

夹带式散粮输送机垂直提升段力学模型探讨

马建宇,李永祥,王明旭,靳航嘉

(河南工业大学 机械工程学院,河南 郑州 450007)

摘要:基于夹带式皮带机物料提升段夹持力的一般数学模型,推导出为防止夹带横向移动导致物料外泄的改进模型;基于赫兹接触定理推导出弹性散粒体物料在垂直提升段物料层数(物料厚度)、物料最外层与中心(质心)所受挤压力关系的数学模型,并尝试将该模型应用于小麦散粮输送机中,通过算例验证了该模型的实用性和有效性。本模型可对现有的夹带机设计经验公式进行改良,提高计算的精度,为具体压带机分部件的设计、研究以及优化等提供一定的理论支撑,为其它相似的夹带式输送机提供研究思路和理论借鉴。

关键词:夹带式皮带机;力学模型;散粮输送;垂直提升

中图分类号:S 377 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2017)05-0071-04

Discussion on mechanical model of vertical lifting section of clamping belt conveyor

MA Jian-yu, LI Yong-xiang, WANG Ming-xu, JIN Hang-jia

(College of Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450007)

Abstract:Based on the general mathematical model of the clamping force of the belt conveyor in lifting section, the improved model to avoid the material leakage caused by the lateral movement of the belt was deduced. Based on the Hertz contact theorem, the mathematical model of elastic bulk material thickness in vertical lifting section, the relationship between the squeeze forces obtained by the material of outermost layer and the center (centroid) was deduced. The model was tried to apply in design of wheat transport machine, and was validated by the calculation. The model makes a partial improvement on the existing empirical formula of the clamping belt conveyor and the accuracy of the calculation, which provided theoretical support for the design, research and optimization of the specific parts of the belt machine, as well as other similar clamping conveyors.

Key words: clamping belt conveyor; mechanical model; bulk grain conveying; vertical lifting

随着国际贸易的日益发展,国际进出口贸易急剧增加,对大批量散料输送能力的要求越来越高,在港口的输运中更为显著^[1]。相比于常规的大倾角运输设备如斗式提升机等,夹带式皮带机在运输过程中,物料被包裹在承重带与压带之间,不与外界接触,物料颗粒间无(或很小)相对运动,因此输运过程中振动小、物料的破碎率低、噪音低、无污染、无泄漏、无火花,不存在尘埃爆炸的隐患^[2-3]。而且还拥有能耗低、绿色环保、经济性好、可靠性高、运输物料种类多等诸多优点。在当前我国港口码头的不断新建和扩建过程,对输送设备的需求越来越高的背景下,大输送量并且高效、节能的大倾角夹带式皮带运

输机必将拥有广阔的应用前景^[4]。

1 数学模型

1.1 夹带机提升段的一般数学模型

上世纪80年代,美国学者 Dos Santos 对大倾角夹带式皮带输送机进行了大量的理论研究,提出提升段的一般数学模型^[5]。传统皮带机的运输倾角如果大于物料间的内摩擦角,带上的物料就会滑移引起运输失效。但夹带式皮带机相比传统的皮带机多了一条压带,压带靠自身的张力或外加压力压紧物料,增大了物料内部的摩擦力,物料被压带和承载带夹持,从而做到大倾角乃至垂直运输^[6]。

对于无内聚力物料的受力,可以简化如图1所示(假设物料为紧密的平行层流)。

$$W_m \sin \alpha = (N + W_m \cos \alpha) \mu \quad (1)$$

式中: α 为输送角度; μ_m 为夹持物料的内摩擦系数; μ_b 为夹持物料与皮带摩擦系数; N 为对覆盖

收稿日期:2017-03-23

基金项目:小麦和玉米深加工国家工程实验室开放课题(001249);河南省科技厅重点科技攻关项目(152102110071)

