

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.011

矿用超高分子量聚乙烯托辊结构与工艺优化及耐磨性能

邱凤云, 刘向东, 邱新伟, 崔鹏, 吴隆飞, 智豪

(佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江佳木斯 154007)

摘要: 传统金属托辊用于带式输送机中存在诸多问题,如托辊与输送带之间磨损大、运行阻力大、自身质量大、使用寿命短、易损坏及密封性能差,这些问题在矿井等特殊环境更严重。为解决现有托辊问题,设计了一种新型超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)复合材料托辊。选择PE-UHMW为基体材料,对其进行阻燃和抗静电改性,研制出一种PE-UHMW双抗复合材料,用于制造矿用托辊产品。用ANSYS Workbench对PE-UHMW托辊和传统金属托辊进行静力学分析,有限元仿真结果显示PE-UHMW材料托辊在等效应力及质量上优于传统托辊,受力更安全,质量轻可降低运行阻力;然后改进并优化了PE-UHMW托辊结构,经多种方案对比,发现托辊辊筒内壁带圆形截面加强筋及圆环结构最优,弹性变形较小且受力均匀;通过响应面优化法得到加强筋的最佳尺寸为宽12.3 mm、高7.4 mm,圆环的最佳厚度为2.0 mm,优化后托辊应力较小,变形量较优化前减少了42.6%,质量与优化前相比变化不大,但比金属托辊减轻75%。设计了一体化挤出成型工艺,依据辊筒仿真结果设计挤出模具,并经正交试验选出了最佳工艺参数组合:机头温度为230℃、熔体压力为14 MPa、牵引速度为1.5 m/min,解决了PE-UHMW塑料挤出成型的难题。最后,通过本体取样对PE-UHMW双抗复合材料辊筒进行耐磨性能试验,其平均磨耗体积约为0.21 cm³,仅为极限值的30%,证明了辊筒力学性能优良,工艺过程可靠。

关键词: 超高分子量聚乙烯;托辊;有限元仿真;优化设计;挤出成型工艺

中图分类号: TQ316, TQ320.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0073-10

Structure and process optimization of mine ultra-high molecular weight polyethylene idler and its abrasion resistance

QIU Fengyun, LIU Xiangdong, QIU Xinwei, CUI Peng, WU Longfei, ZHI Hao

(School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract : The traditional metal idler used in belt conveyor has many problems, such as large wear between the idler and the conveyor belt, large running resistance, large weight, short service life, easy to damage and poor sealing performance, especially in special environments such as mines. In order to solve the problem of the existing idler, a new type of ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) composite idler was designed. PE-UHMW was selected as the base material and modified by flame retardant and antistatic modification methods, and a kind of PE-UHMW double resistance composite was developed, which was used in the manufacture of mine idler products. The static analyses of PE-UHMW idler and traditional metal idler were carried out by ANSYS Workbench. The finite element simulation results show that the PE-UHMW idler is superior to the traditional idler in equivalent stress and mass, the force is safer, and the light weight can reduce the running resistance. Then, the structure of PE-UHMW idler was improved and optimized. By comparing various schemes, it is found that the structure of inner wall of the idler roller with circular section stiffener and ring is the best, and the elastic deformation is small and the force is uniform. By response surface optimization method, the optimum size of the stiffener is 12.3 mm of width and 7.4 mm of height, and the optimum thickness of the ring is 2.0 mm. After optimization, the stress of the idler is small, the deformation is reduced by 42.6% compared with that before optimization, and the mass is little changed compared with that before improvement, but it is reduced by 75% compared with the metal

基金项目: 黑龙江省教育厅基本科研业务费人才培养项目(2021-KYYWF-0561)

通信作者: 刘向东, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为农业工程

收稿日期: 2024-10-08

引用格式: 邱凤云, 刘向东, 邱新伟, 等. 矿用超高分子量聚乙烯托辊结构与工艺优化及耐磨性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 73-82.

QIU Fengyun, LIU Xiangdong, QIU Xinwei, et al. Structure and process optimization of mine ultra-high molecular weight polyethylene idler and its abrasion resistance[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 73-82.

idler. The integrated extrusion molding process was designed, the extrusion mould was designed according to the roller simulation results, and the optimal combination of process parameters was selected by orthogonal test: the head temperature was 230 °C, the melt pressure was 14 MPa and the traction speed was 1.5 m/min, which solved the difficult problem of PE-UHMW plastic molding. Finally, the abrasion resistance test of PE-UHMW double resistance composite roller was carried out through bulk sampling. The average abrasion volume is about 0.21 cm³, which is only 30% of the limit value, which proves that the mechanical properties of the roller are excellent and the process is reliable.

