

# 降低气力输送小麦能耗的试验研究

钱东平<sup>1</sup>, 程庆会<sup>1</sup>, 李国防<sup>2</sup>, 赵彦如<sup>1</sup>

(1. 河北农业大学, 保定 071001; 2. 河北职业技术师范学院, 昌黎 066600)

**摘要:** 气力输送是应用广泛的物料输送方法, 但能耗较高是一大弊端, 为了降低谷物气力输送的能耗, 从而充分发挥气力输送的优越性, 故采用正交的二次回归旋转组合试验, 以小麦为试验材料, 选择谷物含水率、气流速度和料气浓度比作为试验因子, 进行能量消耗的测试。找出了能耗与各因素间的回归方程, 并确定了影响能耗的主次因素, 得出了主要因素对能耗的影响规律。对试验结果进行统计计算和方差分析, 得出: 风速对能耗影响最大, 浓度比次之, 含水率最小; 气流速度与能耗成二次抛物线关系; 料气浓度比与能耗成一次线性关系; 小麦含水率与能耗成二次抛物线关系。在试验研究和理论分析的基础上提出: 在满足生产率要求和不破碎、不掉料的前提下, 尽可能选择能够输送的较低的气流速度; 若设备动力有余量, 可以适当提高浓度比, 但应注意浓度比提高引起的输送不稳定性; 为获得较好的输送效果, 应尽量选择谷物水分适当。

**关键词:** 气力输送; 能耗; 农产品加工

**中图分类号:** S226.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2003)03-0108-04

## 1 引言

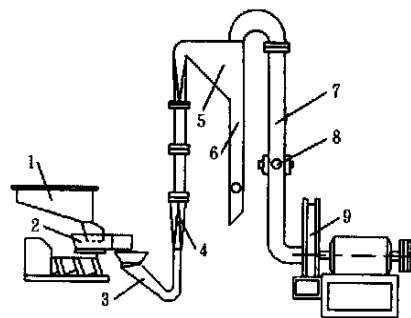
气力输送和机械式输送一样, 是应用广泛的物料输送方法。气力输送简单、灵活、易操作, 这些优点符合现代物流工程和物料搬运技术所提出的要求, 输送形式较机械式完善, 因此以其环保、卫生、安全等特点被粮食加工部门经常采用。但其能耗较高限制了在更广泛领域的应用, 其降耗问题为目前各国研究的重点。影响能耗的因素很多, 物料特性、输送工艺参数、设备结构、操作工况等均影响到能耗的变化。前人对此曾作过深入研究, 就许多因素的作用规律提出了有价值的见解, 对气力输送的节能降耗提出了有效措施。过去研究中理论推算<sup>[1,2]</sup>, 很难用于指导生产实践, 或为粮食加工厂实践测试压损<sup>[3,4]</sup>, 对工艺参数缺乏定量分析。通过正交的二次回归旋转组合试验找出了能耗与各因素间的回归方程, 并确定了影响能耗的主次因素, 得出了主要因素对能耗的影响规律, 为粮食加工厂气力输送装置的设计提供了参考依据。另外, 单一管径管道用于长距离输送导致更多的空气能量用于输送空气本身, 随着工业生产和需要, 采用分段管径管道长距离输送成为当今世界气力输送技术的研究热点。

