



饲料气力输送系统设计与试验

付 鹏¹, 刘洛航¹, 杨卫平^{1*}, 刘仁鑫¹, 张 凯², 郭文良², 冷超群³

(1. 江西农业大学 工学院, 南昌 330045; 2. 江西增鑫科技股份有限公司, 江西 新余 338000;

3. 南昌理工学院 建筑工程学院, 南昌 330044)

中图分类号: S818. 9; S817. 3

文献标识码: A

文章编号: 1004-7034(2021)24-0076-08

摘要:为了解决现代规模化生猪养殖场饲料输送过程中饲料输送能力差、输送距离短、破碎率高以及疫病防控等问题,笔者以满足年出栏万头猪的饲料供给能力为目标,设计了饲料气力输送系统及试验装置,即选用了额定压力为 100 kPa、流量为 12.5 m³/min 和功率为 37 kW 的罗茨风机,排量为 0.01 m³/r 的旋转供料器,管径为 83 mm 的 DN80 镀锌钢管输送管道,筒体直径(Φ)为 500 mm 的旋风分离器,以及袋滤式除尘器,并对试验装置的饲料输送能力、管道压降、破碎率等输送性能进行验证。结果表明:试验装置输送能力的相对误差小于 8.33%,输送能力的提高随系统管道压降的增加近似呈线性关系,饲料平均破碎率为 11.50%;试验装置在工作过程中无管道粘料及弯管堵塞现象,各部件均工作正常,系统运行稳定可靠,性能指标满足设计要求。说明本试验设计猪饲料的气力输送系统可满足现代规模化生猪养殖。

关键词:饲料;气力输送;系统输送能力;管道压降;破碎率

为了解决养殖用地减少、疫病防控等级低、养殖效益差和环境污染严重等问题,小规模 and 农村庭院式养猪模式正逐渐被现代规模化封闭式猪舍养殖模式所取代^[1]。现代规模化生猪养殖既节约用地、经济效益高,又便于解决生猪养殖对环境的污染问题^[2-3]。生猪养殖过程中,饲料的供应是必不可少的环节,其中干料线和液态料线等传统的饲料输送方式在实际应用中存在诸多有待解决的问题,而气力输送具有输送能力强、输送距离远、输送楼层高、破碎率低、疫病防控等级高、易实现自动化及维修方便等优点^[4],近年来逐渐被生猪养殖行业所关注。

国内外对气力输送系统在实际生产中的应用开展了大量研究:王晓明等^[5]针对塔式谷物烘干机存在谷物破碎率高和清洁度差等问题,设计了用于 35 t 塔式谷物烘干机的气力循环输送系统,结果表明其平均输送能力为 37.3 t/h,满足设计要求,玉米烘干破碎率降为 2.69%,优于国家标准;郭飞扬等^[6]针对大豆联合收获机的传统螺旋运输器在卸粮过程中破

率高的问题,设计了一种大豆联合气力收获机,结果表明其收获能力达 4.68 m³/h,大豆破碎率为 1.49%,满足大豆联合收获机田间作业要求;文桂林等^[7]针对粮库通用供料器输送能力差、物料输送速度慢和距离短等问题,设计了一种可控制颗粒重量流量的新型供料器,并对其数值模拟研究,结果表明供料器最高输送能力达 60 t/h,出料口物料速度为 76.3 m/s,且能通过调节供料器的出料口大小控制颗粒重量流量,满足了不同的输送需求;乌兰图雅等^[8]为解决揉碎玉米秸秆的螺旋输送过程中输送能力低、功耗大及部件磨损严重等问题,设计了螺旋-气力耦合输送系统,结果表明随着气流速度的增大,该系统输送物料的功耗先减小后增加,当气流速度为 20 m/s 时功耗最小,比无气流时的功耗减小了 8.3%,螺旋叶片和机壳等部件所受的压力随气流速度的增大而减小,且均小于无气流时的数值。

关于气力输送系统的研究与应用现多见于种植业农作物及农副产品的运输,而在畜牧业,尤其在现代规模化生猪养殖中的应用少有报道。为此,笔者针对目前猪场饲料输送系统在现代规模化生猪养殖应用中需解决的主要问题,设计了饲料气力输送系统及试验装置,并通过试验测试了该试验装置的输送性能,旨在为猪饲料气力输送系统的推广应用提供一种可供借鉴设计方法。

1 饲料气力输送系统总体设计

1.1 饲料气力输送系统要求

为了满足现代规模化生猪养殖场饲料的日消耗

收稿日期:2021-03-18; 修回日期:2021-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(31960683);江西省教育厅科技计划项目(GJJ180190);江西省现代生猪产业技术体系专项(赣财文指[2019]7号)

作者简介:付 鹏(1977—),男,实验师,硕士,研究方向为农业建筑与环境,fupeng1581@126.com.

*通信作者:杨卫平(1963—),男,教授,博士,研究方向为畜禽养殖环境及其设施,wp_yang1@126.com.

