

粉料干法造粒挤压辊的力学特性及有限元分析

Mechanical properties and finite element analysis of the dry granulation roller

刘志民 韩雷 刘洋

LIU Zhi-min HAN Lei LIU Yang

(河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038)

(College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

摘要:根据干法造粒过程中挤压辊的受力特点,结合 Von Mises 准则建立挤压辊力学模型,通过模型求解与简化,计算其等效应力,并从理论上定性分析挤压辊力学特性。利用 SolidWorks 软件建立挤压辊三维实体模型,通过有限元软件 ANSYS Workbench 对其力学特性进行定量分析。理论分析和仿真结果表明:挤压辊变形主要集中在沿挤压辊宽度 30~150 mm 内,最大变形量出现在挤压辊表面($z/a=0.0$)中心区域,变形量达 0.026 4 mm;挤压辊在深度 $z/a=0.5$ 圆柱面应力最大为 43.2 MPa。

关键词:干法造粒;挤压辊;力学特性;有限元分析

Abstract: According to the characteristics of the roller during dry granulation process, the dry granulation roller mechanics model was established by Von Mises criterion. The model was solved and simplified to calculate its equivalent stress. The mechanical properties of the dry granulation roller were qualitatively analyzed theoretically. The 3D solid model of the squeeze roll was established by using SolidWorks software. The mechanical properties of the dry granulation roller were quantitatively analyzed by finite element software ANSYS Workbench. The theoretical analysis and simulation results showed that the deformation of the dry granulation roller was mainly concentrated along the width of the dry granulation roller in the range of 30~150 mm, and the maximum deformation occurred in the center of the dry granulation roller surface ($z/a=0$) with a deformation of 0.026 4 mm. The maximum stress of the dry granulation roller occurred at the depth of $z/a=0.5$ with the cylindrical layer at 43.2 MPa.

Keywords: dry granulation; dry granulation roller; mechanical properties; finite element analysis

干法造粒是在湿法造粒基础上发展而来的一种新型造粒工艺,其工艺流程是将物料粉末连续挤压成型、造粒,物料

作者简介:刘志民(1975—),男,河北工程大学副教授,博士。

E-mail: liuzhiminh@126.com

收稿日期:2018-01-15

中无需添加任何粘合剂,生产过程环保、高效。同时干法造粒具有改进产品外观,改善分离状原料的流动特性,便于贮存和运输,方便准确定量,减少粉末飞尘污染等优点,在制药、化工、食品等工业生产领域应用广泛^[1-2]。

挤压辊是干法造粒工艺过程中的关键工作部件,松散物料在挤压螺旋喂料压力作用下,依次经过两相向匀速旋转挤压辊之间的滑动区和咬入区,物料在滑动区内与挤压辊之间的相互作用力较小,随着挤压辊连续旋转,物料进入咬入区且体积被逐渐压缩,物料与挤压辊之间的相互作用力也随之增大,当物料进入两挤压辊中心线最小间隙附近时,物料被挤压成密实状薄片,此时,物料与挤压辊之间的作用力达到最大值^[3-7]。物料与挤压辊间的最大作用力及挤压辊的受力变形对物料成形的密实度和系统工艺过程控制有着重要影响,其结果将直接影响造粒效果和质量。为此,本研究根据 Von Mises 准则^[8],将理论分析与有限元仿真方法相结合,分析挤压辊受力特性和变形规律,此研究为干法造粒机挤压辊的优化提供理论设计依据,同时也为干法造粒挤压系统的过程控制提供参考。

1 挤压辊力学模型及受力分析

在实际干法造粒工艺生产过程中,物料对挤压辊的作用力为径向方向,当忽略泊松比所引起的挤压辊沿轴线方向滑动时,挤压辊力学模型(见图1)可简化为平面应变问题。物料在挤压螺旋喂料压力 P_0 ^[9-10]和挤压辊压力共同作用下,依次经过滑动区和咬入区,两挤压辊在平面应力场受到的作用力对称分布,故仅在其中一个挤压辊内部建立坐标系(x, z),表面作用力所引起的应力分量可按 Jonhson^[11-13]给出的公式进行计算:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{2z}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s)(x-s)^2 ds}{[(x-s)^2+z^2]^2} - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{q(s)(x-s)^3 ds}{[(x-s)^2+z^2]^2}; \\ \sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s) ds}{[(x-s)^2+z^2]^2} - \frac{2z^2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{q(s)(x-s) ds}{[(x-s)^2+z^2]^2}; \\ \tau_{xy} = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s)(x-s) ds}{[(x-s)^2+z^2]^2} - \frac{2z}{\pi} \int_{-a}^a \frac{q(s)(x-s)^2 ds}{[(x-s)^2+z^2]^2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- x, z —— 挤压辊中任意一点坐标, mm;
- $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ —— 平面内应力分量, Pa;
- $p(s)$ —— 挤压辊接触表面上的表面压力, Pa;
- $q(s)$ —— 挤压辊接触表面切向力, Pa;
- α —— 咬入角 α 所对弧面长度, mm;
- s —— 接触表面上任意一点至接触中心的距离, mm。

