

# 斗式提升机输送大豆的机械损伤特征与机理

高连兴, 邵志刚, 焦维鹏, 刘畅, 杨德旭, 刘德军\*

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 为改进斗式提升机设计、减轻输送过程中对大豆的机械损伤, 以辽豆 15、辽豆 18 和黑农 40 大豆为对象, 采用 TD250 型斗式提升机对大豆进行提升输送损伤试验, 研究了斗式提升机在输送大豆过程中造成损伤的特征与机理。结果表明: 大豆在斗式提升输送过程中的损伤率约为 10%, 种皮破损为主要损伤形式, 约占 7.5%, 同时伴有破碎、两瓣、缺损等。损伤主要由装载时畚斗对大豆剪切、冲击及摩擦力造成的; 卸载时大豆撞击机罩所产生冲击力的作用反力造成的。通过优化装卸载结构及运行参数, 损伤率下降至 6.7%。

**关键词:** 损伤检测, 机理, 动力学参数, 大豆, 机械损伤, 斗式提升机

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.z1.005

中图分类号: S229.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-Supp.1-0026-07

高连兴, 邵志刚, 焦维鹏, 等. 斗式提升机输送大豆的机械损伤特征与机理[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 26-32.

Gao Lianxing, Shao Zhigang, Jiao Weipeng, et al. Soybean mechanical damage characteristics and mechanism during transportation by bucket elevator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 26-32. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

大豆是中国重要的油料作物之一, 对油脂供给安全、发展畜牧业具有极其重要意义<sup>[1-2]</sup>。大豆从收获或进口靠岸到加工整个物流过程中, 需多次短途输送、提升装卸和出入仓等环节, 易造成大豆外部损伤和内部损伤<sup>[3]</sup>。破碎的大豆容易在分选和输送过程中损耗掉而造成直接经济损失, 且大豆品质下降, 容易失油、细菌感染、吸湿, 增加了病虫和霉菌侵袭的敏感性, 缩短储存期, 严重影响大豆储藏及食用价值。内部损伤的大豆不但会加剧后续输送的破碎, 且若用作豆种时, 严重影响发芽而造成减产, 具有更大的间接危害性<sup>[4]</sup>。

据资料表明: 2011 年中国大豆年产量约为 1500 万 t, 进口大豆需求量在 5240 万 t 以上, 每年因运输造成的损伤约为 600 万 t<sup>[5]</sup>。关于大豆等谷物输送损伤问题已经引起关注并开展了研究。徐立章等认为分级包装、装卸运输、加工、贮藏过程因静载、振动、碰撞、冲击等载荷形式的作用, 形成以塑性或脆性破坏形式为主的现时损伤和以黏弹性变形为主的延迟损伤, 是导致谷物品质降低的重要形式; 谷物的机械损伤在输送过程中易产生破碎而降低粮食的品质<sup>[6]</sup>。高连兴等研究了玉米、花生等脱粒时的损伤特征及机理, 改进和研制了低损伤脱粒机械,

同时研究了大豆脱粒损伤特征及隐性损伤对大豆种子发芽的影响<sup>[7-10]</sup>。Shreekant 等研究认为斗式提升机喂料、卸料过程高度显著影响大豆发芽率并使大豆开裂、种皮损伤, 气力输送有助于减轻大豆损伤, 得出了减轻大豆输送损伤的最佳含水率<sup>[11]</sup>。周云等研究了在谷物物料输送过程中, 提升环节是必不可少的, 其中较大一部分输送损伤是由斗式提升机造成的<sup>[12-19]</sup>。

本文在分析大豆在斗式提升输送过程中产生机械损伤特征及受力特点的基础上, 研究大豆在斗式提升机输送过程中的损伤机理, 为改进和设计低损伤大豆专用斗式提升机起到参考和指导作用。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料与设备

试验材料为辽北主栽大豆品种辽豆 15、辽豆 18 和黑农 40, 脱粒分选后用于试验, 试验时, 大豆存放约 20 d, 各大豆品种接近仓储含水率 10%~13%<sup>[20]</sup>。

主要试验设备有 TD250 型斗式提升机, 红外线水分测定仪, D90 尼康数码相机, NIKON 电子显微镜等。TD250 型斗式提升机(图 1)主轴转速 240 r/min, 畚斗线速度 1.5 m/s, 斗幅 180 mm, 传动滚筒半径 358 mm, 通过其牵引构件绕过上部和底部的滚筒或链轮, 牵引构件上每隔一定距离装一畚斗, 由上部滚筒或链轮驱动, 物料从有载分支的下部进料口供入, 由畚斗把物料提升至上部卸料口卸出, 畚斗往复运动, 实现连续提升作业。

