

# 转轮式全混合日粮混合机试验设计与机理分析\*

于克强<sup>1,2</sup> 李利桥<sup>1</sup> 何勋<sup>3</sup> 王德福<sup>1</sup> 张全超<sup>1</sup> 那明君<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江科技大学机械工程学院, 哈尔滨 150080;

3. 河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002)

**摘要:** 为了揭示设计的转轮式全混合日粮混合机的混合机理, 将其混合室在空间上平均划分为4个区, 并结合高速摄像(1 200 帧/s, 4G) 技术对其混合过程进行深入细致的研究, 得出了其混合过程主要是剪切混合、对流混合和扩散混合交替进行的过程, 且在混合过程中伴有物料的滑移运动、瀑布运动和涡流运动, 并得出转子转速、混合叶板角度、混合时间和充满系数4个因素对混合质量影响较大, 依据变异系数评价指标对上述因素进行了试验研究, 确定其参数取值范围为: 转子转速 29 ~ 31 r/min, 混合叶板角度 16° ~ 26°, 混合时间 10 ~ 12 min, 充满系数 48% ~ 53%, 在此范围内变异系数小于 10%。

**关键词:** 全混合日粮 混合机 转轮式 混合机理

**中图分类号:** S225.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0109-09

## Experimental Design and Principle Analysis on Paddle-wheel Total Mixed Ration Mixer

Yu Keqiang<sup>1,2</sup> Li Liqiao<sup>1</sup> He Xun<sup>3</sup> Wang Defu<sup>1</sup> Zhang Quanchao<sup>1</sup> Na Mingjun<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Mechanical Engineering, Heilongjiang Science and Technology University, Harbin 150080, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** On the basis of the development status of total mixed ration mixer in China, the paddle-wheel total mixed ration mixer was developed. To reveal mixing principle of the mixer, the mixing chamber was divided into four districts, and research of the mixing process was conducted by using high-speed cameras (1 200 frames/s, 4G). This study showed that shear mixing, convective mixing and diffusion mixing were the main modes in the mixing process, and accompanied by gliding motion, waterfall movement and eddy motion. It could be obtained that the rotor speed, angle of the mixing paddle, mixing time and fullness coefficient had greater influences on the mixing performance of the paddle-wheel total mixed ration mixer. Then, the above four parameters were decided as experimental factors, and variation coefficient was chosen as the evaluation index, experiments were done by design method of quadratic regression orthogonal rotational combination. Through the experimental study on paddle-wheel total mixed ration mixer, the main parameters in structure and motion of the mixer were optimized and determined as follows: rotor speed of 29 ~ 31 r/min, the angle of mixing paddle of 16° ~ 26°, mixing time of 10 ~ 12 min, fullness coefficient of 48% ~ 53%. The research of paddle-wheel total mixed ration mixer could provide a theoretical support for the optimum design and performance forecast of the mixer.

**Key words:** Total mixed ration Mixer Paddle-wheel Mixing principle

收稿日期: 2014-09-21 修回日期: 2015-01-07

\* 国家自然科学基金资助项目(51405076)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20124105110004)和黑龙江省科技攻关资助项目(GC13B604)

作者简介: 于克强, 博士生, 黑龙江科技大学副教授, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: 121334518@qq.com

通讯作者: 王德福, 教授, 博士生导师, 主要从事畜牧机械研究, E-mail: dfwang640203@sohu.com

## 引言

目前,在我国养牛业生产中除大型牧场外仍普遍采用精粗分饲的饲养方式,这种饲养方式易引发代谢性疾病<sup>[1-2]</sup>,同时原料奶的乳蛋白率、乳脂率等营养指标与国外先进水平也有较大差距。为克服传统饲喂方法的不足,国外许多牧场奶牛饲养都采用全混合日粮(Total mixed ration, TMR)技术<sup>[3-10]</sup>。据相关报道,使用TMR饲养技术,可使鲜奶单产增加、发病率降低,并大幅度提高人均养牛头数。而全混合日粮饲养技术的关键是TMR混合机。

目前,国外已有20多家公司研制出多种型号的TMR混合机,按其结构型式主要分卧式和立式两大类,其中立式主要有单螺旋和双螺旋两种,卧式主要以单螺旋、双螺旋、三螺旋、四螺旋为主。我国现有的TMR混合设备生产企业主要生产单螺旋立式和三螺旋卧式TMR混合设备,我国对TMR混合设备混合机理方面的研究还较少,自主研发的TMR混合机也较少<sup>[11-14]</sup>。

我国规模奶牛场所用的设备一般都是大型的立式单螺旋或双螺旋,以及卧式三螺旋TMR混合设备。为促进全混合日粮饲养技术的应用,并满足不同泌乳期奶牛的需要,本文设计转轮式TMR混合机,对该机混合机理进行深入分析,确定对该机混合质量影响较大的主要结构与运行参数,并进行试验研究,为相关研究提供支持。

## 1 试验设备与材料

### 1.1 试验设备

设计的转轮式TMR混合机主机体尺寸为 $1\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,有效容积为 $0.5\text{ m}^3$ ,配套动力为 $4\text{ kW}$ ,主要由上机体、转子、下机体和传动装置等组成,其总体结构如图1a所示。该机的转子为其主要工作部件,转子的直径为 $0.95\text{ m}$ ,宽为 $0.45\text{ m}$ ,主要由侧圆环、支臂、横梁、转轴和混合叶板组成;转子上共安装4个横梁,横梁宽 $50\text{ mm}$ ,与支臂一起固定侧圆环,同时横梁还有辅助推料作用;4个混合叶板与4个横梁等间距、交替安装在转子上,混合叶板宽 $120\text{ mm}$ ,其顶端线与轴线之间安装角度为 $\alpha$ (称混合叶板角度),并且混合叶板平面绕其顶端线顺时针旋转 $45^\circ$ 安装,混合叶板在转子旋转过程中对全混合日粮进行搅拌混合,转子的结构见图1b。上机体主要由进料口、折线立板和上侧板组成,下机体主要由卸料机构、底板(8块直板折成,每两块直板之间的安装夹角为 $157.5^\circ$ )和半圆形下侧板组成,为配合混合机理研究,该混合机的机体单侧板采用了透