Keywords : ultra-high molecular weight polyethylene ; idler ; finite element simulation ; optimal design ; extrusion process

带式输送机是一种在煤矿、冶金、发电站、港口、化工等领域被广泛应用的物料搬运机械,尤其在煤矿和井下等环境中更是必不可少的运输工具^[1]。带式输送机的主要承载构件是托辊,其性能表现直接影响着输送机的整体运行效果。

作为输送机的重要承载构件,托辊主要被用来支撑传送带以及辅助物料的装载运输。数据显示,托辊质量约占整个输送系统的30%~40%,能源消耗约占整体的70%,成本约占1/4^[2],托辊因此又被称为整个输送系统的“心脏”。目前使用托辊多为金属材料制成,这种托辊与传送带之间磨损大、运行阻力大、质量大以及使用寿命短,同时还易出现管体断裂、轴承损坏、密封性能差等问题。为此,对托辊进行改进,以减少损耗,提高使用寿命,成为需要解决的重要问题。

非金属材料的使用、结构的优化设计及新型工艺研究是托辊改进的3大研究方向。Vasić等^[3]提出了优化轴承设计、强化密封结构以及选用高品质的材料与润滑脂等措施,以降低托辊的失效率并延长输送机的使用寿命。赵少迪等^[4]提出磁性液体密封润滑托辊结构,相较于普通托辊,它具有更出色的密封效果,较低的旋转阻力和更高的使用寿命。杨言^[5]则采用聚氨酯复合材料代替传统托辊材料,研究该材料作为辊体对托辊整体的影响。

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)材料是一种聚乙烯树脂,分子量极高,具有超轻、高模、耐腐蚀、耐紫外线、自润滑及吸水率低等特点^[6-7],是一种性能优异的热塑性工程塑料。又因该材料具有良好的耐磨性、自润滑性、耐腐蚀性及抗冲击性这几个重要优点,使其成为生产非金属托辊的优选材料。由于PE-UHMW的熔体流动速度非常慢,即具有较高的熔点、黏度和较差的流动性,使得它的加工成型非常困难,因此对生产工艺要求较为严格^[8]。不同的成型工艺对PE-UHMW材料性能也有影响,王艺涵^[9]通过改变模压成型工艺制备了几组PE-UHMW

材料,研究了不同模压成型工艺参数对PE-UHMW物理性能、力学性能和摩擦学性能的影响。

采用PE-UHMW制作的带式输送机托辊主要应用于矿井等特殊工作环境,矿井是煤尘、瓦斯聚集的地方,极易引发火灾、爆炸等问题,因此需对PE-UHMW进行阻燃和抗静电改性以确保托辊的安全应用。刘睿喆^[10]探究了PE-UHMW阻燃改性的现状,得出采用共混法进行阻燃的效果良好,且无卤阻燃和绿色环保是未来的主要方向。韩永强等^[11]采用导电炭黑和HKD-151为抗静电剂对PE-UHMW改性,探究其力学性能和加工性能,证明了该复合材料满足井下煤矿的使用要求。

笔者以矿井下带式输送机托辊为研究对象,从材料、结构以及成型工艺3方面展开研究,旨在设计一种新型非金属托辊以代替传统金属托辊,在矿井等特殊环境下使用。选用PE-UHMW作为基体材料,通过添加阻燃剂和抗静电剂,制备出一种新型PE-UHMW双抗复合材料。利用仿真分析软件改进并优化PE-UHMW托辊结构,采用正交试验法,研究最佳成型工艺参数,克服了PE-UHMW材料成型的难题。最后经辊筒性能试验,验证制品及成型工艺的可靠性,为PE-UHMW材料在带式输送机托辊领域的应用提供新思路。

1 PE-UHMW双抗复合材料的制备

1.1 主要原材料

PE-UHMW: UTEC3040, 巴西石化(布拉斯科公司);

导电炭黑:F900A, 天津亿博瑞化工有限公司;

溴系阻燃剂:FR-803, 山东天一化学股份有限公司;