量,适应现代规模化生猪养殖环境及加强疫病防控要求,笔者设计了一套满足年出栏万头猪的规模猪场饲料日消耗量的饲料气力输送系统,该系统需将饲料输送至各猪舍料塔中,以解决传统饲料输送方式的输送能力差、输送距离短、破碎率高及疫病防控等问题。参照《规模猪场建设》(GB/T 17824.1—2008)要求设计规模猪场猪只类型及饲料日消耗量^[9],见表1。

表1 猪只类型及饲料日消耗量

Table 1 Types and daily feed consumption of pigs

猪只类型	存栏数量/头	饲料日消耗量/ (kg·头 ⁻¹)
后备和成年种公猪	28	2.7
后备与空怀妊娠母猪	576	2.2
哺乳母猪	96	5.0
哺乳仔猪	960	0.2
保育猪	1 368	1.0
生长育肥猪	3 352	2.5

根据表1得出猪场饲料日消耗量(S)计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^m k_i \times c_i \quad (1)$$

式(1)中:*i*为猪只类型,*m*为猪只类型总数,*k_i*为存栏数量(单位为头),*c_i*为饲料日消耗量(单位为kg/头)。

如果 *S* = 11.8 t,则饲料气力输送系统需每天向猪场输送 12 t 饲料。

1.2 饲料气力输送系统组成及功能

饲料气力输送系统流程见图1。

由图1可知:该系统主要由供料装置、输送管路、饲料分离除尘装置和控制装置四部分组成。首先供料装置将待输送的饲料存入料斗,以备后续饲料供给使用;其次系统气源产生正压空气,并将正压空气送入输送管道,同时供料器也将饲料送入管道,饲料与正压空气在管道内充分混合形成气固两相流;然后

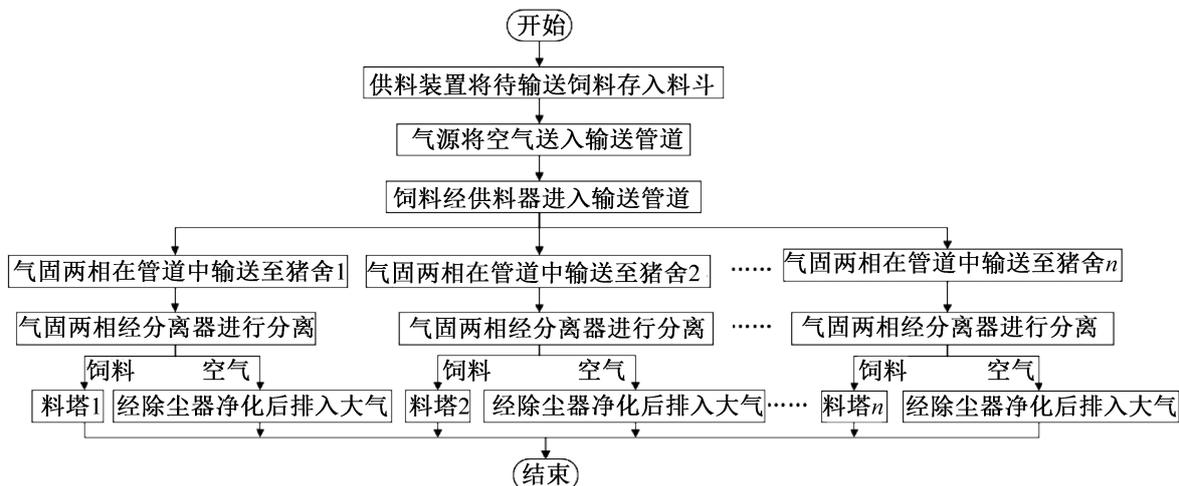


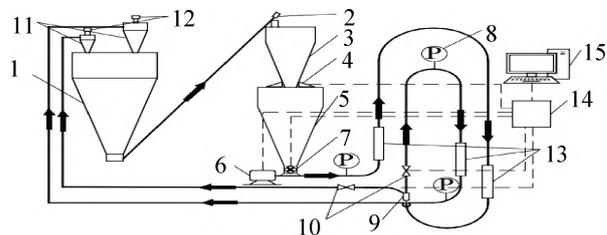
图1 饲料气力输送系统流程图

Fig. 1 Flow chart of feed pneumatic conveying system

根据各猪舍所需饲料要求,控制装置通过控制气动阀的开闭选择通往各猪舍的输送管道,同时正压空气将输送管道中的饲料分别输送至各个猪舍;最后安装在猪舍料塔中的饲料分离除尘装置将饲料从气固两相流中分离出来,并将其存储在各猪舍相应的料塔中,空气则经过除尘器净化后排入大气中,控制装置监控整个系统的运行及各部件的工作情况,完成各猪舍料塔的饲料供应。

在满足上述饲料气力输送系统工作流程基本要求的基础上,为节约试验装置成本,仅设计通往同一料塔的2条输送管道,分别表示向距离为210,310 m的猪舍提供饲料,试验装置见图2。

由图2可知:供料装置(由料塔、螺旋提升机、缓冲斗、称重传感器、料斗、气源和供料器组成)将待输送的饲料存入料斗;输送管路(由压力表、三通管、气



- 1. 料塔;2. 螺旋提升机;3. 缓冲斗;4. 称重传感器;5. 料斗;
- 6. 气源;7. 供料器;8. 压力表;9. 三通管;10. 气动阀;
- 11. 分离器;12. 除尘器;13. 透明管;14. 控制柜;15. 计算机。