## 2 试验装置和试验方法

### 2.1 试验台构造

气力输送试验台(图 1)主要由料斗、电磁振动给料器、诱导式接料器、输料管、三角箱式卸料器、离心风机、变频调速器和电机组成。

喂入量的控制是通过调节料斗活门的开度和调节电磁振动给料器的电流来实现的, 电磁振动给料器的使用使喂料更加均匀。风机由电机带动, 通过变频调速器



1. 料斗 2. 振动给料器 3. 接料器 4. 输料管  
5. 卸料器 6. 闭风器 7. 排风管 8. 调风阀 9. 电机  
图 1 气力输送试验台

Fig 1 Test-bed for pneumatic conveying

来调节风机的风量和输料管内风速。变频调速器可以在 0~1 440 r/min 范围内调整。输送管道内径  $d$  由下式计算

$$d = 1/30 \sqrt{q/v\pi}$$

$$q = (1.10 \sim 1.20) G/\mu Y$$

式中  $q$ ——输送空气流量;  $G$ ——生产率;  $\mu$ ——料气比;  $Y$ ——自由空气重度;  $v$ ——气流速度; 弯管部分曲率半径根据实践经验一般取  $R = (6 \sim 10)d$  较为适宜。本试验台取  $d = 150 \text{ mm}$ , 垂直高度  $h = 6000 \text{ mm}$ ,  $R = 1200 \text{ mm}$ 。

### 2.2 试验因素

选择粮食加工厂较为常用的小麦作试验材料。选择谷物含水率、气流速度和料气浓度比作为试验因素, 探讨这些因素对气力输送能耗的影响规律。

### 2.3 试验方法

试验采用正交的二次旋转回归组合试验设计。参考目前生产上采用的参数值, 试验因素变化范围为: 含水率  $M_c = 10\% \sim 18\%$ ; 风速  $v_a = 24 \sim 32 \text{ m/s}$ ; 浓度比  $\mu = 1.2 \sim 2.0 \text{ kg/kg}$ 。

试验指标是电能比耗  $Y$ , 由式(1)计算:

$$Y = \text{电机消耗功率} / \text{输送谷物质量} \quad (1)$$

收稿日期: 2002-08-09 修订日期: 2002-10-31

作者简介: 钱东平(1952-), 男, 教授, 副院长, 主要从事气力系统、物料干燥、制冷、农产品加工工程及智能控制等理论与应用研究。河北保定 河北农业大学机电工程学院, 071001

根据正交的二次回归旋转组合试验的要求, 对各因素按式(2)进行编码, 编码表见表 1。

表 1 谷物气力输送因素编码表

Table 1 Coding list for pneumatic conveying			
编码值	因 素		
	$Z_1$ (含水率) /%	$Z_2$ (风速) /m · s <sup>-1</sup>	$Z_3$ (浓度比) /kg · kg <sup>-1</sup>
$Y$	18	32	2 00
1	16 4	30 4	1 84
0	14	28	1 60
- 1	11 6	25 6	1 36
- $Y$	10	24	1 20

$$x_j = 2(Z_j - Z_{j2}) / (Z_{j2} - Z_{j1})Y + Y \tag{2}$$

式中  $x_j$ ——第  $j$  水平编码值;  $Y$ ——星号臂的值, 由因子个数决定;  $Z_{j2}$ ——第  $j$  个因子的上限值;  $Z_{j1}$ ——第  $j$  个因子的下限值;  $Z_j$ ——第  $j$  水平因子值。

由此确定了小麦气力输送能耗的试验方案(表 2)。每组试验分别进行 23 次, 其中包括 8 次 3 因子 2 水平的正交试验, 6 次星号臂试验和 9 次零水平试验。每次试验分别进行两次, 取平均值。

2 4 试验测试内容

试验中需要测试的参数有: 含水率  $M$ 、气流速度  $v_m$ 、浓度比  $\mu$ 、电机功率  $N$  等。

试验中采用粮食水分测定仪直接测量小麦的湿基水分; 气流速度是测定输料管中心处的动压, 由动压换算得到该处的气流速度; 浓度比的确定根据小麦的流量和空气的流量调节, 小麦的流量通过振动给料器控制箱的调节实现, 空气流量的调节由调速电机调节气流速度实现; 电机的输入功率用瓦特表直接测定。

试验测试过程: 先将调速电机旋钮拧至最小, 接通电源, 缓慢旋转调速钮, 使其逐渐增大, 直至风机启动, 运转平稳。测定输料管气流速度, 并继续调整电机转速, 以至获得满意的气流速度。接通电磁振动给料器, 使料斗中小麦向下流至其中, 按所调定的输料量选择给料量, 以实现试验所需浓度比。同时以秒表计时, 测定输送时间, 以便计算其生产率。观察输料管中的小麦稳定后, 记录电机输入功率, 将相关试验数据填入试验表格, 每次试验重复 2 次, 取平均值。