红磷:PEFP-482, 广州银塑阻燃新材料股份有限公司;

鳞片石墨:青岛日升石墨有限公司;

甲醇、乙醇(95%):分析纯, 天津恒兴化学试剂制造有限公司。

1.2 主要仪器及设备

高速混合机:SRH-10L,阜新瀚特尔橡胶机械有限责任公司;

高分子材料专用挤出机:SJ-45/25,张家港繁丰机械有限公司;

酒精喷灯燃烧试验机:JN-MT-181,东莞市杰恩检测设备有限公司;

高绝缘电阻测量仪:ZC46A,上海安标电子有限公司。

1.3 试样制备

对材料的阻燃改性选择红磷与溴系阻燃剂共同阻燃,起到协同阻燃效应,能在较低的总添加量下实现良好的阻燃性能。同时有助于保持PE-UHMW原有性能,减少成本。考虑和PE-UHMW的相容性及出色的导电性能,选用国产导电炭黑作为抗静电剂。在高速混合机内将PE-UHMW树脂、导电炭黑、阻燃剂等进行混合。鉴于颗粒及PE-UHMW树脂流动性差,挤出困难,采用石墨包裹红磷,浸湿然后碾磨成粉,一起共同挤出,起到润滑及协同抗静电的作用。

在高速混合机中进行15~30 min的混合,至物料均匀,将混合物放入高分子材料专用挤出机中,挤出机各段的温度为180~235℃、熔体压力15 MPa,在模具的作用下挤出厚度为10 mm的PE-UHMW双抗复合材料板材,冷却定型,经牵引装置,最后机加工制成阻燃抗静电试验样条,供测试使用。

1.4 性能测试

矿用PE-UHMW托辊必须达到煤矿井下制品的标准。为此,依据MT/T 113-1995对制备的PE-UHMW复合材料实施了阻燃和抗静电性能测试。

1.4.1 阻燃性能测试

根据MT/T 113-1995,制备6块360 mm×50 mm×10 mm的试样,采用酒精喷灯燃烧试验机(以甲醇与乙醇的混合物为燃料,两者体积比为5:95),分别对试样进行燃烧试验。将试样放入夹持器,在酒精喷灯作用下持续燃烧30 s,然后移走未熄灭的喷灯,记录试样的有焰燃烧时间和无焰燃烧时间。

1.4.2 抗静电性能测试

根据MT/T 113-1995,制备3块300 mm×300 mm×10 mm的方形试样。环境温度维持在(23±2)℃,相对湿度控制在(65±5)%,使用高绝缘电阻测量仪,对该试样的表面电阻进行测量。测量完成后将试样

翻面,在另一表面上重复上述过程,3块试样均测量其上、下两个表面的电阻,最后对上表面和下表面电阻分别取平均值。

1.5 双抗性能测试数据

对材料双抗性能即阻燃和抗静电性能的测试数据进行整理,列出结果见表1。

表1 材料阻燃性能和抗静电性能测试数据

Tab.1 Material flame retardant and antistatic performances test data

Test type	Numbers of tests	Test item	Mean value
Flame	6	Flaming combustion time/s	1.35
retardant test	6	Flameless combustion time/s	9.29
Antistatic	3	Upper surface resistance/ Ω	3.5×10^5
performance test	3	Lower surface resistance/ Ω	4×10^5

试验结果表明,在阻燃性能测试中6块试样的有焰燃烧时间算术平均值为1.35 s,不超过3 s,且每块试样有焰燃烧时间均小于10 s,符合判定规则;6块试样在无焰燃烧时间的算术平均值为9.29 s,不超过10 s,且每块试样无焰燃烧时间均小于30 s,符合判定标准;经燃烧后,试样上的火焰蔓延长度最大为60 mm,小于280 mm,符合判定规则。

在抗静电性能测试中,3块试件上表面电阻值的算术平均值为 $3.5 \times 10^5 \Omega$,下表面电阻值的算术平均值为 $4 \times 10^5 \Omega$,两者均小于 $3 \times 10^8 \Omega$ 。因此,以上数据均满足MT/T 113-1995中聚合物制品阻燃及抗静电性标准要求。