### 1.2 试验方法

斗式提升机装载方式分为挖取式、注入式及混合式 3 种, 由于挖取式装载方式对喂料连续性要求不高、使用广泛、工作效率高, 因此选用 TD250 型斗式提升机作为

收稿日期: 2011-11-17 修订日期: 2012-02-15

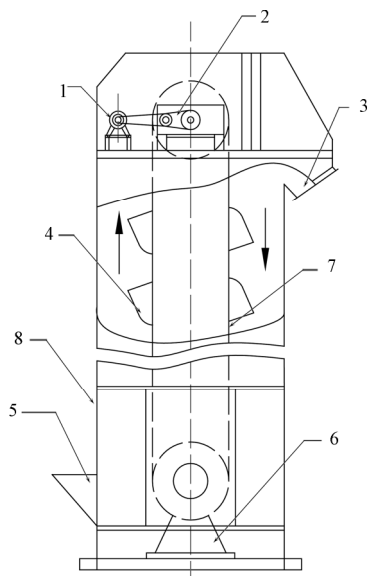
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075284)

作者简介: 高连兴(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工与收获机械研究。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110866。

Email: lianxing\_gao@126.com

※通信作者: 刘德军(1972—), 男, 辽宁省朝阳市人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农产品加工与收获机械方面研究。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110866。Email: ldjldj@126.com

试验设备，如图 2 所示，试验在大豆加工仓库进行。



1. 电动机 2. 减速器 3. 卸料口 4. 畚斗 5. 进料口 6. 张紧装置 7. 牵引构件 8. 机体

图 1 TD250 型斗式提升机工作原理

Fig.1 Working principle of TD250 bucket elevator



图 2 TD250 型斗式提升机

Fig.2 TD250 bucket elevator

大豆由散装货车卸货后，直接投入 TD250 型斗式提升机进料口，如图 3 所示，进行提升分流。输送前大豆的损伤主要由收获、脱粒等过程造成，不计入输送损伤

的统计当中。输送前后分别取 5 kg 的大豆为样本进行对比，以经过斗式提升机输送后的损伤统计减去输送前的损伤统计，即为大豆提升输送损伤，提升输送损伤分为两部分：装载损伤和卸载损伤。装载时，以 10 个畚斗装料后的样本进行统计装载损伤；卸载时，以对应的 10 个畚斗卸料后的样本进行统计卸载损伤，试验重复 3 次。对输送后的大豆进行观察取样，统计大豆输送损伤特征及装卸载损伤率。



图 3 TD250 型斗式提升机进料过程

Fig.3 Feeding process of TD250 bucket elevator

## 2 试验结果与分析

### 2.1 损伤形式与损伤率

根据试验观察与结果分析，大豆在斗式提升机输送过程中出现 2 类损伤，即外部损伤和内部损伤。外部损伤可分为 4 种形式：破碎（图 4a）即大豆籽粒整体碎裂成几个部分；两瓣（图 4b）即一大豆沿子叶方向完全分离；缺损（图 4c）即大豆籽粒裂纹或缺失；种皮破损（图 4d）即大豆种皮局部或完全损伤破损。内部损伤即大豆籽粒外形完好而内部子叶、胚芽或胚轴等出现损伤。

通过对大豆提升输送过程的统计发现，大豆在装卸过程中产生的外部损伤，约占总量的 10%左右，其中破碎约占 1.1%、两瓣约占 1.35%、缺损约占 0.22%、种皮破损约占 7.5%。因此，大豆在提升输送过程中，由于斗式提升机的机械作用所造成的损伤主要以种皮破损为主，统计其损伤情况如表 1 所示。其中，装载损伤约占 7.7%，卸载损伤约占 2.4%，由此可见，大豆提升输送损伤主要产生于装载环节。同时，由表 1 可知，不同品种大豆在输送过程中的损伤率有所不同。辽豆 15 的总损伤率较低，各项损伤形式的百分比也比较辽豆 18 及黑农 40 稍低。



