

汽爆系统中进料密封阀门的结构设计及稳定性分析

刘峰¹, 孔晓玲^{1*}, 赵敏晖²

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 云南天际旭能新能源科技有限公司, 昆明 650000)

摘要: 针对汽爆系统中进料口阀门进料效率低, 容易漏气等问题, 设计了一种集进料、密封和开启为一体的进料密封阀门。根据阀门的材质和使用环境, 对阀门中的阀芯进行了理论分析, 并利用 ANSYS Workbench 软件对其进行强度分析, 得到了阀芯的最大变形量发生位置以及能够满足其稳定进料和密封时螺旋轴的最佳直径和最佳转速, 经理论计算和强度校核, 阀门在正常工作环境下, 其阀芯的强度完全满足设计要求。对不同进料时间和转速对阀门的进料稳定性影响进行试验研究, 确定 150 kg 玉米秸秆完成进料时的最佳转速为 200 r·min⁻¹, 最佳进料时间为 5 min。

关键词: 汽爆系统; 理论分析; 强度校核; 试验研究

中图分类号: S224.29

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2014)03-0517-06

Structure design and stability analysis of sealing valve for feed in steam explosion system

LIU Feng¹, KONG Xiaoling¹, ZHAO Minhui²

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2. Yunnan Tianji Xuneng New Energy Co. Ltd, Kunming 650000)

Abstract: In order to solve low feed control efficiency, easy leakage and other problems of inlet valve in the steam explosion systems, a feed valve which simultaneously achieves feeding, sealing and opening was designed. Through theoretical analysis of valve core according to material and working environment of valve and intensity using ANSYS Workbench, the maximum deformation position of valve core, the optimum diameter and the best speed of screw shaft which can ensure the stability of feed and seal were obtained. Through theoretical calculation and intensity check, the strength of valve core fully meets the design requirements under normal working conditions. The experimental test for the impact of feeding time and speed on the stability of feed shows that the optimal speed for feed is 200 r/min and the best feeding time is 5 min, to feed 150 kg corn stalks.

Key words: steam explosion system; theoretical analysis; intensity check; experimental study

蒸汽爆碎(简称汽爆)预处理是近几年才发展起来的一种秸秆预处理方法。原料用蒸汽加热至 180~235℃, 维压一定时间后, 突然减压释放, 产生二次蒸汽, 体积猛增, 在机械剪切力的作用下, 其固体物料结构被破坏, 增大了与生物药剂接触的有效面积, 为原料的进一步降解做好铺垫^[1-6]。

目前的汽爆设备一般都采用高压球阀作为物料的进出口阀门, 高压球阀的内部结构如图 1 所示。高压球阀虽然可以用来很好地密闭反应容器, 但是其用于玉米秸秆等物料时易导致阀口拥堵, 使进料速度减慢, 甚至于秸秆粘附球阀表面会造成漏气现象, 影响汽爆设备的使用寿命。

本研究在原有设备的基础上进行了阀门的结构设计, 稳定性校核、分析及试验。

1 阀门的结构设计

进料阀门的结构如图 2 所示, 它是由密封阀柱和密封圈组成, 利用汽爆系统中的中高压蒸汽推动密封阀柱向上移动, 使阀柱内的硅胶密封圈与非标密封法兰的密封端面相互挤压, 来保证密封圈的变形量在 15%~30%之间, 以达到密封要求。阀门开启是基于汽爆罐中产生的负压和阀门自身重力来保证阀芯向下移动, 向下移动的速度和最大距离分别通过葫芦装置和定位板限制。为防止秸秆的拥堵,

