

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.10.020

黑火药圆筒混合机的设计原理与参数影响

孙彬, 孙勇飞, 徐诚

(南京理工大学机械工程学院, 南京, 210094)

摘要: 为了能够安全高效生产黑火药, 在阐述黑火药制备过程的基础上, 提出一种圆筒混合机制备黑火药方案。建立药剂受力模型和运动计算模型, 分析药剂在滚筒不同转速下的受力情况与运动规律, 得到了药剂的运动方程和落点速度, 并采用安全性监测系统进行远程监控。结果表明: 该方案能实现对烟火药的粉碎与混合操作, 以及人机隔离和无人化生产, 达到了预期的设计要求。

关键词: 圆筒混合机; 黑火药; 抛射运动; 人机隔离

中图分类号: TJ410.5 **文献标志码:** B

Design Theory of Black Powder Drum Mixer and Effects of Parameters

Sun Bin, Sun Yongfei, Xu Cheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to produce black powder safely and efficient, the process of preparation and production of black powder was described. A preparation project of black powder using drum mixer was proposed, and crushing and mixing black powder were achieved. The forced model and movement model were established, the forced feature and movement method of black powder in drum mixer which was under different rolling speeds analyzed, equations of motion and placement speed obtained, and safety monitoring system was adopted to monitor remotely. Man-machine isolation and unmanned production were realized, and the desired design requirement was achieved.

Keywords: drum mixer; black powder; projectile motion; man-machine isolation

0 引言

烟花爆竹在中国已有一千多年的悠久历史, 是民间常用的喜庆娱乐用品。黑火药是硝酸钾、硫磺和木炭组成的混合物, 是烟花爆竹的重要组成部分之一。黑火药的生产历来采用人工手锤碎片、混合、倒料的生产工艺, 不仅劳动强度大、车间占地面积大、生产效率低、生产成本低, 而且极易发生因劳动人员操作疏忽而造成的爆炸事故。近年来, 黑火药的生产设备虽有所改进和更新, 但使用传统工艺, 不仅日生产量和产品质量一直上不去, 还经常引发车间爆炸事故, 现有生产工艺和设备已满足不了规模化生产的需求。因此, 笔者对市场上较少见到集原料粉碎、混合为一体的多功能黑火药混合机进行研究。

1 圆筒混合机自动工作原理

1.1 结构与工作原理

圆筒混合机主要由木质滚筒、机罩、驱动装置、接料小车组成, 驱动装置的主轴穿过木质滚筒驱动木质滚筒旋转, 机罩罩在木质滚筒外部对木质滚筒

进行支撑和保护隔离, 机罩的下方为接料小车。木质滚筒、机罩和接料小车放置在同一个车间, 驱动装置放置在另一个车间中。具体结构如图 1。

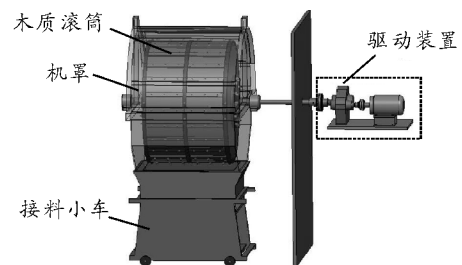


图 1 圆筒混合机的三维结构图

将检验合格、质量适当的木球与黑火药原料倒入木质滚筒中, 用密封盖盖住滚筒的装料口, 用木扳手将其固定。圆筒混合机的木质滚筒经由减速器与电动机相连。驱动装置启动后, 黑火药药剂在摩擦力的作用下, 随着筒体旋转方向向上运动, 当提升到一定高度后, 药剂由于自身的重力作用又落下来。药剂是在随着筒体的旋转而反复提升和下落的过程中粉碎、混合均匀的。达到混合时间后, 用铜扳手将滚桶密封盖卸下换上网盖, 然后将混合完成的黑火药倒入接料小车的布袋中。

收稿日期: 2011-05-04; 修回日期: 2011-06-15

基金项目: 国家科技支撑项目“烟花爆竹生产工艺安全技术研究与工程示范”(2008BAK40B02)