1.6 材料性能参数

改性后的PE-UHMW材料不仅具有阻燃抗静电性,还保持了PE-UHMW本身的特性,具有较好的延展性、硬度和冲击性能等。经检测,该材料的综合性能见表2。

2 托辊静力学分析及优化

2.1 托辊工作载荷下的受力分析

2.1.1 三维实体模型的建立

采用ANSYS Workbench对PE-UHMW托辊和传统金属托辊进行静力学仿真分析,首先需建立三维实体模型。托辊的核心组成部件包括轴承座、辊筒、轴、轴承及其他配件。工作时,辊轴固定在支架上起支撑作用,而辊筒和轴承座等随着轴承外圈一起转动,因此经简化后可将该连接件作为托辊中的一个转动整体进行有限元分析^[12]。托辊转动件的结构尺寸及几何参数见图1和表3。

2.1.2 有限元模型的建立及网格划分

在实际应用中,托辊与支承结构均为薄壁结

表2 托辊用PE-UHMW双抗复合材料性能

Tab.2 Properties of PE-UHMW double resistance composite for idlers

Item	Test standard	Numerical value
Density/(g·cm ⁻³)	GB/T 533-2008	0.95
Tensile yield strength/MPa	GB/T 1040.1-2018	27
Tensile breaking strength/MPa	GB/T 1040.1-2018	30
Elongation at break/%	GB/T 1040.1-2018	340
Modulus of elasticity/MPa	GB/T 1040.1-2018	860
Poisson ratio	GB/T 1040.1-2018	0.4
Bending strength/MPa	GB/T 9341-2008	32
Bending modulus/MPa	GB/T 9341-2008	790
Compressive strength/MPa	GB/T 1041-2008	25
Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	GB/T 1843-2008	104
Shore hardness (D)	GB/T 2411-2008	70
Friction coefficient	GB/T 10006-2021	0.07~0.11
Mortar wear rate/%	QB/T 2668-2004	0.068
Thermal deformation temperature/°C	ASTM D648-18	90
Coefficient of expansion	ASTM D696-24	1.5
Water absorption/%	ASTM D570-22	<0.01%
Flame retardancy	MT/T113-1995	Achieve
Surface resistance/Ω	MT/T113-1995	3.5×10 ⁵

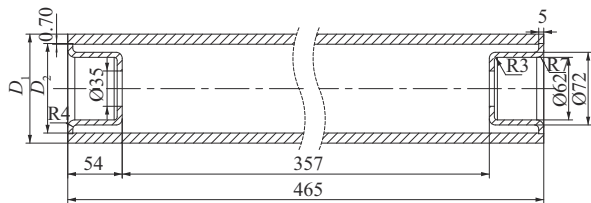


图1 托辊结构与尺寸

Fig.1 Structure and size of idlers

表3 托辊的几何参数

Tab.3 Geometric parameters of idlers

Parameters	PE-UHMW idler	Metal idler
Outer diameter (D_1)/mm	108	108
Inner diameter (D_2)/mm	88	98
Length/mm	465	465

构,当进行有限元模拟时,须对其进行剖分^[13]。使用高阶四面体单元进行网格划分,其中,PE-UHMW托辊的网格包含246 376个节点与151 396个单元,网格的平均质量达到0.823,显示出良好的网格质量水平;金属托辊的网格节点数为179 881,单元数为99 686,平均质量为0.820 86,网格质量也较好。

2.1.3 材料参数及载荷约束的设置

(1)材料参数设置。

在有限元分析中,确定好转动件的单元类型及几何模型后,必须在ANSYS Workbench中进一步配置单元实常数与材料的属性^[14]。本文涉及金属与PE-UHMW两种托辊,其各自组件间的材料属性存在差异,因此,需分别设置材料参数,具体的设置详情见表4和表5。

表4 PE-UHMW托辊材料参数

Tab.4 PE-UHMW idler material parameters

Part type	Density/(kg·m ⁻³)	Poisson ratio	Modulus of elasticity/MPa	Strength limit/MPa
Roller (PE-UHMW composites)	950	0.4	860	30
Bearing block (PA)	1 150	0.42	3 800	70

表5 金属托辊材料参数

Tab.5 Metal idler material parameters

Part type	Density/(kg·m ⁻³)	Poisson ratio	Modulus of elasticity/MPa	Strength limit/MPa
Roller (Q235B)	7 850	0.3	2.1×10^5	113
Bearing block (08F)	7 850	0.3	2.0×10^5	99