收稿日期: 2013-07-10

作者简介: 刘峰, 硕士研究生。E-mail: 605152176@qq.com

* 通信作者: 孔晓玲, 教授。E-mail: kong923@126.com

在阀柱的上端安装有螺旋推进器，由于两者采用可伸缩万向联轴器连接，在轴向上具有补偿功能。

阀门密封面具有自动清洁功能。进完料后，依靠螺旋推进器自身的转动，物料产生离心力，从而使物料与密封面脱离，并在其重力作用下，进入汽爆罐中，从而实现了自清洁。

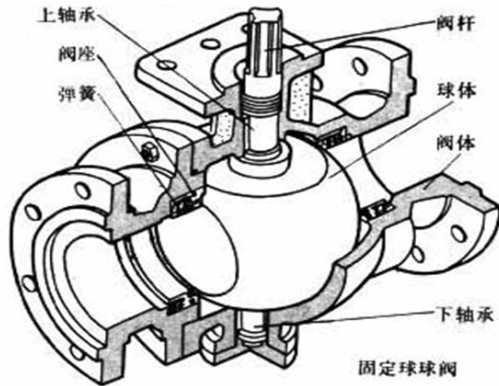
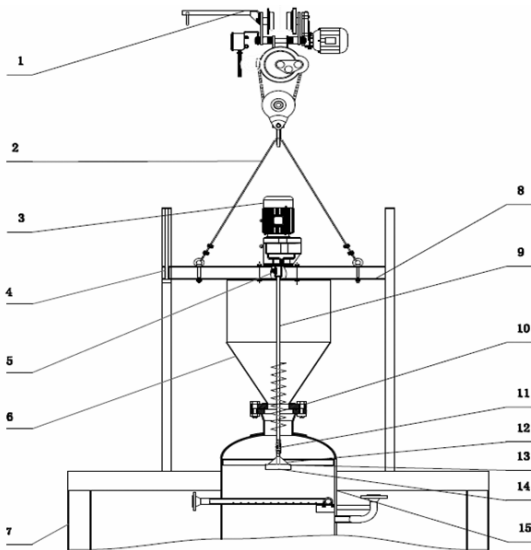


图 1 球阀内部结构示意图

Figure 1 The internal structure diagram of valve



1. 葫芦装置, hoist device; 2. 钢丝绳, steel wire rope; 3. 电磁调速电机, electromagnetic speed regulating motor; 4. 光杆导轨, rod guide; 5. 轴套, shaft sleeve; 6. 锥形进料口, conical inlet; 7. 支架, support frame; 8. 电机架, motor frame; 9. 螺旋推进器, screw propeller; 10. 密封法兰, sealing flange; 11. 可伸缩万向联轴器, scalable universal coupling; 12. 导向锥, guide cone; 13. 硅胶密封圈, silicone ring; 14. 密封阀柱, seal valve column; 15. 汽爆罐, steam explosion tank

图 2 阀门的安装示意图

Figure 2 Schematic diagram of valve installation

1.1 密封阀柱和密封圈的结构设计

1.1.1 密封阀柱的结构尺寸 密封阀柱工作情况如图 3 所示，阀柱厚度 δ_0 可由式 (1) 计算，其中 K

为结构特征系数, $K=0.35$, Φ 为焊缝系数, $\Phi=0.8$, 密封阀柱外径 $D_0=249$ mm, 厚度 $\delta_0=30$ mm。

$$\delta_0 = D_0 \sqrt{\frac{Kp}{[\sigma]\phi}} \tag{1}$$

1.1.2 密封圈及密封阀柱上密封槽的结构尺寸 密封圈材料选为硅橡胶 (温度 $-70^\circ \sim 350^\circ$, 硬度 $8 \sim 25$ 邵氏), 弹性模量 $E=40$ Mpa, 采用封闭式密封槽, 密封圈的内径 $D_{i1}=215$ mm, 密封圈截面高度 $h_0=5.8$ mm, 宽度 $b_0=10$ mm, 密封阀柱上密封槽宽度 $b=14.8$ mm, 深度与密封圈高度相一致 $h=5.8$ mm^[11]。

1.1.3 密封圈强度计算 选用轴向挤压变形极限时, 要考虑到密封圈的工作寿命, 一般轴向变形值 ϵ 取 $15\% \sim 30\%$ 。密封圈最小变形量为 Δh_{\min} , 最大变形量为 Δh_{\max} , 变形后的最大高度为 h_{\max} , 变形后的最小高度为 h_{\min} , 截面高度公差为 C , $C=0.2$ 。