图2 饲料气力输送试验装置系统图

Fig. 2 System diagram of feed pneumatic conveying test device

动阀和透明管组成)将待输送饲料输送至相应的猪舍料塔中;分离除尘装置(由分离器和除尘器组成)将饲料从气固两相流中分离出来,分离后的饲料储存



在料塔中供下次试验使用,空气则经过净化后排入大气中;控制装置(由控制柜和计算机组成)根据各猪舍对饲料的需求控制各部件工作,并且监控整个试验装置的运行,具有人机交互功能。

2 饲料气力输送系统主要参数设计

2.1 系统关键参数

在试验装置(见图2)的基础上对气力输送系统的参数进行设计,主要包括输送能力、料气比、输送空气流量、颗粒悬浮速度和输送气流速度的确定。为满足输送系统能够远距离输送饲料,试验装置以输送距离为310 m进行设计,该设计结果可为后续部件的选择提供重要帮助。

2.1.1 输送能力 输送能力(G_t)指单位时间内输送饲料的重量。依据年出栏万头猪的饲料日供应12 t要求,并且考虑实际生产情况,输送时间定为2 h,则理论 $G_t=6$ t/h。

2.1.2 料气比 料气比(u)指输送饲料的重量流量与所需空气的重量流量之比。 u 越大,输送能力越强,但管道的压力损失也将增大,输送距离变短,而且管道容易堵塞; u 越小,输送能力差,生产效率低。由于稀相气力输送的料气比介于1~10之间,密相气力

输送的料气比介于10~50之间,鉴于本试验装置属于正压稀相气力输送,并且考虑实际情况,故 $u=8$ ^[10]。

2.1.3 输送空气流量 输送空气流量(q_a)指输送饲料所需的正压空气流量, q_a 越大,系统能量损耗越大; q_a 越小,饲料较难输送至指定猪舍料塔,且管道易堵塞, q_a 计算公式为^[11]:

$$q_a = \frac{1\ 000\ G_t}{60\ u\ \rho_a} \quad (2)$$

式(2)中: ρ_a 为空气密度(单位为 kg/m^3)。

经计算, $q_a=10.2\ \text{m}^3/\text{min}$ 。

由于试验装置气源产生的正压空气在输送过程中存在一定的损失,则气源流量(q)计算公式为^[11]:

$$q = q_a(1 + C) \quad (3)$$

式(3)中: C 为漏气系数,一般 $C=0.12\sim 0.20$,考虑现场安装情况,取值为0.20。

经计算, $q=12.2\ \text{m}^3/\text{min}$ 。

2.1.4 颗粒悬浮速度 颗粒悬浮速度(v_p)指使饲料在垂直管道中处于悬浮状态时所需的最小输送气流速度,以该速度输送饲料时系统能量损耗最低。 v_p 受到颗粒粒径(d_p)的影响,其计算公式为^[11]:

$$v_p = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_a)}{18\ \mu}, d_p \leq 1.225 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_p - \rho_a)} \right] \quad (4a)$$

$$v_p = 1.195\ d_p \left[\frac{(\rho_p - \rho_a)^2}{\rho_a \mu} \right], 2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_p - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{3}} \leq d_p \leq 20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_p - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4b)$$

$$v_p = 5.45 \sqrt{\frac{d_p(\rho_p - \rho_a)}{\rho_a}}, 20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_p - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{3}} \leq d_p \leq 1\ 100 \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_p - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4c)$$

式(4a、4b、4c)中: d_p 的单位为m, ρ_p 为颗粒密度(单位为 kg/m^3), μ 为空气动力黏度(单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

根据实际生产,选取猪饲料等效粒径 d_p 为6 mm的球形颗粒估算颗粒悬浮速度。设饲料密度 $\rho_p=630\ \text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_a=1.2\ \text{kg}/\text{m}^3$, $\mu=1.8\times 10^{-5}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,经计算 $v_p=9.7\ \text{m}/\text{s}$ 。

2.1.5 输送气流速度 输送气流速度(v_a)指输送饲料的空气速度, v_a 越快,系统能量损耗越大; v_a 越慢,饲料容易堵塞管道,且生产效率低。在实际输送过程中,由于颗粒与颗粒之间的碰撞、颗粒与管壁之间的摩擦与碰撞,以及管道内空气流动的不均匀性等原因,一般实际采用的 v_a 是 v_p 的1.5~3.0倍^[11]。综合考虑试验装置的可靠性,实际采用的 $v_a=3v_p\approx 29\ \text{m}/\text{s}$ 。

2.2 系统压力损失

系统压力损失指气固两相流在管道内流动过程中能量损失所造成的进出口压力差。在气力输送系统中,系统的压力差提供输送饲料所需的能量,但压力差越大,能量损耗越高。为了确定装置气源的额定

