

粉末螺旋输送机的设计及有限元分析

郭 华¹, 周 健^{1*}, 张金建², 沈芳明², 李红军¹

¹浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

²浙江衢州永正锂电科技有限公司, 浙江 衢州

收稿日期: 2023年1月11日; 录用日期: 2023年2月24日; 发布日期: 2023年3月8日

摘 要

针对粉末螺旋输送机输送性能差、使用寿命低等问题, 以氢氧化锂粉末为输送物料, 对粉末螺旋输送机进行了整体结构设计。首先, 本文以输送螺杆为关键零部件, 将出料口位置的螺杆设计成无螺旋叶片, 根据实际生产输送要求以及氢氧化锂粉末特性, 确定了输送螺杆的参数数值; 然后, 采用有限元分析法对输送螺杆进行了强度和刚度分析, 验证了输送螺杆结构参数设计的合理性, 研究了输送螺杆叶片厚度对应力和变形的影响规律。其中应力最大值发生在输送螺杆叶片的根部位置处, 而最大变形发生在输送螺杆的叶片外缘; 随着螺旋叶片厚度的增加, 输送螺杆的最大等效应力、总变形在逐渐减小, 为输送螺杆的设计提供了一定的参考。

关键词

粉末螺旋输送机, 有限元分析法, 输送螺杆, 强度

Design and Finite Element Analysis of Powder Screw Conveyor

Hua Guo¹, Jian Zhou^{1*}, Jinjian Zhang², Fangming Shen², Hongjun Li¹

¹School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

²Quzhou Yongzheng Lithium Technology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

Received: Jan. 11th, 2023; accepted: Feb. 24th, 2023; published: Mar. 8th, 2023

Abstract

In response to the problems of poor conveying performance and low service life of powder screw

*通讯作者。

文章引用: 郭华, 周健, 张金建, 沈芳明, 李红军. 粉末螺旋输送机的设计及有限元分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 770-776. DOI: 10.12677/mos.2023.122073

conveyor, the overall structure design of powder screw conveyor is carried out with lithium hydroxide powder as the conveying material. First of all, this paper takes the conveying screw as the key component, and designs the screw at the outlet position without screw blade. According to the actual production conveying requirements and the characteristics of lithium hydroxide powder, the parameter values of the conveying screw were determined. Then, the strength and stiffness of the conveying screw were analyzed by finite element analysis to verify the rationality of the design of the conveying screw structure parameters. The effect of conveying screw blade thickness on stress and deformation was studied. The maximum stress occurs at the root of the conveyor screw blade, while the maximum deformation occurs at the outer edge of the blade of the conveyor screw. As the thickness of the screw blade increases, the maximum equivalent force and total deformation of the conveying screw gradually decreases, which provides a certain reference for the design of the conveying screw.

Keywords

Powder Screw Conveyor, Finite Element Analysis Method, Conveying Screw, Strength

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

螺旋输送机具有结构简单、安装方便、易于维修和便于多点装料等特点，广泛应用于化工原料、制药、润滑脂及其电池工业等领域[1] [2]。但近年来，随着市场对氢氧化锂粉末的需求不断增加，自动化生产线上对氢氧粉末的输送要求也越来越高[3] [4]。而输送螺杆作为螺旋输送机的关键零部件，直接影响着螺旋输送机的输送性能和使用寿命，成为了设计的关键问题[5] [6]。

目前，采用传统的设计方法对输送螺杆展开设计，难以满足新时代的需求。而有限元分析法能分析复杂的工程结构，模拟复杂材料的本构关系、边界条件和荷载，大幅度缩短产品的开发周期，评估产品的设计合理性，现已成为企业研发部门不可缺少的工具。因此，本文针对粉末螺旋输送机进行了整体结构设计，通过有限元分析法对输送螺杆进行了强度和刚度分析，得到了与之对应的应力和变形云图，验证了输送螺杆结构参数设计的合理性，分析了螺旋叶片厚度对应力及变形的影响规律，为输送螺杆的设计提供了参考。