$$\Delta h_{\min} = \epsilon_{\min} \times h_0 \tag{2}$$

$$\Delta h_{\max} = \epsilon_{\max} \times h_0 \tag{3}$$

$$h_{\max} = (1 - \epsilon_{\min}) \times (h_0 + C) \tag{4}$$

$$h_{\min} = (1 - \epsilon_{\max}) \times (h_0 + C) \tag{5}$$

密封圈预紧力可通过式 (6)、(7) 计算, 实现完全密封所需的预紧力 $F=42$ kN \sim 84 kN 之间, 而汽爆罐中的蒸汽压力 $P_C=1.5$ Mpa, 其对密封圈所产生应力 $F_C=73$ kN, 所以在 1.5 MPa 的蒸汽压力下, 阀门可以实现完全密封, 而且密封圈不会失效。

$$F_{\min} = EA \Delta h_{\min} / h_0 \tag{6}$$

$$F_{\max} = EA \Delta h_{\max} / h_0 \tag{7}$$

$$F_{\max} = EA \Delta h_{\max} / h_0$$

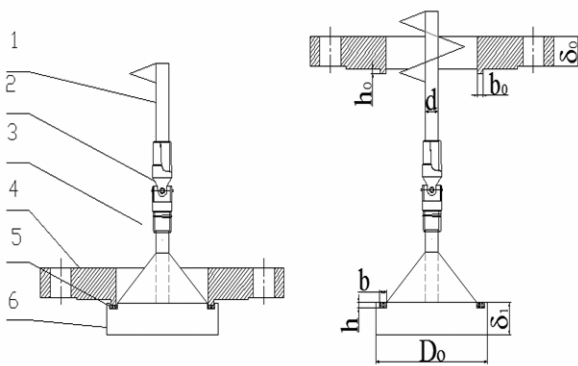
1.2 密封法兰的结构设计

由于密封法兰在阀门结构设计有起到一个密封面的作用, 结构如图 3 所示。其结构尺寸与汽爆罐进料口连接法兰相匹配, 厚度 $\delta_1=28$ mm, 内孔直径 $D_i=216$ mm, 密封端面与密封圈的截面宽度相一致 $b_1=10$ mm, 其高度通过密封圈的最大变形量 Δh_{\max} 设计计算, 确定 $h_1=3$ mm。

1.3 螺旋推进器的结构设计

螺旋推进器的主要作用是利用螺旋旋转所产生的动力来打破秸秆物料在汽爆罐进料口的堆积、堵塞和结拱现象。

1.3.1 螺旋推进器螺旋直径的确定 螺旋推进器螺旋直径大小直接影响着秸秆物料的进料速度和进料质量。秸秆物料均匀地撒到旋转的螺旋叶面时, 由于物料与螺旋面之间存在着摩擦力, 导致部分物料会随着螺旋一起旋转, 另一部分物料会在其重力作用下垂直下落^[9]。

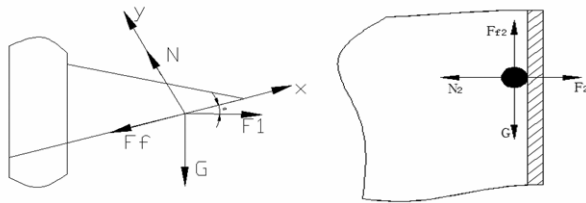


(a) 封闭状态, closed state (b) 开启状态 on-state

1.螺旋推进器, screw propeller ;2.可伸缩的十字万向联轴器, scalable universal coupling;3.导向锥,guide cone;4.密封法兰盘, sealing flange;5.硅橡胶圈, silicone ring;6.密封阀柱, seal valve column

图 3 阀门的结构

Figure 3 The structure of the valve



(a)螺旋外围秸秆颗粒受力图 The force of spiral peripheral straw particles; (b)秸秆颗粒与壳体接触时的受力图 The force of straw particles when in contact with the casing