压力、流量和功率,需考虑输送系统的总压力损失。输送系统总压力损失($\Delta p_{\text{总}}$)等于气流产生的压力损失(Δp_a)与饲料运动产生的压力损失(Δp_p)之和,即:

$$\Delta p_{\text{总}} = \Delta p_a + \Delta p_p \quad (5)$$

但由于空气与饲料之间存在复杂的相互作用,气流产生的压力损失和饲料运动产生的压力损失不易分开计算,因此将 $\Delta p_{\text{总}}$ 分解为气固两相流压力损失(Δp_1)和局部压力损失(Δp_2)两项,即:

$$\Delta p_{\text{总}} = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad (6)$$

2.2.1 Δp_1 Δp_1 由加速压力损失、摩擦压力损失和颗粒悬浮压力损失组成。

1)加速压力损失($\Delta p_{\text{加}}$)。 $\Delta p_{\text{加}}$ 指正压空气使饲料加速所造成的压力损失,计算公式为^[11-12]:

$$\Delta p_{\text{加}} = \left[1 + u \left(\frac{v_p \text{max}}{v_a} \right)^2 \right] \rho_a \frac{v_a^2}{2} \quad (7)$$

式(7)中: $v_p \text{max}$ 为颗粒最大速度(单位为 m/s),可通过经验公式得到^[5]:

$$\frac{v_p \text{max}}{v_a} = 0.9 - \frac{7.5}{v_a} \quad (8)$$

经计算, $\Delta p_{加} = 2\ 682\ \text{Pa}$ 。

2) 摩擦压力损失 ($\Delta p_{摩}$)。 $\Delta p_{摩}$ 指气流的阻力和饲料引起的附加阻力所造成的压力损失, 由气流摩擦压力损失 (Δp_{af}) 和颗粒群引起的摩擦压力损失 (Δp_{pf}) 组成, 计算公式为^[11-12]:

$$\Delta p_{摩} = \Delta p_{af} + \Delta p_{pf} = (1 + Ku)R_m l_{总} \quad (9)$$

式(9)中: K 为输送管道沿程阻力附加系数, 取值为 0.7; R_m 为单位长度的摩擦阻力, 取值为 25 Pa/m; $l_{总}$ 为输送管道的总长度, 取值为 310 m。

经计算, $\Delta p_{摩} = 51\ 150\ \text{Pa}$ 。

3) 颗粒悬浮压力损失 ($\Delta p_{悬}$)。 $\Delta p_{悬}$ 指维持饲料在水平或倾斜输送管道中处于悬浮状态所造成的压力损失, 鉴于试验装置的输送管道均为水平管道, 则计算公式为^[11-12]:

$$\Delta p_{悬} = u \rho_a g l \frac{v_p}{v_{p\max}} \quad (10)$$

式(10)中: g 为重力加速度(单位为 m/s^2); l 为水平输送管道的长度, 根据设计, 取值为 310 m。

经计算, $\Delta p_{悬} = 13\ 282\ \text{Pa}$ 。

综上所述, $\Delta p_1 = \Delta p_{加} + \Delta p_{摩} + \Delta p_{悬} = 67\ 114\ \text{Pa}$ 。

2.2.2 Δp_2 Δp_2 由供料器、弯管、分离器和除尘器局部压力损失组成。

1) 供料器局部压力损失 ($\Delta p_{供}$)。 $\Delta p_{供}$ 指饲料经过供料器进入输送管道所造成的压力损失, 依据试验装置选用了旋转供料器, 则计算公式为^[11-12]:

$$\Delta p_{供} = (1 + u)\xi_{供} \rho_a \frac{v_a^2}{2} \quad (11)$$

式(11)中: $\xi_{供}$ 为供料器的局部阻力系数, 取值为 1.14^[13]。

经计算, $\Delta p_{供} = 5\ 177\ \text{Pa}$ 。

2) 弯管局部压力损失 ($\Delta p_{弯}$)。 $\Delta p_{弯}$ 即气固两相流经过弯管时所造成的压力损失, 输送距离为 310 m 的管路有 6 个水平转向水平的 90° 弯管, 则计算公式为^[11-12]:

$$\Delta p_{弯} = \sum_{j=1}^m (1 + K_j u)\xi_j \rho_a \frac{v_a^2}{2} \quad (12)$$

式(12)中: j 为弯管数量(单位为个); K_j 为弯管局部阻力的附加阻力系数, 取值为 1.5; ξ_j 为弯管局部阻力系数, 取值为 0.05。

经计算, $\Delta p_{弯} = 1\ 968\ \text{Pa}$ 。

3) 分离器局部压力损失 ($\Delta p_{分}$)。 $\Delta p_{分}$ 指正压空气经过分离器进入除尘器所造成的压力损失, 依据试验装置选用了旋风分离器, 则计算公式为^[11-12]:

$$\Delta p_{分} = \xi_{分} \rho_a \frac{v_a^2}{2} \quad (13)$$

式(13)中: $\xi_{分}$ 为分离器的阻力系数, 取值为 5。

经计算, $\Delta p_{分} = 2\ 523\ \text{Pa}$ 。

4) 除尘器局部压力损失 ($\Delta p_{除}$)。 $\Delta p_{除}$ 指正压空气经除尘器净化后排入大气所造成的压力损失, 依据试验装置选用了袋滤式除尘器, 其压力损失取值在 1 200~2 500 Pa 之间, 取最大值, 则 $\Delta p_{除} = 2\ 500\ \text{Pa}$ 。

