

圆管带式输送机输送带横向弯曲刚度量化研究新范式

袁超¹ 朱昊¹ 俞俊瑞¹ 胡成全² 孙国栋² 张媛^{1,2} 张梦超^{1,2}

(1. 山东科技大学 机械电子工程学院, 青岛 266590)

(2. 力博重工科技股份有限公司, 泰安 271099)

摘要:【目的】圆管带式输送机作为重要的散装物料环保运输设备,其输送带横向弯曲刚度的量化至关重要。研究旨在解决钢丝绳芯输送带横向弯曲刚度的量化问题。【方法】首先,通过分析标准ISO 703:2017,确定了横向弯曲刚度的测量分析方法;其次,建立了圆管带式输送机钢丝绳芯输送带的数值模型及3D仿真模型,利用数值分析法和有限元法获取了不同方案下的输送带变形数据;最后,通过误差分析对比,论证了模型的合理性;并基于钢丝绳芯输送带的弹性模量、线质量及截面几何参数对成槽性的函数依赖关系,建立了输送带横向弯曲刚度的广义挠度公式。【结果】研究结果为解决圆管带式输送机输送带横向弯曲刚度的量化问题提供了新视角,并为设备的设计与工程实践奠定了基础。

关键词: 横向弯曲刚度; 钢丝绳芯输送带; 数值仿真; 有限元法

中图分类号: TH222 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2026.01.012

0 引言

随着工业4.0的到来,环境问题日益突出,各种密闭性带式输送设备广受青睐,连续运输机械成为现代工业和物流运输业的重要技术装备^[1-3]。圆管带式输送机自投入实际应用以来,就在世界范围内得到日益广泛的应用。圆管带式输送机克服了传统带式输送机的缺点^[4](如输送过程会使物料暴露在空气中,出现粉尘、扬尘等情况)^[5]并进行发展创新,是一种高效环保的连续带式输送设备,符合特种运输行业倡导的绿色环保与可持续发展的要求和理念^[6],显示出广阔的发展前景。

相对于普通带式输送机,圆管带式输送机将输送带卷成圆管状的方式虽然实现了封闭运输,但是由于输送带是被安装在管形保持(Pipe Shape Keeping, PSK)窗板上的6个托辊约束形成的圆管状^[7],这就使得输送带与托辊之间的接触力不仅取决于输送带和运输物料的质量,还取决于输送带本身的弯曲性能,即输送带的横向弯曲刚度。该弯曲性能所产

生的力被称为成形力^[8]。一般来说,输送带纵向表现的坚硬性,是由输送带的机械响应,即主要由织物层的钢丝绳或者纺织物的弯曲导致的^[9];在横向上,输送带更加灵活,主要是由橡胶化合物及横向织物层导致的。

对于输送带来说,过高的横向弯曲刚度,即输送带较“硬”,虽然可保证输送带的成管性,但易造成输送带与托辊之间的作用力增加,加剧输送带与托辊组之间的磨损,增大圆管带式输送机的磨损程度;若圆管带式输送机输送带的横向弯曲刚度过低[图1(a)],即输送带较“软”,则输送带难以形成圆管状,在圆管带式输送机运行过程中容易出现扭管、塌管等故障;若圆管带式输送机出现翘边现象[图1(b)],即输送带较“硬”,则极大增加了输送系统运行过程中的运行阻力。对于输送机来说,量化需要输送带的横向弯曲刚度,以确定结构变形,该变形表示输送带形成足以满足所需形状(槽状或者管状)的能力。分析表明,输送带的横向弯曲模量差异较

收稿日期:2024-09-18

基金项目:泰安市科技创新重大专项(RD202202);山东省重点研发计划(竞争性创新平台)项目(2023CXPT062);“十四五”国家重点研发计划项目(2023YFC2907304)

作者简介:袁超,男,1999年生,河南光山人,在读硕士研究生;主要研究方向为圆管带式输送机高效稳定运行关键技术研究及矿山智能化;m13782979142@163.com。

张梦超(通信作者),男,1995年生,山东招远人,讲师;主要研究方向为智能矿山连续运输设备的设计与开发;zhangmc1995@sdust.edu.cn。

引用格式:袁超,朱昊,俞俊瑞,等.圆管带式输送机输送带横向弯曲刚度量化研究新范式[J].机械传动,2026,50(1):92-99.

YUAN Chao, ZHU Hao, YU Junrui, et al. A new paradigm for quantifying lateral bending stiffness of belts on pipe belt conveyors[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2026, 50(1): 92-99.