作者简介:马建宇,1987年出生,男,在读硕士研究生。

通讯作者:王明旭,1980年出生,男,副教授,博士。

带施加的压紧力; W_m 为散装材料的重力;
 $\mu = \min(\mu_m, \mu_b)$ 。

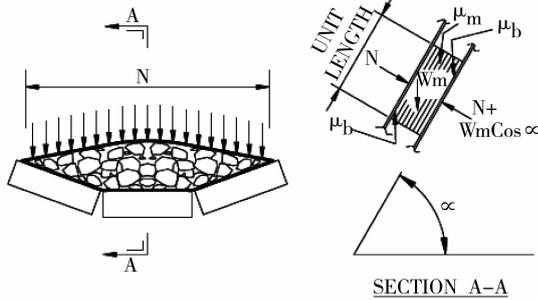


图1 夹带机提升段受力分析

由式(1)可得,夹带机为实现 α° 的倾斜角,对覆盖带施加的压紧力 N ,如式(2)。

$$N = W_m \left(\frac{\sin\alpha}{\mu} - \cos\alpha \right) \quad (2)$$

如果承载带与覆盖带同步运行,可知:

$$W_m \sin\alpha = (2N + W_m \cos\alpha)\mu \quad (3)$$

由式(3)可得,夹带机为实现 α 倾斜角,对覆盖带施加的压紧力 N ,如式(4)。

$$N = \frac{W_m}{2} \left(\frac{\sin\alpha}{\mu} - \cos\alpha \right) \quad (4)$$

1.2 夹带机提升段的分析与改进模型

从理论上讲,夹带式皮带机仅仅依靠一组相对应的夹持托辊便可满足夹持要求。但在夹带机在实际工作中,两覆盖皮带不可避免的发生横向移动,可能会导致物料外泄。这就要求皮带必须向外伸出一定的“外沿”,并由“外沿”托辊施加一定的负载,保证物料始终处于被包裹夹持状态(如图2)。

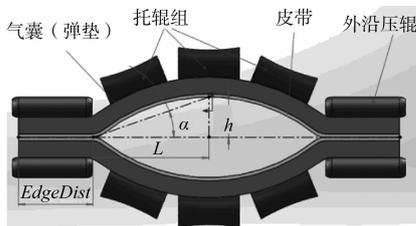


图2 夹带机夹持横截面示意图

因此夹带机提升段的一般数学模型在实际设计中有一定局限性,计算“外沿”的长度必须在一般模型的基础上做出相应改进,如图3。

其中的 $\alpha, \mu_m, \mu_b, N, W_m$ 含义同前文; N_m 为 N 作用在承载带与物料的分量; N_e 为 N 作用在“外沿”的分量; μ_e 为两皮带间的摩擦系数。

当两带被同步驱动,必须施加在物料上以防止滑移的最小载荷 N_m 由式(4)可知:

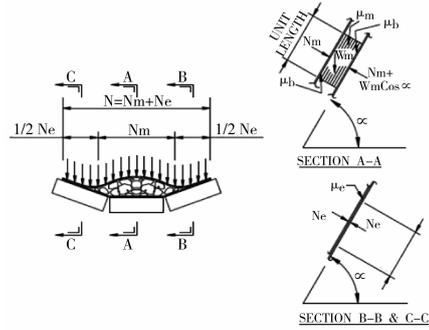


图3 夹带机提升段受力分析的改进模型

$$(\min) N_m = \frac{W_m}{2} \left(\frac{\sin\alpha}{\mu} - \cos\alpha \right) \quad (5)$$

如果仅仅承载带被驱动,则:

$$(\min) N_e \mu_b = (\min) N_m \mu \quad (6)$$

于是,所需的最小总法向载荷 N 可以通过式(5)和式(6)联立表示:

$$\begin{aligned} (\min) N &= (\min) N_e + (\min) N_m \\ &= \left(\frac{\mu}{\mu_e} + 1 \right) (\min) N_m \end{aligned} \quad (7)$$

也即:

$$(\min) N = \left(\frac{\mu}{\mu_e} + 1 \right) \frac{W_m}{2} \left(\frac{\sin\alpha}{\mu} - \cos\alpha \right) \quad (8)$$

如果承载带上的夹紧力按带宽均匀地分布在皮带上,则:

$$\frac{N_e}{N} = \frac{2 \text{EdgeDist}}{\text{BeltWidth}} \quad (9)$$

结合式(7)和式(9),便可以确定满足式(6)的每侧所需的“外沿”长度:

$$\text{EdgeDist} = \frac{\text{BeltWidth}}{2 \left(\frac{\mu_e}{\mu} + 1 \right)} \quad (10)$$