a. 破碎



b. 两瓣



c. 缺损



d. 种皮破损

图 4 大豆提升输送损伤特征形式

Fig.4 Damage characteristic forms of soybean hoisting transportation

表 1 大豆输送损伤率统计分析  
Table 1 Soybean statistical analysis of transport damage rate

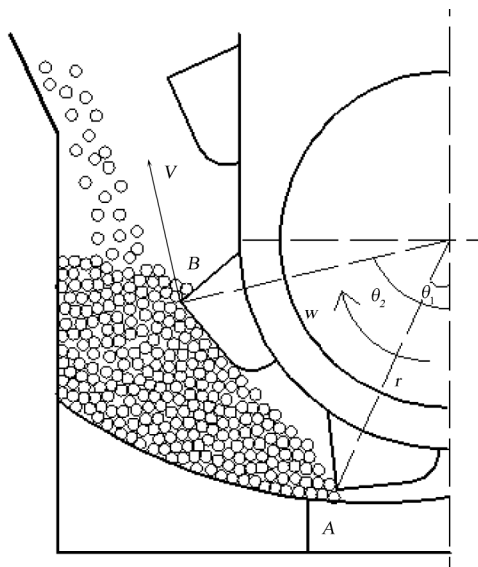
品种	破碎		两瓣		缺损		种皮破损		总损伤率/%	
	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差		
装载过程	辽豆 15	0.82	0.0656	1.00	0.1212	0.26	0.0265	5.47	0.1709	7.55
	辽豆 18	0.84	0.0361	1.02	0.1473	0.13	0.0529	5.72	0.0794	7.71
	黑农 40	0.87	0.0529	1.06	0.0794	0.12	0.0200	5.79	0.1513	7.84
卸载过程	辽豆 15	0.26	0.0300	0.31	0.0265	0.08	0.0265	1.73	0.1229	2.38
	辽豆 18	0.27	0.0346	0.32	0.0624	0.04	0.0173	1.81	0.0173	2.44
	黑农 40	0.27	0.0265	0.33	0.0361	0.04	0.0100	1.83	0.1400	2.47

注：表中各类损伤率均应用绝对值，即各项之和为总损伤率。

2.2 输送损伤机理

2.2.1 大豆装载损伤分析

TD250 型斗式提升机采用挖取式装载，大豆从进料口自上而下地连续进入、充满进料装置底部的同时，畚斗连续运行、其前檐和侧檐连续挖取物料、垂直提升运动。其装载工作过程原理如图 5 所示。



注： $\theta_1$ 为畚斗开始取料时速度方向与水平方向的夹角； $\theta_2$ 为畚斗结束取料时速度方向与水平方向的夹角； $r$ 为畚斗运行回转半径； $w$ 为角速度； $v$ 为畚斗运行速度

图 5 挖取式装载工作原理

Fig.5 Working principle of loading style by excavating

采用挖取进料方式的大豆提升机，畚斗在取料过程中对大豆作用力主要发生在前檐、侧檐和前壁（畚斗外壁）处，受力性质分为挤压力、冲击力、摩擦力和剪切力等，这些作用力随畚斗所处取料位置、畚斗与物料接触位置的不同而发生变化，属于动态受力且十分复杂。

通过对畚斗结构、运动特点与取料过程分析发现：畚斗前檐回转半径最大、运动速度也最高，取料过程中进入物料深度大；工作一定时间后畚斗前檐属于钝刃，对物料的作用力可以认为是挤压力。因此，以畚斗前檐接触处的大豆为质点（B 点）进行受力分析，所受各种力如图 6 所示，平衡方程为

$$\vec{F}_x + \vec{F}_y = \vec{G} + \vec{F}_v + \vec{F}_t + \vec{F}_f + \vec{F}_i \quad (1)$$

式中， $G$ 为大豆自身的重力，N； $F_x$ 为大豆之间挤压反力在  $x$  轴的分力，N； $F_y$ 为大豆之间挤压反力在  $y$  轴的分力，

N； $F_t$ 为畚斗前檐和侧檐的切入力，N； $F_f$ 为畚斗前壁对大豆的挤压力，N； $F_v$ 为畚斗前檐对大豆运动时产生的摩擦力，N，方向与畚斗前檐速度方向  $V$  相同； $F_i$ 为畚斗前檐对大豆的冲击力，N，与速度方向一致。

通过受力分析可知，畚斗连续运行、从进料斗底部开始对大豆刮取过程中，畚斗外壁各点处的切向速度方向在外壁面以内，基本对大豆没有作用力，所以可以忽略畚斗前壁对大豆的挤压力  $F_f=0$ ；与其他作用力相比，大豆本身重力可以忽略。公式（1）简化后为

