

脱硫橡胶的螺旋输送设计与热平衡计算

李 青¹,任冬云^{1*},张立群²,杨彩霞¹,刘英杰¹

(1.北京化工大学 机电工程学院,北京 100029;2.北京化工大学 材料科学与工程学院,北京 100029)

摘要:一种废旧橡胶动态脱硫新工艺的设备由动态脱硫罐、螺旋输送装置和搅拌冷却换热装置组成,通过脱硫罐先后卸料、螺旋连续输送、搅拌罐冷却的动态脱硫,可有效降低目前脱硫工艺中对环境造成的污染。针对该设备,提出一种螺旋输送及换热能力理论计算方法。通过分析物料受力及摩擦力对物料输送的影响,对螺旋输送的各个参数进行设计及校核,同时对橡胶物料的降温过程进行了热量平衡计算分析。

关键词:脱硫橡胶;螺旋输送;热平衡计算;搅拌器

中图分类号:TQ335⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2012)07-0432-05

我国是世界上最大的橡胶消费国,但又是一个橡胶资源相对匮乏的国家。正确处理废橡胶是循环经济推进我国橡胶工业科学发展的必然选择。废旧轮胎和其他废物的积累对环境构成严重威胁。硫化橡胶具有三维交联网络结构,无法进行生物降解。出于对环境 and 经济两方面的考虑,回收是唯一可行的解决办法。橡胶和轮胎回收利用的概念已经沿用超过 50 年了。

一种废旧橡胶动态脱硫新工艺^[1]所用设备主要由动态脱硫罐、螺旋输送装置和搅拌冷却换热装置组成。这一专利新技术将彻底改变我国落后的、污染严重的再生胶生产工艺,推动废橡胶综合利用行业的再次发展。现有的动态脱硫橡胶生产过程中,通过橡胶与冷却水直接接触来降低橡胶的温度,导致冷却水含有大量硫元素,工业生产中产生大量工业废水,严重污染环境,造成二次污染。同时,脱硫橡胶直接暴露于外界,仍有残余尾气排放到空气中。针对废旧橡胶动态脱硫工艺中存在的上述问题,专利技术采用多脱硫罐先后卸料、螺旋连续输送,搅拌罐冷却的新工艺,可使大部分冷却水多次循环利用,并有效降低废气对环境的污染。本工作针对这种新工艺提出分析螺旋输送及换热能力的理论计算方法,用于指导这种新工艺的设备设计和工艺操作参数的优化。

作者简介:李青(1982—),女,山东潍坊人,北京化工大学在读博士研究生,主要从事石油机械设计及原油油水分离方面的研究。

* 通信联系人

1 改进方法

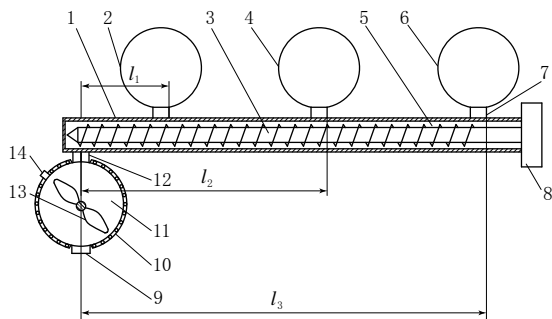
脱硫新工艺流程如图 1 所示,3 个动态脱硫罐分别为脱硫罐 1、脱硫罐 2 和脱硫罐 3,根据罐内脱硫反应所需时间,每隔一定时间其中一个罐卸料,3 个脱硫罐交替进行,然后通过螺旋输送将物料输送到冷却搅拌器中,在搅拌器接口处向物料喷射一定量的水,利用水的汽化热快速降低物料温度。在螺杆与脱硫罐以及螺旋输送机与搅拌器的接口处采用密封装置,可以避免废气排放到大气中。进入冷却搅拌器中的废气与汽化热生成的蒸汽通过搅拌器排气口回收。采用上述装置既达到了降温的目的,又避免了物料与用于热交换的冷却水的直接接触,从而避免废水的污染,冷却水还可以循环利用。

2 物料受力及摩擦力对物料输送的影响分析

从图 1 螺旋输送结构上选取一小段,用于描述结构基本几何参数,如图 2 所示。 D 为机筒直径; s 为螺距; h 为叶片高度; w 为螺槽宽度; d 为螺旋轴径; θ 为螺旋升角; γ 为螺旋叶片外径与机筒内壁间隙。