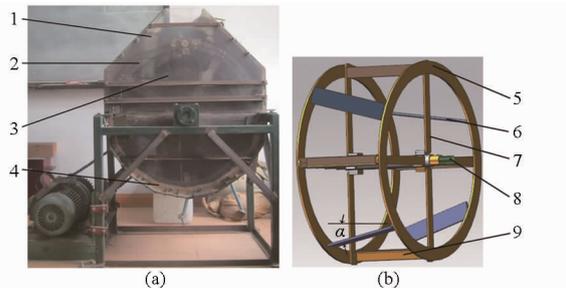


图1 转轮式TMR混合机示意图

Fig. 1 Sketch map of paddle-wheel TMR mixer

(a) 混合机结构图 (b) 转子结构图

1. 上机体 2. 转子 3. 混合室 4. 下机体 5. 侧圆环 6. 混合叶板 7. 支臂 8. 转轴 9. 横梁

明PVC板材料制作。

### 1.2 试验材料

采用质量分数为70%青贮玉米秸秆(含水率70%)、10%稻秆(含水率6.1%)、19%玉米面(含水率9.4%)、1%食盐(含水率0.5%)组成试验原料。

为了揭示转轮式TMR混合机混合机理,应用美国Vision Research公司V5.1型数字式高速摄像机对物料混合过程进行研究,试验转速为 $20\text{ r/min}$ ,混合叶板角度为 $16^\circ$ ,充满系数约50%。

## 2 混合机理分析

本文研究转轮式TMR混合机的混合机理,并通过分析其主要混合过程,得出对其混合质量影响较大的因素。

经预试验可知,转轮式TMR混合机在混合过程中会产生物料跟随转子团转现象,即安装有混合叶板的转子以一定速度转动时,物料聚集成团并跟随转子同步转动。因此,分析物料团转的原因及其破坏的过程,对研究转轮式TMR混合机理至关重要。

由于受到混合叶板的推送与拖带作用力,以及物料之间的摩擦力作用,在混合过程中混合叶板和转轴之间会夹带一些物料,这些物料会挤压在混合叶板与转轴之间(称挤压物料层)跟随混合叶板一起绕转轴转动;同时在混合过程中横梁、转轴和两侧的支臂形成一个框架,工作时类似于一把无底锹(统称该结构为无底锹)将物料成团托起。这样在混合过程中,物料易于受混合叶板和无底锹的作用在混合室内团转。当混合叶板运动到一定位置且转子转速满足一定条件时,混合叶板带动的物料会向前下方抛撒,挤压物料层产生破裂,其下落的物料可逐步打破无底锹托起的物料团,进而在混合过程中可以交替产生物料间的剪切、扩散和对流混合。物料在混合机内的混合情况见图2,根据高速摄像机拍摄物料在混合机内的混合运动过程绘制,为详细

描述物料在混合机内的运动,将混合过程按混合室空间平均分为 4 个区进行描述, I、II、III、IV 区分别位于第 3、2、1、4 象限,取混合叶板在 4 个区内一般位置进行分析,  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $D_1$  为对流混合形成区,  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 、 $D_2$  为剪切混合形成区,  $B_3$ 、 $C_3$  为扩散混合形成区, 设混合叶板对物料单元的作用力  $F$  与竖直方向夹角为  $\beta$  (图 3)。

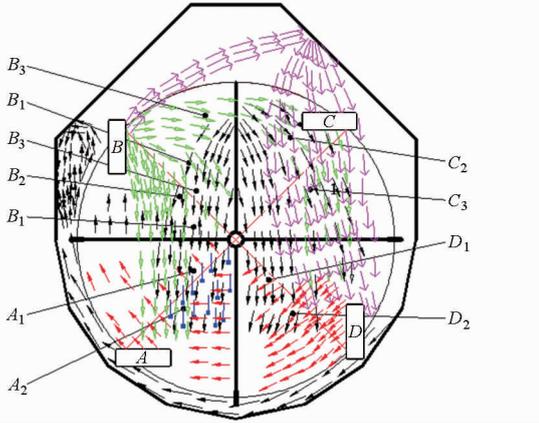


图 2 转轮式 TMR 混合机混合过程示意图  
Fig. 2 Diagram of the mixing process of paddle-wheel TMR mixer

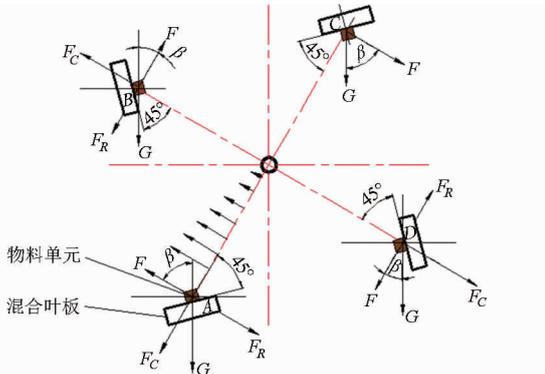


图 3 物料单元在混合过程中的受力示意图  
Fig. 3 Diagram of force diagram of material in mixing process

### 2.1 物料在混合 I 区的混合过程

在混合 I 区,随着混合叶板转动,  $\beta$  角的变化范围为  $(90^\circ, 0)$ , 对混合叶板上的物料单元进行受力分析, 见图 3。物料单元在竖直方向受力分析公式为

$$F \cos \beta \geq F_c \sin \beta + G + F_R \cos \beta \quad (1)$$

其中  $F_c = m \frac{v^2}{r}$

式中  $F$ ——混合叶板对物料单元的作用力(简称作用力), N

$F_c$ ——物料单元受到的离心力, N

$F_R$ ——物料单元受到其他物料的反作用力(简称反作用力), N

$G$ ——物料单元的重力, N

$m$ ——物料单元质量

$v$ ——物料单元线速度

$r$ ——转子半径

由式(1)可知,物料在混合叶板作用力  $F$  的分力作用下克服其离心力  $F_c$ 、反作用力  $F_R$  的分力及重力  $G$  而跟随混合叶板运动, 且由公式可看出, 转子转速越高则  $F_c$  越大, 进而混合叶板对物料的作用力  $F$  越大, 由于挤压物料层内部越靠近轴处的物料受到混合叶板的带动作用力越小(图 3 中与  $F$  方向相同的一系列箭头), 进而物料间的摩擦带动力减小, 在混合过程中受力较小的物料运动慢, 使物料之间产生速度差, 物料层间会发生滑移形成剪切混合, 并随  $\beta$  角减小, 重力促使物料产生向下滑动的趋势逐渐增强, 此速度差逐渐增大。同时, 混合 II 区下落进入混合 I 区的物料(图 4 中  $k$  所在区域)会与挤压物料层内物料发生碰撞形成对流混合, 碰撞后使部分挤压物料层破裂, 破裂下落的物料(如图 2 中混合 I 区向下滑落的蓝色箭头所示)与上方下落的物料形成剪切混合(图 2 中  $A_1$  和  $A_2$  区域)。