$$\vec{F}_x + \vec{F}_y = \vec{F}_v + \vec{F}_t + \vec{F}_i \quad (2)$$

将上述矢量方程转化为代数方程，则大豆在坐标轴 X 和 Y 轴方向受到的作用力分别为

$$F_x = \cos\theta (F_v + F_t + F_i) \quad (3)$$

$$F_y = \sin\theta (F_v + F_t + F_i) \quad (4)$$

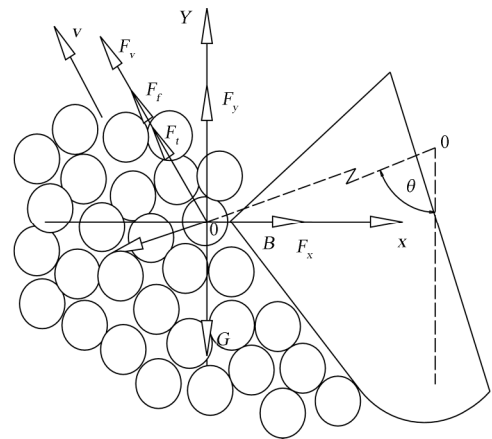


图 6 挖取式装载受力分析

Fig.6 Force analysis of loading style by excavating

由式（3-4）可知，在装载过程中，大豆籽粒主要受  $F_v$ 、 $F_t$  和  $F_i$  作用导致损伤。当  $\theta=0$  时即畚斗从最低处取料时， $F_x=F_v+F_t+F_i$ ， $F_y=0$ ，大豆籽粒在竖直方向受力为 0，水平方向受力大小为  $F_v$ 、 $F_t$ 、 $F_i$  的数量和，随着畚斗继续运行， $\theta$  角随之变化，大豆籽粒所受合力也随之变化。根据各作用力的合力  $F_a$  来看，畚斗在挖取运行过程中相当于会对大豆籽粒产生一种刚性挤搓力  $F_a$ ，极易造成大豆籽粒的损伤。根据大豆静态加载力学特性<sup>[21]</sup>可知，作用在平行或垂直于大豆子叶方向的极限载荷力分别为 64.662 和 113.600 N，因此在挖取式装载过程中，大豆籽

粒所受合力  $F_a$  小于极限载荷力，损伤率方可降低。

根据分析可知，TD250 型斗式提升机采用挖取式装载方式进行装载，畚斗对大豆所产生的损伤主要发生在畚斗前檐。大豆籽粒由进料口连续不断进入机体底部，畚斗在底部由低至高进行挖取取料，由于进料口较高，导致豆堆堆积高度过高，豆堆中上部将会对底部大豆籽粒产生较大的压力，由于反力作用，在畚斗取料过程中，畚斗前檐将会对底部大豆籽粒产生较大的剪切力  $F_t$ ，在畚斗往复运动取料的过程中，畚斗前壁至前檐将会对豆粒产生摩擦力  $F_f$ ，极易造成大豆的损伤。与此同时，挖取式装载过程中畚斗运行速度较大，根据冲量定理，冲击力大小与冲击前后速度差成正比，当高速运行的畚斗在接触豆粒的瞬间，畚斗前檐将对豆粒产生较大的冲击力  $F_v$  作用，极易产生损伤，因此可以通过降低畚斗运行速度达到降低输送损伤的目的。

斗式提升机的设计应考虑畚斗形状、进料口高度、角度、进料量大小及运行速度等因素。根据机理分析，为了降低畚斗外壁对大豆的摩擦力，在保证畚斗填充率的条件下，设计畚斗时，应使畚斗前壁至前檐的外部曲线与畚斗回转半径圆弧相一致。进料口与水平成  $45^\circ$  角为宜，大豆从进料口进入提升机底部会形成一个堆积角为  $45^\circ$  左右的豆堆，配合以相适宜的畚斗外部曲线，方可降低畚斗外壁与大豆籽粒之间的摩擦力。进料口的下部高于尾轴中心水平 150 mm 较适宜，这样可避免进料口集料堵塞，降低豆堆高度，减小畚斗运行阻力。进料量需根据提升机的生产效率确定，但不宜过大。在保证生产效率的前提下，运行速度采用 1.2 m/s 可减少畚斗前檐对大豆的冲击力，具体参数如表 2 所示。

表 2 斗式提升机改进参数

Table 2 Improvement parameters of bucket elevator

进料口角度/ $^\circ$	进料口高度/mm	运行速度/( $m \cdot s^{-1}$ )
45	150	1.2

根据优化后试验结果可知，斗式提升机在装载环节的损伤率由 7.7% 下降至 4.8%，损伤特征主要仍为种皮破损，具体损伤情况如表 3 所示。

2.2.2 大豆卸载损伤分析

卸载过程是斗式提升机最为关键的工作过程，直接影响大豆输送的生产率及损伤率。斗式提升机的卸载方式有重力式、离心式及混合式 3 种。当装满大豆的畚斗由上升分支运行至头部驱动轮后，畚斗中大豆某质点同时受重力  $mg$  与离心力  $m\omega^2r$  的作用，其中  $m$  为大豆籽粒的质量， $\omega$  为畚斗运行角速度， $r$  为大豆籽粒旋转半径。其合力  $F$  是产生大豆卸载损伤的主要原因。