小段螺旋输送结构中的物料受力分析如图 3 所示。由图 3 可知,螺旋叶片对物料作用力的合力 F 与叶片的法向方向 P_N 之间的夹角为 β ^[2],此角度为物料的摩擦角,轴向力 F_t 与法向 P_N 方向之间的夹角 θ 为螺旋升角。内螺旋升角(θ_s)为

$$\theta_s = \frac{s}{\pi d} \quad (1)$$



1—机筒;2—脱硫罐;13—螺杆;4—脱硫罐;5—螺槽;
6—脱硫罐;3;7—脱硫罐卸料口;8—电动机;9—搅拌罐
卸料口;10—换热系统;11—冷却搅拌罐;12—喷水口;
13—搅拌叶;14—尾气收集口; l_1 —第 1 脱硫罐对应的
输送段; l_2 —第 2 脱硫罐对应的输送段;
 l_3 —第 3 脱硫罐对应的输送段。

图 1 脱硫新工艺流程

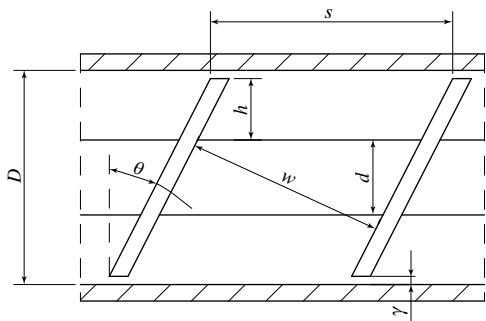


图 2 螺旋输送结构上的一小段基本几何参数

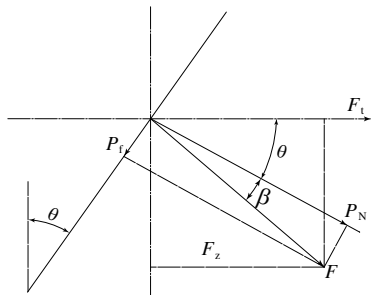


图 3 物料受力分析

物料与螺杆的动摩擦因数(f)如下:

$$f = \tan \beta \tag{2}$$

摩擦力及摩擦因数是影响固体输送主要因素。摩擦机理认为:摩擦因数实际上是两个滑动物件中较软的物理性质的函数^[3]。橡胶颗粒与机筒内壁的摩擦因数大于胶料对螺旋叶片的摩擦因数时,输送能力增强,差值越大,输送能力越强。在不改变螺旋几何参数的条件下,仅通过控制胶料与机筒内壁及螺旋叶片表面的摩擦因数,输送生

产能力就会成倍提高。因此在设计螺旋输送机时着重考虑摩擦因数的影响。

3 主要参数计算

3.1 机筒内直径

根据文献[4]有如下关系式:

$$D = \left(\frac{Q}{47K_1 A \varphi c \rho} \right)^{\frac{2}{5}} \tag{3}$$

令

$$K = \left(\frac{1}{47K_1 A} \right)^{\frac{2}{5}}$$

则

$$D = K \left(\frac{Q}{\varphi c \rho} \right)^{\frac{2}{5}} \tag{4}$$

式中 Q ——输送量;

K_1 ——螺距和机筒直径之比,即 $K_1 = \frac{s}{D}$;

K 和 A ——物料综合特性因数;

φ ——填充因数;

c ——倾斜输送因数;

ρ ——物料的单位体积质量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

其中采用实体螺旋面时相关参数的取值可参考表 1。根据不同倾斜角度, c 取值分别为: 0° 1.5° 0.97, 10° 0.94, 15° 0.92, 20° 0.88, 30° 0.82, 40° 0.76, 50° 0.70, 60° 0.64, 70° 0.58, 80° 0.52, 90° 0.46。

表 1 相关参数的取值

块度	磨琢性	实例	φ	K	A
粉状	半磨琢性	石灰	0.30~0.40	0.041 5	75
粉状	磨琢性	硫铁矿粉	0.25~0.30	0.056 5	35
粉状	无磨琢性	锯木屑	0.25~0.35	0.049 0	50

3.2 螺距

螺距不仅决定着螺旋的升角,还决定着在一定填充因数下物料运行的滑移面,因此螺距的大小直接影响着物料输送过程。当 Q 、 D 及 d 值一定时,螺距增大将增大螺旋升角,增大螺旋面与物料的动摩擦因数,减小螺杆的转速,减小物料的轴向运动速度,减小叶片的线速度。螺距减小则相反。在确定最大的许用螺距时,应使物料颗粒具有尽可能大的轴向输送速度,同时又使螺旋面上各点的轴向输送速度大于圆周速度。因此, s 应同时满足以下 2 个条件^[5]:

$$s_{\max} \leq \pi d \tan \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \tag{5}$$

$$s_{\max} \leq \pi D \tan\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right) \quad (6)$$