2. 粉末螺旋输送机的设计

输送物料为氢氧化锂粉末，平均粒径为 D_0 为 358 μm 。氢氧化锂粉末的输送装置采用粉末螺旋输送机，其结构主要由螺筒 4、输送螺杆 5、变频电机 10、旋转阀 7、法兰出料口 1、凸缘联轴器 9 等部分组成，粉末螺旋输送机结构示意图如图 1 所示。粉末螺旋输送机的工作原理：来自上一道工序的粉末经过旋转阀定量出料到螺旋内部空间，在螺旋叶片的推动下沿着水平输送到法兰出料口，然后经过微波固体流量开关监测粉末流动情况，最终输送下一道工序中实现粉末粉碎。为了实现粉末螺旋输送机定量供料，只需对变频电机进行转速调节。在输送粉末过程中，粉末产生的飞扬现象在应用该装置后可以得到有效的抑制，且适合应用于粉末流动性差、供料稳定均匀以及输送效率较低的情况。同时为了提高粉末螺旋输送机或输送稳定性，在出料口位置处将输送螺杆设计成无螺旋叶片。

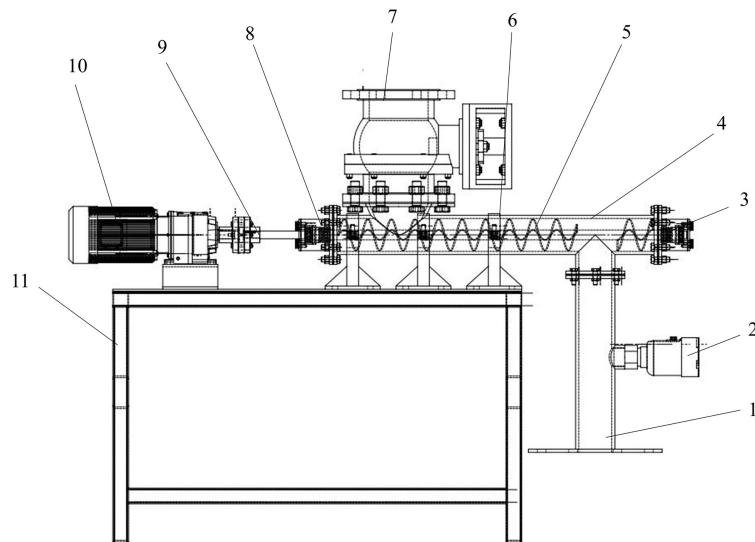


Figure 1. Structure diagram of powder screw conveyor
图 1. 粉末螺旋输送机结构示意图

2.1. 螺旋直径

螺旋直径的确定主要根据粉末特性、输送能力以及结构布置形式等[7]。本文输送螺杆采取结构布置形式为水平，输送量 $Q = 1200 \text{ kg/h}$ ，螺旋直径的通用计算公式为：

$$D = \left(\frac{Q}{47KA\varphi\rho} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中： K 为螺距与螺旋直径的比值，取 0.8； φ 为填充率，取 0.4； A 为物料综合系数，由于氢氧化锂粉末为粉状以及具有较弱的磨琢性，根据物料综合特性取 75； ρ 为物料的堆积密度，氢氧化锂粉末堆积密度为 907 kg/m^3 。计算得出螺旋直径 $D = 67 \text{ mm}$ ，经过圆整取螺旋直径为 75 mm 。

2.2. 螺旋轴径与螺距

当螺旋直径 D 和输送量 Q 确定后，螺旋轴径和螺距两者直接影响输送螺杆的强度和刚度，决定了螺旋的输送状态[8]，一般按照如下公式确定：

$$d = (0.2 \sim 0.35)D \quad (2)$$

$$s = KD \quad (3)$$

式中： d 为螺旋轴径，mm； s 为螺距，mm。经过计算得出螺旋轴径的范围为 $15 \leq d \leq 26 \text{ mm}$ ，对于标准水平布置的螺旋输送机或者流动性较好的物料，通常 K 一般取 0.8~1.0，对此螺距的范围为 $60 \leq s \leq 75 \text{ mm}$ 。为了更好地保证粉末螺旋输送机的输送能力以及输送螺杆具有较高的强度，输送螺杆的结构尺寸一般设计偏大，结合实际生产厂商的加工能力，最终确定螺旋轴径 d 为 26 mm ，螺距 s 为 75 mm 。

2.3. 间隙

螺旋叶片外端与螺筒之间的间隙会影响螺旋输送的精度和功率。物料在螺旋输送过程中受到叶片的挤压，叶片前端的粉末向前滑移，导致叶片后端形成一定的空隙，影响了各个螺距内物料的填充状态，降低了螺旋的输送精度。由于氢氧化锂粉末粒径较小，当间隙 $\tau < d$ 时，若输送螺杆的刚度不足，很容易