3 试验结果及分析

小麦气力输送能耗试验结果见表 2。

表 2 小麦气力输送试验方案及结果计算表

Table 2 Test scheme and results of pneumatic conveying														
试验号	试验变量			$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	试验指标	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$										电能比耗	
1	16 4	30 4	1 84	1	1	1	1	1	1	1	0 406	0 406	0 406	1 509
2	16 4	30 4	1 36	1	1	1	- 1	1	- 1	- 1	0 406	0 406	0 406	1 760
3	16 4	25 6	1 84	1	1	- 1	1	- 1	1	- 1	0 406	0 406	0 406	1 015
4	16 4	25 6	1 36	1	1	- 1	- 1	- 1	- 1	1	0 406	0 406	0 406	1 240
5	11 6	30 4	1 84	1	- 1	1	1	- 1	- 1	1	0 406	0 406	0 406	1 531
6	11 6	30 4	1 36	1	- 1	1	- 1	- 1	1	- 1	0 406	0 406	0 406	1 704
7	11 6	25 6	1 84	1	- 1	- 1	1	1	- 1	- 1	0 406	0 406	0 406	1 056
8	11 6	25 6	1 36	1	- 1	- 1	- 1	1	1	1	0 406	0 406	0 406	1 284
9	18 0	28 0	1 60	1	1 682	0	0	0	0	0	2 234	- 0 594	- 0 594	1 338
10	10 0	28 0	1 60	1	- 1 682	0	0	0	0	0	2 234	- 0 594	- 0 594	1 306
11	14 0	32 0	1 60	1	0	1 6820	0	0	0	0 594	2 234	- 0 594	1 780	
12	14 0	24 0	1 60	1	0	- 1 682	0	0	0	0	0 594	2 234	- 0 594	1 017
13	14 0	28 0	2 00	1	0	0	1 682	0	0	00 594	- 0 594	2 234	1 010	
14	14 0	28 0	1 20	1	0	0	- 1 682	0	0	0	0 594	- 0 594	2 234	1 432
15	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 359
16	14 0	28 0	1 60	10	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 296	
17	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 076
18	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 237
19	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 269
20	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 390
21	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 349
22	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 269
23	14 0	28 0	1 60	1	0	0	0	0	0	0	0 594	- 0 594	- 0 594	1 176
				$B_j$	30 493	0 003	3 041	- 1 583	0 119	- 0 075	0 029	0 462	1 151	- 0 108
动力消耗				$d_j$	23	13 66	13 66	13 66	8	8	8	15 89	15 89	15 89
回归分析				$b_j$	1 326	0 0002	0 223	- 0 116	0 015	- 0 0009	0 004	0 0292	0 0724	- 0 007
				$Q_j$		$5.9 \times 10^{-7}$	0 6781	0 1836	0 0018	0 00071	0 0001	0 0135	0 0833	0 0007

注: 在试验变量中,  $X_1$ - 含水率;  $X_2$ - 气流速度;  $X_3$ - 浓度比;  $B_j$ - 常数矩阵的元素;  $d_j$ - 信息矩阵的元素;  $b_j$ - 回归系数;  $Q_j$ - 偏回归平方和;  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ - 对平方项进行中心化处理后所得结果。

### 3.1 回归方程的建立

对试验结果进行统计计算,得到了小麦气力输送的功率消耗  $Y$  与含水率  $x_1$ 、气流速度  $x_2$  和浓度比  $x_3$  关系的回归方程,见式(3)。

$$Y = 1.231 + 2.1 \times 10^{-4}x_1 + 0.223x_2 - 0.116x_3 + 0.015x_1x_2 - 9.4 \times 10^{-3}x_1x_3 + 3.6 \times 10^{-3}x_2x_3 + 0.0292x_1^2 + 0.0724x_2^2 - 6.8 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (3)$$