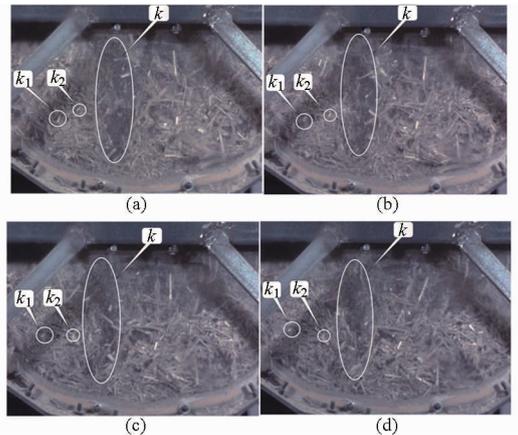


图 4 物料在混合 I 区的混合情况

Fig. 4 Mixing of materials in district I

(a) 物料颗粒  $k_1$ 、 $k_2$  在挤压物料层上的初始位置

(b) 0.034 s 后物料颗粒  $k_1$ 、 $k_2$  的位置

(c) 0.068 s 后物料颗粒  $k_1$ 、 $k_2$  的位置

(d) 0.102 s 后物料颗粒  $k_1$ 、 $k_2$  的位置

在混合 I 区通过改变混合叶板角度可以改变混合叶板对物料的横向推送能力, 且随着混合叶板角度的增加横向推送能力逐渐增大, 使混合 I 区内物料的对流混合更加剧烈, 但在其他影响因素不变的情况下, 当混合叶板角度增加过大时, 混合叶板对物料的纵向作用强度减弱较大, 进而影响物料在混合 I 区内的总体对流运动。具体混合叶板角度对物料混合均匀度的影响见试验验证。

图 4 是混合 I 区内物料的混合情况, 照片时间间隔为 0.034 s。  $k_1$  和  $k_2$  是挤压物料层中 2 个标记点, 其中  $k_1$  相对于  $k_2$  离轴较远, 由高速摄像软件算

出  $k_1$  颗粒的平均速度为  $0.54 \text{ m/s}$ ,  $k_2$  颗粒的平均速度为  $-0.17 \text{ m/s}$ , 从 2 个颗粒所在的物料层的层动速度可以看出在挤压物料层内物料层间存在速度差, 即存在剪切混合, 从图 4 可以看出混合 II 区内下落的物料对挤压物料层有冲击, 且使部分挤压物料层破裂,  $k_2$  颗粒的平均速度为负值, 说明其对挤压物料层动速度影响较大, 甚至会改变部分物料的速度方向。

## 2.2 物料在混合 II 区的混合过程

在进入混合 II 区时, 由于混合机内壁由下机体安装的直板所折成的弧形线形底板变成了上机体的直线板结构, 混合叶板与混合机内壁的间隙突然变大, 此时, 混合叶板拖动的外层物料由于受离心力作用沿机体内壁被抛起, 并在重力作用下回落且融入到转子带动的物料流中, 因此在转子与上机体内壁间形成一个涡流区, 涡流区下落的物料与混合 I 区沿内壁上升的物料形成较强的对流混合, 并且转速越高则对流运动越强烈 (如图 2 混合 II 区混合机内壁处做涡流回流的黑色箭头所示)。涡流区存在于上下机体交汇处区域, 涡流运动加剧了混合室内物料的变位混合强度。

在混合 II 区, 随着混合叶板转动,  $\beta$  角的变化范围为  $(0, 90^\circ)$ , 混合叶板  $B$  上物料单元的受力分析如图 3 所示。当转子转速不高时, 即离心力  $F_c$  较小, 此时其竖直方向受力分析公式为

$$G + F_R \cos \beta - F \cos \beta - F_c \sin \beta + fF \sin 45^\circ \cos(45^\circ - \beta) \geq 0 \quad (2)$$

式中  $f$ ——物料与混合叶板之间的摩擦因数

此时, 物料所受的重力逐渐起主导作用, 直到  $\beta \geq 45^\circ$  时, 重力所起作用最大, 在竖直方向上物料所受的重力  $G$  和反作用力  $F_R$  的分力之和要大于物料所受的离心力  $F_c$  的分力、作用力  $F$  和摩擦力的分力之和, 物料会被混合叶板向前下方抛撒。设混合叶板对物料水平向前推送力为  $F_1$ , 则  $F_1 = F \sin \beta$ , 且  $F_1$  随  $\beta$  的增大而增大, 所以当  $\beta$  在  $0 \sim 45^\circ$  范围内, 随  $\beta$  的增大抛撒作用逐渐增强, 此时挤压物料层完全破裂, 散落的物料与被混合叶板  $B$  抛撒的物料形成剪切、扩散混合 (图 2 中  $B_2$  和  $B_3$  区域); 混合叶板  $B$  抛撒的物料一部分穿过混合 II 区落到混合 I 区, 在此过程中与混合 II 区和 I 区交界处的无底锹托起的物料团及混合 I 区内上升的物料形成强烈的对流混合 (图 2 中混合 II 区向下运动的绿色箭头在  $B_1$  区域); 还有一部分物料向混合 III 区方向运动, 与介于混合 II 区和 III 区交界处的无底锹托起的物料团相撞, 形成对流混合 (图 2 中混合 II 区上部  $B_1$  区域), 促进此处物料团的加速破裂, 散开的物料团以竖直方向轴

的垂直面为分界线向两侧做向下的瀑布运动。物料团上处于混合 II 区内的物料落向混合 I 区, 下落过程中与混合 II 区下落的其他物料形成剪切、扩散混合 (图 2 中处于混合 II 区向下滑落的黑色箭头在  $B_2$  和  $B_3$  区域), 与介于混合 I 区和 II 区交界处无底锹托起的物料团及混合 I 区上升的物料形成强烈的对流混合 (图 2 中处于混合 II 区向下滑落的黑色箭头在  $B_1$  区域)。当  $\beta \geq 45^\circ$  时, 混合叶板与物料开始逐渐分离。

图 5 显示了图 2 混合 II 区内, 混合叶板在  $B$  位置附近抛撒的物料与无底锹托起的物料团冲撞的过程, 照片时间间隔为  $0.083 \text{ s}$ 。图 5 中  $e$  表示混合叶板上抛撒的物料,  $f$  表示无底锹托起的物料团,  $g$  表示无底锹托起的物料团开始破裂,  $h$  表示无底锹托起的物料团完全破裂,  $i$  表示下一个无底锹托起的物料团。从图 5 中可以看出, 在混合 II 区内混合叶板抛撒的物料中一部分物料与介于混合 II 区和混合 III 区交界处的无底锹托起的物料团相撞, 形成对流混合, 促进了此处无底锹托起物料团的加速破裂。