1.3 入料处到包料处长度与带速的函数关系

物料在被夹紧前,必须有足够的时间(距离)完成在承载带上的沉降并加速(或减速)到与带相同的速度。当物料稳定后,覆盖带必须在物料的上放被引入,并与承载带包络夹持物料。因此,物料的装载与夹持对皮带的速度的设计尤其重要。

设入料处到包料处长度为 L_{\min} ,带速为 v_0 ,物料团某颗粒出入料口速度为 v_1 ,入料口倾斜角为 θ ,入料口到卸料处高度忽略不计(如图4),则:

$$v_1 \cos\theta + \mu_b g \frac{L_{\min}}{v_0} = v_0 \quad (11)$$

式中: g 为重力加速度; μ_b 含义同上文。

对式(11)变形,得:

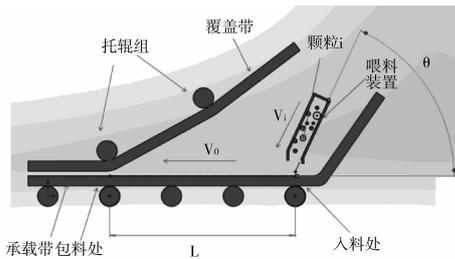


图4 入料处物料单颗粒受力分析

$$L_{\min} = \frac{v_0^2}{\mu_b g} - \frac{v_0 v_{i \cos \theta}}{\mu_b g} \quad (12)$$

每个物料颗粒出入料口速度 v_i 并不完全相同,但由于物料间颗粒相互碰撞产生功率消耗,因此计算时使用物料的平均速度代入式(12)推算入料处到包料处长度是合适的。

1.4 垂直提升段弹性散粒物料受力模型的推导

1.4.1 提升阶段物料的受力分析

将物料团单个颗粒分割开来,则在垂直提升阶段,物料团内任意颗粒 i 受到自身重力,以及相互间挤压产生的法向接触应力(不考虑切向力),根据牛顿第二定律,有:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + F_{n_i} \mu_m \quad (13)$$

式中: m_i 、 $\frac{dv_i}{dt}$ 、 F_{n_i} 分别为任意 i 颗粒的质量、加速度、法向接触应力; g 为重力加速度; μ_m 为物料间的摩擦系数。运输机在实际工作中可认为是匀速, $\frac{dv_i}{dt} = 0$, 因此式子(13)可简化为:

$$F_{n_i} = -m_i g / \mu_m \quad (14)$$

由式(4)及式(14)可知,任意颗粒在垂直提升阶段不“滑落”的基本条件为颗粒受到的由挤压力产生的摩擦力,要大于(至少等于)颗粒自身的重力。

1.4.2 皮带夹持宽度、弧度与压紧力的函数关系

在一般情况下,物料与皮带的摩擦系数大于物料之间的,因此皮带与物料间的摩擦力本模型不作为考虑因素。公式(14)只是在理论上得出物料在垂直提升段所需的夹持力(压强),但由于散粒体“应力波”传递的不均匀性,根据文献[7],散状颗粒物料团在受压时,内部的受力呈现树状结构。对于某一被夹持物料团,不能简单的认为物料团的中心(质心)一定是受夹紧力最小的点。但当物料团厚度低于某一常数,受力最小点就是物料团的中心(质心)。文献[7]并没有给出这一常数的具体算法,也没有得出物料团中受力最小的颗粒与最外层压力的关系。笔者尝试利用赫兹(Hertz)接触理论,

求得这一常数。

赫兹(Hertz)接触理论公式为:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* R^* \alpha^{3/2} \quad (15)$$

式中: F_n 为物料颗粒受到的法向接触力(挤压力); E^* 、 R^* 为两接触颗粒的当量杨氏模量和当量半径,

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}; \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2};$$

v 、 E 、 R 、 α 分别是颗粒的泊松比、杨氏模量、半径、接触变形量。

对式(15)求导可得:

$$F_n |_{\alpha} = 2 E^* R^* \alpha^{1/2} \quad (16)$$

由高等数学理论可知,当 α 取得一个较小的变化量 $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha$ 可以取正或负), F_n 的变化量 ΔF_n 为:

$$\Delta F_n = F_n \Delta\alpha = 2 E^* R^* \alpha^{1/2} \Delta\alpha \quad (17)$$