综上所述, $\Delta p_2 = \Delta p_{供} + \Delta p_{弯} + \Delta p_{分} + \Delta p_{除} = 12\ 168\ \text{Pa}$ 。

故试验装置的 $\Delta p_{总} = \Delta p_1 + \Delta p_2 = 79\ 282\ \text{Pa} \approx 79\ \text{kPa}$ 。

以满足年出栏万头猪的饲料供给能力为目标, 对系统的主要参数进行了设计计算, 结果见表 2。

表 2 系统的主要参数

Table 2 Main parameters of the system

参数名称	数值
$G_t / (\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	6
u	8
$q / (\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	12.2
$v_a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	29
$\Delta p_{总} / \text{kPa}$	79

3 主要部件选择

3.1 装置气源

装置气源用于提供饲料运动所需的动力源。在气力输送工程应用中常用的气源有离心风机和罗茨风机, 其中离心风机的风量受管道压力影响大, 而罗茨风机产生的压力取决于管道中的阻力, 其压力变化时风量变化小, 适用于气力输送系统。为了确保气力输送系统稳定运行, 气源需保证管道中压力变化时风量变化小^[14], 因此选用罗茨风机作为装置气源。确保饲料能够输送至指定地点, 则气源所需的功率 (P) 的计算公式为^[11]:

$$P = \frac{p q}{60 \eta_1 \eta_2} \quad (14)$$

式(14)中: p 为气源压力, 一般在 $\Delta p_{总}$ 基础上再加 20% 的余量, 即 $p = 1.2 \times \Delta p_{总} \approx 95\ \text{kPa}$; η_1 为气源的流体效率, 取值为 70%; η_2 为机械传动效率, 根据传动系统的结构, 取值为 95%。

经计算, $P = 29\ \text{kW}$ 。

根据上述计算, 结合所得的气源压力 $p = 95\ \text{kPa}$ 和流量 $q = 12.2\ \text{m}^3/\text{min}$, 罗茨风机(型号为 PG30-100-32.10, 购自上海复盛佩卓奇鼓风机有限公司), 参数为: 额定压力 100 kPa, 流量 12.5 m^3/min , 功率 37 kW, 满足理论计算要求。

3.2 供料器

供料器用于将饲料送入输送管道。常见的供料器有容积式、旋转式和螺旋式等^[15]。容积式供料器密封性能好, 常用于高压密相气力输送; 旋转供料器具有连续供料功能, 转速可变的旋转供料器可改变颗粒重量流量, 适用于稀相气力输送; 螺旋式供料器密



封性好,但能耗高,螺旋叶片表面磨损大^[16]。综合考虑连续供料、颗粒重量流量可变和能量消耗小等因素,选用转速可变的旋转供料器,其排量(V)的计算公式为^[12]:

$$V = \frac{1\ 000\ G_t}{60\ \rho_p n \eta_3} \quad (15)$$

式(15)中: n 为叶轮的转速,取值为24 r/min; η_3 为容积效率,取值为70%。

经计算, $V = 0.009\ 5\ \text{m}^3/\text{r}$,因此选用排量为0.01 m^3/r 的转速可变的旋转供料器。

3.3 输送管道

输送管道用于将饲料输送至指定猪舍料塔。综合考虑饲料与管壁之间的摩擦与碰撞、饲料对管道的冲蚀磨损、输送阻力小及管道易加工等因素,选用防锈与耐磨兼备的镀锌钢管。

为减少饲料与壁面的碰撞次数,弯管以大曲率半径为宜,并且输送管道的中心尽量保持在一条直线上;又由于气固两相流经过弯管时会产生惯性力和离心力,导致饲料撞击弯管外侧壁面,使得弯管产生严重的冲蚀磨损,为了便于更换弯管,采用法兰连接;由于输送管径越大,系统能耗越高,因此输送管径的选择要有利于减小能耗和维持系统正常工作,管径($d_{\text{管}}$)可按以下公式得到^[11]:

$$d_{\text{管}} = \sqrt{\frac{4q_a}{60\pi v_a}} \quad (16)$$

经计算,输送管道 $d_{\text{管}} = 86\ \text{mm}$,参照《低压流体输送用焊接钢管》(GB/T 3091—2008)^[17]要求,输送管道选择管径为83 mm的DN80镀锌钢管。

3.4 分离器

分离器用于将输送到各猪舍的饲料从气固两相流中分离出来,饲料存储在相应料塔中,气体从分离器出口进入除尘器。常见的分离器有重力式、离心式和惯性式等。重力式分离器是利用饲料和空气的密度差实现气固分离,适合分离不易破碎的饲料^[18];离心式分离器又称旋风分离器,是利用两相流旋转时离心力的作用实现气固分离,适用于中小型气力输送系统^[19];惯性式分离器是利用饲料的惯性实现气固分离,适合分离不易破碎的饲料^[20]。