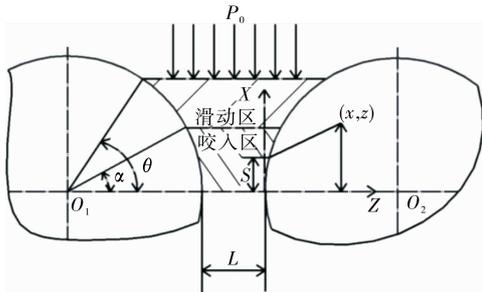


图1 挤压辊力学模型

Figure 1 Working principle of granulation roller

咬入区内表面压力 $p(s)$ 根据 Johanson 等^[14-15] 给出的公式进行计算, 则挤压辊任一位置角 θ 处的平均压力值 σ_θ 按式(2)计算:

$$\sigma_\theta = \sigma_\alpha \left[\frac{d/D + (1 + L/D - \cos\alpha) \cos\alpha}{d/D + (1 + L/D - \cos\theta) \cos\theta} \right]^K, \quad (2)$$

式中:

- σ_α —— 当 $\theta = \alpha$ 时的平均应力, Pa;
- K —— 物料压缩系数, 当物料在一定的含水量和温度情况下为特定常数;
- L —— 挤压辊间隙, mm;
- D —— 挤压辊直径, mm;
- d —— 挤压辊表面沟槽深度, mm。

由于咬入角 α 随物料属性和挤压条件等因素而变化, 无法从理论上测出精确数据, 而物料在咬入区内受到连续挤压作用时, 其单位厚度质量会保持不变, 仅密度发生变化, 因此, 咬入角 α 可按式(3)进行估算:

$$\cos\alpha = 1 - L(\gamma' - \gamma)/D\gamma, \quad (3)$$

式中:

- γ —— 物料松装密度, g/cm^3 ;
- γ' —— 物料压实密度, 可通过试验进行估算, g/cm^3 。

将式(3)代入式(2), 当取位置角 $\theta = 0$ 时, 可计算出咬入区内挤压辊接触表面最大压力 $\sigma_{\theta=0}$, 此压力数值即为咬入区内挤压辊接触表面上任意一点至接触中心距离为 0 时的最大表面压力 $p(0)$ 。由于咬入区内物料与挤压辊表面没有相对滑移, 故切向力 $q(s) = 0$, 并用 m 和 n 表示挤压辊内一般点 (x, z) 处的应力, 则挤压辊平面内任意一点应力分量计算公式[式(1)]可简化为:

$$\begin{cases} \sigma_x = -p(0) \left[m \left(1 + \frac{z^2 + n^2}{m^2 + n^2} \right) - 2z \right]; \\ \sigma_z = -p(0)m \left(1 - \frac{z^2 + n^2}{m^2 + n^2} \right); \\ \tau_{xz} = -p(0) \left[\frac{mz(x^2 - n^2)}{x(m^2 + n^2)} \right]. \end{cases} \quad (4)$$

m 和 n 由式(5)定义, 且式中 m 和 n 的正负号分别与 z 和 x 处坐标正负号一样:

$$\begin{cases} m^2 = (1/2) \{ [(1-x^2+z^2)^2 + 4x^2z^2]^{1/2} + (1-x^2+z^2) \}; \\ n^2 = (1/2) \{ [(1-x^2+z^2)^2 + 4x^2z^2]^{1/2} - (1-x^2+z^2) \}. \end{cases} \quad (5)$$

在平面内任意一点应力状态可以用 4 个应力分量进行描述, 即 $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}, \sigma_y$, 其中, σ_y 是沿着挤压辊轴线方向的应力, 也是平面内任意一点的中间主应力, 其大小根据公式 $\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z)$ 进行确定。取挤压辊弹性参数泊松比 $\nu = 0.3$, 则 Von Mises 等效应力为:

$$\sigma_{eq} = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xz}^2] \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