免费获取

大,易导致输送带的变形差异较小。弯曲刚度与输送带变形,会影响输送机的压陷阻力,进而影响系统驱动功率的选择^[10]。目前,在工程实践中,不合适的输送带选型^[11]、不同横向弯曲刚度的输送带选择和相关设计等原因,导致圆管带式输送机在运行过程中发生许多工程问题,直接或间接地造成一系列的经济损失。

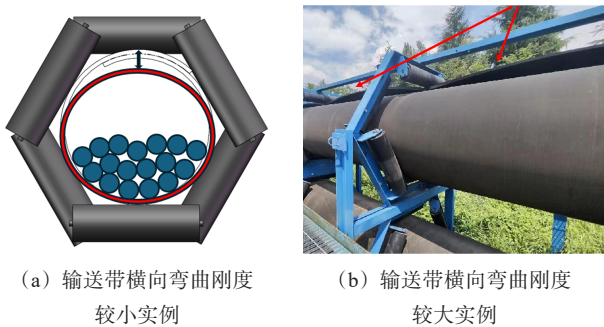


图1 圆管带式输送系统典型故障

Fig. 1 Typical faults of the pipe belt conveyor system

因此,还需要进一步量化横向弯曲刚度。因为它表征了托辊表面受到的与输送带之间的接触载荷,该载荷是从扁平状的输送带约束成为圆管状时出现的;而且,输送带的线质量和几何形状同样影响输送带与托辊的接触力。本文旨在确定相关的量化计算方法,认识其假设和局限性,将计算方法进行相互比较,并通过输送带的相关参数对输送带的成槽性进行影响分析。这对于输送带横向弯曲刚度的研究及输送带模型的建立具有一定的意义。

1 输送带横向弯曲刚度测量方法及分析模型

1.1 输送带成槽性测量方法

尽管输送带的横向弯曲刚度是圆管带式输送机输送系统的一个重要参数,但目前国家标准中还未系统规定横向弯曲刚度的具体要求。ISO 703:2017标准中对输送带成槽性的具体试验方法进行了描述,该试验测试是基于实际经验建立的^[12],如图2所示。标准中将输送带成槽性(悬垂度)定义为输送带产生的最大挠度与输送带最大宽度之比,即

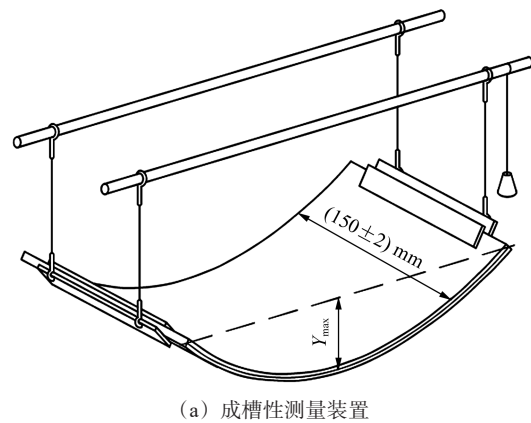
$$\chi_0 = \frac{Y_{\max}}{B} \quad (1)$$

式中, Y_{\max} 为输送带的最大挠度; B 为输送带的最大宽度。

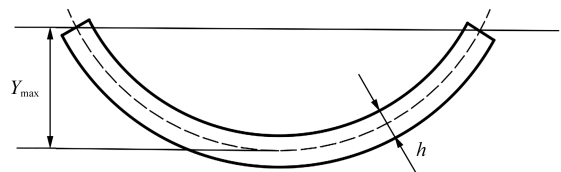
1.2 输送带横向弯曲刚度数值分析模型

输送带的数值分析模型可以直接根据输送带的成槽性来量化输送带的横向弯曲刚度。通过改变所涉及的参数,可直接根据函数依赖性来确定参数对输送带横向弯曲刚度的影响。经过试验数据充分验

证后的数值模型与解析解一致,能够更好地说明模型的准确性。同时,可以通过修改或增加函数的阶数来实现超出解析解限制的目的。



(a) 成槽性测量装置



(b) 输送带截面图

图2 输送带成槽性测量方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the conveyor belt troughing measurement method

为了选择相关分析模型,同时考虑输送带的复合材料特性和硫化成型工艺^[13],需要做出相应的假设,即:在最小应变的情况下,沿宽度方向的弹性弯曲模量恒定。因此,研究仅限于具有均匀带结构的管状输送带,而对于带结构不均匀的输送带,应该补充和修订额外的测定方法。

在分析输送带的样品尺寸时,输送带结构可以简化成梁结构。设 b 为输送带宽度, $b=(150\pm 2)$ mm; h 为输送带的厚度。在这种情况下,输送带宽度 b 就是结构的跨度。

Euler-Bernoulli理论^[14-15]针对输送带横向弯曲问题的解释较好。基于该理论,可以直接求解集中力作用下梁结构的非线性弯曲问题。而圆管带式输送机输送带的横向弯曲刚度往往是由分布载荷作用导致的输送带卷曲。对于分布载荷导致的非线性弯曲,Euler-Bernoulli理论并不能直接求解,只能用近似的方法和假设进行数值处理或者等效成伪线性弯曲问题或简化的非线性系统。其中,输送带简化梁上的均布载荷 q 作用下造成的横向表面位移 w 的Euler-Bernoulli方程为

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q \quad (2)$$

式中, E 为有效弹性模量; I 为输送带等效梁的转动

惯量。

除非线性弯曲外, Euler-Bernoulli 理论还可以适应轴向拉伸, 增加1个2阶拉伸项, 即

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q + EA\varepsilon \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3)$$