造成物料的堵塞或发生故障；当间隙 $\tau = d$ 时，容易物料发生卡壳并加大螺旋输送的能量损耗，导致物料的破损。因此，间隙应大于粉末最大粒径，同时间隙也不宜过大，过大容易降低粉末的输送精度，因此间隙的选取应在 2~7 mm，最终选取间隙为 4.5 mm。

3. 输送螺杆的有限元仿真分析

3.1. 输送螺杆有限元前处理

输送螺杆选用的材料为 304 不锈钢，查阅相关材料手册，常温下密度为 7930 kg/m^3 ，泊松比为 0.3，抗拉强度为 620 MPa，屈服强度为 310 MPa，杨氏模量为 1.94×10^{11} 。在输送过程中，输送螺杆所受的载荷主要来自粉末堆积压力、氢氧化锂粉末与输送螺杆之间产生的摩擦力、自身重力、离心力(以角速度形式表示)以及扭矩[9]。

1) 粉末堆积压力 F_1

在满载工况下进料口处完全充满粉末，此时输送螺杆受到的粉末堆积压力计算公式如下：

$$F_1 = V_h \times \rho \times g \quad (4)$$

$$V_h = \frac{1}{3} \pi h \left(\frac{D_1^2 + D_2^2 + D_1 D_2}{4} \right) \quad (5)$$

式中： V_h 为进料口处满载情况下的粉末体积， m^3 ； g 为重力加速度，取 9.8 g/m^2 ； D_1 为进料口的最大直径和 D_2 为最小直径，其中 D_1 为 0.15 m， D_2 为 0.079 m； h 为进料口顶部与轴线之间的高度，取 0.08 m。计算得出堆积压力 F_1 为 7.56 N。

2) 氢氧化锂粉末与输送螺杆之间产生的摩擦力 F_2

在粉末输送过程中，粉末与输送螺杆表面之间均产生了摩擦力，摩擦力的计算公式如下：

$$F_2 = \mu \pi \left(\frac{(D + 2\tau)^2 - d^2}{4} \right) \varphi \cdot L \cdot \rho \cdot g \quad (6)$$

式中： μ 为摩擦系数，取 0.3；考虑到整个螺筒输送空间，输送长度 L 取 0.82 m；其余参数数值与上文相同。计算得出摩擦力 F_1 为 15.19 N。

3) 输送螺杆自身的重力 G

在分析模块中，直接添加重力 Standard Earth Gravity 选项即可。

4) 离心力

输送螺杆在做旋转运动时，自身质量产生离心力，以角速度的形式 ω 表示。角速度 ω 计算公式如下：

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (7)$$

式中： n 为转速，取 108 r/min。计算得出角速度 ω 为 11.31 rad/s。

5) 扭矩 M

由于凸缘联轴器将输送螺杆与电动机输出轴连接起来，实现传递转矩。因此，电机的驱动转矩于输送螺杆所受的扭矩，扭矩计算公式如下：

$$T = 9550 \cdot \frac{P}{n} \quad (8)$$

式中： P 取电机驱动功率 0.045 KW。计算得出扭矩 T 为 3.98 N·m。

6) 输送螺杆轴端的约束

由于输送螺杆轴颈两端采取的是轴承支撑形式。因此根据所选轴承的工作情况，并结合输送螺杆绕中心轴作旋转运动，在输送螺杆轴颈两端处施加圆柱面约束 Cylindrical Support，约束其轴向、周向，切向为自由约束。输送螺杆施加载荷和约束如图 2 所示。

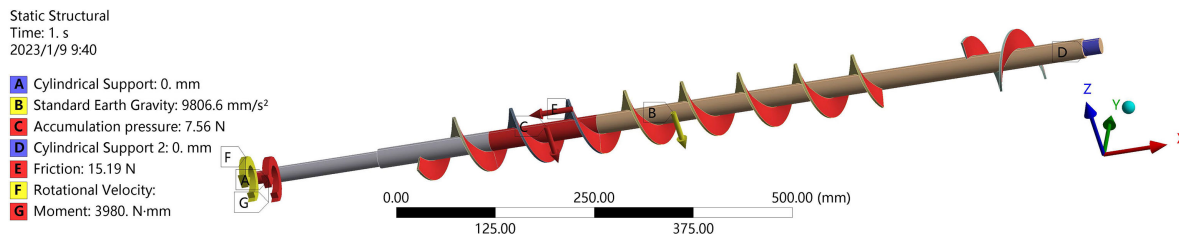


Figure 2. Schematic diagram of the distribution of the load and restraint applied to the conveying screw
图 2. 输送螺杆施加载荷和约束的分布示意图