将式(4)、(5)代入式(6), 并分别对 Von Mises 等效应力 σ_{eq} 、咬入角 α 所对弧面长度 a 、坐标 x 和坐标 z 进行无量纲化处理, 得到挤压辊不同深度横截面 z/a 处无量纲等效应力 $\sigma_{eq}/p(0)$ 随无量纲坐标 x/a 变化曲线见图 2。从图 2 可以看到, 在不同深度圆柱面无量纲等效应力沿两挤压辊连心线呈对称分布, 且在 $x/a = 0.0$ (咬入角 α 为 0) 处出现极大值。在 $z/a = 0$ 时的挤压辊表面, 无量纲等效应力最小, 且保持为一常量; 当 $z/a = 1.0$ (挤压辊深度为 a 圆柱面) 时, 无量纲等效应力最大, 但在 $x/a = 0.0$ 处应力幅值变化较小; 当 $z/a = 0.5$ (挤压辊深度为 $0.5a$ 圆柱面) 时, 无量纲等效应力较大, 且在 $x/a = 0.0$ 处应力幅值变化最大。说明在横截面 $z/a = 0.5$ 时, 应力沿挤压辊接触面中心附近幅度变化最大。此分析结果与 Von Mises 准则描述相一致, 即当摩擦系数较小时, 屈服首先会出现在接触体内部。

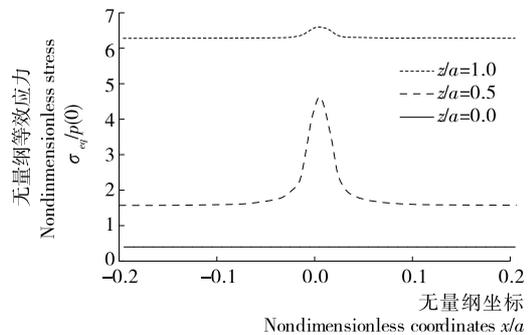


图2 无量纲等效应力相对于无量纲坐标 x/a 的分布曲线
Figure 2 The distributing curves of the dimensionless stress with respect to the dimensionless coordinates x/a

2 挤压辊有限元仿真分析

为进一步定量研究挤压辊的力学特性, 利用 ANSYS Workbench 软件对其进行仿真分析。

2.1 挤压辊有限元模型建立

利用 SolidWorks 软件建立挤压辊三维实体模型, 选取挤压辊工作面直径为 240 mm, 见图 3。点击 SolidWorks 软件中的 ANSYS Workbench 接口选项, 将三维实体模型导入 ANSYS Workbench 软件中, 右击 Mesh 选项, 结合挤压辊回转体结构特点, 选择 Sweep 选项对挤压辊模型进行扫掠法六

面体单元网格划分,见图 4。最后对挤压辊有限元模型进行参数设置,材料选择 Mn13,其泊松比为 0.3、弹性模量为 2.06×10^5 MPa、密度为 $8\,900\text{ kg/m}^3$,屈服强度为 800 MPa。

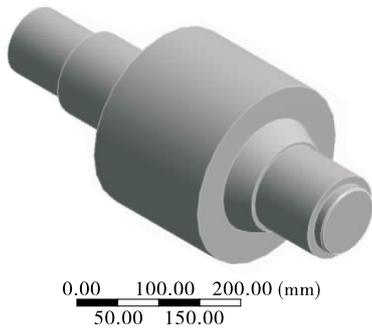


图 3 挤压辊模型

Figure 3 Granulation roller model

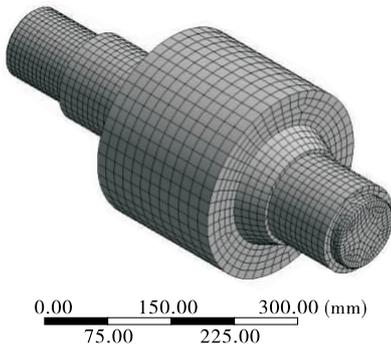


图 4 挤压辊网格划分

Figure 4 Mesh division of granulation roller

2.2 施加载荷和边界约束

右击 static structural 选项,在挤压辊轴承两端添加约束,一端轴承作用面限制 x, y, z 自由度,另一端轴承作用面限制 y, z 自由度。在挤压成型过程中,松散物料在挤压螺旋喂料压力、挤压辊匀速旋转带动和挤压辊压力共同作用下,物料与挤压辊表面紧密接触,咬入角内挤压辊受到的作用力是均匀分布的,由式(2)计算面载荷为 54.1 MPa。通过 Geometry 模块,在挤压辊和物料接触表面添加印记面,施加面载荷压力为 54.1 MPa。