一般情况下, s 计算公式为

$$s = (0.8 \sim 1)D \quad (7)$$

当倾斜布置或输送物料流动性较差时, s 计算公式为

$$s \leq 0.8D \quad (8)$$

3.3 轴径

螺旋轴径与螺距的关系应是输送能力与结构的关系,轴径应同时满足以下2个关系式:

$$d \geq \frac{f_w}{\pi} s \quad (9)$$

$$d \geq \frac{(1 + f_w)s}{(1 - f_w)\pi} \quad (10)$$

式中, f_w 为橡胶颗粒与螺杆的动摩擦因数。

由于螺旋输送机的填充因数较小,只要保证靠近叶片外侧的物料具有较大的轴向速度,且轴向速度大于圆周速度即可。一般轴径计算公式为

$$d = (0.2 \sim 0.35)D \quad (11)$$

3.4 螺旋转速

通常情况下,螺旋转速越大,输送机的输送能力越高,转速越小,输送机的输送量越低。但当转速超过一定的极限值时,物料会因为离心力过大而向外抛,以致无法输送。因此还需要对转速 n 进行限定,不能超过某一极限值。当位于螺旋外

$$\frac{p_x}{p_0} = \exp\left\{\frac{f_t M x [\cos(\theta + \beta) - f_w \sin(\theta + \beta) - f_w / f_t (1 + 2h/w)]}{h}\right\} \quad (18)$$

式中, p_0 为标准大气压强,取 0.1 MPa; f_t 和 f_w 分别为橡胶颗粒与机筒及橡胶颗粒与螺杆的动摩擦因数; M 为径向和轴向应力的比值,与位置无关,假定各向同性应力分布时取值为 1。

由于物料填充因数小于 1,因此第二输送段和第三输送段是一个由开始完全充满即填充因数为 1 到填充因数小于 1 的渐变过程。机筒表面的平均正压力 p_m 由前几个完全充满螺旋段得到。

充满螺旋段机筒表面积为

$$B_1 = \pi DL \quad (19)$$

同理,未充满段物料所占机筒的展开表面积为

$$B_2 = \pi DL \varphi \quad (20)$$

机筒展开的表面积 $B = B_1 + B_2$ 。按公式(18)计算输送压力,此时的轴向距离长度仅指充

径处的物料颗粒不产生垂直于输送方向的径向运动时,它所受惯性离心力的最大值与其自身所受重力之间应有如下关系^[6]:

$$m\omega \leq mg \quad (12)$$

式中, m 为物料质量; ω 为螺旋旋转角速度。

通常最大转速($n_{\max}$)常使用如下经验公式计算。

$$n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (13)$$

螺旋输送机转速不允许超过它的临界转速,

$$\text{即} \quad n \leq n_{\max} \quad (14)$$

根据文献[7],螺旋的输送能力为

$$Q = 15\pi[(D + 2\gamma)^2 - d^2]\varphi s n c \rho \quad (15)$$

由此可得所需的螺旋转速为

$$n = \frac{Q}{15\pi[(D + 2\gamma)^2 - d^2]\varphi s c \rho} \quad (16)$$

3.5 扭矩和功率计算及轴强度校核

扭矩公式如下:

$$t = f_t p_m B R \quad (17)$$

式中, f_t 为橡胶颗粒与机筒之间的动摩擦因数, p_m 为机筒表面的平均正压力, R 为机筒半径, B 为机筒展开的表面积。 $B = \pi DL$ (其中 L 为机筒长度)。