式中, A 为横截面积, $A = bh$; ε 为轴向延伸应变, $\varepsilon = N/(EA)$, 其中, N 为轴向拉伸力。

式(3)通过构成具有4阶导数的弯曲项和考虑轴向伸长的附加项反映了梁对横向载荷的机械响应。

因为 Euler-Bernoulli 理论的局限性, 没有考虑横向剪切效应, 输送带等效梁模型理论上更适合于作用在偏厚且细长梁结构的 Timoshenko 理论^[6]。与 Euler-Bernoulli 理论结构不同, Timoshenko 理论允许由于剪切变形而在横截面和弯曲中性轴之间进行额外的旋转。除了弯曲和拉伸项外, Timoshenko 控制方程还有1个剪切附加项, 即

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q + EA\varepsilon \frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{kEI}{GA} \frac{d^2 q}{dx^2} \quad (4)$$

式中, k 为矩形截面系数, $k = 1.2$; G 为剪切模量。

对于圆管带式输送机, 输送带沿线的长度与宽度比巨大, 横截面与中性轴之间的额外旋转变得其微小。因此, Timoshenko 理论可以收敛到 Euler-Bernoulli 理论。

1.3 输送带等效梁模型问题分解及模型建立

本文提出一种量化输送带横向弯曲刚度新范式, 能够很好地解释圆管带式输送带等效梁模型。基于 Euler-Bernoulli 理论对输送带的分析模型进行阐释, 并在有限元法(Finite Element Method, FEM)内求解遵循 Timoshenko 理论的数值模型。FEM Timoshenko 梁模型包含了非线性弯曲结构中的中性轴拉伸、剪切变形以及结构拉伸引起的横截面变薄效应。

假设梁结构的非线性弯曲不可扩展, 且考虑输送带自重, 将输送带等效梁问题分解为输送带简化梁和输送带等效梁模型。

图3所示为输送带简化梁模型。将梁的自由端设置为坐标系的原点, 并根据 Euler-Bernoulli 弯曲方程可得

$$\frac{d\theta}{ds} = -\frac{M}{EI} \quad (5)$$

因此可得

$$EI \frac{d^2 \theta}{ds^2} = -\frac{dM}{ds} = -qs \cos \theta \quad (6)$$

式中, θ 为任意一点的坡角; s 为从自由端到输送带任意一点的弧长; M 为作用在输送带简化梁上的弯矩。

由图3可得,

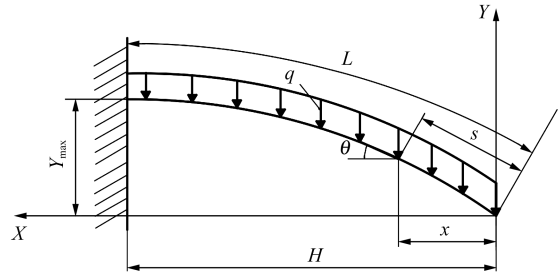


图3 输送带简化梁模型

Fig. 3 Simplified beam model of the conveyor belt

$$\cos \theta = \frac{dx}{ds} \quad (7)$$

根据边界条件

$$\begin{cases} x = 0 \\ \frac{d\theta}{ds} = 0 \\ \frac{d^2 \theta}{ds^2} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

可得

$$\cos \theta \frac{d\theta}{ds} = -\frac{q}{2EI} x^2 \quad (9)$$

其中,

$$\frac{d\theta}{ds} = \cos \theta \frac{d\theta}{dx} \quad (10)$$

因此可得

$$\begin{aligned} \int \cos^2 \theta d\theta &= \int -\frac{q}{2EI} x^2 dx \Rightarrow \\ \frac{1}{2} (\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta) &= -\frac{q}{6EI} x^3 + C_3 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, C_3 为积分求解时产生的不定积分常数。

根据边界条件

$$\theta = 0, x = H \quad (12)$$

式中, H 为梁的水平投影。

因此,

$$C_3 = \frac{qH^3}{6EI} \quad (13)$$

同时, 对输送带梁单元进行微元代换, 可以得到

$$\theta = \frac{qH^3}{6EI} (1 - \frac{x^3}{H^3}) \quad (14)$$

另一方面, 由于不可延伸的简化梁结构最大挠度 Y_{\max} 和结构最大长度 L 都与 θ 相关, 由此可得如下关系

$$L = \int_0^H \sec \theta dx \quad (15)$$

$$Y_{\max} = \int_0^H \tan \theta dx \quad (16)$$

利用 Simpson 积分法对式(15)、式(16)进行数值积分, 可以得到

$$L = \int_0^H \sec \theta dx \approx \frac{H}{3n} \sum_{j=1}^{n/2} (\sec \theta_{2j-2} + 4\sec \theta_{2j-1} + \sec \theta_{2j}) \quad (17)$$

$$Y_{\max} = \int_0^H \tan \theta dx \approx \frac{H}{3n} \sum_{j=1}^{n/2} (\tan \theta_{2j-2} + 4\tan \theta_{2j-1} + \tan \theta_{2j}) \quad (18)$$