假设受挤压力最小的颗粒受力为 $F_{n_{\min}}$, 接触变形量为 α_{\min} , 受力最大的颗粒(最外圈颗粒)受力为 $F_{n_{\max}}$, 接触变形量为 α_{\max} , 粮团堆叠层数为 M 层, 则:

$$F_{n_{\max}} = k F_{n_{\min}} \quad (18)$$

$$N F_n = F_{n_{\max}} - F_{n_{\min}} \quad (19)$$

$$\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}} = \left(1 - \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{\max}}\right)^M \quad (20)$$

联立式(18)、(19)、(20)建立方程组即可得到在物料层数为 M , 物料团最外层与中心(质心)所受挤压力之间的关系。

2 垂直提升段力学模型的应用

笔者选择小麦作为被夹持物料。小麦颗粒近似椭圆球,长轴 3 ~ 6 mm,短轴 2 ~ 3mm;容重 795 kg/m³,每千粒重 35 ~ 38 g;由文献[8]得小麦的最小摩擦角为 21.21°, $\mu_m = 0.388$;杨氏模量 0.314 ~ 2.4 Mpa,泊松比取 0.2。小麦计算半径取 3mm, k 取 1.1,将以上参数代入式(18)、(19)、(20)得 $M = 147$ 。于是可得出:当小麦粮团厚度不高于 440 mm,只要对小麦粮团施加大于或等于 $1.1 \times \sum_1^i m_i g / \mu_m$ 的总压力(i 为该粮团的颗粒数),则该粮团中任意单颗小麦受到的摩擦力都不低于自身的重力。

小麦属于无粘连散粒体,由文献[9]可知,在被夹紧前,小麦散粮由输送机倾泻于夹带机运输带上,形成具有一定角度的堆积体,根据文献[10]与文献[11],小麦散粮堆积坡度角略小于小麦颗粒的最小摩擦角,取 20°。为便于 2 个传送带夹紧,可知夹紧后(提升阶段)小麦粮团截面长轴与短轴两端点的夹角 θ 也应取 20°,则粮团总厚度(截面短轴长度)为:

$$(1) \text{ 当 } L \leq 130 \text{ mm 时, } h = L \tan \theta = 0.364 L;$$

$$(2) \text{ 当 } L > 130 \text{ mm 时, } h = 44 \text{ mm.}$$

当 L, h, θ 确定, 带弧长 L_1 、夹带“外沿”长度、夹带夹持面横截面曲率半径 R 、面积 S 、也随之确定:

$$L_1 = \frac{\pi R \arcsin\left(\frac{L}{2R}\right)}{90} \quad (21)$$

根据上文式(10), 小麦散粮夹带垂直提升机夹带“外沿”长度选定为 $L_1/3$, 则带宽 L_0

$$L_0 = L_1 + \frac{2L_1}{3} = \frac{\pi R \arcsin\left(\frac{L}{2R}\right)}{54} \quad (22)$$

$$R = \frac{h}{2} + \frac{L^2}{8h} \quad (23)$$

$$S = 2 \left[\frac{\pi R^2 \left(\arcsin\left(\frac{L}{2R}\right) \right)}{180} - \frac{LR \cos\left(\arcsin\left(\frac{L}{2R}\right)\right)}{2} \right] \quad (24)$$

根据上文式(4), 夹带机的气囊(弹垫)需要提供粮团的夹持力为:

$$N = k_s \cdot k \cdot S \cdot H \cdot \rho \cdot g / \mu_m \quad (25)$$

式(25)中: k_s 为总安全系数; H 为气囊(弹垫)有效夹持长度; ρ 为小麦容重; 其它参数含义同上文。根据文献[12], 取 $k_s = 1.3$ 。

笔者初拟提升效率 $\eta = 1\ 000\ \text{t/h}$, 则:

$$\eta = \rho S V \quad (26)$$

式(26)中: V 为传送带的速度; 其他符号含义同前文。

取小麦粮团截面长度 $L = 1.2\ \text{m}$, 单个气囊(弹垫)有效夹持长度 $H = 0.1\ \text{m}$, 满载厚度 $0.5\ \text{m}$, 满载体积应变 0.5 。则根据本模型, 夹带机各部件相应的参数如下:

小麦粮团夹持面截面高度 $0.44\ \text{m}$, 面积 $0.379\ \text{m}^2$; 双侧气囊(弹垫)需提供 $988.1\ \text{N}$ 的压力, 单侧气囊(弹垫)需提供 $3\ 759.1\ \text{Pa}$ 的压强, 气囊(弹垫)当量体积模量 $7\ 518.0\ \text{Pa}$; 皮带单侧“外沿”长度 $0.33\ \text{m}$, 总带宽 $2.0\ \text{m}$; 设定传送带的速度为 $1.0\ \text{m/s}$, 则本机构提升效率可达 $1\ 034.1\ \text{t/h}$, 满足初拟提升效率的要求。

3 结论

利用现有的夹带机提升段的一般数学模型, 获得了为防止夹带横向移动导致物料外泄的改进模型, 如式(10), 利用该改进模型可以求出夹带所需的“外沿”长度, 如果 $\mu = \mu_e$, 则每侧所需的“外沿”

长度约为 $1/4$ 带宽度; 如果所夹持物料属于粘性材料或细颗粒材料, 则 μ_e 小于 μ , 当 $\mu_e = \mu/2$ 时, 则每侧所需的“外沿”长度约为 $1/3$ 带宽度, 以保证外加荷载荷力从承载带边缘转移到与覆盖带夹持物料的中心处。

借助牛顿经典力学, 推导出入料处到包料处的长度的计算方法, 式(12)。得出入料处到包料处的长度与颗粒与皮带间的摩擦系数、物料颗粒出入料口速度以及入料口倾斜角有关, 与颗粒的质量、大小无关。

基于对赫兹接触定理公式求导, 建立得到被夹持物料的层数(物料厚度)、物料最外层与中心(质心)所受挤压力之间关系的方程组, 式(18)、式(19)和式(20)。利用该方程组可确定弹性散粒体垂直提升段夹持面跨度与夹持面高度之间的函数关系。仅需初拟设置跨度 L 便可求得物料垂直提升所需的夹持力(压强), 对之前采用的槽式提升机相关设计公式和经验公式进行了改良, 提高了计算的精度。并由此可进一步推导出电机功率、托辊的压力等参数, 为具体压带机分部件的设计、研究、优化等做出一定的理论支撑, 也可为其它相似的夹带式运输机提供研究思路 and 理论借鉴。

参考文献:

- [1] 张钺. 国内外带式输送机的应用概况[J]. 矿山机械, 2001(5): 55-60.
- [2] 熊康士. 我国垂直提升胶带机的前景[J]. 中州煤炭, 1988(3): 46-47.
- [3] 陈毅永. 垂直夹带输送机的关键技术[J]. 起重运输机械, 1988(2): 7-16.
- [4] 章崇任. 新型皮带机在建设工程中的应用[J]. 建筑机械化, 1991(1): 33-34.
- [5] 张挺. 有限空间大倾角提升设备选型综述[J]. 山西焦煤科技, 2015(1): 54-56.
- [6] 张书根. 大倾角下山施工时皮带输送机的应用与探讨[A]. 中国煤炭学会成立五十周年系列文集 2012 年全国矿山建设学术会议专刊(上)[C]. 中国煤炭学会煤矿建设与岩土工程专业委员会, 2012: 2.
- [7] 孙其诚, 王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展, 2008(1): 87-100.
- [8] 许启铿, 陈家豪, 王录民. 小麦力学参数的三轴压缩试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015(5): 101-105.
- [9] 孟婷婷, 周柏玲, 石磊, 田志芳. 杂粮粉与小麦粉粘度特性比较研究[J]. 粮油食品科技, 2012(5): 19-20.
- [10] 许志新. 小麦水分与容重变化的关系[J]. 粮油食品科技, 2013(3): 25-26.
- [11] 赵永志, 江茂强, 徐平, 郑津洋. 颗粒堆内微观力学结构的离散元模拟研究[J]. 物理学报, 2009(3): 1819-1825.
- [12] 武文斌. 同步输送机的形式及设计[J]. 食品与机械, 1994(3): 22. 