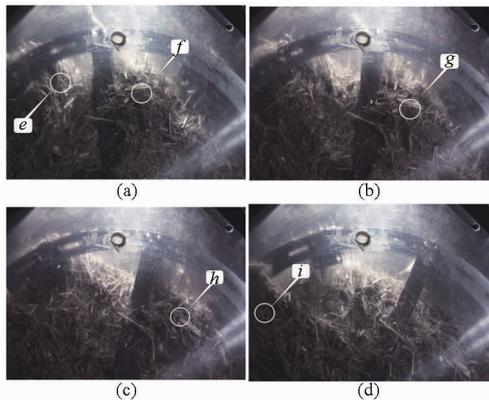


图 5 混合 II 区内混合叶板抛撒的物料与无底锹托起的物料团冲撞过程高速摄像图像

Fig. 5 High-speed camera images of process of collision between material tossed from mixing paddle and material group picked up by bottomless shovel in district II

- (a) 混合叶板上抛撒的物料与无底锹托起的物料团相撞  
 (b)  $0.083 \text{ s}$  后无底锹托起的物料团开始破裂  
 (c)  $0.166 \text{ s}$  后无底锹托起的物料团完全破裂  
 (d)  $0.249 \text{ s}$  后物料与混合叶板完全脱离

当转子转速较高时, 由公式  $F_c = m \frac{v^2}{r}$  可知物料

所受的离心力较大, 其竖直方向受力分析公式为

$$F_c \sin \beta + F \cos \beta - G - F_R \cos \beta - fF \sin 45^\circ \cos(45^\circ - \beta) \geq 0 \quad (3)$$

此时, 在竖直方向上物料所受离心力  $F_c$  和作用力  $F$  的分力之和要大于物料的重力  $G$ 、反作用力  $F_R$  和摩擦力的分力之和, 物料会被混合叶板  $B$  向前上方抛撒。由上述可知, 混合叶板对物料水平向前

推送力  $F_1$  随  $\beta$  的增大而增大, 所以当  $\beta$  在  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围内, 随  $\beta$  的增大抛撒作用逐渐增强; 混合叶板运动到  $\beta \geq 45^\circ$  区域时, 随  $\beta$  的增大物料逐渐脱离混合叶板被向前上方抛起, 被抛起的物料会与混合机上机体发生碰撞, 然后被反弹下落与混合 III 区内其他下落的物料产生扩散、剪切混合 (图 2 中粉色箭头在  $C_2$  和  $C_3$  区域)。

另外混合叶板角度使其对物料产生横向推送作用, 使混合 II 区物料在下落的同时还有横向运动的趋势, 进而促进混合 II 区内交叉渗透混合, 同时会影响混合 II 区内物料落向混合 I 区的方位, 由于相邻混合叶板推送物料的方向相反, 所以促进了物料的变位混合。

图 6 是在混合机顶部观察物料在混合 II 区混合叶板  $B$  上被推送的轨迹, 照片时间间隔为  $0.017\text{ s}$ 。图中  $q$  为混合叶板。从图 6a、6b 看出, 此位置物料被混合叶板向左前方推送。以图 6 中物料颗粒  $p$  作为标记测得横向平均速度  $v_x = 0.248\text{ m/s}$ , 绘制出物料颗粒  $p$  被混合叶板推送的轨迹曲线, 并由此拟合出曲线方程 (图 7), 由拟合方程可以看出, 当混合叶板按图 6 所示角度安装时 (混合叶板安装角度为  $16^\circ$ ), 有向左前方推送物料趋势, 且当物料颗粒  $p$  向前运动  $78\text{ mm}$  时, 被向左推送  $10\text{ mm}$ , 由测得  $v_x$  值表明运动趋势较明显。由本研究设计可知下一个混合叶板角度反向, 则下一个混合叶板运动到此位置时将物料向右前方推送, 因而混合过程中在混合室内三维空间内可形成对流混合, 且随着混合叶板角度的增大, 横向作用强度增大, 使得物料在混合室三维空间内变位渗透混合加剧。

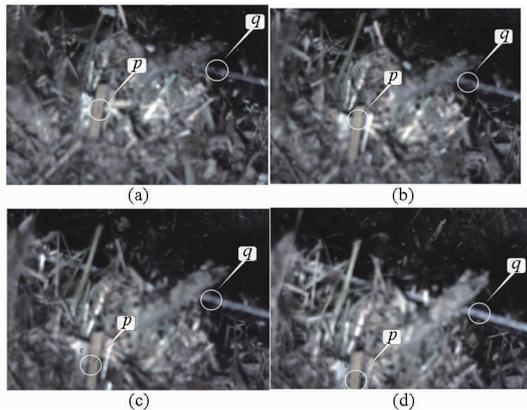


图 6 在混合 II 区和混合 III 区中间部位物料颗粒  $p$  被混合叶板  $B$  推送轨迹

Fig. 6 Trajectory of material particles  $p$  propelled by the mixing plddle  $B$  in the middle of districts II and III

- (a) 物料颗粒  $p$  被混合叶板向左前方推送
- (b)  $0.017\text{ s}$  后物料颗粒  $p$  的位置
- (c)  $0.034\text{ s}$  后物料颗粒  $p$  的位置
- (d)  $0.051\text{ s}$  后物料颗粒  $p$  的位置

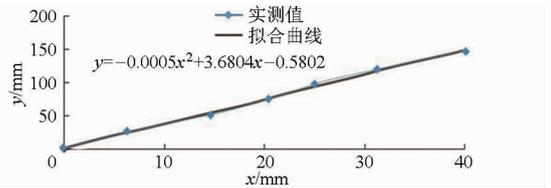


图 7 物料颗粒  $p$  被混合叶板  $B$  横向推送的轨迹曲线

Fig. 7 Trajectory curve of material particles  $p$  laterally propelled by mixing plddle  $B$

### 2.3 物料在混合 III 区的混合过程

在混合 III 区, 当转速较低时, 由公式  $F_c = m \frac{v^2}{r}$  可知物料所受离心力较小, 同时由于物料的重力作用, 混合叶板还未进入混合 III 区时, 物料与混合叶板几乎完全脱离, 当混合叶板进入混合 III 区时下方基本没有物料, 所以此时在混合 III 区混合叶板对物料的作用较小; 根据预试验可知, 当转子转速超过  $15\text{ r/min}$  时, 才会有部分物料跟随混合叶板进入混合 III 区, 此时混合叶板  $C$  下方的物料在自身的重力和混合叶板  $C$  的作用下 (图 3) 加速向下运动, 与物料团破碎后瀑布下落物料在混合 III 区形成剪切、扩散混合 (图 2 中  $C_2$  和  $C_3$  区域), 同时物料团破碎后瀑布下落的物料之间由于所处的位置不同, 下落时会产生速度差, 进而产生剪切混合 (图 2 中  $C_2$  区域)。由上述分析可知, 混合叶板下方物料相对较少且运动速度较快, 所以混合叶板角度对其影响很小。