3.2. 强度分析

为了验证输送螺杆的结构和参数设计是否满足强度要求，对其等效应力云图进行分析，图 3 为输送螺杆等效应力云图。从图中可知，在满载输送工况下，输送螺杆的最大等效应力为 122.45 MPa，危险部位出现在输送螺杆叶片的根部位置处，说明叶片根部是易发生塑性变形的区域。选取材料 304 不锈钢的屈服强度为 310 MPa，得出的最大等效应力值小于 304 不锈钢的屈服极限，故输送螺杆的结构和参数满足强度要求。

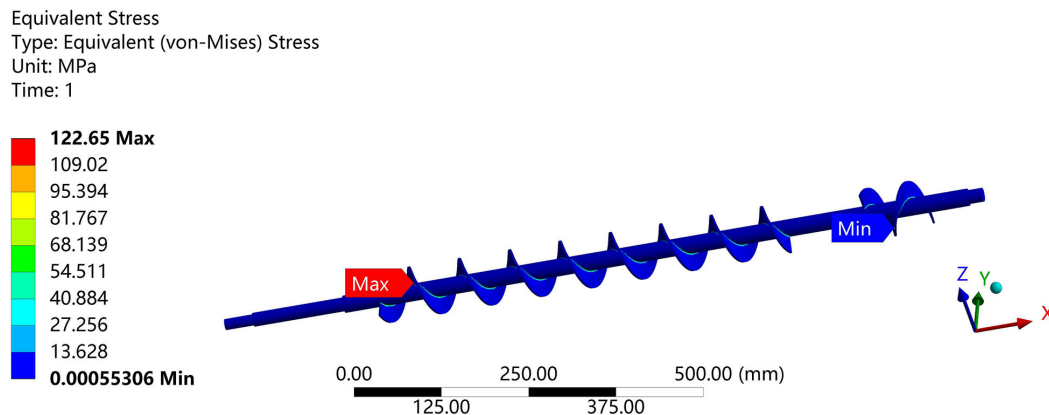


Figure 3. Equivalent force cloud diagram of conveying screw
图 3. 输送螺杆的等效应力云图

3.3. 刚度分析

为了验证输送螺杆的结构和参数设计是否刚度要求，对其整体变形云图进行分析，图 4 为输送螺杆变形云图。由图可知，输送螺杆的最大变形发生在输送螺杆叶片的外部边缘处，越靠近螺旋叶片的外部边缘处，变形量在减小，最大变形量为 0.34732 mm。该最大变形量可作为间隙选取的合理性，根据上述选取的间隙为 4.5 mm，可见选取余量稍大。由于小间隙可避免粉末发生结拱、粘壁情况，并在一定程度上提高输送的稳定性，在此结合实际加工装配精度，在此调整间隙为 2 mm。