式中, n 为划分积分区间 $[0, H]$ 的子区间总数; j 为分段抛物线逼近的组号, $j = 1, 2, \dots, n/2$ 。

图4所示为输送带等效弯曲梁模型。由图4可知, 梁的变形量可以通过简支梁两端距离 $2L$ 和最大挠度 Y_{\max} 表示。Euler-Bernoulli 方程建立了变形结构的弯矩和曲率之间的关系, 分析上述输送带等效梁模型, 同样可以得到

$$EI \frac{d^2\theta}{ds^2} = -q(L - S)\cos \theta \quad (19)$$

式中, S 为输送带梁结构的弧长。

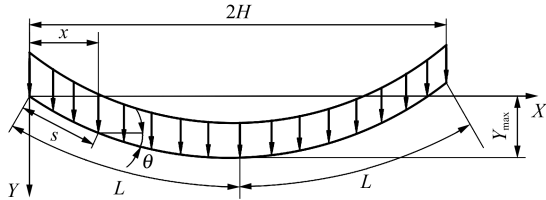


图4 输送带等效弯曲梁模型

Fig. 4 Equivalent bending beam model of the conveyor belt

根据边界条件

$$\begin{cases} \theta = 0, x = H \\ \frac{d\theta}{ds} = 0, x = 0 \\ \frac{d^2\theta}{ds^2} = 0, x = 0 \end{cases} \quad (20)$$

可得输送带任意位置的梁的角度, 即

$$2\theta \approx \sin 2\theta = \frac{qH^3}{EI} \left(\frac{4}{3} - 2\frac{x^2}{H^2} + \frac{2x^3}{3H^3} \right) \quad (21)$$

$$\theta = \frac{qH^3}{2EI} \left(\frac{4}{3} - 2\frac{x^2}{H^2} + \frac{2x^3}{3H^3} \right) \quad (22)$$

1.4 模型优化及修改

输送带在产生结构变形后, 会产生一定横向拉伸位移 Δ , 且该横向拉伸位移 $\Delta = 2(L - l_x)$ 。其中, l_x 为任意一点 x 所代表的弧长。由图4可知, 结构的弯矩可以表示为任意位置 x 的函数, 其中, $0 \leq x \leq 2l_x$, 因此可得

$$M(x) = qLx - qS \frac{x}{2} \quad (23)$$

为降低模型的复杂性, 用水平位移表示弧长, 即 $S(x) = \Delta + \Delta(x)$ (24)

根据不同的载荷和边界条件, $\Delta(x)$ 的几个近似函数为

$$\begin{cases} \Delta(x) = \Delta = C_{\text{con}} \\ \Delta(x) = \Delta \sqrt{\frac{x}{2l_x}} \\ \Delta(x) = \Delta \sin \frac{\pi x}{4l_x} \end{cases} \quad (25)$$

式中, C_{con} 为常数。

因此, 式(23)中的弯矩为

$$M(x) = -\frac{q}{2}(x^2 - 2Lx) \quad (26)$$

为进一步解决问题, 引入函数 $\Lambda(x)$, 有

$$\Lambda(x) = \frac{d^2y}{dx^2} / [1 + (\frac{dy}{dx})^2]^{3/2} \quad (27)$$

$$\Lambda(x) = \frac{d\theta}{dS} = -\frac{M(x)}{EI} = \frac{q}{2EI}(x^2 - 2l_x x) \quad (28)$$

$$\sin \theta = \int \Lambda(x) dx + C = \frac{q}{6EI}(x^3 - 3l_x x^2) + C \quad (29)$$

式中, C 为积分求解时产生的不定积分常数。

根据边界条件

$$\theta = 0, x = l_x \quad (30)$$

可得

$$\theta \approx \sin \theta = \frac{q}{6EI} [x^3 - 3l_x x^2 + 2l_x^3] \quad (31)$$

1.5 数值模拟求解

对输送带简化梁模型进行数值模拟。确定输送带等效梁结构的几何参数, 如弹性模量 E 、惯性矩 I 以及施加在输送带上的均布载荷 q 等; 在梁结构上施加均布载荷, 均布载荷的位置与节点 x 的水平投影相同; 施加约束条件, 并确定梁的位移边界条件, 确定单元刚度矩阵, 方便整体刚度矩阵叠加; 求解位移方程 $ka = P$ 。其中, k 为整体刚度矩阵; a 为广义节点位移向量; P 为整体载荷向量。图5所示为建立的数值模型。

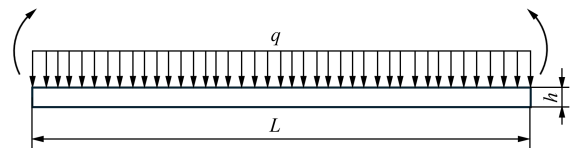


图5 输送带等效梁数值模型

Fig. 5 Numerical model of the conveyor belt equivalent beam

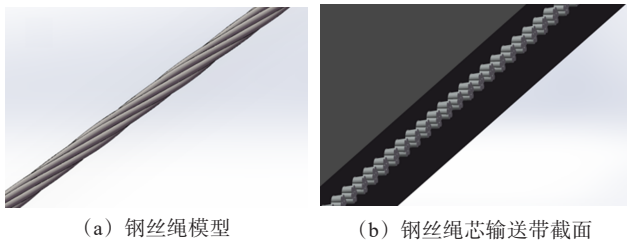
针对输送带梁结构模型进行 Matlab 数值仿真。对输送带简化梁结构的弯曲编写更高阶的剪切方程, 设置 25 个节点载荷; 在输送带等效梁结构设置 50 个节点载荷。设置横向模量函数及惯性矩函数, 并在每个节点施加外部载荷和弯矩, 添加每个节点的位移约束, 对输送带设置弹簧刚度, 编写求解器。