2.3 结果求解与分析

载荷和边界约束添加完成后,在 solution 选项中右击 Solve 命令开始运算求解。求解完成后,通过 Deformation 选项提取挤压辊变形云图,见图 5,发现挤压辊变形最大的地方为挤压过程中与物料直接接触的表面,并且在挤压辊与物料接触的中心表面呈椭圆形分布,通过提取变形量数据,绘制距挤压辊表面不同深度的变形曲线见图 6。变形主要集中在沿挤压辊中心轴向长度 30~150 mm 内,且最大变形量出现在挤压辊表面 $z/a = 0.0$ 中心区域,变形量达 0.026 4 mm,随着深度增加其变形量逐渐减小,在挤压辊深度 $z/a = 0.5$ 时变形量为 0.018 8 mm,在挤压辊深度 $z/a = 1.0$ 时变形量为 0.011 6 mm。

通过 Equivalent Stress 选项提取挤压辊应力云图(见图 7),提取挤压辊中心断面和两端面径向应力分布,绘制不

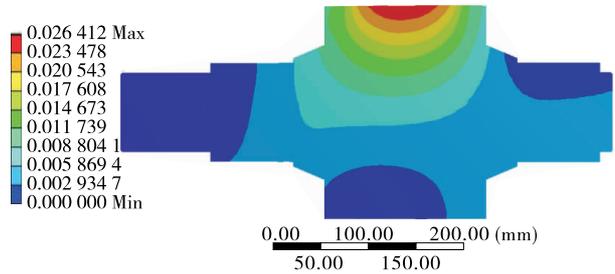


图 5 挤压辊变形云图

Figure 5 Deformation cloud of granulation roller

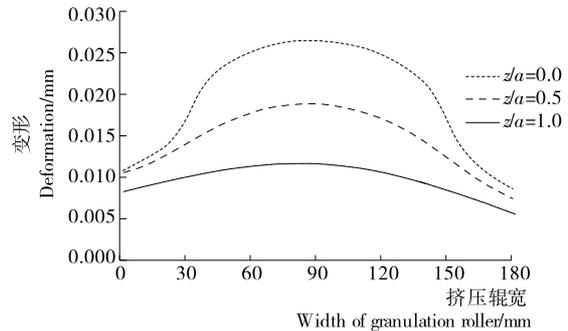


图 6 挤压辊变形曲线

Figure 6 Deformation curve of granulation roller

同截面径向应力分布曲线(见图 8),发现应力极值出现在与物料接触的挤压辊表面以下深度 40 mm,最大应力为 43.2 MPa,并在端面过渡部分出现应力集中。提取挤压辊 z/a 为 0.0, 0.5, 1.0 时不同深度应力数据,绘制挤压辊不同深度应力曲线见图 9,发现在横截面 z/a 为 1.0, 0.5 时应力大于挤压辊表面 $z/a = 0.0$ 的应力,即与上述无量纲等效应力相对于无量纲坐标 x/a 变化曲线相一致。

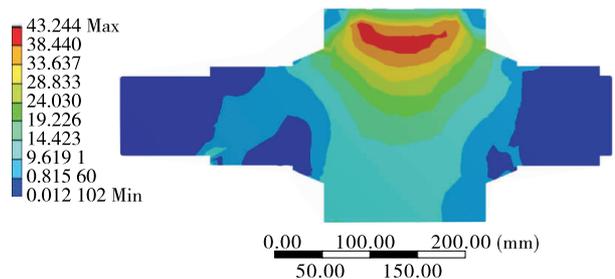


图 7 挤压辊等效应力云图

Figure 7 Effect force cloud of granulation roller

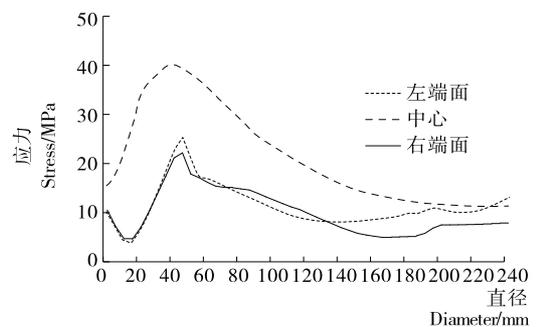


图 8 挤压辊径向应力曲线

Figure 8 Radial stress curve of granulation roller

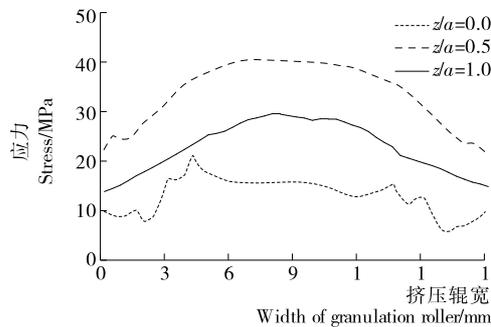


图9 挤压辊应力曲线

Figure 9 Cross section stress curve of granulation roller

3 结论

(1) 挤压辊力学特性理论分析与有限元结果仿真与 Von Mises 准则描述相一致,且有限元仿真给出了挤压辊应力及变形程度的定量评价。

(2) 挤压辊变形主要集中在沿挤压辊宽度 30~150 mm 内,最大变形量出现在挤压辊表面($z/a=0.0$)中心区域,变形量达 0.026 4 mm,且随着深度增加其变形量逐渐减小。