对回归方程的显著性检验表明,在 99.99% 的置信度下回归效果极显著。回归系数 ( $x_2, x_3, x_2^2$ ) 均在 90% 以上的置信度下显著,小麦含水率  $x_1$  在 75% 以上的置信度下显著。

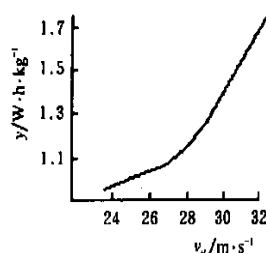


图2 风速-小麦气力输送能耗关系曲线

Fig. 2 Relationship between wind velocity and energy consumption

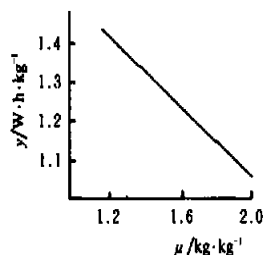


图3 浓度比-小麦气力输送关系曲线

Fig. 3 Relationship between consistency ratio and energy consumption

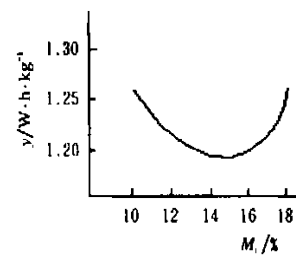


图4 含水率-小麦气力输送能耗关系曲线

Fig. 4 Relationship between moisture content and energy consumption

### 3.3.1 气流速度(风速)

风速是影响能耗的主要因素。从图2可知,风速与能耗呈平方关系,风速的增加引起能耗的迅速增加。输送气流速度越大,提升谷物的压损就越高,从而能耗越高;同时较高的风速也会造成谷物的破碎和管件的磨损。但是气流速度过低时,谷物的输送就会变得不稳定出现输料管堵塞、掉料。在生产实践中,风速的选择要慎重:在满足生产率要求和不破碎、不掉料的前提下,尽可能的选择能够输送的较低的气流速度。

### 3.3.2 料气浓度比

由图3可知,浓度比对气力输送系统的能量消耗影响显著,能耗同浓度比呈线性关系。浓度比增加,能量消耗下降。这是因为,在输送一定量的谷物时,浓度比越大所需输送谷物的空气量越小,气力输送的能耗就越小,输送就越经济;管道内谷物的速度与谷物在该截面的数量成反比,该截面上的谷物量越多,谷物的速度越小,则在输送过程中发生碰撞、冲击、摩擦的机会就减少,从而能耗就越低。但应注意的是,浓度比过高会降低设备的吸风量,使输送不稳定。

### 3.3.3 含水率

谷物的含水率对能量消耗影响虽不十分显著,对3种谷物能耗的影响程度也不尽相同。

含水率对小麦输送的能量消耗影响较为显著,成二次关系,如图4所示。含水率的变化引起谷物颗粒表面形状的变化,从而影响谷物的悬浮速度,引起能量消耗的变化。由图4可见,含水率曲线上有一最低点,使能耗

### 3.2 影响能耗的主要因素

各因素的编码消除了取值单位的不同对回归系数的影响,因此可以根据回归系数的大小分析各因素对能量消耗的影响。由式(3)可知,影响能量消耗的主要因素依次为:气流速度  $v_a$ 、浓度比  $\mu$ 、含水率  $M$ 。以回归方程为目标函数,以各因素的变化范围作约束条件,用复合形法优化程序进行优化设计,得到能耗最低时各因素的最佳组合为  $x_1 = 14.58\%$ ,  $x_2 = 25.01 \text{ m/s}$ ,  $x_3 = 1.95 \text{ kg/kg}$ 。