2 FEM 模拟仿真

采用 Ansys 软件研究输送带等效梁结构受力情况, 验证等效梁模型求解圆管带式输送机输送带成

管问题的合理性，并对影响输送带横向弯曲刚度的主要参数，如输送带弹性模量 E 、输送带线质量 q' 、输送带几何参数(带宽 B 、带厚 h)进行分析验证。

圆管带式输送机钢丝绳芯输送带模型如图6所示。根据标准HG/T 4224—2011^[17]，选择输送带规格为St3150，钢丝绳根数为119，抗拉强度为2500 N/mm，公称管径为500 mm，带宽为1850 mm，输送带厚度为31 mm，长度为(150±1) mm，横向弹性模量为41 MPa，承受外均布载荷大小为100 N/mm，泊松比为0.49。



(a) 钢丝绳模型 (b) 钢丝绳芯输送带截面

图6 钢丝绳芯输送带模型

Fig. 6 Model of the steel cord conveyor belt

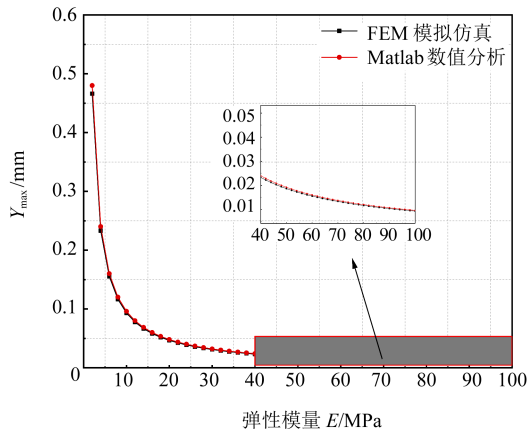
对于有限元建模，除了非线性弯曲变形、轴向拉伸、剪切效应外，输送带等效梁模型还考虑了由于结构延伸而发生的“变薄”效应，是通过将梁的横截面缩放为轴向拉伸的函数实现的。

2.1 输送带弹性模量对输送带成形的影响

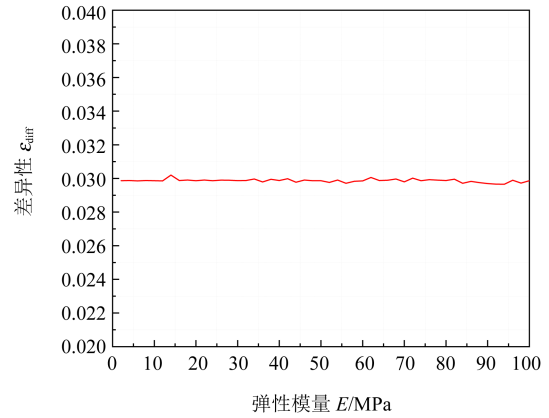
给定输送带的几何形状，问题集中在确定输送带的弹性模量上(弹性模量与惯性矩的乘积是输送带等效梁的弯曲刚度)。为进行分析论证，可将数值解 $E_{Analysis}$ 与有限元解 E_{FEM} 进行对比。设定具体差异函数描述结果差异性，表达式为

$$\varepsilon_{diff} = \left| \frac{E_{FEM} - E_{Analysis}}{E_{FEM}} \right| \quad (32)$$

同时，可以设定差异以更加直观地进行比较，如图7所示。针对仿真过程输送带变形曲线的选择如图8所示。



(a) 输送带变弹性模量仿真对比



(b) 变弹性模量差异性

图7 输送带弹性模量对成形的影响

Fig. 7 Influence of the conveyor belt elastic modulus on the forming

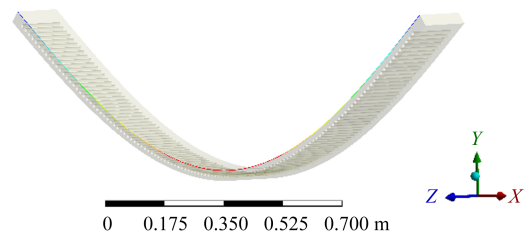


图8 输送带仿真结果

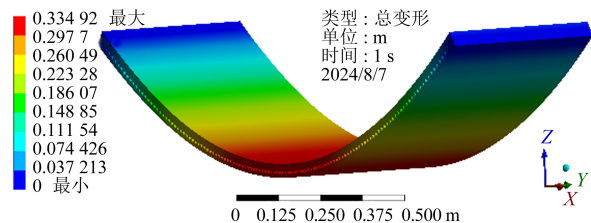
Fig. 8 Simulation results of the conveyor belt

根据输送带不同弹性模量进行仿真研究。由图7(a)可知，随着输送带横向弹性模量的不断增加，输送带的悬垂度不断下降；在0~10 MPa时，输送带悬垂度急剧下降，下降趋势逐步趋于平缓。在不同方法的差异性比较中，针对弹性模量这一输送带物理参数，差异性集中在3%，表明数值模拟分析与FEM模拟有较强的相关一致性。