图 8 是混合 III 区内物料的运动情况, 照片时间间隔为  $0.034\text{ s}$ 。图 8 中  $i$  表示物料团下落的物料,  $m$  表示混合叶板,  $n$  表示混合叶板下方物料。从图 8 可以看出转速在  $20\text{ r/min}$  时有一小部分物料跟随混

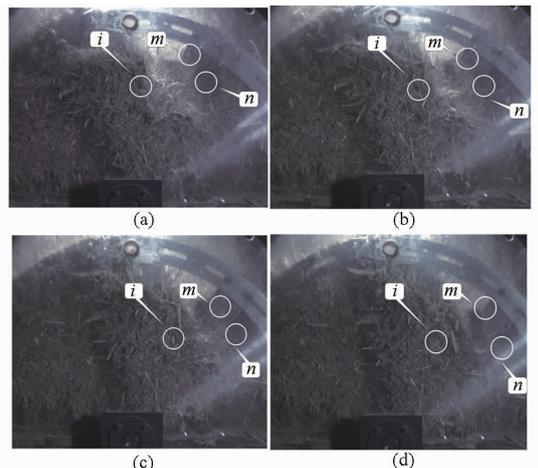


图 8 混合 III 区内物料的运动情况

Fig. 8 Movement of material in mixing district III

- (a) 混合 III 区内物料所处的某位置
- (b)  $0.034\text{ s}$  后混合 III 区内物料所处的位置
- (c)  $0.068\text{ s}$  后混合 III 区内物料所处的位置
- (d)  $0.102\text{ s}$  后混合 III 区内物料所处的位置

合叶板转动,混合Ⅲ区混合叶板下方的物料与无底锹散落的物料随着转子的转动交叉融合在一起,形成剪切、扩散混合。

## 2.4 物料在混合Ⅳ区的混合过程

在混合Ⅳ区,随着混合叶板转动, $\beta$ 角的变化范围为 $(0,90^\circ)$ 。混合过程中受混合叶板推动的物料沿竖直方向受力满足

$$G + F_c \sin\beta + F \cos\beta - F_R \cos\beta - fF \sin 45^\circ \cos(45^\circ - \beta) \geq 0 \quad (4)$$

在竖直方向上物料所受的重力  $G$  和离心力  $F_c$ 、作用力  $F$  的分力之和要大于物料的反作用力  $F_R$  和摩擦力的分力之和,物料跟随混合叶板  $D$  运动的同时还有向下运动趋势,使混合叶板所推动的物料之间发生层动产生剪切混合。根据  $F_c = m \frac{v^2}{r}$  可知,随着转速增大离心力增大,由式(4)可知,物料向下运动趋势显著。当  $\beta \geq 45^\circ$  时,物料开始在混合叶板上跟随其转动,此时随着  $\beta$  的增大,物料向下运动趋势逐渐减小。由于混合叶板推动的物料运动速度快,而混合Ⅳ区上部物料运动慢,使两者之间存在速度差而发生层动,形成剪切混合(图2中  $D_2$  区域)。同时混合Ⅲ区瀑布下落物料流的内侧物料与混合叶板  $D$  推动的物料相撞形成对流(图2中  $D_1$  区域)。

由于受混合叶板角度的影响,混合叶板  $D$  推动的物料除了向前下方运动外还有横向运动趋势,物料的横向运动加强了与混合Ⅲ区下落物料的对流混合。

混合Ⅲ区瀑布下落的物料流外侧的物料及混合叶板下方的物料共同进入混合Ⅳ区并被混合叶板推动沿混合机底板转动,同时瀑布下落的物料流内侧物料下落到混合Ⅳ区并插入到混合Ⅳ区物料中。图9是混合Ⅲ区内瀑布物料流内侧物料插入混合Ⅳ区物料的情况,照片时间间隔为0.034 s。从图9可以看出混合Ⅲ区插入混合Ⅳ区的物料流穿透力很强,物料流连续,且几乎贯穿混合Ⅳ区,与混合Ⅳ区内的物料形成强烈的对流混合。图中圆圈表示混合Ⅲ区进入混合Ⅳ区的物料流。

综合混合过程分析,挤压物料层和无底锹托起的物料团在混合室内会产生随转子团转现象,但在转子转速和混合叶板角度满足一定条件时,物料团会产生破坏,进而在混合室内形成不同程度、不同类型的物料混合方式,其中转子转速对物料在混合室内各个区的不同位置产生的混合方式和运动强度影响最大;总体上物料在混合室每个区的主要混合方式为:在混合Ⅰ区主要是剪切、对流混

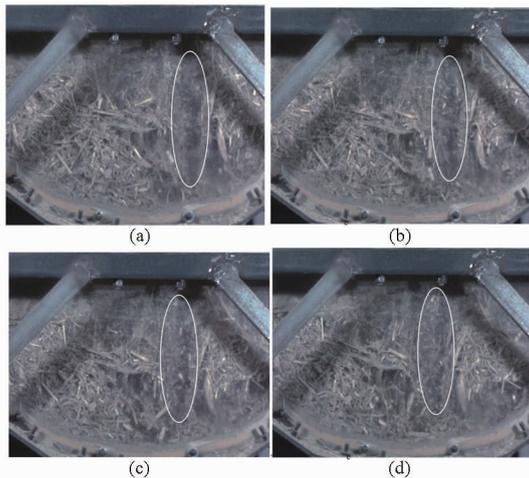


图9 混合Ⅲ区进入混合Ⅳ区的物料流位置图

Fig.9 Material flow from district III into district IV

(a) 混合Ⅲ区进入混合Ⅳ区的物料流位置

(b) 0.034 s后混合Ⅲ区进入混合Ⅳ区的物料流位置

(c) 0.068 s后混合Ⅲ区进入混合Ⅳ区的物料流位置

(d) 0.102 s后混合Ⅲ区进入混合Ⅳ区的物料流位置

合,在混合Ⅱ区主要是剪切、对流、扩散混合,在混合Ⅲ区主要是剪切、扩散混合,在混合Ⅳ区主要是剪切、对流混合。

## 2.5 混合时间及充满系数对物料混合的影响

由混合过程分析可知,物料在混合室不同区域内的主要混合方式和混合强度不同,随着混合时间的增加,不同成分物料之间发生融合渗透,使物料在混合室内逐渐达到均布状态,但物料在混合均匀后,若混合时间继续增加,由于全混合日粮物料间物理特性的差异,均布后的物料则会出现离析和分级现象。随混合机充满系数的增加,在其各个混合区域内同时参与各种混合运动的物料增多,增大了混合室内物料间相互融合渗透的机会,同时,混合过程中挤压物料层和无底锹托起的物料团被打破后产生的剪切和对流混合更强烈,使混合室内变位渗透混合加剧,但当混合机充满系数过大时,混合过程中大部分物料始终跟随混合叶板团转,整个混合室内物料间相对运动减少,物料间剪切、对流及扩散混合减弱。具体混合时间及充满系数对物料混合均匀度的影响见试验验证。