### 3.3 试验因素对气力输送能耗的影响

根据回归方程(3)绘出了能耗  $Y$  随试验因素变化的曲线,如图2、3、4所示。

达到最小,即能耗最低时的最佳含水率。最佳含水率对于气力输送的降耗以及减少谷物破碎有重要意义,这有待于从农业物料力学方面进行更为深入的探讨。

## 4 结 论

1) 影响小麦气力输送能耗的主要因素依次为:气流速度  $v_a$ 、料气浓度比  $\mu$ 、含水率  $M$ 。

2) 气流速度  $v_a$  是影响能量消耗的主要因素,与能耗呈平方关系;料气浓度比  $\mu$  对气力输送系统的能量消耗影响显著,能耗同浓度比呈线性关系;谷物含水率  $M$  对小麦输送的能量消耗影响较为显著,呈二次抛物线关系。

3) 能耗最低时各因素的最佳组合为:含水率  $14.58\%$ ,气流速度  $25.01 \text{ m/s}$ ,质量浓度比  $1.95 \text{ kg/kg}$ 。

4) 在满足生产率要求和不破碎、不掉料的前提下,尽可能选择能够输送的较低的气流速度。

5) 对于设备动力有余量的厂家,可以适当提高浓度比,但应注意浓度比提高引起的输送不稳定性。

6) 为获得较好的输送效果,应尽量选择谷物水分适当(破碎低、能耗小)时进行输送。

### 〔参 考 文 献〕

- [1] 魏 雷. 垂直输料管临界输送的数学求解[J]. 郑州粮食学院学报, 1988, (3): 83~94.
- [2] 黄远东. 气力输送和物料年处阻力区的判定方法的建立[J]. 郑州粮食学院学报, 1993(4).
- [3] 贾奎连. 降低碾米厂电耗的技术途径[J]. 粮食与饲料工

- 业, 1988, (5): 12~ 14
- [4] 王远成 引进粉厂气力吸运系统降低电耗途径的研究[J] 郑州粮食学院学报, 1992, (2): 45~ 49
- [5] 程克勤 低速密相气力输送综述[J] 硫磷设计与粉体工程, 2001, (2): 22~ 26
- [6] 程克勤 气力输送技术的若干新进展[J] 硫磷设计与粉体工程, 2001, (5): 15~ 24
- [7] 龚义书, 王璋保 煤粉气力输送弯管段压力损失的研究[J] 工业炉, 1999, 5(2).
- [8] 李建国, 任苏民 气力输送技术浅谈[J] 水利电力机械, 2001, 6(3): 38~ 39
- [9] 莫伟军 火电厂双套管紊流气力除灰系统[J] 电力建设, 2001, 1(1): 49~ 51
- [10] 彭建恩 对粉碎料采用气力输送方式的探讨[J] 粮食科技与经济, 1996, (6): 37~ 38

## Experimental research on reducing power consumption of pneumatic conveying of wheat

Qian Dongping<sup>1</sup>, Cheng Qinghui<sup>1</sup>, Li Guofang<sup>2</sup>, Zhao Yanru<sup>1</sup>

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. Hebei Profession Technology College, Changli, Hebei 066600, China)

**Abstract:** Pneumatic conveying is one of the material transportation methods that is widely used. But the higher energy consumption is the weakness of pneumatic conveying. In order to reduce the energy consumption and make good use of the advantage of pneumatic conveying, adopting orthogonal experiment of twice rotation combination, using wheat as experiment material, choosing moisture content of the wheat, the speed of airflow, the consistency ratio of material and air as experiment factors, the test of energy consumption was carried out. Then the relationship between energy consumption and the other factors was found out and the main factors were determined and the regulations that the main factors influence energy consumption were obtained. By statistics and analysis, the wind velocity makes the greatest influence on energy consumption, the consistency ratio second, moisture content little. The relationship between airflow velocity and energy consumption is quadratic parabolic, the relationship between the consistency ratio of material and air and energy consumption is linear, the relationship between moisture content and energy consumption is quadratic parabolic. On the basis of experimental study and theoretical analysis, on condition of meeting the requirements of productivity, no smash and no material drop, the lower speed of airflow that can transport should be chosen. If the power of the machine is sufficient, the consistency ratio can be raised, but raising the consistency ratio can result in unstable and unreliable conveying. In order to get better result, the proper moisture content of the wheat should be selected.

**Key words:** pneumatic conveying; energy consumption; agro-product processing