作者简介: 孙彬(1985—), 男, 山东人, 硕士, 从事机械设计与仿真技术研究。

1.2 圆筒混合机的人机隔离方案

因为黑火药的摩擦、撞击、静电感度较高, 因此与药剂直接接触的滚筒采用木质骨架, 内部嵌满牛皮。即使是金属材质的传动主轴, 外部也包有牛皮。出料口盖其内部与药剂接触部分使用木质盖衬, 外裹牛皮。与药剂直接接触的各部分均采用绝缘材料, 可有效防止烟花药剂在粉碎混合过程中的静电影响, 杜绝任何隐患。

将为圆筒混合机提供动力支持的传动部分与进行粉碎、混药工作的木质滚筒等分别装在 2 个房间进行隔离, 涉药房间避免安装电气元件, 杜绝电器带来的安全隐患。工房设在山坳内, 距离控制室在 50 m 以上, 确保安全。采用安全监测系统远程监控, 实现人机分离和无人化生产, 即使发生危险情况, 也不会造成人员伤亡。在控制室除可远距离电控操作外, 还可通过显示屏观察到上料、混合、出料的整个生产过程, 一有异常, 可立即停机。

1.3 样机的研制

项目组针对江西省李渡烟花集团有限公司烟花黑药生产工艺, 完成了黑火药混药危险工序人机隔离生产技术的研制, 研制了集黑火药原料粉碎混合与筛分为一体化的自动圆筒混合机, 并采用远程监控技术, 目前已用于黑火药生产, 年产量可达到 400 t。

2 混合机内药剂运动过程分析

圆筒混合机在粉碎混合烟花药剂时, 由于药剂组成成分的不同性质以及筒体的转速、填充率等工艺参数不同时, 药剂运动状态大致有 6 种^[1], 分别为滑移、阶梯、滚动、小瀑布、大瀑布和离心。

当滚筒内壁的摩擦系数 μ 非常小, 滚筒对药剂的摩擦力不足以使药剂上升时, 此时药剂做滑移运动; 滚筒内壁的摩擦系数 μ 很小, 筒体转速也很低, 滚筒能提供一定的摩擦力, 但由于摩擦力较小, 药剂做阶梯运动; 滚筒内壁的摩擦系数 μ 较大, 筒体转速较低时, 药剂被提升一定高度后, 位于药堆上部的药剂会滚落到底部, 此时药剂做滚动运动; 滚筒内壁的摩擦系数 μ 较大, 筒体转速较高时, 药剂达到一定速度与高度后被抛出, 此时药剂做抛落运动(小瀑布); 滚筒内壁的摩擦系数 μ 较大, 滚筒转速较高时, 药剂被抛出, 药剂抛射面与下面移动面分离, 此时圆筒混合机内药剂做抛落运动(大瀑布); 滚筒内壁的摩擦系数 μ 大, 滚筒转速非常高,

超过临界值时, 药剂做离心运动, 药剂随滚筒一起转动, 不能达到粉碎与混合的目的。

2.1 设备参数的影响

影响黑火药粉碎混合的参数^[2]有混合时间、筒体转速、填充率、筒体长度和直径。混合时间越长, 对黑火药的粉碎混匀越有利。因此, 应在不影响生产率的情况下, 尽量加长混合时间。

筒体转速决定药剂在圆筒内运动状况, 因而对黑火药的粉碎和混匀很大的影响。如果转速过快, 离心力会使药剂贴在滚筒圆周上; 如果转速太慢, 药剂则会在滚筒内作类似平移的运动。只有当转速适宜时, 黑火药呈小瀑布状抛落, 各组分有充分接触机会, 才能取得良好的混匀效果。

填充率是指筒内物料平均横截面积占筒体有效横截面积的百分比, 它对产量、粉碎和混合均有很大影响。填充率过大, 在转速和混合时间不变的情况下, 虽能提高产量, 但此时料层增厚, 混合料运动状态不佳, 不能获得适宜的运动轨迹, 会对粉碎混匀产生不良影响; 填充率过小, 生产率不能满足生产需要。填充率的确定须和转速协同考虑, 使两者搭配合理, 才能提高粉碎混匀效果。

