^3$,煤浆黏度 $4.3\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$;取钢球的密度 $7\,900\text{ kg/m}^3$,黏度默认为 $1.7894\times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

设置空气为第 1 相,煤浆为第 2 相,直径 15 mm 的钢球^[8]为第 3 相,钢球黏度默认为 $1.7894\times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,颗粒体积黏度为 lun-et-al,其余为默认。

4) 边界条件

球磨机湿法磨矿,磨腔做运动壁面处理^[9],设筒体绕 z 轴旋转,取磨机筒体转速率为 0.7。列文松理论转速

$$n_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{D} \frac{42.3}{\sqrt{\sin \varphi}}} \approx \frac{42.3}{\sqrt{D \sin \varphi}} \quad (8)$$

式中: φ ——摩擦角, $\varphi = \arctan f$, f 为衬板表面的摩擦

提升系数。

则筒体临界转速 $n_c = 67.33\text{ r/min} \approx 68\text{ r/min}$,从而确定实验磨机的转速为 47 r/min 。

5) 数值求解

①模拟方式

整个方程组的求解通过 CFD 软件 FLUENT13.0 完成。采用压力-速度耦合有限体积法进行求解,其速度场和压力场互相耦合。

②初始化

全场初始化后,为球磨机磨腔填充钢球和煤浆,直径为 15 mm 钢球填充率^[10]取为 50%,球磨机粉碎时煤浆充填量一般以将球间空隙填满埋没为标准,这里取煤浆填充率为 1。

③模拟结果

在实际生产中,由于筒体轴向长度往往较磨介直径来说非常大,所以其对磨介运动的影响可以忽略。图 4 为钢球和煤浆混合物在筒体轴向长度上的湍动能和湍流耗散率。

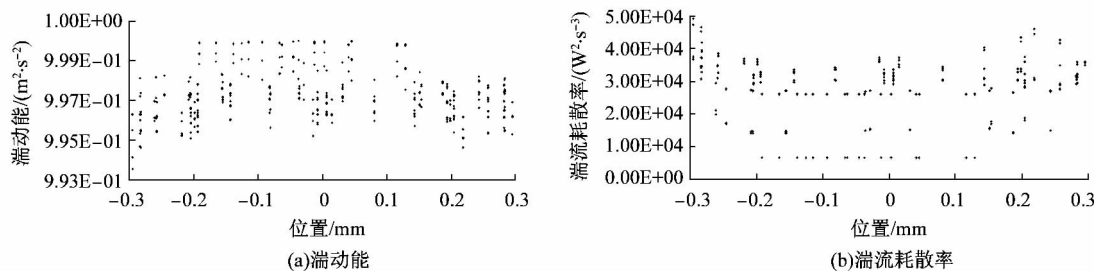


图 4 钢球和煤浆混合物在筒体轴向长度的湍动能和湍流耗散率分布图

Figure 4 Turbulent kinetic energy and the turbulent dissipation rate of ball and coal slurry mixture in cylinder axial length

从图 4 可以看出,沿着筒体轴向长度方向,钢球和煤浆的混合物湍动能、湍流耗散率变化较小,由于筒体两端端盖的影响,湍动能在端盖附近较小,而湍流耗散率在端盖附近较大,这与球磨机湿法磨矿时,湍动能和湍流耗散率的实际情况相符,说明了模型的正确性。故在下面的分析中,主要针对筒体径向方向进行分析。

从图 5 和图 6 可以看出,钢球与煤浆在磨腔内呈现抛落运动与泻落运动的混合状态。磨腔底部包括泻落区域钢球与钢球、煤浆与煤浆间空隙较小,体积浓度大;在抛落区域,钢球与煤浆由于处在抛落状态,钢球与钢球、煤浆与煤浆之间存在空隙,则体积浓度较小;体积浓度小的区域,存在较大的浓度梯度,在钢球与煤浆脱离点附近,部分钢球与煤浆随着筒体旋转到达开始抛落点,部分钢球与煤浆已经抛落,存在较大的浓度