图 4 秸秆颗粒在输送过程中的受力情况

Figure 4 Stress conditions of straw particles in the course of transportation

秸秆物料特性参数 K , $K=0.049$, 秸秆密度 ρ , 秸秆在输送过程中的填充系数 Ψ , 取为 0.6, 及螺旋推进器的倾角系数 C , $C=0.36$, 都会直接影响物料能否在规定时间内完成进料, 进而影响其生产能力 Q , 其中螺旋推进器的螺旋直径 D 可以通过式 (8) 计算得到

$$D \geq K^{2.5} \sqrt{Q / \varphi p C} \quad (8)$$

当螺旋直径较大时, 物料在离心力的作用下沿着叶片切线抛出, 在机壳的反作用力下, 物料就会在叶片边缘与汽爆罐进料口之间被挤压, 阻碍螺旋的旋转, 导致停机, 同时由于摩擦力的存在还会导致螺旋叶片发生变形, 减少阀门的使用寿命; 当螺旋直径较小时, 物料就会被螺旋打“飞”, 同时还可能会使物料打碎, 影响其质量。所以要合理的确定螺旋直径的大小来保证螺旋外围与汽爆罐进料口内壁之间的距离 S , 实现物料的顺利进料, 经过计算和试验验证最终确定螺旋直径 $D=200$ mm。

1.3.2 螺旋轴直径和螺距的选择 螺旋轴的直径 $d=(0.2 \sim 0.35)D$, 截面厚度为 4 mm, 螺距 $S_1=(0.8 \sim 1)D$, 即 $d=40$ mm \sim 70 mm, $S_1=160$ mm \sim 200 mm, 由于输送的物料为含水量为 30% 的玉米秸秆, 比较松软, 螺距较小时容易出现“抱轴”现象, 故螺距取最大值 $S_1=200$ mm。

1.3.3 螺旋推进器临界转速的确定 所谓螺旋推进器的临界转速就是处于叶片上的物料颗粒与螺旋叶片不发生相对运动的最高转速^[10]。在临界转速条件下, 作用于秸秆颗粒上的力有秸秆自身重力 G , 秸秆所受离心力 F_1 , $F_1 = mR\omega^2$, 螺旋叶片与秸秆之间的摩擦力 $F_f = fN$ ($f = \tan \rho$) 以及螺旋叶片对秸秆的支反力 N , 如图 4(a) 所示, 可以写出力的平衡方程。

$$\sum x = 0 F_1 \cos \alpha - F_f - G \sin \alpha = 0 \quad (9)$$

$$\sum y = 0 N - F_1 \sin \alpha - G \cos \alpha = 0 \quad (10)$$

临界转速:

$$n_{\text{临界}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R} \tan(\alpha + \rho)} \quad (11)$$

式中, α 为螺旋倾角, $\alpha=25^\circ$, ρ 为摩擦角, $\rho=60^\circ$ 。

当秸秆颗粒离开螺旋叶片与壳体内表面接触时, 其受力情况如图 4 (b) 所示。为了保证秸秆能够顺利进入汽爆罐中, 秸秆颗粒的重力 G 必须大于或等于秸秆颗粒与汽爆罐进料口内壁之间的摩擦力 F_{f2} , 即 $G = mg \geq F_{f2} = f_2 m R \omega^2$, 再根据 (11) 式可以得出螺旋推进器完成进料的最低转速为 $147.7 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 其临界转速为 $316 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.3.4 螺旋片厚度的选择 螺旋的厚度 $\delta=2 \sim 8$ mm, 由于本装置输送的物料为玉米秸秆, 比重为 0.3, 相对较小, 螺旋叶片厚度 δ 初步选为 2 mm。