鉴于本气力输送试验装置用于猪场输送饲料,而且饲料易破碎,因此选用旋风分离器。筒体直径小时,饲料分离效率低,而直径大会增加能耗,故直径的选择既要保证分离效率高,又要尽可能减少能耗^[21]。依据上述试验装置主要参数的计算数据,旋风分离器筒体直径($d_{\text{分}}$)的计算公式为^[22]:

$$d_{\text{分}} = 1.13 \left[\frac{q_a \rho_a^2}{60 \mu (\rho_p - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{2.201}} \quad (17)$$

根据通用型分离器设计表^[12],经计算, $d_{\text{分}} =$

510 mm,取整为500 mm。

3.5 除尘器

除尘器用于净化分离器出口排出的含粉尘空气,并将净化后的空气排入大气中。目前常用的除尘器有重力式、惯性式、离心式、洗涤式、袋滤式和静电式等^[23]。由于袋滤式除尘器除尘效率高、阻力小、占地面积小和运行稳定可靠^[24],因此选用袋滤式除尘器较为合理。

4 饲料气力输送试验装置及性能试验

4.1 试验装置

基于上述主要参数的计算及主要部件的选择,按照图2所示研制了饲料气力输送试验装置,见147页彩图3。

4.2 试验装置性能验证

为了验证该试验装置的输送性能,从生产实际出发,于2020年4月24日—7月25日,在江西增鑫科技股份有限公司开展了输送能力、管道压降和破碎率等主要输送性能的试验研究。饲料输送距离为310 m,饲料密度为630 kg/m^3 ,饲料颗粒形状近似为直径4 mm、高9 mm的圆柱体。主要试验设备有称重传感器(型号为SIWAREX WP521 ST,测量范围为0.5~5.0 t,测量精度为0.05%,购自德国西门子公司)、压力表(型号为FK-Y190,测量范围为0~0.2 MPa,精度等级为0.4%FS,购自中国武汉丰控自动化技术有限公司)、秒表和电子秤。

4.2.1 输送能力 为了测试试验装置的实际输送能力能否满足设计要求,对该试验装置的输送能力进行试验。由于缓冲斗的重量及传感器自重的原因,先对称重传感器进行零点标定,再使用传感器测得待输送饲料的重量。输送饲料时,打开旋转供料器,用秒表记录下料时间。通过公式(18)得出试验装置的实际输送能力(G_s),然后由公式(19)计算输送能力的相对误差(δ),装置输送能力的测试结果见表3。

$$G_s = \frac{M}{t} \quad (18)$$

式(18)中: M 为待输送饲料重量(单位为kg), t 为下料时间(单位为s)。

$$\delta = \frac{|G_s - G_t|}{G_t} \times 100\% \quad (19)$$

式(19)中: G_s 的单位为t/h, G_t 为理论输送能力(单位为t/h)。

由表3可知,该试验装置输送能力的相对误差均小于8.33%,误差小于10%^[25],说明该试验装置能够满足理论输送能力的设计要求。试验时未出现管道粘料及弯管堵塞现象,各部件均正常工作,装置运行稳定可靠。

4.2.2 管道压降 为了测试试验装置能否按要求将饲料输送至指定料塔,对该试验装置的输送能力与系

表3 饲料气力输送试验装置输送能力试验结果
Table 3 Test results of conveying capacity of feed pneumatic conveying test device

试验编号	M/kg	t/s	$G_s/(t \cdot h^{-1})$	$G_r/(t \cdot h^{-1})$	$\delta/\%$
1	50	33	5.5	6.0	8.33
2	50	30	6.0	6.0	0.00
3	50	28	6.4	6.0	6.67
4	50	31	5.8	6.0	3.33
5	100	58	6.2	6.0	3.33
6	200	122	5.9	6.0	1.67
7	220	139	5.7	6.0	5.00
8	400	265	5.6	6.0	6.67

统管道压降的关系进行试验。通过控制供料器转速调节进入输送管道的饲料重量流量,进而影响试验装置的输送能力,压力表测量输送管道进出口截面的空气压力。试验装置的输送能力与系统管道压降的试验数据拟合结果见图4。

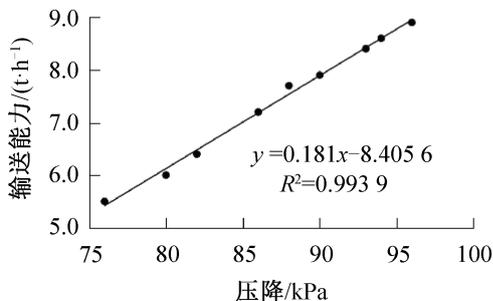


图4 输送能力与系统管道压降的试验数据拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of the test data between the conveying capacity and the pressure drop of the system pipeline

由图4可知,经拟合得到函数关系式为 $y = 0.181x - 8.4056$,拟合优度(R^2)的值越接近1,拟合曲线对试验数据的拟合程度越好,说明试验装置输送能力的提高随系统管道压降的增加近似呈线性关系。当系统管道压降为气源额定压力的100 kPa时,试验装置的实际输送能力最高可达8.9 t/h,大于系统设计的理论输送能力6 t/h,表明该试验装置满足饲料输送要求。