卸料过程中，当重力值比离心力值大，即  $mg > m\omega^2r$ ，畚斗内大豆籽粒向畚斗的内边移动，大豆受重力影响卸出，故称重力式卸载，此时，畚斗运行速度较小，效率较低；当大豆籽粒的离心力远大于重力，即  $mg < m\omega^2r$ ，畚斗内大豆向畚斗的外边移动，豆粒受离心力的影响而抛出，故称离心式卸载，由于畚斗运行速度大，工作效率高，离心式卸载是目前大豆提升输送应用最多的卸载方式，但同时，由于离心力过大，大豆籽粒撞击到机罩的作用力也较大，极易产生大豆损伤。当大豆籽粒离心力值与重力值差异很小，畚斗内大豆一部分沿畚斗外边卸出，一部分沿畚斗内边卸出，故称混合式卸载。

表 3 斗式提升机装载优化后损伤率统计分析

Table 3 Statistical analysis of damage rate of bucket elevator after loading optimization

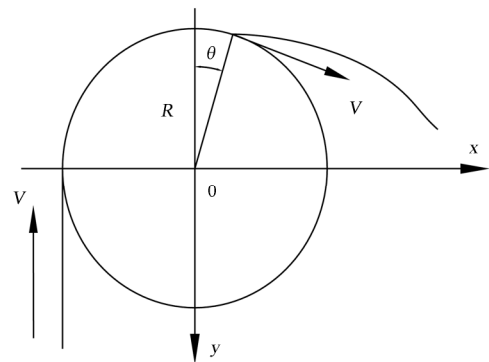
品种	破碎		两瓣		缺损		种皮破损		总损伤率/%
	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差	
辽豆 15	0.53	0.0119	0.64	0.0087	0.08	0.0015	3.54	0.0208	4.78
辽豆 18	0.56	0.0166	0.57	0.008	0.09	0.0031	3.67	0.0212	4.89
黑农 40	0.49	0.0094	0.63	0.011	0.16	0.0069	3.59	0.0133	4.87

为了研究大豆实际卸料轨迹，分析卸料时的受力特点，选用 I、II 点为畚斗卸料时的两个极限点，根据运动方程及 TD250 型斗式提升机工作参数可以分别求得 I、II 点的抛料轨迹。以 TD250 型斗式提升机头部驱动滚筒中心为坐标原点，建立如图 7 所示直角坐标系，质点绕过头部驱动滚筒作一段圆周运动，并绕过最高点转过一个角度  $\theta$ ，达到  $\cos\theta = v^2/Rg$ ，此点即为物料卸料点，所以取运动方程见式 6。

$$x = vt\cos\theta + R\sin\theta \quad (5)$$

$$y = vt\sin\theta + \frac{1}{2}gt^2 - R\cos\theta \quad (6)$$

式 (5-6) 中， $\cos\theta = v^2/Rg$ ； $v$  为畚斗运行速度，1.5 m/s； $R$  为回转半径，0.358 m； $g$  为重力加速度， $9.81m/s^2$ ； $t$  为卸料时间，s。



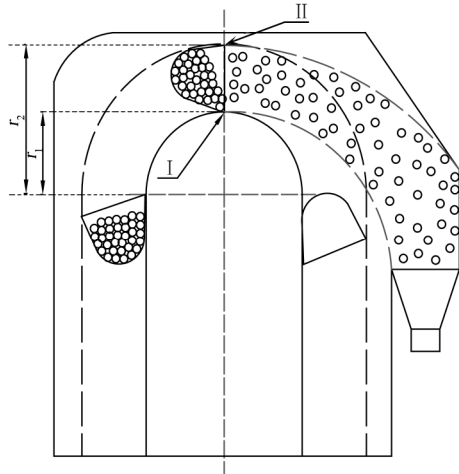
注：v 为畚斗运行速度； $\theta$  为畚斗卸料角；R 为滚筒半径。

图 7 卸料运动方程坐标系

Fig.7 Unloading motion coordinate system

计算卸料轨迹采取极限求值法，定义 I、II 点为极

限位置，如图 8 所示。



注： $r_1$  为 I 点回转半径； $r_2$  为 II 点回转半径。

图 8 卸载工作原理

Fig.8 Working principle of unloading

其中 I 点位置的回转半径为滚筒半径，即 0.358 m，初始速度  $v_1 = \omega r_1 = 1.432$  m/s；II 点回转半径为斗幅与滚筒半径的和，即 0.538 m，初始速度  $v_2 = 2.152$  m/s。卸料时间取 0.5 s，下落高度  $h = 1.225$  m，间隔为 0.01 s。根据已知条件计算得