(2)载荷及约束的设置。

在利用仿真软件进行求解前,需先对结构所受载荷进行计算,并根据实际工作情况,对边界条件进行相应的约束设置^[15]。

托辊工作时的静载荷 F 按照式(1)计算。

$$F = 9.8ea_0\left(\frac{I_m}{v} + q_B\right) \quad (1)$$

式中: a_0 为托辊间距($a_0=1.2$ mm); v 为带速($v=2.5$ m/s); e 为托辊的载荷系数(上托辊取0.8,下托辊取1); I_m 为输送机的输送能力($I_m=1\ 200$ t/h=333.3 kg/s); q_B 为每米输送带质量($q_B=44.16$ kg/m)。

将数值代入式(1)得: $F=9.8 \times 0.8 \times 1.2 (333.3/2.5 + 44.16)=1\ 669.54$ N。

针对施加载荷区域面积 A ,参考相关资料并模拟托辊实际工作时的情况,选取托辊外表面的1/6处,相应计算公式见式(2),在该位置的所有节点上施加载荷。

$$A = (1/6)A' = (1/6)\pi D_1 L_1 \quad (2)$$

式中: A' 为托辊辊筒面积,单位mm²; D_1 为托辊直径,单位mm; L_1 为托辊长度,单位mm。

将数值代入式(2)得: $A=(1/6) \times 3.14 \times 108 \times 465=26\ 281.8$ mm²。

上述计算完成后,在Workbench中对托辊表面施加载荷,一般需换算成单位压力 P 进行输入,大小为: $P=F/A=0.063\ 5$ MPa。

载荷施加完成后,模拟托辊在输送机上的运转情况,对其施加边界条件即约束。因托辊转动件一般由轴承支撑并随其旋转,所以约束应该施加在轴承座上与轴承接触处,且要限制其他5个方向的自由度,仅保留托辊沿轴向方向的旋转。托辊载荷及约束的设置结果如图2所示。

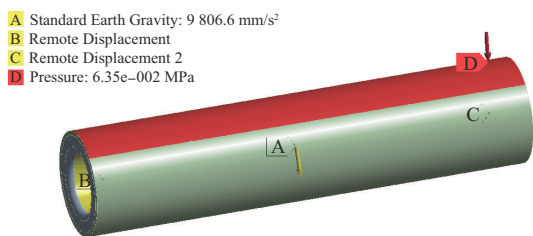


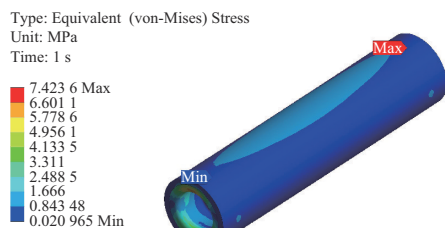
图2 托辊载荷及约束的设置结果

Fig. 2 Setting results of idler load and constraint

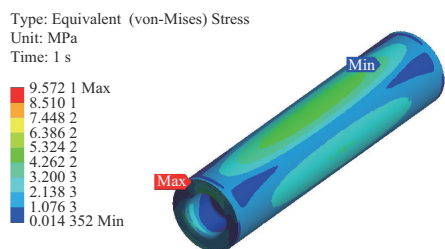
2.1.4 有限元计算结果分析

在 ANSYS Workbench 软件中完成约束和载荷的施加后,继续选择“solve”指令,对托辊执行静力学分析。两种托辊的计算结果如图3所示。

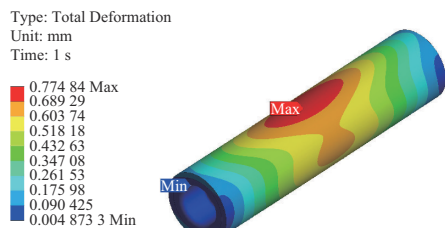
通过分析仿真结果可知:PE-UHMW 托辊的最大应力出现在轴承座边缘位置,数值为 7.423 6 MPa,