4.2.3 破碎率 饲料在输送管道内经摩擦与碰撞后会破碎成粒径很小的颗粒,猪只食用粒径过小的饲料会提高猪只食道溃疡、肠道出血症及胃溃疡等疾病的发病率,甚至造成猪只死亡。同时饲料破碎也会产生大量粉尘,造成环境污染等。为了测试饲料经过输送管道到达指定料塔后饲料的破碎情况,对该试验装置的破碎率进行试验。试验前将料塔上的饲料分离除尘装置拆下,用接料袋收集从分离器流出的饲料,待饲料输送完毕后,使用3目的尼龙网过滤出粉料,电子秤测量过滤后粉料的重量,通过公式(20)计算饲料破碎率(Y),结果见表4。

$$Y = \frac{M_{\text{粉}}}{M} \times 100\% \quad (20)$$

式(20)中: $M_{\text{粉}}$ 为粉料重量(单位为kg), M 为待输送饲料重量(单位为kg)。

表4 饲料气力输送试验装置饲料破碎率试验结果
Table 4 Test results of feed breakage rate of feed pneumatic conveying test device

试验编号	M/kg	$M_{\text{粉}}/\text{kg}$	Y/%
1	180	19.7	11.19
2	200	18.5	9.39
3	200	20.6	10.30
4	270	39.0	14.66
平均值	213	24.5	11.50

由表4可知,饲料平均破碎率为11.50%,造成饲料破碎的主要原因是输送管道中饲料与饲料之间的碰撞和饲料与管壁之间的摩擦与碰撞,饲料在供料装置或者饲料分离除尘装置中受挤压也会造成饲料破碎。由于该试验装置为封闭式管道输送,且采用了除尘率较好的袋滤式除尘器,故试验装置对其所处的环境不会造成污染。

5 结论

1)设计了满足年出栏万头猪的规模猪场的饲料气力输送系统,解决了目前猪场饲料输送系统输送能力差、输送距离短、破碎率高和疫病防控等问题,且系统对其所处的环境不会造成污染。

2)对试验装置的输送能力、输送空气流量和试验装置压力损失等主要参数进行了设计,对试验装置的部件进行了选择,并设计了饲料气力输送试验装置。选用了额定的压力100 kPa、流量12.5 m³/min和功率37 kW的罗茨风机,满足饲料输送所需的动力要求;选用了排量为0.01 m³/r的旋转供料器,满足饲料的供给要求;选用筒体直径(Φ)500 mm的旋风分离器,满足高的饲料分离要求。

3)开展了输送能力、管道压降和破碎率等试验研究,输送能力的相对误差小于8.33%,输送能力的提高随系统管道压降的增加近似呈线性关系,饲料平均破碎率为11.50%。试验装置在工作过程中无管道粘料及弯管堵料现象,各部件均工作正常,系统运行稳定可靠,性能指标满足试验装置设计要求。

参考文献:

- [1] 刘婷,周杨.我国不同规模生猪养殖成本效率、影响因素及区域差异分析[J].黑龙江畜牧兽医,2020(14):22-26.
- [2] 谷政,赵慧敏.基于L-V模型的中国生猪产业规模化结构演进研究[J].黑龙江畜牧兽医,2019(16):13-19.
- [3] 王善高,王琪,徐章星,等.中国生猪养殖环境效率的时空演进与收敛性分析[J].黑龙江畜牧兽医,2020(10):7-11,22.
- [4] 李永祥.气力输送弯管的磨损及磨损机理研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2005,26(01):68-70,74.



- [5] 王晓明,黄永华,沈铁宏,等. 5HYL-35 塔式谷物烘干机气力循环输送系统设计[J]. 中国农机化学报,2020,41(07):81-86.
- [6] 郭飞扬,金诚谦,俞康,等. 大豆联合收获机气力卸粮装置的设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2020,25(10):147-157.
- [7] 文桂林,何智翔,卿启湘,等. 粮库气力输送机供料器设计与优化[J]. 计算机仿真,2016,33(02):254-260.
- [8] 乌兰图雅,青林,王春光. 揉碎玉米秸秆螺旋-气力耦合输送装置设计[J]. 农业工程学报,2019,35(06):29-38.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 规模猪场建设:GB/T 17824.1-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [10] 耿振中. 炭黑密相气力输送系统的设计和试验研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2007.
- [11] 周乃如,朱凤德. 气力输送原理与设计计算[M]. 郑州:河南科学技术出版社,1981.
- [12] 李诗久,周晓君. 气力输送理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [13] 黄远东,周乃如,朱凤德. 面粉正压输送中叶轮式供料器的两相流压损研究[J]. 农业机械学报,2005,36(05):72-74.
- [14] 樊保兴. 粉煤灰正压气力输送对压缩空气质量的要求[J]. 水利电力机械,1995(03):28-30.
- [15] 张乾熙,贾明生,侯冬尽. 组合式煤粉气力供料输送装置实验研究[J]. 冶金能源,2017,36(05):20-23,35.
- [16] 魏飞,张林海,侯书林. 秸秆物料除杂及气力输送系统的设计[J]. 农机化研究,2013,35(08):80-83.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 低压流体输送用焊接钢管:GB/T 3091-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [18] SAYDA A F, TAYLOR J H. Modeling and control of three-phase gravity separators in oil production facilities [C]. New York: IEEE,2007.
- [19] 陈涛. 散粮卡车取粮器自动控制系统设计研究[D]. 郑州:河南工业大学,2014.
- [20] 王肖. 撞击式气固分离器颗粒运动特性数值模拟和试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [21] A. C. 霍夫曼, L. E. 斯坦因. 旋风分离器-原理、设计和工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [22] 刘忠文. 旋风分离器筒体设计计算方法[J]. 化工设备设计,1995(06):19-22.
- [23] 石增斌. 布袋除尘器技术及其应用[J]. 煤炭技术,2006(01):123-125.
- [24] 彭宗祥. 连续密相气力输送系统设计及实验研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2013.
- [25] 方薪晖,安海泉,刘臻,等. 煤粉掺混煤液化残渣萃余物的气力输送压降特性研究[J]. 煤炭学报,2020,45(04):1510-1518.