设在轴向距离 x 处的输送压力为 p_x , 根据文献[8]有

满螺旋段的螺旋输送长度,并非总的螺旋输送长度。求得 p_x 后进而求得机筒表面的平均正压力(p_m)和扭矩(t)。求得扭矩后其功率 P 为

$$P = \frac{tn}{60} \quad (21)$$

最后采用以下公式进行轴的强度校核。

$$\tau = \frac{16t}{\pi d^3} \quad (22)$$

强度校核需分3段进行。

4 实际计算

4.1 螺旋参数计算

3个脱硫罐中,每个脱硫罐的处理量为 1.6 t,反应时间约 1 h,3个脱硫罐间歇卸料,根据实际生产情况,每隔 0.5 h 其中一个罐卸料。在 10

min 之间将料输送到搅拌器中。三元乙丙橡胶 (EPDM) 的物料密度为 $0.44 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 质量流量为 $9\,600 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。假定输送过程中前 5 个螺距完全充满, 计算得出的螺旋输送尺寸及参数为: $D \quad 0.26 \text{ m}, s \quad 0.26 \text{ m}, d \quad 0.09 \text{ m}, n \quad 79 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, h \quad 0.07 \text{ m}, \beta \quad 13.088^\circ, f_t \quad 0.652, f_w \quad 0.232, \theta_s \quad 42.615^\circ, \gamma \quad 0.015 \text{ m}, K \quad 0.049, A \quad 50, \varphi \quad 0.3, c \quad 1, l \quad 6.74 \text{ m}$ 。

4.2 输送段计算

根据式(18)~(22)对图 1 中的 3 个输送段分别进行计算。第 1 脱硫罐对应的输送段共 4 个螺距; 假定第 2 脱硫罐对应的输送段中前 5 个螺距完全充满且全长输送段共 14 个螺距, 第 3 脱硫罐对应的输送段中前 5 个螺距完全充满且全输送段共 24 个螺距。

第 1 脱硫罐物料螺旋计算结果如下: 单个螺旋叶片输送长度(l_s)为 0.566 m , 总螺旋输送长度(l_1)为 2.264 m , 机筒长度(L)为 1.04 m , 机筒展开表面积(B)为 0.849 m^2 , $x=l_1$ 处输送压力为 0.378 MPa , 机筒表面平均正压力为 0.239 MPa , 扭矩为 $1.720 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 功率为 22.647 kW 。

第 2 脱硫罐物料的螺旋计算结果如下: 螺旋输送长度(l_2)为 7.924 m , 机筒长度(L)为 3.64 m , 前 5 个螺距输送长度(l_c)为 2.829 m , 前 5 个螺距机筒长度(l_t)为 1.3 m , 前 5 个螺距机筒展开面积(B_1)为 1.061 m^2 , 后 9 个螺距机筒长度为 2.340 m , 后 9 个螺距机筒展开面积(B_2)为 0.573 m^2 , 机筒展开面积为 1.634 m^2 , $x=l_c$ 处输送压力为 0.526 MPa , 机筒表面的平均正压力为 0.313 MPa , 扭矩为 $4.335 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 功率为 57.078 kW 。

第 3 脱硫罐物料螺旋计算结果如下: 总螺旋输送长度为 13.584 m , 总机筒长度为 6.24 m , 前 5 个螺距输送长度为 2.829 m , 前 5 个螺距机筒长度为 1.3 m , 前 5 个螺距机筒展开面积为 1.061 m^2 , 后 19 个螺距机筒长度为 4.94 m , 后 19 个螺距机筒展开面积为 1.210 m^2 , 机筒展开表面积为 2.271 m^2 , $x=l_c$ 处输送压力为 0.526 MPa , 机筒表面的平均正压力为 0.313 MPa , 扭矩为 $6.052 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 功率为 79.330 kW 。

4.3 轴强度的校核

螺旋轴材料选取 65Mn 钢, 按照式(22), 分别

对第 1~3 脱硫罐计算结果进行轴的强度校核, 结果表明均合格。

4.4 热平衡计算

脱硫胶粉从脱硫罐卸料并经螺旋恒温输送到冷却搅拌器入口处时的初始温度(θ_0)为 250°C 。经过冷却搅拌罐的冷却后的物料目标温度(θ_2)为 70°C 。首先在机筒与搅拌器接口处设置喷水结构, 利用水的汽化热吸收物料的热量, 使物料温度(θ_1)降至 130°C , 其中, EPDM 的比热容(c_r)为 $0.63 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, 水的汽化潜热(30°C)为 $2\,424 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、密度(45°C)为 $990.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、比热容($c_w, 45^\circ\text{C}$)为 $4.174 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 、热导率($\lambda_w, 45^\circ\text{C}$)为 $0.6408 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 、粘度(45°C)为 $0.6027 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。其次, 当物料输送到搅拌器内时, 搅拌器夹套通冷却水与物料进行热交换以降低物料温度。通过两步热量换算使物料由 250°C 降至 70°C , 计算如下^[9]。