筒体直径既决定圆筒混合机生产能力, 又直接影响到粉碎和混合效果。直径的影响可从转速、填充率等参数中反映出来。

2.2 药剂抛射运动的受力情况

圆筒混合机主要以粉碎、混合药剂为主要目的, 因此其运动方式以药剂作抛落运动(小瀑布)^[3]为宜。由于药剂运动状态比较复杂, 为简化问题, 根据药剂的实际运动状态, 作如下假设: 药剂与滚筒间无相对滑动; 药剂层间相对滑动极小, 计算时可以忽略不计。

取靠近滚筒内壁的药剂为研究对象, 可认为药剂与滚筒的圆周速度相同, 药剂的受力情况如图 2。

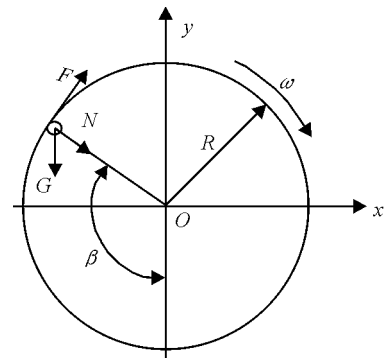


图 2 药剂受力图

图 2 中 G 为药剂所受的重力； N 为圆筒对药剂的支撑力，其来源有 2 个，药剂重力的径向分量与药剂旋转产生的圆周力； F 为药剂所受的摩擦力，其大小 $F = \mu N$ ； β 为药剂的提升角， $\beta > 90^\circ$ ； R 为滚筒的直径。

此时药剂所受法线方向上的力^[4]为：

$$G \cos(180^\circ - \beta) + N = m\omega^2 R \quad (1)$$

药剂所受切线方向上的力为：

$$G \sin(180^\circ - \beta) - F = 0 \quad (2)$$

将 $F = \mu N$ 和式 (1) 带入式 (2) 可得

$$G \sin(180^\circ - \beta) - \mu[m\omega^2 R - G \cos(180^\circ - \beta)] = 0, \text{ 即}$$

$$g \sin \beta - \mu(\omega^2 R + g \cos \beta) = 0 \quad (3)$$

由上式可以看出，随着药剂的旋转上升， β 逐渐变大，药剂所受摩擦力逐渐变小，滚筒对药剂的支撑力也逐渐变小，质量对药剂的运动没有影响。

当药剂上升到一定的高度进行抛射时，药剂的提升角 $\beta > 90^\circ$ ，药剂所受滚筒的支持力 N 为 0，此时有

$$G \cos(180^\circ - \beta) = m\omega^2 R \quad (\beta > 90^\circ) \quad (4)$$

整理可得：

$$\beta = \arccos\left(\frac{-\omega^2 R}{g}\right) = \arccos\left(-\frac{(\pi n)^2 D}{1800g}\right) \quad (\beta > 90^\circ) \quad (5)$$