(3) 挤压辊在深度 $z/a=0.5$ 横截面应力最大,与实际情况是一致的;同时,为避免挤压辊端面与轴过渡部分在 $z/a=0.5$ 横截面附近出现应力集中,可进一步对挤压辊结构进行优化设计。

参考文献

- [1] 彭飞,李腾飞,康宏彬,等.小型制粒机喂料器参数优化与试验[J].农业机械学报,2016,47(2):51-58.
- [2] 王善荣.大麦压片机的研制[J].食品与机械,1997(5):25-26.
- [3] PATEL B A, ADAMS M J, TURNBULL N, et al. Predicting the pressure distribution during roll compaction from uniaxial compaction measurements[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 164(2/3): 410-417.
- [4] 李欣,王国强.高压辊磨机磨辊强度有限元分析[J].建筑机械,2003(9):45-48.
- [5] BINDHUMADHAVAN G, SEVILLE J P K, ADAMS M J, et al. Roll compaction of a pharmaceutical excipient: Experimental validation of rolling theory for granular solids[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(14): 3 891-3 897.
- [6] MAOUCHE N, MAITOURNAM M H, VAN K D. On a new method of evaluation of the inelastic state due to moving contact[J]. Wear, 1997, 203-204(96): 139-147.
- [7] 张鹏.辊压造粒机压辊分离力的近似计算[J].中国井矿盐,2003(5):37-38.
- [8] 冯剑军,谭援强.基于 Hertz 理论圆柱和平面之间的滑动接触分析[J].摩擦学学报,2009,29(4):346-350.
- [9] 陈传文.粉料充填系统计量误差的因素与控制[J].食品与机械,1994(3):20-20.
- [10] 孙晓霞,孟文俊,梁志坚,等.基于 TCP 流稳定螺旋涡的垂直螺旋输送机的设计方法[J].北京理工大学学报,2017,37(11):1 114-1 121.
- [11] JOHANSON K L.接触力学[M].徐秉业,译.北京:高等教育出版社,1992:20-21.
- [12] KOGUT L, ETSION I. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 69(5): 657-662.
- [13] HUI Qiu, HILLS D A, NOWELL D, et al. Skew sliding of an elastic cylinder: An investigation of convection in contact[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50(2): 293-298.
- [14] JOHANSON J R. A rolling theory for granular solids[J]. Journal of Applied Mechanics, 1965, 32(4): 842.
- [15] MULIADI A R, LITSTER J D, WASSGREN C R. Modeling the powder roll compaction process: Comparison of 2-D finite element method and the rolling theory for granular solids (Johanson's model)[J]. Powder Technology, 2012, 221: 90-100.

信息窗

中国首次提出食品工业减盐策略

中国疾病预防控制中心营养与健康所和中国营养学会 18 日在北京联合推出《中国食品工业减盐指南》,力争到 2030 年全国人均盐摄入量下降 20%。这是中国首次推出减盐指南。

据介绍,减盐指南工作组从 2016 年开始研究指南的起草工作。目前形成的《中国食品工业减盐指南》,建议食品企业作为减盐工作的实践者应本着循序渐进、分段实施、重点突破的原则,以 2016 年调查的各类食品钠含量分布现状为基准,逐渐实现到 2030 年加工食品钠含量平均水平降低 20% 的目标。食品企业可参照同类食品钠含量的平均水平和分布状况,通过改善工艺、口味调节等多种技

术减少钠盐用量,达到行业整体下调盐用量的目标。

目前,全球已有超过一半的国家启动了全国性减盐指南或行动。其中,英国、芬兰、澳大利亚和日本等国家的减盐行动已初见成效。中国是世界上食盐摄入量最高的国家之一,人均盐摄入量高达 10.5 g/d。随着食品工业的快速发展,越来越多加工食品进入生活,盐的来源已从家庭烹调用盐向加工食品转移。专家指出,虽然食品工业积极参与和实践是减盐工作成败的关键,但全社会的共同协作、多方支援才能取得实质性进展。

(来源: <http://www.cifst.org.cn>)