4.4.1 汽化热

在进入搅拌器前向物料喷水进行冷却, 物料由 250°C 冷却到 130°C 所需喷水量(Q_w)为

$$Q_w r = Q_r c_r (T_0 - T_1) \quad (23)$$

可得 $Q_w = 49.901 \text{ (kg)}$

由于将料输送到搅拌器中需 10 min , 因此, 需水质量流量为 $299.406 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4.4.2 搅拌器冷却水热交换

物料进入搅拌器内需由 130°C 降至 70°C , 根据能量守恒定律, EPDM 释放的热量等于搅拌器外层夹套流道中水吸收的热量, 由下式进行计算:

$$Q_w c_w (T_{w0} - T_{w1}) = Q_r c_r (T_1 - T_2) \quad (24)$$

式中, T_{w0} 和 T_{w1} 分别为水终温(60°C)和初温(30°C)。

计算橡胶释放热量为 $60\,480 \text{ kJ}$, 所需水量为 482.990 kg , 工艺要求在 0.5 h 内完成热交换, 因此水质量流量为 $965.980 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在规定时间内, 当此装置外层夹套流道中水的传热能力大于橡胶释放的热量才可使此装置达到传热效果, 即满足下式:

$$k(T_r - T_w)St \geq Q_r c_r (T_1 - T_2) \quad (25)$$

式中 k ——对流换热系数, $k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda_1}}$, 取

$$334.236 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1};$$

h_1 ——水的对流换热表面传热系数, 取
 $375.237 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1};$

λ_1 ——碳钢的热导率, 取 52
 $\text{J} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1};$

δ ——壁厚, 取 17 mm;

S ——对流换热面积, 即传热面积, 约为
 $9.302 \text{ m}^2;$

T_w ——循环水的平均温度, 取 $45^\circ\text{C};$

T_r ——冷却搅拌器内物料的平均温度, 取
 $100^\circ\text{C};$

t ——冷却时间, 取 0.5 h。

将数据代入公式(25)可得装置的传热量为
 $85\,499.240 \text{ kJ} (> 60\,480 \text{ kJ})$, 该设计满足工艺
 要求。

5 结语

针对多脱硫罐先后卸料、螺旋连续输送、搅拌
 罐冷却的动态脱硫新工艺, 提出可分析螺旋输送
 及换热能力的理论计算方法。分析物料受力及摩
 擦力对物料输送的影响。对螺旋输送的各参数进

行设计和校核。同时对橡胶物料的降温过程进行
 热量平衡计算。该计算分为水的汽化热和搅拌器
 外层夹套流道中通冷却水的热交换计算两部分。
 通过计算, 所设计的参数既能满足输送要求, 又能
 将物料降到所需温度, 同时还避免了对环境造成
 的危害。

参考文献:

- [1] 任冬云, 张立群, 李青. 一种废旧橡胶动态脱硫新工艺[P]. 中国: CN 201110122208. 7, 2011-05-12.
- [2] 孙洁, 尹忠俊, 陈兵. 开式螺旋输送原理分析与参数设计[J]. 起重输送机械, 2010(5): 11-16.
- [3] 贺鹏. 单螺杆挤出机固体输送段摩擦系数的研究[J]. 塑料科技, 2003, 154(2): 31-36.
- [4] 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): 27-31.
- [5] 徐余伟. 橡胶工业螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 橡塑技术与装备, 2008, 34(10): 52-58.
- [6] 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 面粉通讯, 2008(5): 21-24.
- [7] 邢益标. 螺旋输送机设计探讨[J]. 轻工机械, 1991(2): 32-38.
- [8] Z 塔德莫尔, C G 高戈斯. 聚合物加工原理[M]. 任冬云, 译. 北京: 化学工业出版社, 2009-01-01.
- [9] 杨祖荣, 刘丽英, 刘伟. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007-01.

收稿日期: 2012-01-07

Design and Heat Balance Calculation of Screw Conveyor for Rubber Desulfurization

LI Qing, REN Dong-yun, ZHANG Li-qun, YANG Cai-xia, LIU Ying-jie

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

Abstract: A new technology of waste rubber dynamic desulfurization including intermittent unloading from several devulcanizers, continuous transportation by screw conveyor and cooling in agitator tank could be used to effectively reduce environmental pollution in the current desulfurization process. Based on this new equipment, a theoretical calculation method was developed to analyze the screw transportation and heat transfer ability. The influence of force exerted on materials and friction on the conveying process was analyzed, the parameters of screw transportation was designed and verified, and the heat equilibrium of cooling process was calculated.

Keywords: devulcanized rubber; screw transportation; heat balance calculation; agitator tank