3.4. 螺旋叶片厚度对应力和变形的影响规律

螺旋叶片厚度决定了螺旋叶片与输送螺旋轴的接触面积，在粉末对螺旋叶片的作用力下，接触面积

的大小会影响输送螺杆的应力与变形大小。本文研究螺旋叶片厚度大小对输送螺杆应力与变形的影响，结果如图 5 所示。

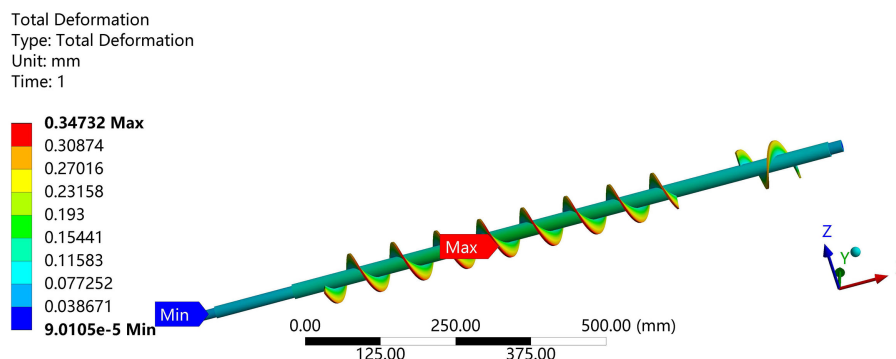


Figure 4. Deformation cloud of conveying screw

图 4. 输送螺杆的变形云图

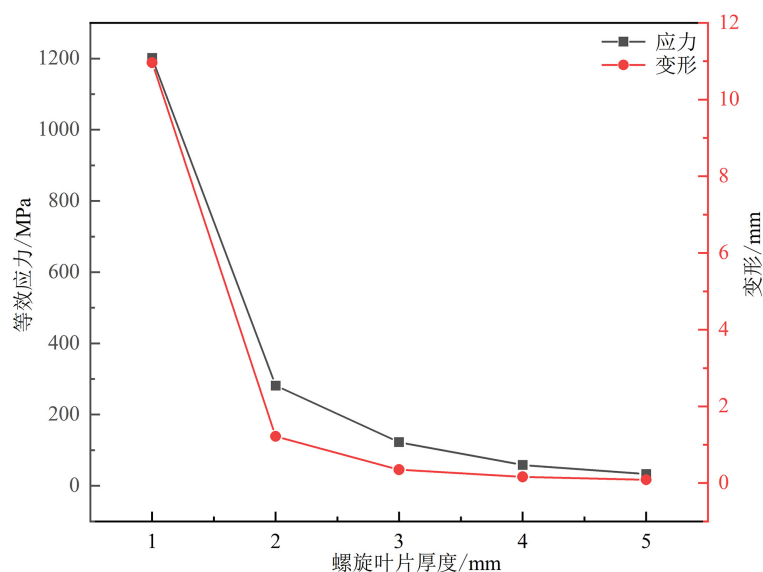


Figure 5. Variation relationship between thickness of spiral blade and maximum equivalent force and deformation

图 5. 螺旋叶片厚度与最大等效应力、变形之间的变化关系

从图中可知，螺旋叶片厚度与最大等效应力、总变形成反比关系，随着螺旋叶片厚度的增加，输送螺杆的最大等效应力、变形在逐渐减小。叶片厚度在 1~2 mm 时，最大等效应力与变形的变化量最大，其中螺旋叶片厚度为 1 mm 时，最大等效应力和变形分别为 1201.3 MPa、10.96 mm，输送螺杆的结构和参数不能满足强度和最大间隙要求。叶片厚度在 2~5 mm 时，最大等效应力与变形变化较小，而上文选取的螺旋叶片厚度为 3 mm，已满足强度要求。

4. 总结

本文首先对粉末螺旋输送机进行了整体结构设计，以氢氧化锂粉末为输送物料，确定了符合输送量要求的输送螺杆主要参数数值；其次，采用有限元分析法进行了输送螺杆的强度和刚度分析，验证了输送螺杆结构参数设计的合理性；最后，研究了输送螺杆叶片厚度对应力和变形的影响规律。

参考文献

- [1] 黄石茂. 螺旋输送机输送机理及其主要参数的确定[J]. 广东造纸, 1998(3): 29-33.
- [2] 李超, 马凤坤. 螺旋输送机的设计[J]. 盐科学与化工, 2017, 6(4): 51-53.
- [3] 胡国荣. 高镍三元正极材料产业化过程中难点问题探讨[J]. 电源技术, 2019, 43(8): 1245-1249.
- [4] 陈光辉, 王中奎, 罗宁川. 国内氢氧化锂生产工艺及成本分析[J]. 中国金属通报, 2020(9): 9-10.
- [5] 郝友莉, 唐正宁, 季婷婷. 粉体包装机密实输送螺杆的设计[J]. 轻工机械, 2017, 35(5): 12-15.
- [6] 代林波, 刘武发, 曹沛. 母猪精确饲喂装置下料机构的设计与有限元分析[J]. 中国农机化, 2012(6): 158-161.
- [7] 张罡, 董朝领. 湿料硝酸钾螺旋输送机设计参数选择[J]. 化工装备技术, 2018, 39(4): 55-57.
- [8] 李超, 马凤坤. 螺旋输送机的设计[J]. 盐科学与化工, 2017, 46(4): 51-53.
- [9] 韩苓. 冶炼粉尘螺旋输送机的设计与强度分析[J]. 装备制造技术, 2020(8): 58-61.