Design and test of feed pneumatic conveying system

FU Peng¹, LIU Luohang¹, YANG Weiping^{1*}, LIU Renxin¹,
ZHANG Kai², GUO Wenliang², LENG Chaoqun³

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Zengxin Technology Co., Ltd., Xinyu 338000, China; 3. School of Civil Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330044, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor feeding capacity, short feeding distance, high breakage rate as well as epidemic prevention and control in the feeding process of modern large-scale pig farms, in this paper, the feed pneumatic conveying system and test device were designed by author to meet the feed supply capacity of ten thousand pigs per year. Therefore, roots blower with rated pressure of 100 kPa, flow rate of 12.5 m³/min and power of 37 kW, rotary feeder with displacement of 0.01 m³/r, DN80 galvanized steel pipe with a pipe diameter of 83 mm for transporting pipes, cyclone separator with cylinder diameter of 500 mm and bag filter dust collectors were selected. The feed conveying capacity, pressure drop in pipes, and breakage rate of the test device were tested. The results showed that the relative error of the conveying capacity of the experimental device was less than 8.33%. With increasing of system pressure drop, the conveying capacity basically increased linearly. In the meanwhile, the average breakage rate of feed was 11.50%. There was no pipe sticking or elbow blockage during the working process. All the parts work normally, the system runs stably and reliably, also the performance indexes meet the design requirements. The research results indicated that the pneumatic conveying of pig feed designed in this experiment could meet the requirements of modern large-scale pig breeding.

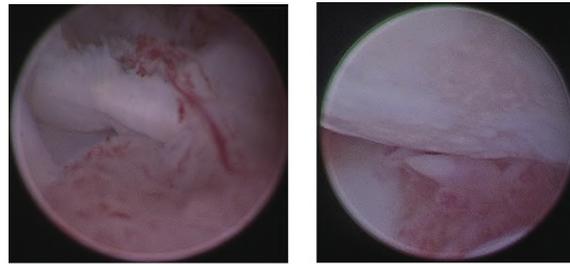
Keywords: feed; pneumatic conveying; conveying capacity of system; pipeline pressure drop; breakage rate

(023)

· 兽医科学 ·

一例发育性骨病致犬四肢跛行的关节镜治疗

(作者 马裔寒等,正文见第 63-66 页)



A 肘关节 B 膝关节

图 5 关节镜检查结果

Fig. 5 Check results of arthroscopic

· 兽医科学 ·

一例犬炎性乳腺癌的诊治

(作者 张 佩等,正文见第 67-70,75 页)

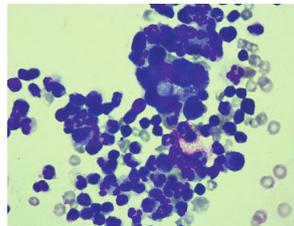
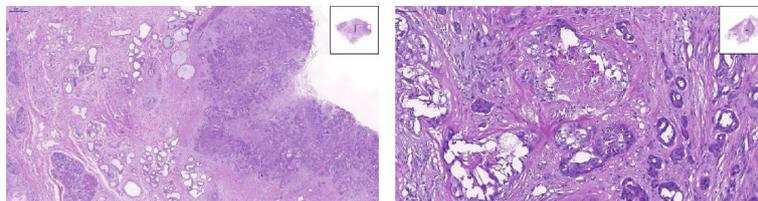


图 1 组织穿刺镜检结果(100×10)

Fig. 1 Microscopic examination results of tissue puncture(100×10)



A 2.0× B 20.0×

图 4 肿瘤病理组织切片染色镜检结果

Fig. 4 Microscopic examination results of pathological tissue sections staining of tumor

· 饲草、饲料与添加剂 ·

饲料气力输送系统设计与试验

(作者 付 鹏等,正文见第 76-82 页)



A 回收装置

B 供料装置

C 输送管路

1. 料塔;2. 螺旋提升机;3. 缓冲斗;4. 称重传感器;5. 料斗;6. 气源;7. 供料器;8. 压力表;9. 三通管;10. 气动阀;11. 分离器;12. 除尘器;13. 透明管。

图 3 饲料气力输送试验装置实物

Fig. 3 Physical drawing of feed pneumatic conveying test device