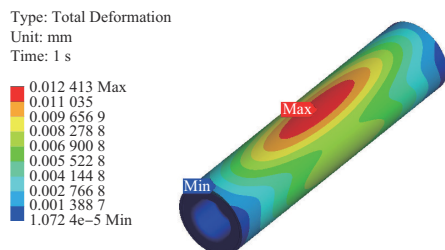
(a) Equivalent stress of PE-UHMW idlers



(b) Equivalent stress of metal idlers



(c) Deformation of PE-UHMW idlers



(d) Deformation of metal idlers

图3 托辊在工作载荷下受力分析结果

Fig. 3 Force analysis results of idlers under working load

相较于轴承座材料的许用应力 70 MPa,该数值极小,托辊的强度远远符合应用需求。最大变形出现在托辊外表面的中间部分,数值为 0.774 84 mm,最小则趋近于 0 mm,相较于托辊的几何尺寸来看,该应变极小,可视为小变形。金属托辊最大应力位于辊筒上与轴承座接触位置,数值为 9.572 1 MPa,最大变形也发生在外表面中部,为 0.012 413 mm,均满足使用要求。

比较两种托辊分析结果,变形量都较小(不足 1 mm),表明托辊具有足够的刚度,能抵抗大的挠曲变形。另外,PE-UHMW 托辊的最大应力明显低于金属托辊,质量也较金属托辊更轻,因此,在相同的外直径和载荷约束条件下,壁厚 10 mm 的 PE-UHMW 托辊相比壁厚 5 mm 的金属托辊,能明显地降低表面的应力水平,从而提升托辊承载能力。

2.2 托辊不同载荷下的受力分析

为了更深入分析托辊的受力特性,对两种托辊在不同载荷下的应力和位移进行了模拟计算^[16],分别设定了 250, 500, 1 670, 2 500, 3 450 N 的正压力,同时保持其他条件不变。其中,1 670 N 是上文中经过计算得到的托辊工作载荷,3 450 N 是查阅 DTII 带式输送机手册得到的该输送机托辊的极限载荷,250 N 是在国家标准中进行托辊测试时所用的标准载荷,其余载荷为模拟输送机工作过程中不同间隔下的托辊载荷。将上述不同载荷下托辊所受的最大应力和变形结果绘制成曲线,如图4和图5所示。

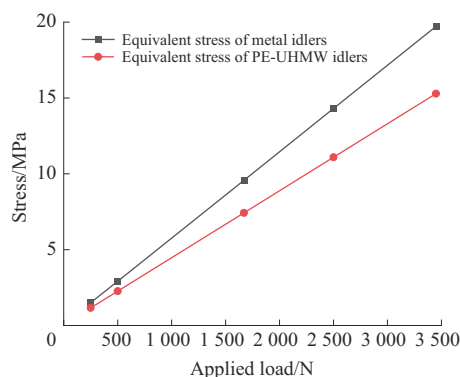


图4 不同载荷下托辊的最大应力

Fig. 4 Maximum stress of idlers under different loads

由图4和图5可见,随着载荷的增大,PE-UHMW 托辊的最大应力一直小于金属托辊,而最大变形量则一直大于金属托辊。

综上可知,相较于金属托辊,PE-UHMW 托辊在表面应力和材料性能上均展现出改进和提升,只在

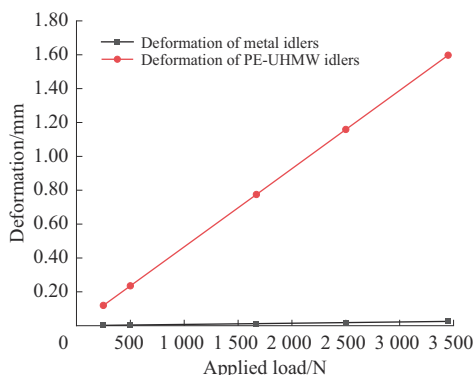


图5 不同载荷下托辊的最大变形

Fig. 5 Maximum deformation of idlers under different loads

变形量上稍逊于金属托辊,由此验证了PE-UHMW托辊替代金属托辊在技术层面的可行性。

2.3 托辊结构改进

为降低弹性变形等对托辊辊筒的影响,需对PE-UHMW托辊进行改进和优化^[17],使其达到更完美的生产及使用要求。选取以下两种方法进行托辊结构的改进。

2.3.1 辊筒内壁支撑圆环

由仿真分析可知,托辊受到载荷后的最大变形出现在辊筒表面中心位置,且考虑到托辊还可以看作简支梁结构,可以通过减小辊筒跨度值的方法来减小其最大应力和最大变形。因此,采用在辊筒中间添加1个圆环的方法减小辊筒的跨度值,对托辊结构进行改进。