综上所述,转子转速、混合叶板角度、混合时间和充满系数对该机混合质量有较大的影响。

## 3 试验

### 3.1 试验方案

通过上述机理分析,确定影响该机混合质量的主要结构与运行参数——转子转速  $n$  (r/min)、混合叶板角度  $\alpha$  ( $^\circ$ )、充满系数  $\rho$  (%) 及混合时间  $T$

(min) 为试验因素,以变异系数  $C_v$  (%) 为考核指标,本文对该机进行试验研究,以揭示各因素的影响规律并优化其主要参数。

根据预试验及实际工程中混合机相关参数取值,最后确定本试验中各因素取值范围为:转子转速 10 ~ 50 r/min、混合叶板角度  $0^\circ \sim 32^\circ$ 、混合时间 4 ~ 16 min、充满系数 30% ~ 70%。本试验采用二次旋转正交组合试验设计方法,进行 4 因素 5 水平试验,各试验因素水平编码如表 1 所示。

表 1 混合试验因素水平编码

Tab.1 Experimental factors and levels

编码	转子转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	混合时间 $T/\min$	充满系数 $\rho/\%$	混合叶板角度 $\alpha/(\circ)$
-2	10	4	30	0
-1	20	7	40	8
0	30	10	50	16
1	40	13	60	24
2	50	16	70	32

### 3.2 混合质量评价指标

本文选用变异系数作为混合质量评价指标,根据已有资料<sup>[15-22]</sup>,全混合日粮变异系数小于 10% 时混合质量好,变异系数大于 10% 且小于 20% 时混合质量可以接受,但需要改进。每次试验按四分法取 10 个样品,每个样品 100 g,通过化学分析确定其氯离子含量来计算变异系数。变异系数的计算公式为

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $S$ ——混合物样品中氯离子含量的标准差  
 $\bar{X}$ ——混合物样品中氯离子含量的平均值

### 3.3 试验结果

转轮式 TMR 混合机试验结果见表 2,表中 A、B、C 和 D 分别为转子转速、混合时间、充满系数和混合叶板角度等试验因素对应的编码值。应用 Design Expert 软件分别获得混合均匀度变异系数的回归模型及其方差分析,分别如式(6)与表 3 所示。

$$C_v = 4.17 - 0.73A - 0.7B - 0.67C - 0.56D + 0.55AB + 0.003AC - 0.02AD + 0.52BC + 0.47BD - 0.04CD + 0.97A^2 + 0.87B^2 + 0.55C^2 + 0.66D^2 \quad (6)$$

由表 3 的试验方差分析可知,模型显著且适合。由 Design Expert 软件还可看出其模型决定系数分别为  $R^2 = 0.985$ ,进一步说明模型拟合程度较好,试验误差小。混合均匀度的方差分析中,A、B、C、D、AB、BC、BD、 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  项有极显著影响;其他项对混合均匀度的影响不显著。

表 2 混合试验方案与结果

Tab.2 Experimental plan and results

序号	转子转速	混合时间	充满系数	混合叶板	变异系数 $C_v/\%$
	A	B	C	角度 D	
1	-1	-1	-1	-1	11.35
2	1	-1	-1	-1	8.83
3	-1	1	-1	-1	6.87
4	1	1	-1	-1	6.55
5	-1	-1	1	-1	9.05
6	1	-1	1	-1	6.53
7	-1	1	1	-1	6.65
8	1	1	1	-1	6.33
9	-1	-1	-1	1	9.41
10	1	-1	-1	1	6.81
11	-1	1	-1	1	6.81
12	1	1	-1	1	6.41
13	-1	-1	1	1	6.95
14	1	-1	1	1	4.35
15	-1	1	1	1	6.43
16	1	1	1	1	6.03
17	-2	0	0	0	9.50
18	2	0	0	0	6.58
19	0	-2	0	0	9.04
20	0	2	0	0	6.24
21	0	0	-2	0	7.70
22	0	0	2	0	5.02
23	0	0	0	-2	7.92
24	0	0	0	2	5.68
25	0	0	0	0	4.78
26	0	0	0	0	4.07
27	0	0	0	0	4.04
28	0	0	0	0	4.30
29	0	0	0	0	3.56
30	0	0	0	0	4.60
31	0	0	0	0	4.48
32	0	0	0	0	3.85
33	0	0	0	0	4.78
34	0	0	0	0	4.02
35	0	0	0	0	4.12
36	0	0	0	0	3.50

表 3 变异系数回归模型的方差分析

Tab.3 ANOVA on regression equation model

项目	均方	F 值	P 值	显著性
模型	9.49	98.756 49	< 0.000 1	**
A	12.79	133.152 3	< 0.000 1	**
B	11.76	122.433 2	< 0.000 1	**
C	10.77	112.163 8	< 0.000 1	**
D	7.53	78.357 25	< 0.000 1	**
AB	4.84	50.389 17	< 0.000 1	**
AC	$1.440 \times 10^{-4}$	0.001 499	0.969 5	
AD	$6.400 \times 10^{-3}$	0.066 63	0.798 8	
BC	4.33	45.042 09	< 0.000 1	**
BD	3.53	36.796 59	< 0.000 1	**
CD	0.026	0.266 521	0.611 1	
$A^2$	29.88	311.043 3	< 0.000 1	**
$B^2$	24.01	249.993 3	< 0.000 1	**
$C^2$	9.55	99.408 78	< 0.000 1	**
$D^2$	13.78	143.476 4	< 0.000 1	**