2 阀门的稳定性分析

阀门进料及密封的可靠性主要由螺旋推进器和密封阀柱所组成的阀芯的稳定性决定。阀芯在工作时的受力状况和变形状况导入到 ANSYS 软件进行分析。

根据螺旋叶片加工制作方法, 在一个螺距 S 内螺旋线长度 L 等于展开叶片内孔周长 L , 其中, 即

$$\pi d_1 = \sqrt{S^2 + (\pi d)^2} \quad (12)$$

螺旋叶片的受力面积

$$A = n_1 \pi (D^2 - d_1^2) \quad (13)$$

物料所受的离心力

$$F_1 = m R \omega^2 \quad (14)$$

螺旋叶片所受的正压力

$$N = F_1 \sin \alpha + G_1 \cos \alpha \quad (15)$$

螺旋叶片所受的垂直分力

$$F=N\cos\alpha \tag{16}$$

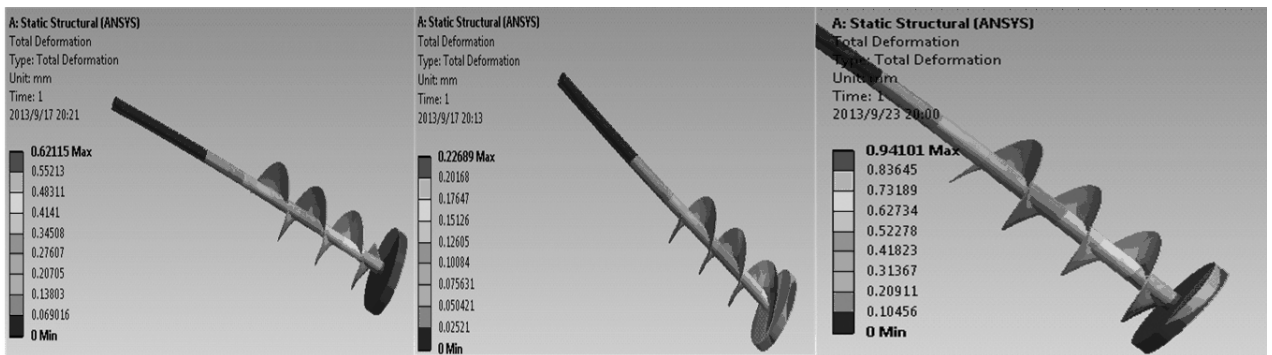
螺旋所受的剪切应力

$$\tau_1=F/A_1 \tag{17}$$

叶片所受的切应力可由(17)式计算得到 $\tau=1.7023\text{ Mpa}$, 其中 A_1 为螺旋叶片与螺旋轴的接触面积, $A_1=l\cdot\delta$, G_1 为秸秆物料的重量, d_1 为初始螺旋内孔的直径, m 为物料的质量, n_1 为螺旋叶片的个数。

将简化的三维实体模型导入到 ANSYS 软件中,通过分析获得阀门阀芯的变形情况如图 5 所示。在阀芯上施加正压力 $N_1=3474.36\text{ N}$, 转速选为 $n=200\text{ r/min}$, 材料选择为 0Cr18Ni9。根据螺旋推进器的设计要求螺旋轴的直径可为 $d=40\sim 70\text{ mm}$, 当选择螺旋轴的直径为 40 mm 时, 阀芯的变形情况如图 5 (a) 所示, 螺旋叶片、螺旋轴的最大变形量为 0.55213 mm 和 0.62115 mm , 分别发生在螺旋叶片

底端外围和密封阀柱底部。变形量过大, 会造成进料时, 秸秆物料缠绕在轴上, 同时还会造成阀柱与汽爆罐罐口法兰内径孔的干涉作用, 所以阀芯的变形量必须控制在 0.5 mm 以内。改进设计, 选择螺旋轴的直径为 45 mm 时, 阀芯的变形及应力分布情况如图 5 (b) 所示, 螺旋叶片、螺旋轴的最大变形量为 0.22689 mm , 分别发生在螺旋叶片底端外围和密封阀柱外围。分析可知当螺旋轴直径为 45 mm 时, 阀芯的变形量为 0.22689 mm , 变形量明显减小, 且螺旋叶片所受的切向力 τ 小于不锈钢 0Cr18Ni9 的许用切向力 $[\tau]$; 当转速选为 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 阀芯变形情况如图 5 (c) 所示, 螺旋叶片、螺旋轴的最大变形量为 0.94101 mm , 分别发生在螺旋叶片底端外围和密封阀柱底部, 变形量较大, 不能满足物料稳定进料。所以当选择螺旋轴直径 $d=45\text{ mm}$, 阀芯转速为 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 螺旋叶片厚度 $\delta=2\text{ mm}$ 能够满足设计要求, 保证了进料密封阀门的稳定性。



(a)转速为 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 直径为 40 mm (a) Diameter of screw propeller, 40 mm ; speed, $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$
(b)转速为 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 直径为 45 mm (b) Diameter of screw propeller, 45 mm ; speed, $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$
(c)转速为 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 直径为 45 mm (c) Diameter of screw propeller, 45 mm ; speed, $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