梯度;在钢球与煤浆的抛落终点附近,部分钢球与煤浆还处在抛落状态,部分钢球与煤浆已经冲击衬板,到达抛落点即瞬时速度为零,并将开始随着衬板做圆周运动,存在较大的体积浓度梯度。而靠近筒体区域,钢球与煤浆随着筒体一起旋转,且由于煤浆黏性力的影响,体积浓度较小。这与球磨机实际运动状况是相符的。

从图 7 可以看出,钢球在脱离点与抛落终点附近存在较大的压强与压强梯度,这是因为钢球处在抛落状态时,钢球与钢球之间不存在作用力,而在脱离点与抛落终点左右,钢球与钢球之间都存在较大的作用力,特别是抛落终点附近,钢球由于抛落而携带了较大的动能,钢球与钢球、钢球与衬板碰撞产生较大的冲击力,作用力及作用力梯度都很大,则相对应的压强与压强梯度也很大。

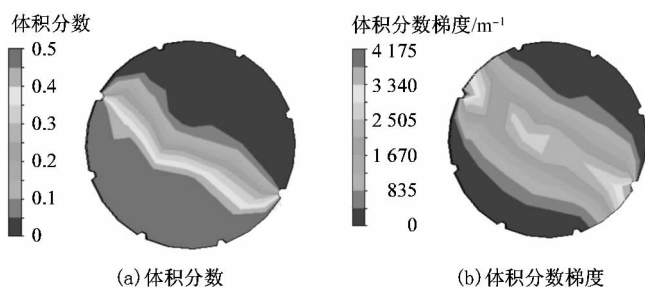


图5 钢球体积浓度及体积浓度梯度分布云图

Figure 5 Volume concentration and the volume concentration gradient of ball

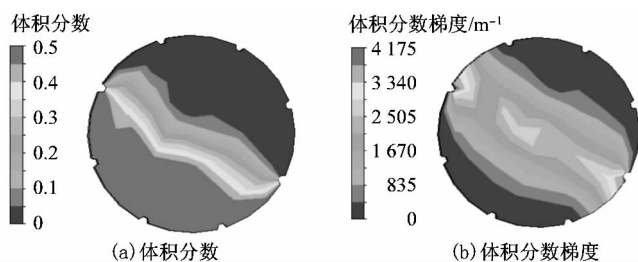


图6 煤浆体积浓度及体积浓度梯度分布云图

Figure 6 Volume concentration and the volume concentration gradient of coal slurry

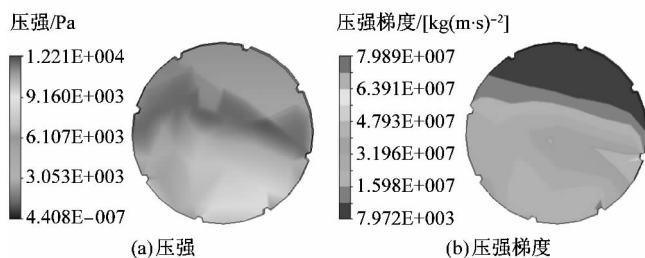
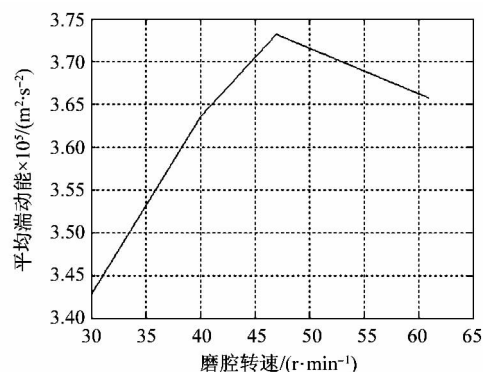