I 点卸料轨迹方程为： $y = 5.311x^2 - 1.722x - 0.1574$ ；

II 点卸料轨迹方程为： $y = 11.99x^2 - 9.548x + 1.58$ ；

运用 matlab 软件拟合方程曲线得卸料轨迹如图 9 所示。

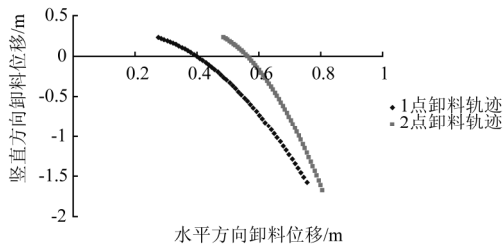
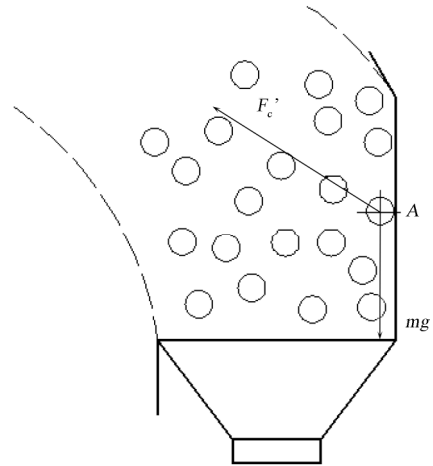


图 9 大豆卸料轨迹

Fig.9 Trajectory of soybean unloading

根据运动学分析可知，大豆籽粒在离开畚斗后做抛物线运动，豆粒流在一定的包络范围内卸料，其抛物轨迹包络线倾角在  $45^\circ \sim 70^\circ$ 。畚斗内侧大豆籽粒主要依靠重力作用，沿内包络线卸载，内包络线在卸料时间末的瞬时线速度  $v_{内} = (v_1^2 + 2gh)^{1/2} = 5.105$  m/s，大豆做平抛运

动后进入卸料口，完成卸载；而畚斗外侧大豆籽粒主要依靠离心力作用，沿外包络线做抛物线运动，外包络线在卸料时间末的瞬时线速度  $v_{外} = (v_2^2 + 2gh)^{1/2} = 5.352$  m/s，此时撞击瞬时速度取决于离心力与下落高度。此时，大豆籽粒将撞击在斗式提升机的机罩上，以撞击在机罩上的大豆为质点 (A 点) 进行受力分析，如图 10 所示。大豆籽粒撞击到机罩的瞬间受到自身的重力  $mg$  以及撞击在机罩产生冲击力的作用反力  $F_c'$ ，作用反力  $F_c'$  大小与冲击力  $F_c$  大小相等，方向相反。



注： $F_c'$  为大豆撞击机罩产生冲击力的作用反力； $mg$  为大豆籽粒所受重力。

图 10 卸载受力分析

Fig.10 Force analysis of unloading

由动量定理可知， $F = mv/t$ ，式中  $t$  为撞击机罩时的接触时间，速度  $v$  由卸载时大豆籽粒自身重力  $mg$  与离心力  $m\omega^2 r$  的合力所产生的。因此离心力  $m\omega^2 r$  越大，大豆卸载时所受合力越大，同时下落高度越大，大豆籽粒撞击机罩时的速度就越大，进而所受冲击力就越大，大豆籽粒极易损伤。为了减少大豆在卸载时的损伤，应根据卸载轨迹包络线轨迹设计提升机的头罩及卸料口的形状尺寸，保证其在卸料轨迹包络线的中央范围进行卸料，使机罩可以包络所有的飞行轨迹线，避免大豆籽粒撞击到斗式提升机的机罩上。提升机头罩采用外包络线曲线形状进行改进，提高卸料口高度至主轴底部位置，同时减小畚斗的运行速度至 1.2 m/s，使大豆籽粒在离开畚斗时的初始速度和卸料速度较低，减小冲击力，以降低损伤。根据优化试验结果，大豆在卸载时籽粒撞击头罩的击打声音明显减少，卸料速度下降了 5%，卸载损伤率由 2.4% 下降至 1.9%，具体损伤情况如表 4 所示。

表 4 斗式提升机卸载优化后损伤率统计分析

Table 4 Statistical analysis of damage rate of bucket elevator after unloading optimization