图 5 不同转速下阀芯的变形分布图

Figure 5 The deformation distribution of valve core under different speeds

3 阀门的稳定性试验

试验是对进料密封阀门中的螺旋推进器和密封阀柱所组成的阀芯进行稳定性测试。在进行稳定性测试时, 主要分析在不同转速和不同进料时间的作用下, 进料密封阀门的进料量, 通过进料量的大小来评价阀门的稳定性。然后通过采用正交对试验结果进行分析得出完成 150 kg 物料进料时的最佳转速和进料时间。

3.1 材料和方法

3.1.1 材料 长度为 $10\sim 30\text{ mm}$, 含水量为 30% 的玉米秸秆,分为 5 组试验, 将每组的物料质量 600 kg 分为 4 份, 每份物料重为 150 kg , 玉米秸秆来自于河南许昌。

云南天际新能源有限公司生产的容积为 1 m^3 的试验汽爆罐, 汽爆罐的底部可以打开, 便于物料的取出; 郑州金鹏机械设备有限公司生产的皮带输送机, 带宽为 500 mm , 移动速度为 $1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 皮带输送机的长度为 10 m ; 上海东南衡器有限公司生产的电子秤等设备。

3.1.2 方法 将第 1 组中的 4 份玉米秸秆分别通过皮带输送机输送到进料口, 测定在 4 min 、 5 min 、 6 min 和 7 min 内使 150 kg 物料输送到进料口时, 物料在皮带上的覆盖厚度;

将第 2 组中的 4 份玉米秸秆分别通过皮带输送机输送到进料口, 通过刮板调节物料在皮带输送机上的覆盖厚度, 来实现在 4 min 、 5 min 、 6 min 和 7 min 内使 150 kg 物料输送到进料口, 利用进料密封

阀门进料, 进料密封阀门中的阀芯旋转速度为 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 测定在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内阀门的进料量;

将第 3 组中的 4 份玉米秸秆分别通过皮带输送机输送到进料口, 通过刮板调节物料在皮带输送机上的覆盖厚度, 来实现在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内使 150 kg 物料输送到进料口, 利用进料密封阀门进料, 进料密封阀门中的阀芯旋转速度为 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 测定在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内阀门的进料量;

将第 4 组中的 4 份玉米秸秆分别通过皮带输送机输送到进料口, 通过刮板调节物料在皮带输送机上的覆盖厚度, 来实现在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内使 150 kg 物料输送到进料口, 利用进料密封阀门进料, 进料密封阀门中的阀芯旋转速度为 $250 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 测定在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内阀门的进料量;

将第 5 组中的 4 份玉米秸秆分别通过皮带输送机输送到进料口, 通过刮板调节物料在皮带输送机上的覆盖厚度, 来实现在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内使 150 kg 物料输送到进料口, 利用进料密封阀门进料, 进料密封阀门中的阀芯旋转速度为 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 测定在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内阀门的进料量。

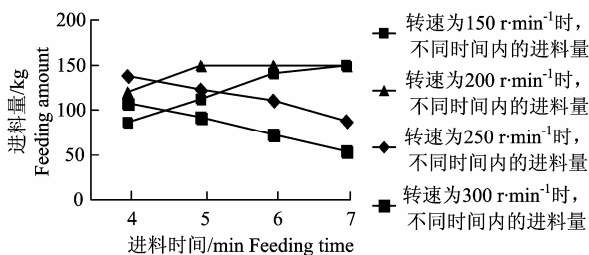


图 6 不同转速和入料时间对进料量的影响

Figure 6 Effects of different speeds and the feeding time on the feeding amount

3.2 结果与讨论

通过试验得到在 4 min、5 min、6 min 和 7 min 内使 150 kg 物料输送到进料口时, 物料在皮带上的覆盖厚度分别为 50 mm、43 mm、36 mm 和 30 mm。

通过试验得到 4 min、5 min、6 min 和 7 min 的进料量如图 6 所示, 从图中可以看出当阀芯转速为 $250 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 阀门的进料量随着进料时间的增加逐渐减少, 说明阀门很不稳定, 出现晃动现象; 当转速为 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 6 min 可以完成进料, 但进料效率相对较低; 当转速为 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 进料量随着进料时间的增加而增加, 说明阀门进料