2.3.2 辊筒内壁加强筋及其类型的确定

为降低托辊的弹性变形,还可以在辊筒内壁添加一圈加强筋,起到增强刚度的作用。圆筒及圆锥筒加强筋的截面类型一般有圆形和方形等,此处选取圆形截面(circular section stiffener)、长条形截面(long section stiffener)和“齿轮型”截面(gear section stiffener)3种类型,因在对托辊进行仿真分析时,其受力面积一般被模拟为表面的1/6,所以,选取的加强筋个数为6。在极限载荷下,分别对带有3种加强筋的辊筒进行应力和变形量分析,分析结果如图6所示。

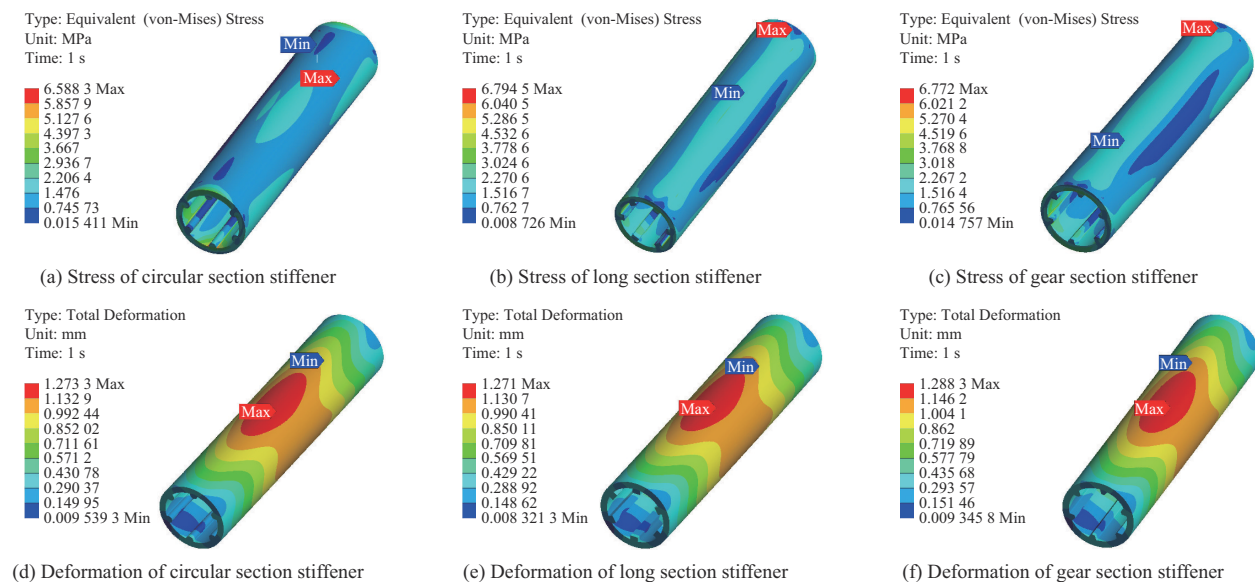


图6 带有3种加强筋的辊筒应力和变形量分析结果

Fig. 6 Analysis results of stress and deformation of rollers with three kinds of stiffener

根据图6结果可知,极限载荷下3种类型加强筋都能起到减小PE-UHMW辊筒变形量的效果。在弹性变形上,圆形和长条形截面加强筋的变形量明显小于齿轮型截面加强筋。在所受应力上,圆形截面加强筋又小于其他两种。综上,圆形截面加强筋在减小PE-UHMW辊筒受力和变形上起到最好的效果,因此,选取此类加强筋以改进PE-UHMW托辊结构。

2.4 托辊尺寸的优化设计

2.4.1 基于响应面的参数优化

响应面优化是指选取典型的几个区域,从整体上对各个因子和响应值进行拟合,找出各个因子的最优水平。考虑到辊筒加强筋和圆环的大小直接影响托辊的变形和质量,因此,选取响应面参数优化法,来确定其最优尺寸。

通过拟合试验设计的15个样本点,进行分析计算,以辊筒加强筋和圆环尺寸作为优化参数,得到

优化参数与托辊最大变形、最大等效应力和托辊质量之间关系的三阶响应面图像,然后再根据结果进行响应面优化,确定最优参数。

在 ANSYS Workbench 软件中的参数管理(Parameter Set)内,对输入与输出参数进行了配置,同时确定托辊最大变形量 <1 mm的约束条件,参数见表6。