### 3.4 试验结果分析

#### 3.4.1 单因素影响规律分析

单因素对变异系数的影响规律见图 10。由图 10 可知,当单个因素分别作用时,随着转子转速、混合时间、充满系数和混合叶板角度的增加,变异系数呈先迅速下降后趋于上升变化。这是因为当转子转速取值较低时,随着转子转速的增加,挤压物料层内物料间剪切运动增强,同时在混合 II 区内物料被向前抛撒的速度增大,进而对介于混合 II 区和 III 区交界处无底铲托起的物料团冲击大,使剪切运动及下落物料的对流和扩散运动增强,因而,变异系数下降;随着转子转速的继续增加,混合叶板对物料的推送作用增强,同时物料所受的离心力增大,使得物料在混合室内做抛撒运动,不同组分的物料易出现离析和分级,变异系数上升。在混合时间较少时,随着混合时间的增加,物料在混合室内能够充分进行对流、剪切和扩散混合,有利于物料间的均布过程;随着混合时间的继续增加,由于物料间物理特性差异大,均布后的物料易出现离析和分级,变异系数上升。当充满系数取值较低时,随着充满系数的增加,使挤压物料层和无底铲托起的物料团被打破后产生的剪切混合和对流混合更强烈,使混合室内变位渗透混合加剧,同时物料之间相互接触的机会增多,有利于物料各组分之间的相互融合渗透,变异系数下降;随着充满系数的较大增加,在整个混合室内物料间相对运动减少,在混合过程中物料大部分始终跟随混合叶板团转,物料之间对流、扩散运动强度减弱,使得变异系数上升。在混合叶板角度取低水平时,随着混合叶板角度的增加,混合叶板对物料的横向(沿着轴向)作用增大,增强了混合叶板对物料的横向推送能力,进而加剧了物料在混合室三维空间内的对流运动,变异系数下降;当混合叶板角度增加较大时,混合叶板对物料的纵向(混合叶板的线速度方向)作用强度减弱较大,使混合室内总的剪切、对流(各个区内)和扩散运动减弱,变异系数上升。

#### 3.4.2 双因素影响规律分析

双因素对变异系数的影响规律见图 11。由图 11 可看出,各因素交互作用对变异系数的影响规

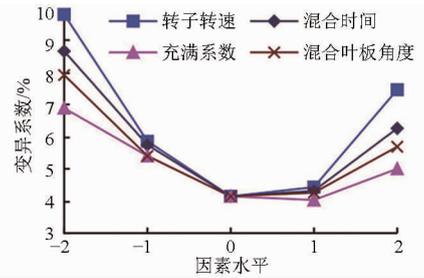


图 10 各因素对变异系数的影响

Fig. 10 Effect of each factor on variation coefficient

律与单因素的分析结果一致,在试验参数范围内转子转速、混合时间、充满系数及混合叶板角度对变异系数的影响均较显著,但相对而言,充满系数稍弱,因此,本文重点对转子转速与混合时间、转子转速与混合叶板角度以及混合时间与混合叶板角度对变异系数的影响规律进行分析。

由图 11a 可知,当混合叶板角度和充满系数固定在零水平时,转子转速和混合时间对变异系数的影响呈凹曲面变化。当转子转速和混合时间都从低水平开始增加时,混合叶板对物料的作用强度增大,混合室内物料间经过充分的剪切、对流和扩散运动,变异系数下降;随着转子转速和混合时间的继续增大,混合叶板对物料的抛撒作用增强,对物料经过长时间抛撒作用后,会使物料间产生离析和分级,变异系数曲线呈上升趋势。转子转速和混合时间都取零水平附近值时,变异系数最小。

由图 11b 可知,当充满系数和混合时间固定在零水平时,转子转速和混合叶板角度对变异系数的影响呈凹曲面变化。当转子转速和混合叶板角度都从低水平开始增加时,增强了混合叶板对物料的作用强度和对物料的横向推送能力,加剧了物料在混合室三维空间内的立体混合,变异系数曲线迅速下降。当转子转速和混合叶板角度都取高水平时,混合叶板对物料的抛撒作用增强,同时混合叶板对物料的纵向作用强度减弱较大,使物料经过充分混合后易于分离,变异系数曲线呈上升趋势。转子转速和混合叶板角度都取零水平附近值时,变异系数最小。

由图 11c 可知,当转子转速和充满系数固定在

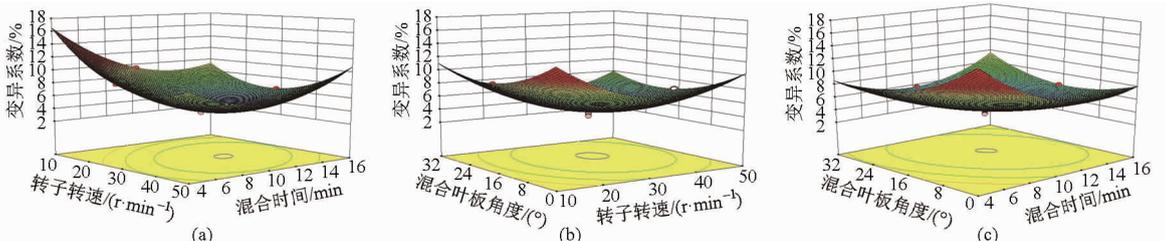


图 11 变异系数的响应曲面

Fig. 11 Response surface of variation coefficient

零水平时,混合叶板角度和混合时间对变异系数的影响呈凹曲面变化。当混合叶板角度和混合时间都从低水平开始增加时,随着混合叶板角度的增大,增强了混合叶板对物料的横向推送能力,增大了混合室三维空间内物料间的对流强度,物料经过一段时间的均布过程变异系数曲线呈下降趋势;随着混合叶板角度和混合时间继续增大,物料混合一段时间后,均布后的物料易于产生分离或分级,变异系数曲线呈上升趋势。混合叶板角度和混合时间都取零水平附近值时,变异系数最小。

### 3.4.3 频数分析

采用频数分析法对试验结果进行优化,确定满足变异系数的因素取值范围。在 $[-2, 2]$ 范围,平均分为5个步长时,总计有 $5^4 = 625$ 个组合方案,可求得变异系数( $0 < y < 10\%$ )出现的方案为324个(表4)。

综合考虑各因素,其参数取值范围为:转子转速 $29 \sim 31$  r/min,混合叶板角度 $16^\circ \sim 26^\circ$ ,混合时间 $10 \sim 12$  min,充满系数 $48\% \sim 53\%$ 。

## 4 结论

(1)通过机理分析与试验研究可知,混合过程

表4 变异系数频数分析

Tab.4 Analysis of variation frequency

编码	转子转速		混合时间		充满系数		混合叶板角度	
	次数	频率 /%	次数	频率 /%	次数	频率 /%	次数	频率 /%
-2	17	5	31	10	33	10	34	10
-1	73	23	65	20	67	21	70	22
0	95	29	84	26	83	26	83	26
1	91	28	91	28	81	25	81	25
2	48	15	53	16	60	18	56	17
平均编码	0.4		0.49		0.35		0.44	
区间范围	[-0.1,0.91]		[0.08,0.89]		[-0.2,0.9]		[0.03,0.85]	
95%置信区间	[29,39]		[10,13]		[48,59]		[16,23]	