品种	破碎		两瓣		缺损		种皮破损		总损伤率/%	
	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差	损伤率/%	标准误差		
卸载过程	辽豆 15	0.21	0.0061	0.25	0.0049	0.07	0.0044	1.40	0.0086	1.92
	辽豆 18	0.22	0.0045	0.25	0.0072	0.03	0.0027	1.47	0.0073	1.97
	黑农 40	0.21	0.0109	0.26	0.0136	0.03	0.0009	1.48	0.0036	1.99

### 3 结论与建议

1) TD250 型斗式提升机输送大豆的损伤率约为 10%，其中装载损伤约占 7.7%，卸载损伤约占 2.4%。主要损伤形式有破碎、两瓣、缺损及种皮破损等形式，其中以种皮破损为主，约占 7.5%，大豆籽粒两瓣其次，约占 1.35%，其他损伤形式所占比例较低。

2) TD250 型斗式提升机造成大豆机械损伤主要产生在装载和卸载过程。挖取装载时，由于豆堆堆积过高，畚斗运行速度过大，畚斗会对大豆籽粒产生剪切力、冲击力和摩擦力作用，大豆极易破碎损伤。卸载时，大豆损伤主要由撞击机罩的冲击作用反力产生，离心力越大，作用反力越大，损伤率越高。

3) 改进后的大豆斗式提升机采用斜口进料，进料口与水平成  $45^\circ$  角，进料口的设计采用分层分流的进料方式，进料口的下部高于尾轴中心水平 150 mm，减少大豆堆积，以减少冲击力作用；卸载时，机罩的设计要考虑大豆卸料轨迹，可减轻大豆籽粒撞击机罩，适当增大卸料口高度，同时卸料口附加缓冲装置可减少大豆损伤。结合装载卸载损伤机理分析，畚斗运行速度不宜过高，优化至 1.2 m/s，但可采用畚斗紧密布置来弥补提高生产率，畚斗宜采用深斗结构形式，结构形状设计应采用流线型设计，使畚斗前壁至前檐的外部曲线与畚斗回转半径圆弧相一致，以减少摩擦阻力作用，畚斗前檐宜采用柔性元件，可降低冲击力及剪切力作用。优化后，装载损伤率由 7.6% 降低至 4.8%，卸载损伤率由 2.4% 降至 1.9%，总损伤率下降至 6.7%。可继续通过斗式提升机结构及运行参数的正交优化设计，得出各参数的最优组合，进一步降低损伤率。

#### [参 考 文 献]

- [1] 赵贵玉, 张越杰. 黑龙江省大豆生产效率研究[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(3): 350—354.  
Zhao Guiyu, Zhang Yujie. A study on soybean productivity in Heilongjiang province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(3): 350—354. (in Chinese with English abstract)
- [2] 石彦国. 调整产业结构确保大豆产业健康持续发展[J]. 中国食品学报, 2010, 10(4): 1—7.  
Shi Yanguo. Adjusting the industrial structure to ensure sustained and healthy development of soybean industry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(4): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [3] 蔡育池, 陈金华, 魏谋开. 改造散粮输送系统降低粮食破碎率[J]. 中国粮食经济, 2007, (2): 510—512.  
Cai Yuchi, Chen Jinhua, Wei Moukai. Transformation bulk grain conveyor system to reduce food broken rate[J]. Chinese Grain Economic, 2007, (2): 510—512. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王蕾. 进口大豆储运过程中霉菌活动的研究[D]. 河南工业大学, 2007, 5.
- [5] Wang Lei. Research on soybean import mold activities during the storage and transportation[D]. Henan Industrial University, 2007, 5. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王印基. 预计 2015 年中国大豆进口将超 6800 万吨.[EB/OL].http://www.21food.cn/html/news/35/659363.htm,2011-11-12/2011-11-17.  
Wang Yinji. Estimate. Chinese soybean imports will exceed 68000000tons.[EB/OL].http://www.21food.cn/html/news/35/659363.htm,2011-11-12/2011-11-17.
- [7] 徐立章, 李耀明, 王显仁. 谷物脱粒损伤的研究进展分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 303—307.  
Xu Lizhang, Li Yaoming, Wang Xianren. Research development of grain damage during threshing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 303—307. (in Chinese with English abstract)
- [8] 高连兴, 李晓峰, 接鑫, 等. 大豆内部机械损伤对发芽的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 63—66.  
Gao Lianxing, Li Xiaofeng, Jie Xin, et al. Inner mechanical damage impact to germination of soybean kernels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 63—66. (in Chinese with English abstract)
- [9] 高连兴, 李晓峰, 接鑫, 等. 大豆机械脱粒损伤特征及损伤率研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(1): 55—58.  
Gao Lianxing, Li Xiaofeng, Jie Xin, et al. Investigation on characteristics and ratio of soybean kernel mechanical damage[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(1): 55—58.
- [10] 那雪姣. 花生脱壳损伤特征规律及立式薄层脱壳装置研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2010.  
Na Xuejiao. Peanut shell damage characteristic rules and vertical thin layer shelling device research[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李心平. 种子玉米脱粒损伤机理及 5TYZ-1 型定向喂入式脱粒机研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.  
Li Xinping. Study on threshing-damage mechanism and 5TYZ-1 type directional -feeding thresher of seed corn[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [12] Shreekant R. Parde, Rameshwar T. Kausal, Digvir S. Jayas et al. 2001 ASAE annual international meeting[C], Paper Number. 06(Part.II), Sacramento Convention Center, Sacramento, California, USA, July 30-August 1, 2001.
- [13] 周云, 王德华, 崔阳, 等. 降低斗式提升机玉米破碎率的措施[J]. 粮食与饲料工业, 2008, (9): 14—17.  
Zhou Yun, Wang Dehua, Cui Yang, et al. Reduce the corn broken rate measures of bucket elevator[J]. Cereal and Feed Industry, 2008, (9): 14—17. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李小化, 陈莲. 斗式提升机提升玉米产生破碎的原因探讨[J]. 粮食与饲料工业, 2004, (1): 15—16.  
Li Xiaohua, Chenlian. Delving maize kernel breakage in bucket elevating[J]. Cereal and Feed Industry, 2004, (1): 15—16. (in Chinese with English abstract)