图7 钢球压强及压强梯度分布云图

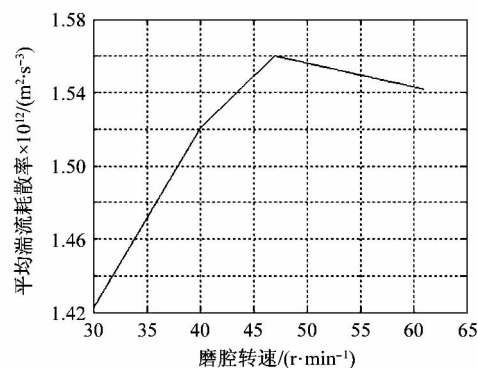
Figure 7 Pressure and pressure gradient of ball

从图8可以看出,当黏度一定时,混合物平均湍动能和平均湍流耗散率随转速的增加先增大后减小,存在一个最大平均湍动能和平均湍流耗散率值。煤浆黏度一定时,当转速过大,由于煤浆的黏性作用,大量煤浆粘附在钢球或筒壁上,随钢球和筒壁一起运动,混合物速度梯度减小,从而降低了混合物的平均湍动能。

从图9可以看出,当磨腔转速一定时,随着煤浆黏度的增加,混合物平均湍动能和平均湍流耗散率先缓慢增加至某值后迅速增加,至某值后缓慢增加,再开始减小,存在一个最大平均湍动能和平均湍流耗散率值。当黏度值适中时,球的表面由于粘附煤浆而使粉碎效果变好,从而平均湍动能和平均湍流耗散率增大;但黏度过大,钢球和煤浆有可能粘附在磨机筒壁上,随筒壁



(a) 平均湍动能



(b) 平均湍流耗散率

图8 黏度为4.3 kg/(m·s)时平均湍动能、平均湍流耗散率随转速变化

Figure 8 Average turbulent kinetic energy and the average turbulent dissipation rate change with the grinding chamber speed when the viscosity is 4.3 kg/(m·s)

一起转动,使得磨矿过程无法正常进行,平均湍动能和平均湍流耗散率减小。

2 结论与展望

以上对水煤浆湿法磨矿时磨腔内部流场分析可得出如下结论:

1) 钢球与煤浆在磨腔内呈现抛落运动与泻落运动的混合状态。磨腔底部包括泻落区域钢球与钢球、煤浆与煤浆间空隙较小,体积浓度大,在抛落区域,钢球与钢球、煤浆与煤浆之间存在空隙,则体积浓度较小;体积浓度小的区域,存在较大的浓度梯度,体积浓度大的区域,存在较小的浓度梯度。

2) 钢球在脱离点与抛落终点附近存在较大的压强与压强梯度,当粘度或磨腔转速一定时,随着一方增加,混合物平均湍动能和平均湍流耗散率先增大后减小,存在一个最大值。

3) 对水煤浆湿法磨矿时球磨机磨腔内部流场进

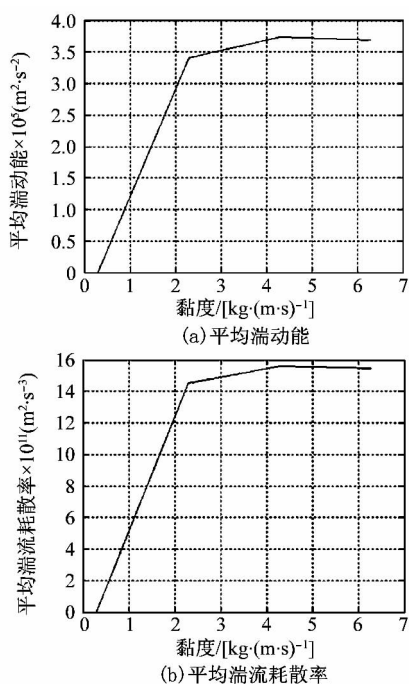


图9 磨腔转速为47 r/min时平均湍动能和平均湍流耗散率随黏度变化

Figure 9 Average turbulent kinetic energy and the average turbulent dissipation rate change with the viscosity when the grinding chamber speed is 47 r/min

行了分析,仿真结果与经验知识相仿,但其准确性尚需实验验证。

参考文献(References):