2.2 输送带不同线质量对输送带成形的影响

图9所示为输送带在相同横向几何形状(B 、 h 、 b)和不同线质量 q' 的参数集下，输送带的线质量对输送带成槽性的影响。图10所示为针对输送带样本中心位置产生的偏移，在所建立的数学模型下通过Matlab数值分析得到的与FEM模拟仿真相似的函数依赖趋势。

由图9、图10可知，表征过大的线质量或者过小的线质量会增加输送带梁结构中的中性轴的拉伸效应。结果表明，针对不同线质量的输送带，采用FEM模拟仿真与Matlab数值分析进行求解时，误差小于20%，且差异值集中在10%。这表明，Matlab数值分析与FEM模拟仿真表现出较强的相关性。



(a) 线质量为 $0.5q'$ 时的输送带变形仿真

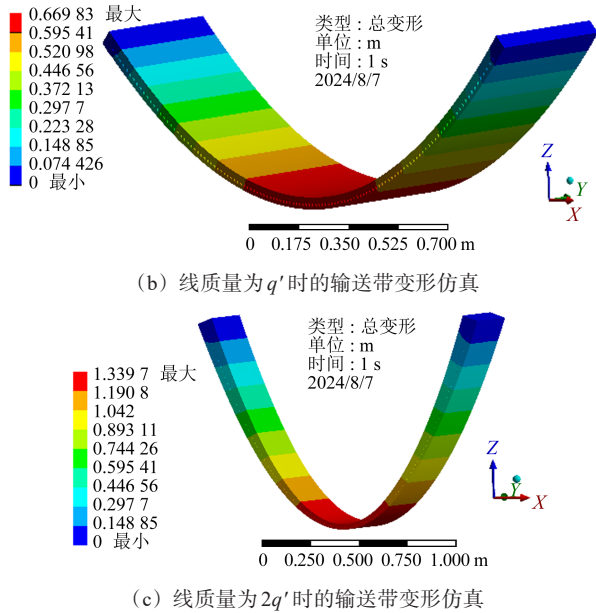
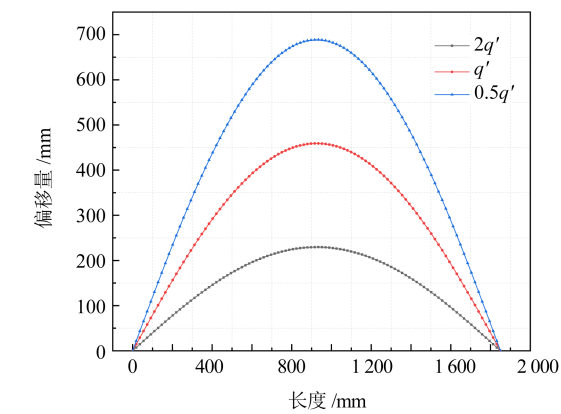


图9 不同线质量下的输送带变形仿真

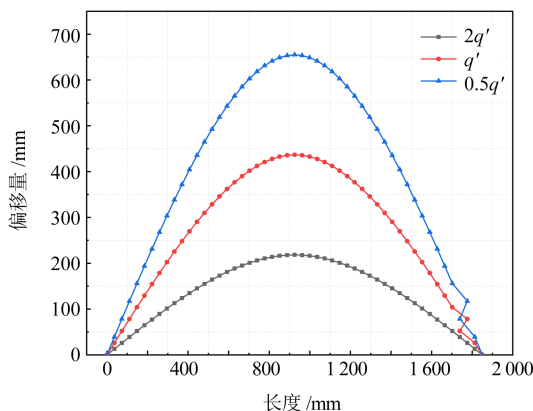
Fig. 9 Simulation of the conveyor belt deformation with different linear masses

2.3 输送带不同几何形状截面对输送带成型的影响

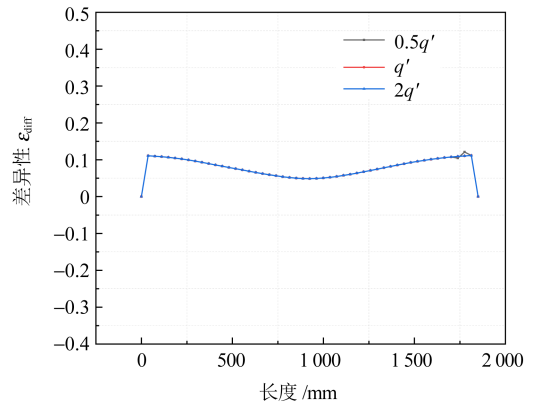
圆管带式输送机的输送带钢丝绳芯的材料和钢丝绳的布局设计影响着输送带的几何形状和输送带的质量,而输送带的几何形状对输送带的质量及输送带的机械响应同样有重要影响。



(a) FEM模拟仿真



(b) Matlab数值分析



(c) 不同线质量的差异性

图10 不同线质量对成型的影响

Fig. 10 Influence of the variable linear mass on the forming

在本文中,输送带的几何形状为整体最大带宽 B 、输送带厚度 h 及其比值(也称为结构的细长比, B/h)。尽管这种比值关系在工程实践中未被选作圆管带式输送机输送带的设计参数,但是在输送带的研究中, B/h 作为一个描述输送带横向结构行为的独立参数,表现出对输送带横向弯曲刚度的高度依赖性。