- [14] 康凯, 吴新连, 姜永顺. 粮库输送设备破碎率的检测及其方法研究[J]. 粮食流通技术, 2008, (5): 16—17.  
Kang Kai, Wu Xinlian, Jiang Yongshun. A study on the examination of transmitted equipment and its resarch method in grain depot[J]. Grain Circulation Technology, 2008, (5): 16—17. (in Chinese with English abstract)
- [15] 廖江明, 袁传光, 姚宏, 等. 浅圆仓玉米破碎率调查报告[J]. 粮食储藏, 2003, 32(4): 50—53.  
Liao Jiangming, Yuan Chuanguang, Yao Hong, et al. Shallow circular warehouse corn broken rate survey report[J]. Food Storage, 2003, 32(4): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郝立群, 董梅, 白岩. 影响玉米干燥系统破碎率的因素及解决方法[J]. 粮食储藏, 2005, 34(4): 19—21.  
Hao Liqun, Dong Mei, Bai Yan. Influence of corn drying system breakage factors and solutions[J]. Food Storage, 2005, 34(4): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [17] Fernando S, Hanna M, Mesquita C. Soybean threshing mechanism development and testing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 47(3): 599—605.
- [18] Vanutrecht D, Bernc C J, Rukunudin I H. Soybean mechanical damage detection[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(2): 137—141.
- [19] 王彩云. 大豆平衡含水率的试验研究[J]. 中国粮油学报, 1999, 14(3): 60—62.  
Wang Caiyun. Experiment on equilibrium moisture content of soybean[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1999, 14(3): 60—62. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李晓峰. 玉米与大豆种子内部机械损伤及检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2010.  
Li Xiaofeng. Study on internal mechanical damage and detection method of corn and soybean seed[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)

## Soybean mechanical damage characteristics and mechanism during transportation by bucket elevator

Gao Lianxing, Shao Zhigang, Jiao Weipeng, Liu Chang, Yang Dexu, Liu Dejun<sup>\*</sup>

(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** In order to improve the design of bucket elevator and reduce the damage in the transportation process, three soybean varieties (Liaodou 15, Liaodou 18 and Heinong 40) were used as the samples. TD250 bucket elevator was involved in the soybean injury test of the ascension delivery, and the soybean mechanical damage characteristics and mechanism were studied. The results showed that the mechanical damage rate of transportation process by soybean bucket elevator was about 10%. Damage characteristics mainly contained broken, two discs, defect and skin damaged. Damage rate of skin damaged was the most among the damage characteristics, about 7.5%. Mechanical damage was mainly caused by shear force, friction and impact pressure made by dust pan, and impact reaction force produced by soybean hitting the machine cover under unloading. Damage rate was reduced at 6.7% after loading and unloading structure and operating parameters optimization.

**Key words:** Damage detection, mechanism, kinetic parameters, soybean, Mechanical damage, Bucket elevator