- [1] 吴良忠,韦业,余礼明,等.水煤浆在节能减排中的应用及发展前景[J].中国环境管理干部学院学报,2010,20(6):45-48.
- [2] METZGER M J, GLASSER D, HAUSBERGER B, et al. Use of the attainable region analysis to optimize particle breakage in a ball mill[J]. Chemical Engineering Science, 2009,64(17):3766-3777.
- [3] CHAI T, ZHAI L, YUE H. Multiple models and neural networks based decoupling control of ball mill coal-pulverizing systems[J]. Journal of Process Control, 2011,21(3):351-366.
- [4] 李人宪.有限体积分法基础[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [5] 王翠,张有忱,黎镜中.迷宫螺旋泵水煤浆输送的CFD模拟及其内部磨损的初步探讨[J].广东化工,2011,38(5):57-59.
- [6] 江旭昌.管磨机[M].北京:中国建材工业出版社,1992.
- [7] 尉迟唯,李保庆,李文,等.煤质因素对水煤浆性质的影响[J].燃料化学学报,2007,35(2):146-154.
- [8] 刘焱,赵国峰,何岩岩,等.生产水煤浆用新型超细搅拌球磨机的研究[J].煤炭加工与综合利用,2011(1):47-49.
- [9] CHOI W S, CHUNG H Y, YOON B R, et al. Applications of grinding kinetics analysis to fine grinding characteristics of some inorganic materials using a composite grinding media by planetary ball mill[J]. Powder Technology, 2001,115(3):209-214.
- [10] 金梅珍.双筒中心圆管振动磨[J].轻工机械,2011,29(1):12-15.

[信息·简讯]

· 行业简讯 · 2012(第10届)中国国际啤酒、饮料制造技术及设备展览会盛大开幕

中国联合装备集团公司和慕尼黑国际博览集团联合主办、北京中轻合力国际展览有限公司和慕尼黑展览(上海)有限公司共同承办的2012(第10届)中国国际啤酒、饮料制造技术及设备展览会(CBB 2012)于2012年9月19日上午10时在北京中国国际展览中心(新馆)盛大开幕。

中国轻工业联合会会长步正发,中国建筑材料集团有限公司副总经理马建国,中国酒业协会、国家工信部消费品工业司副司长高延敏,北京市经济和信息化委员会副主任万新恒,中国乳制品工业协会、中国轻工机械协会等政府有关部门和行业组织领导出席开幕式并剪彩。中国联合装备集团公司总经理刘安江和慕尼黑国际博览集团董事总经理菲弗分别在开幕式上致欢迎词,北京中轻合力国际展览有限公司总经理王欣主持了开幕式。

各参会领导在刘安江总经理陪同下兴致勃勃地参观了各个展馆,认真观看了各种展品,并与参展商亲切交谈,使参展商倍受鼓舞。途中各参会领导还来到中国联合装备集团公司展台进行了参观和指导,认真听取了南京轻工机械集团、合肥中辰轻工机械有限公司和重庆中轻装备有限公司近年发展的情况汇报和参展设备的性能介绍,对集团公司多年来坚持科学发展观以及始终以技术创新引领中国啤酒、饮料装备行业的发展所取得的成就表示赞赏。

各参会领导对CBB 2012的成功举办给予了充分的肯定,对啤酒饮料机械设备行业今后的发展提出了希望和要求。以集团公司啤酒饮料机械板块为代表的中国啤酒、饮料装备行业优秀供应商,把增强自主创新能力作为中国啤酒、饮料装备行业发展战略,致力于建设创新型行业;大力开发具有自主知识产权的核心技术和专利产品,努力提高创新能力;使液态食品机械行业领略装备制造前沿的技术和科研成果,并引领整个行业发展方向,为中国液态食品行业的快速发展做出了重要贡献。

CBB 2012“绿色、安全、低碳”的发展理念,契合了当前液态食品行业最新理念,中外展商展示的新产品、新技术和新装备对未来产业发展和变革具有前瞻性影响。本届展会具有国际性更为显著、中国企业耀眼夺目、强化了学习与商务功能等特色。