由此可知：药剂提升角 β 与滚筒直径 D 和滚筒转速 n^2 成余弦关系。

根据式 (5)，采用 Matlab 软件可以得到 β 关于 D 和 n 的三维函数曲面，如图 3。

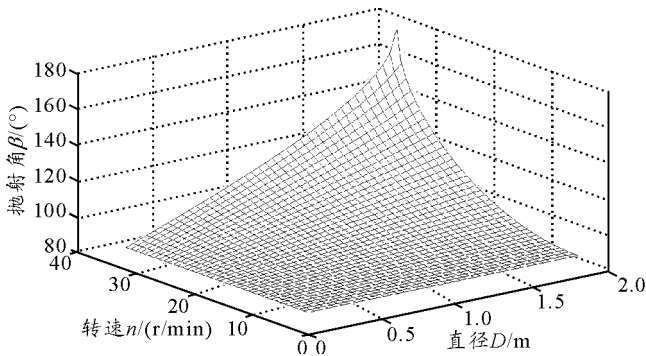


图 3 β 关于 D 和 ω 的三维函数曲面

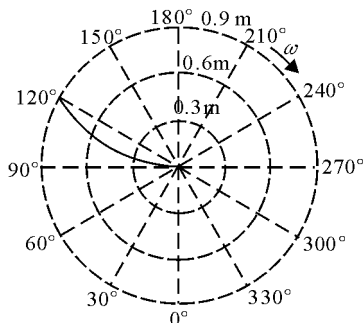


图 4 为二维抛射面曲线

当转速 n 一定时，可以得出抛射角 β 与直径 D 之间的二维曲线。图 4 为计算得到的二维抛射面曲线，坐标为极坐标。

2.3 药剂抛射运动的方程

药剂在滚筒摩擦力的作用下被提升，当药剂上端到达药剂抛射面时，即图中的 A 点，药剂被抛出。药剂抛射运动的轨迹为抛物线，如图 5，之后又随滚筒作圆周运动。呈抛射式运动的药剂，其运动轨迹为连续的、重复的圆弧(对应图 5 中的 BA)与抛物线(对应图 5 中的 AB 段)。

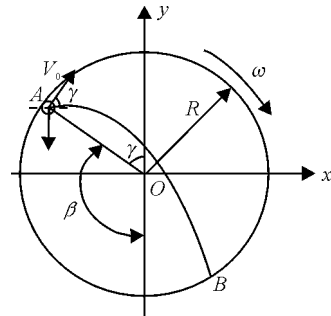


图 5 药剂抛射运动轨迹图

由质点运动微分方程得到在 xoy 坐标系下药剂的运动方程为：

$$x = V_0 t \cdot \cos \gamma - R \sin \gamma \quad (6)$$

$$y = V_0 t \cdot \sin \gamma - \frac{1}{2} g t^2 + R \cos \gamma$$

式中： V_0 为初速度； γ 为药剂抛射角， $\gamma = 180^\circ - \beta$ 。

在药剂跟随圆筒从 B 点运动至 A 点的期间，外层药剂以及受内摩擦作用的里层药剂都做圆周运动，其运动方程为：

$$x^2 + y^2 = R_1^2 \quad (7)$$

式中： R_1 为位于不同层药剂的半径。

在 xoy 坐标系下由方程组 (6) 得到 $t = \frac{x + R \sin \gamma}{V_0 \cos \gamma}$ ，再代入方程组 (6) y 中，得到轨迹方程为：

$$y = (x + R \sin \gamma) \tan \gamma - \frac{1}{2} g \frac{(x + R \sin \gamma)^2}{V_0^2 \cos^2 \gamma} + R \cos \gamma \quad (8)$$

图 5 中，药剂运动至 A 点时圆周运动结束，并开始抛出。尽管不同层的药剂，其抛射点 A 的位置不同，但在抛射点都有下面的平衡方程：

$$m \frac{V_0^2}{R_1} = G \cos \gamma \quad (9)$$

将 $V_0 = \frac{\pi R_1 n}{30}$ ， $g \approx \pi^2$ ， $\cos \gamma = \frac{y}{R_1}$ ，先后带入式 (9)，

有：

$$R_1 = \frac{900}{n^2} \cos \gamma \quad (10)$$

$$x^2 + y^2 - \frac{900}{n^2} y = 0 \quad (11)$$

变换式 (11) 有:

$$x^2 + (y - \frac{900}{2n^2})^2 = (\frac{900}{2n^2})^2 \quad (12)$$

式 (12) 是在 xoy 坐标系下所表示的各层药剂由圆运动转入抛物线运动时的圆的直角坐标方程, 其圆心坐标为 $(0, \frac{900}{2n^2})$, 半径为 $\frac{900}{2n^2}$ 。式 (12) 表明:

药剂抛射点的位置与筒体的转速有关, 当筒体的转速不变时, 则该层药剂的抛射角为一定值, 所以式 (10)、(12) 为药剂抛射起点的轨迹方程。

2.4 药剂的落点坐标与落点速度

令 $g \approx \pi^2$, 由式 (10) 及 $V_0 = \frac{\pi R_1 n}{30}$ 可得:

$$V_0^2 = g \cdot R_1 \cdot \cos \gamma \quad (13)$$

将式 (13) 带入抛物线轨迹方程式 (8), 得

$$y = (x + R_1 \sin \gamma) \tan \gamma - \frac{1}{2} \frac{(x + R_1 \sin \gamma)^2}{R_1 \cos^3 \gamma} + R_1 \cos \gamma \quad (14)$$