比较稳定。

试验结果采用正交分析如表 1 所示, 从表 1 中的极差分析可以得到, 影响进料量即阀门稳定性的因素的主次顺序为螺旋转速 n 大于进料时间 T ; 最优组合为 A_2B_2 , 即阀芯转速为 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 进料时间为 5 min。

表 1 正交试验设计及结果
Table 1 Orthogonal test design and results

试验号 No.	阀芯转速 A Valve spool speed $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	进料时间 B Feeding time T/min	进料量 C Feeding flow Q/kg
1	1	1	85
2	1	2	121
3	1	3	140
4	1	4	110
5	2	1	112
6	2	2	150
7	2	3	125
8	2	4	92
9	3	1	139
10	3	2	150
11	3	3	110
12	3	4	75
13	4	1	150
14	4	2	150
15	4	3	85
16	4	4	55
K_1	114	121.5	
K_2	119.75	142.75	
K_3	118.5	115	
K_4	110	83	
R	9.75	59.75	

3.3 验证试验

在最佳组合即阀芯转速为 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 进料时间为 5 min 的条件下, 对 150 kg 玉米秸秆物料进行 4 次重复试验, 得出阀门进料量基本稳定在 150 kg, 其稳定性最好。

4 结论

设计了一种应用于汽爆系统中的进料密封阀门。阀门采用螺旋旋转进料, 当螺旋旋转速度为 $150\sim 300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 就可以满足 1 m^3 汽爆罐的进料需求; 阀门采用汽爆罐自带的 1.5 Mpa 蒸汽压力作为实现密封的动力, 实现了清洁化生产。

通过 ANSYS Workbench 对阀门的阀芯进行稳定性分析, 确定密封阀门阀芯转速为 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 螺旋轴的直径为 45 mm 时, 阀门阀芯的最大变形量

为 0.22689, 完全满足设计要求。

对进料密封阀门进料稳定性试验得出, 影响阀门稳定性因素的主次顺序为阀芯转速大于进料时间, 而且其最佳组合为阀芯转速为 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 完成进料 (150 kg) 所需的时间为 5 min, 阀门稳定性达到最好。

参考文献:

- [1] 陈洪章, 刘凤英. 蒸汽爆碎技术原理及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 杨春和, 张爱军, 白晓龙, 等. 汽爆技术在农作物秸秆利用中的研究现状与进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 16099-16101.
- [3] Emmel A, Mathias A L, Wypych F, et al. Fractionation of *Eucalyptus grandis* chips by dilute acid-catalysed steam explosion[J]. Bioresource Technology, 2003, 86: 105-115.
- [4] Caneque V, Velasco S, Sancha J L, et al. Effect of moisture and temperature on the degradability of fibre and on nitrogen fractions in barley straw treated with urea[J]. Anim Feed Sci Tech, 1998, 74: 241-258.
- [5] Chen H Z, Li Z H. The novel technique and application of steam-explosion without pollution[J]. Cellulose Science and Technique, 2002, 10(3): 47-52.
- [6] Dekker R F H. Steam explosion: an effective pre-treatment method for use in the bioconversion of lignocellulosic materials[M]// Focher B, Marzetti A. Steam explosion techniques. Fundamentals and Industrial Applications. Crescensi. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers, 1991: 227-305.
- [7] 叶文邦, 张建荣, 曹文辉. 压力容器设计指导手册[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2006: 13-154.
- [8] 蒋大勤, 袁凤隐. 压力容器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 444-449.
- [9] 张陈, 郭维城, 等. 垂直螺旋输送机设计参数确定与优化[J]. 林业机械, 2010(10): 56-58.
- [10] 欧阳富, 姜贵君. 立式快速螺旋输送机的设计与计算[J]. 木材加工机械, 1995(1): 14-17.
- [11] 高清多. 橡胶矩形密封圈结构设计[J]. 润滑与密封, 1991(5): 35-39.
- [12] 蒙贺伟, 高振江, 坎杂, 等. 等变径螺距奶牛精确饲喂给料装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 3(27): 103-107.