CBB 2012整个展期,参观人数达到51 428人次,国际专业观众的比例比往届有显著提高。越南、俄罗斯、白俄罗斯、乌克兰、哈萨克斯坦等周边国家行业协会纷纷组团参观考察展会,国内外知名液态食品企业集团高规格组团参观展会。

2012(第10届)中国国际啤酒、饮料制造技术及设备展览会实现了预计目标,取得圆满成功。

(中国联合装备集团公司)

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.008

碟形弹簧加载机构刚度特性分析

张楚信¹, 徐云根², 方利卡³, 翁泽宇³

(1. 杭州市生产力促进中心, 浙江 杭州 310012; 2. 杭州三花研究院有限公司, 浙江 杭州 310018;
3. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:以某试验机的对合组合的碟形弹簧加载装置为研究对象,采用 Almen-Laszlo 理论计算法与试验测试法对其进行刚度特性的研究,并对其结果进行了比较。结果表明应该用试验测试法确定碟形弹簧的刚度特性,而理论计算法只能作为参考。图3表3参9

关键词:碟形弹簧;刚度特性;理论计算;试验测试

中图分类号:TH87 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)06-0029-03

Rigidity Character Analysis of Disc Spring Loading Mechanism

ZHANG Chuxin¹, XU Yungen², FANG Lika³, WENG Zeyu³

(1. Productivity Promotion Centre of Hangzhou, Hangzhou 310012, China;

2. Hangzhou Three Flowers Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310018, China;

3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Taking the disc spring loading mechanism of some testing machine as the research object, its rigidity characters were studied with the Almen-Laszlo theoretical calculation method and experiment analysis method and the results were compared. The results show that should use the experiment analysis method to determine the rigidity characters of disc spring and the theoretical calculation method can only be used as a reference. [Ch, 3 fig. 3 tab. 9 ref.]

Key words: disc spring; rigidity characters; theoretical calculation; experiment analysis

1 问题的提出

碟形弹簧是由钢板冲压成碟形的薄板弹簧,其主要特点是结构紧凑,轴向刚度大,加载均匀,缓冲和减振能力强,使用寿命长等。标准的蝶形弹簧具有较好的弹性与强度,正常使用情况下不会产生塑性变形,适用于设计轴向空间紧凑的加载机构^[1-2]。

某试验机的加载机构要求载荷大、精度高、结构紧凑,为此设计了蝶形弹簧加载机构。通过对蝶形弹簧施加不同的预压缩量,产生所需要的加载载荷,设计要求最大的载荷为4.5 kN。载荷的大小由预压缩量来控制。因此需要通过对该蝶形弹簧加载机构的刚度特性进行分析,以确保载荷由预压缩量来实现精确控制^[3]。

由于单片碟形弹簧的变形量和负荷值往往不能满足设计要求,这时可成组使用。碟形弹簧典型组合方式有:对合组合碟形弹簧、叠合组合碟形弹簧与复合组合碟形弹簧^[4]。采用不同的组合方式可以得到不同的负载非线性变特性曲线^[5]。文章研究的某试验机碟形弹簧加载机构是对合组合碟形弹簧,由21片C系列碟形弹簧(GB/T1972-2005)组成,主要参数:外径 $D=71$ mm,内径 $d=36$ mm,厚度 $t=2$ mm,压平时变形量 $h_0=2.6$ mm,自由高度 $H_0=4.6$ mm。对合组合碟形弹簧如图1所示。分别用理论计算法与试验测试法对该试验机碟形弹簧加载装置刚度特性进行研究,并对其结果进行分析比较。

2 Almen-Laszlo 计算法

关于碟形弹簧刚度的计算方法,目前大多采用由

收稿日期:2012-05-17;修回日期:2012-07-28

基金项目:浙江省先进制造技术与装备重中之重学科开放基金(20100734)

作者简介:张楚信(1963),男,浙江东阳人,工学学士,高级工程师,主要从事机械工程及金属材料工艺与应用的研究。E-mail: zcx@hznet.com.cn;通信作者:翁泽宇,浙江工业大学机械工程学院, wengzy8888@163.com