在 xoy 坐标系下药剂沿圆运动的轨迹方程为

$$x^2 + y^2 = R_1^2 \quad (15)$$

图 2 中落点 B 的坐标就是式 (14)、(15) 的交点。

令:

$$\begin{cases} X = x + R_1 \sin \gamma, & \text{则带入式 (14)、(15) 整理可得:} \\ Y = y - R_1 \cos \gamma \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y = X \tan \gamma - \frac{1}{2} \frac{X^2}{R_1 \cos^3 \gamma} \\ (X - R_1 \sin \gamma)^2 + (Y + R_1 \cos \gamma)^2 = R_1^2 \end{cases} \quad (16)$$

简化式 (16) 可得:

$$\frac{X^3}{R_1 \cos^4 \gamma} \cdot (\frac{X}{4R_1 \cos^2 \gamma} - \sin \gamma) = 0 \quad (17)$$

求解可得: $X_{1,2,3} = 0, X_4 = 4R_1 \sin \gamma \cos^2 \gamma$

将 $X_4 = 4R_1 \sin \gamma \cos^2 \gamma$ 带入方程组 (16) 可得:

$$Y = -4R_1 \sin^2 \gamma \cos \gamma$$

$$\text{即有: } \begin{cases} X = 4R_1 \sin \gamma \cos^2 \gamma \\ Y = -4R_1 \sin^2 \gamma \cos \gamma \end{cases} \quad (18)$$

在 xoy 坐标系下的落点坐标:

$$\begin{cases} x = 4R_1 \sin \gamma \cos^2 \gamma - R_1 \sin \gamma \\ y = -4R_1 \sin^2 \gamma \cos \gamma + R_1 \cos \gamma \end{cases} \quad (19)$$

抛射时间

$$t = \frac{x + R_1 \sin \gamma}{V_0 \cos \gamma} = \frac{4R_1 \sin \gamma \cos^2 \gamma - R_1 \sin \gamma + R_1 \sin \gamma}{V_0 \cos \gamma} = \frac{4R_1 \sin \gamma \cos \gamma}{V_0}$$

故落点分速度:

$$\begin{cases} V_x = V_0 \cos \gamma \\ V_y = V_0 \sin \gamma - gt = -3V_0 \sin \gamma \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{则落点速度 } V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = V_0 \sqrt{1 + 8 \sin^2 \gamma} \quad (21)$$

药剂落点速度与筒体转速的关系曲线如图 6。

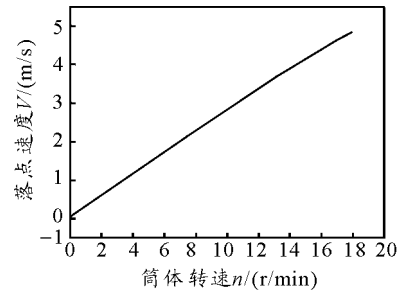


图 6 药剂落点速度与筒体转速的关系曲线

3 结论

1) 黑火药圆筒混合机中与药剂直接接触的部件选用木质或牛皮等软质绝缘材料, 有效地降低了混合过程中撞击、摩擦、静电感度的影响, 提高了黑火药生产的安全性; 涉药机械与驱动装置安置在不同的房间内, 并安装安全性监控系统, 实现了人机隔离和无人化生产。经实际生产验证, 上述方案切实可行。

2) 药剂提升角与直径和转速有关系, 直径和转速越大则提升角越大。

3) 滚筒中磨球和药剂的运动分为 2 个阶段, 即圆周运动阶段和抛物线运动阶段, 最外层的磨球在抛物线运动阶段的运动方程为:

$$y = (x + R \sin \gamma) \tan \gamma - \frac{1}{2} g \frac{(x + R \sin \gamma)^2}{V_0^2 \cos^2 \gamma} + R \cos \gamma, \text{ 磨球冲击}$$

药剂的速度为: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = V_0 \sqrt{1 + 8 \sin^2 \gamma}$ 。

参考文献:

[1] Ding Y L, Forster R, Seville J P K, et al. Granular motion in rotating drums: bed turnover time and slumping-rolling transition[J]. Powder Technology, 2002(124): 18-27.
 [2] 李柏松. 圆筒混合机工艺性能的研究与结构优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006: 21-22.
 [3] 肖明葵. 理论力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
 [4] 陈炳辰. 磨矿原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.