在进行模拟仿真时,选取不同几何结构的钢丝绳芯输送带,具体输送带参数如表1所示。

表1 输送带参数

Tab. 1 Parameters of the conveyor belt

| 参数 | 规格 | | | |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 输送带类型 | St3150 | St1000 | St2000 | St2000 |
| 输送带尺寸(长×宽×厚)/ (mm×mm×mm) | 150× 1 850×31 | 150× 1 850×18 | 150× 1 850×22 | 150× 1 300×15 |
| 钢丝绳直径×根数/mm | 8.1×119 | 4×147 | 6×147 | 6×147 |
| 输送带质量/kg | 5.6 | 4.3 | 5.2 | 4.7 |
| 细长比(B/h) | 59.677 | 102.778 | 84.091 | 86.666 |

如图11所示,对输送带的定性分析表明,对于相同的弹性模量,较薄的输送带相较于较厚的输送带会具有更大的挠度。该现象也表示较厚或者较窄的结构产生的挠度行为与Euler-Bernoulli方程的弯曲项有关。

结果表明,对于输送带的最大挠度,随着 B/h 的增加,输送带最大偏移曲线不断减小,这也解释了结果曲线对成槽性的敏感性。对于输送带相同的细长比 B/h ,不同横截面几何尺寸值的函数曲线表现一致。这表明,输送带的成槽性数值由 B 、 h 联合决定对输送带梁模型的影响,而并非由 B 、 h 某一单独参数决定。

由于几何刚化效应,该差异随着细长比 B/h 的增加而增加。由于输送带数学模型仅假设非线性弯曲,而FEM模型还包括轴向拉伸效应。因此,对于 B/h

比较小的结构,即使输送带的成槽性值比较小,差异值也较大。

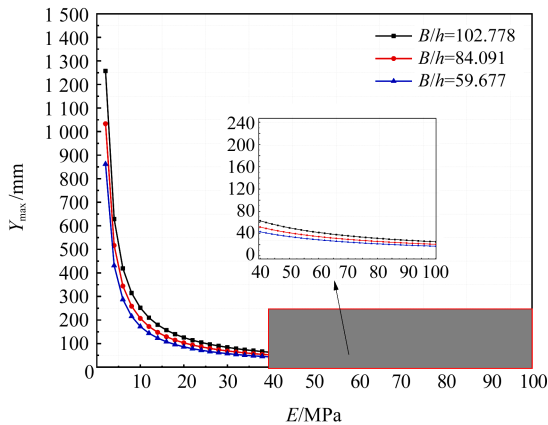


图 11 输送带不同几何形状的偏移量对比

Fig. 11 Comparison of offsets for different geometric shapes of the conveyor belt

由于剪切应力的作用,有限元模型中遵循的 Timoshenko 理论包含剪切应力效应,但 Euler-Bernoulli 理论中未包含剪切应力效应,故不适合较厚的输送带。因此,建立几何形状、输送带线质量和成槽性等输送带输入参数之间的函数依赖性,推导出输送带广义载荷挠度计算式,即

$$\chi = K_T^{\text{beam}} \frac{q'B^3}{EI} \quad (33)$$

式中, K_T^{beam} 为输送带梁横向弯曲刚度修正系数,用于描述成槽性 (Y_{max}/B) 与圆管带式输送机设计参数之间的关系。

图 12 所示为输送带不同几何参数成形曲线。由图 12 可知,对于成槽性,与 $B/h=84.091$ 、 $B/h=86.666$ 时的形成曲线基本相同。这一现象表明,输送带的成槽性表征并不单独取决于输送带宽度或者输送带厚度,考虑 B/h 的比值能够将输送带的横向弯曲刚度量化得更加充分,更能表现输送带的横向弯曲刚度。

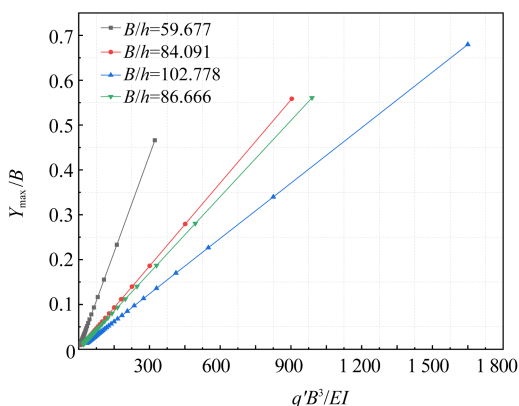


图 12 输送带不同几何参数的成形曲线

Fig. 12 Forming curves of the conveyor belt with different geometric parameters

3 结论

为量化钢丝绳芯输送带的横向弯曲刚度,建立了输送带弯曲几何模型;针对输送带横向弯曲挠度,用 Euler-Bernoulli 模型和 Timoshenko 模型建立了输送带等效梁数值模型,并对模型进行 Simpson 积分法近似逼近求解。针对输送带等效梁模型,分别使用 FEM 模拟仿真和 Matlab 数值分析进行了求解。得出以下主要结论:

1) 通过对输送带横向弯曲刚度的影响因素(输送带弹性模量、输送带线质量、输送带截面几何形状等)进行分析验证,验证了输送带等效梁模型的有效性。

2) 提出输送带广义载荷挠度公式,为圆管带式输送机输送带横向弯曲刚度的分析提供了参考与依据。

参 考 文 献

- [1] BAI C G, DALLASEGA P, ORZES G, et al. Industry 4.0 technologies assessment: a sustainability perspective [J]. International Journal of Production Economics, 2020, 229: 107776.
- [2] FEDORKO G, MOLNÁR V, VASIE M, et al. Proposal of digital twin for testing and measuring of transport belts for pipe conveyors within the concept Industry 4.0 [J]. Measurement, 2021, 174: 108978.
- [3] MOLNÁR V, FEDORKO G, HOMOLKA L, et al. Utilisation of measurements to predict the relationship between contact forces on the pipe conveyor idler rollers and the tension force of the conveyor belt [J]. Measurement, 2019, 136: 735-744.
- [4] MOLNÁR V, FEDORKO G, STEHLÍKOVÁ B, et al. Statistical approach for evaluation of pipe conveyor's belt contact forces on guide idlers [J]. Measurement, 2013, 46(9): 3127-3135.
- [5] SEMRÁD K, DRAGANOVÁ K. Non-destructive testing of pipe conveyor belts using glass-coated magnetic microwires [J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8536.
- [6] DOS SANTOS E, SANTOS L, RIBEIRO FILHO P R C F, MACÊDO E N. Indentation rolling resistance in pipe conveyor belts: a review [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(4): 230.
- [7] STEHLÍKOVÁ B, MOLNÁR V, FEDORKO G, et al. Research about influence of the tension forces, asymmetrical tensioning and filling rate of pipe conveyor belt filled with the material on the contact forces of idler rolls in hexagonal idler housing [J]. Measurement, 2020, 156: 107598.
- [8] ZHENG Q J, XU M H, CHU K W, et al. A coupled FEM/DEM model for pipe conveyor systems: analysis of the contact forces on belt [J]. Powder Technology, 2017, 314: 480-489.

- [9] MOLNAR V, FEDORKO G, STEHLIKOVA B, et al. Influence of tension force asymmetry on distribution of contact forces among the conveyor belt and idler rolls in pipe conveyor during transport of particulate solids[J]. *Measurement*, 2015, 63: 120-127.
- [10] BAJDA M, HARDYGÓRA M. Analysis of the influence of the type of belt on the energy consumption of transport processes in a belt conveyor[J]. *Energies*, 2021, 14(19): 6180.
- [11] FEDORKO G, MOLNAR V, ŽIVČÁK J, et al. Failure analysis of textile rubber conveyor belt damaged by dynamic wear[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 28: 103-114.
- [12] ZAMIRALOVA M E, LODEWIJKS G. Measurement of a pipe belt conveyor contact forces and cross section deformation by means of the six-point pipe belt stiffness testing device[J]. *Measurement*, 2015, 70: 232-246.
- [13] LONG X Y, LI X G, SUN M W, et al. Quantitative analysis of bond and splice strength of steel cord conveyor belt[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, 34(14): 1544-1555.
- [14] BLASZCZYK T. Analytical and numerical solution of the fractional Euler-Bernoulli beam equation[J]. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2017, 12(1): 23-34.
- [15] IVANNIKOV V, TIAGO C, PIMENTA P M. On the boundary conditions of the geometrically nonlinear Kirchhoff-Love shell theory[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(18): 3101-3112.
- [16] BECK A T, DA SILVA C R A. Timoshenko versus Euler beam theory: pitfalls of a deterministic approach[J]. *Structural Safety*, 2011, 33(1): 19-25.
- [17] 全国带轮与带标准化技术委员会输送带分技术委员会. 钢丝绳芯管状输送带: HG/T 4224—2011[S]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 1-6.
- National Technical Committee for Standardization of Pulleys and Belts, Conveyor Belt Subcommittee. Pipe conveyor belts of steel cord construction: HG/T 4224—2011[S]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 1-6.

A new paradigm for quantifying lateral bending stiffness of belts on pipe belt conveyors

YUAN Chao¹ ZHU Hao¹ YU Junrui¹ HU Chengquan² SUN Guodong²
ZHANG Yuan^{1,2} ZHANG Mengchao^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

(2. LIBO Heavy Industries Science & Technology Co., Ltd., Tai'an 271099, China)

Abstract: [Objective] The pipe belt conveyors are crucial equipment for bulk material transportation with significant environmental advantages. This study is aimed to quantify the lateral bending stiffness of steel cord conveyor belts. [Methods] Based on the analysis of standard ISO 703:2017, the measurement and analysis method for the lateral bending stiffness was determined. Numerical model and 3D simulation model of the steel cord conveyor belt were established. Deformation data under different schemes was obtained using numerical analysis method and finite element method. Error analysis was conducted to demonstrate the validity of the models. Furthermore, a generalized deflection formula for the lateral bending stiffness was derived based on the functional dependence of the belt's troughability on elastic modulus, linear mass, and cross-sectional geometric parameters. [Results] The results provide a new perspective for quantifying the lateral bending stiffness of pipe conveyor belts and offer a basis for their design and engineering practice.

Key words: Lateral bending stiffness; Steel cord conveyor belt; Numerical simulation; Finite element method

(编辑: 李立)