中物料在混合室的不同区域会形成以剪切、对流与扩散等相互组成不同组合的混合方式,并且混合过程伴有物料的涡流运动、滑移运动和瀑布运动。

(2)转轮式 TMR 混合机参数优化后的取值范围为:转子转速 $29 \sim 31$  r/min,混合叶板角度 $16^\circ \sim 26^\circ$ ,混合时间 $10 \sim 12$  min,充满系数 $48\% \sim 53\%$ ,此时变异系数小于 $10\%$ 。各因素对变异系数影响程度顺序为:转子转速、混合时间、混合叶板角度、充满系数。

## 参 考 文 献

- 1 范占栋,王光文. 奶牛全混合日粮的应用[J]. 当代畜牧饲养管理,2000(6):21-22.
- 2 Nocet J E. Purance of dairy cows feed forage and grains separately versus a total mixed ration [J]. Journal of Dairy Science, 1986,69(8):2140-2147.
- 3 刘雷. 奶牛全混合日粮技术要点[J]. 新农业,2009(6):18-19.
- 4 郭冬生,彭小兰. 不同精粗比全混合日粮对奶牛产奶性能和牛奶品质的影响[J]. 西南农业学报,2011,24(1):297-300. Guo Dongsheng, Peng Xiaolan. Effects of different ratio of concentrate and roughage in total mixed ration on milk yield and quality in dairy cows[J]. Southwest China Journal of Agricultural Science, 2011,24(1):297-300. (in Chinese)
- 5 高振江,李辉,蒙贺伟. 基于全混合日粮饲喂技术的精饲料精确饲喂模式[J]. 农业工程学报,2013,29(7):148-154. Gao Zhenjiang, Li Hui, Meng Hewei. Study on concentrated precise feeding pattern based on feeding technology of TMR[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(7):148-154. (in Chinese)
- 6 Caplis J, Keane M G, Moloney A P, et al. Effects of supplementary concentrate level with grass silage, and separate or total mixed ration feeding, on performance and carcass traits of finishing steers[J]. Irish Journal of Agricultural and Food Research, 2005, 44(1):27-43.
- 7 Keane M G, Drennan M J, Moloney A P. Comparison of supplementary concentrate levels with grass silage, separate or total mixed ration feeding, and duration of finishing in beef steers[J]. Livestock Science, 2006,103(1):169-180.
- 8 Mäntysaari P, Khalili H, Sariola J. Effect of feeding frequency of a total mixed ration on the performance of high-yielding dairy cows [J]. Journal of Dairy Science, 2006,89(11):4312-4320.
- 9 Miller-Cushon E K, DeVries T J. Effect of dietary dry matter concentration on the sorting behavior of lactating dairy cows fed a total mixed ration[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(7):3292-3298.
- 10 Felton C A, DeVries T J. Effect of water addition to a total mixed ration on feed temperature, feed intake, sorting behavior, and milk production of dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2010,93(6):2651-2660.
- 11 王德福,蒋亦元. 双轴卧式全混合日粮混合机的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):85-88. Wang Defu, Jiang Yiyuan. Experimental study on the twin-shaft horizontal total mixed ration mixer[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(4):85-88. (in Chinese)
- 12 王德福. 双轴卧式全混合日粮混合机的混合机理分析[J]. 农业机械学报,2006,37(8):178-182. Wang Defu. Analysis of mixing principle on twin-shaft horizontal total mixed ration mixer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(8):178-182. (in Chinese)

- Conservation, 1987, 7(1): 38-44. (in Chinese)
- 19 白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 62-65.  
Bai Qingjun, Ma Shusheng. Mechanism of flow drop pit forming during process of rill erosion over slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(6): 62-65. (in Chinese)
- 20 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.  
Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232-237. (in Chinese)
- 21 Øygarden L. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway [J]. CATENA, 2003, 50(2-4): 217-242.
- 22 Di Stefano C, Ferro V. Measurements of rill and gully erosion in Sicily [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(14): 2221-2227.
- 23 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. 水土保持通报, 1989, 9(4): 41-45, 49.  
Zheng Fenli. A research on method of measuring rill erosion amount [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(4): 41-45, 49. (in Chinese)
- 24 Bewket W, Sterk G. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 97(1-3): 81-93.
- 25 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1): 36-48.  
Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Rill erosion developing and its control on steep slope land of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987, 1(1): 36-48. (in Chinese)
- 26 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1996: 59.
- 27 吴永红, 王愿昌, 刘斌, 等. 黄土坡面的土壤侵蚀波动性[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 28-31.  
Wu Yonghong, Wang Yuanchang, Liu Bin, et al. Soil erosion fluctuations of loess slope [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 28-31. (in Chinese)
- 28 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含沙量的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-78.  
Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 73-78. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 117 页)

- 13 刘希锋, 徐冬, 谭海林. 全混合日粮(TMR)搅拌机的种类与应用[J]. 农机化研究, 2006(2): 126-127.
- 14 何延东, 王宇, 高连兴. 饲料混合机的混合机理及工作性能的评定[J]. 农机化研究, 2006(2): 64-66.
- 15 Bargo F, Muller L D, Delahoy J E, et al. Performance of high producing dairy cows with three different feeding systems combining pasture and total mixed rations [J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(11): 2948-2963.
- 16 Schroeder G F, Delahoy J E, Vidaurreta I, et al. Milk fatty acid composition of cows fed a total mixed ration or pasture plus concentrates replacing corn with fat [J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(10): 3237-3248.
- 17 任广跃, 王红英, 于庆龙, 等. 翻转卸料双轴桨叶饲料混合机工作性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 132-135.  
Ren Guangyue, Wang Hongying, Yu Qinglong, et al. Experimental study on mixing performance of the twin-shaft paddle rotating mixer [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 132-135. (in Chinese)
- 18 王德福, 张全国. 全混合日粮混合质量评价指标试验方法的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 126-129.  
Wang Defu, Zhang Quanguo. Experimental methods for evaluating indexes of processing quality of total mixed ration [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 126-129. (in Chinese)
- 19 王德福, 王吉权. 单卧轴全混日粮混合机的试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 205-207.
- 20 马云海, 荣宝军, 佟金, 等. 双旋转卧式滚筒粉料混合造粒机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 123-126.  
Ma Yunhai, Rong Baojun, Tong Jin, et al. Design and test of horizontal double-rotary mixer granulator [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 123-126. (in Chinese)
- 21 刘江涛, 张志杰. 单轴卧式全混日粮混合机加工性能试验研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(7): 218-222.  
Liu Jiangtao, Zhang Zhijie. Study on characteristics of the single-shaft horizontal total mixed ration mixer [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(7): 218-222. (in Chinese)
- 22 杨明金, 李锡文, 史铁林, 等. 高黏度流体混合机混合均匀度试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 137-142.  
Yang Mingjin, Li Xiwen, Shi Tielin, et al. Mixture homogeneity in a high-viscous flow mixer [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 137-142. (in Chinese)