表6 托辊优化参数

Tab. 6 Idler optimization parameters

Optimization variable	Parameters	Lower limit	Initial value	Upper limit
Design variable	Stiffener height/mm	5	7	8
	Stiffener width/mm	10	12	16
	Ring width/mm	2	3	5
State variable	Maximum deformation/mm	0	1.292 4	1
Objective function	Idler quality/kg		1.720 8	

2.4.2 响应面分析

经软件计算完成后,获得了设计变量和目标之间的三阶响应面图像,取加强筋尺寸、圆环厚度与目标变量之间的响应面图像如图7所示。

2.4.3 优化结果分析

由上述分析可知,托辊的最大变形随着辊筒加强筋尺寸和圆环厚度的增大而减小,总质量随加强筋尺寸和圆环厚度的增大而增大,最大应力随着加强筋尺寸和圆环厚度的增大而减小,当圆环厚度到一定值后,最大应力又开始增大。

在托辊最大变形量满足要求(<1 mm)且基本不变的条件下,使托辊的总质量达到最小。在该优化目标及约束下,继续进行响应面优化计算,从而得出优化结果,托辊优化前后参数的对比情况见表7。

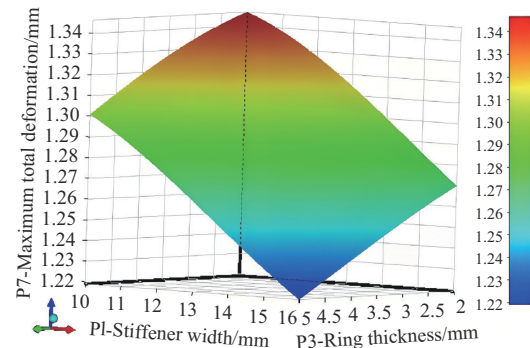
根据优化结果选取最佳设计参数为:加强筋高7.4 mm、宽12.3 mm、圆环厚度2.0 mm。由优化前后参数的对比可知,优化后托辊在受到较小应力的同时,其变形量较优化前减少了42.6%,质量变化不大,比金属托辊减少75%,大大降低了运行阻力,提高了托辊的性能。

3 辊筒挤出工艺过程及参数确定

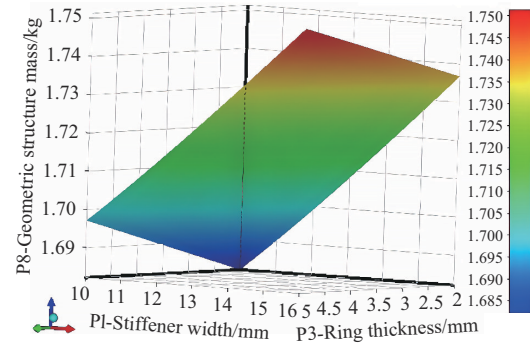
针对辊筒材料的熔体黏度高、流动性和临界剪切速率差,以及辊筒长度较长、内壁加强筋结构较复杂等问题,预选用一体化挤出成型工艺制备辊筒。其中,挤出机的机头温度、熔体压力、牵引速度等是挤出工艺过程中的重要参数^[18]。

3.1 模具设计

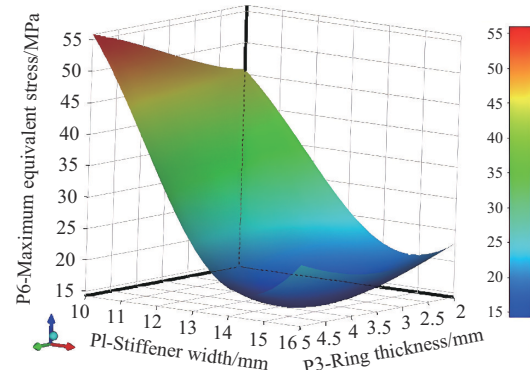
在工程塑料的挤出生产中,挤出模具是挤出机的关键设备,而模具的设计更是挤出成型过程中至



(a) Maximum deformation of idler



(b) Idler mass



(c) Maximum equivalent stress of idler

图7 响应面图像

Fig. 7 Response surface images

表7 托辊优化前后参数

Tab. 7 Parameters before and after idler optimization

Optimization variable	Parameters	Initial value	Optimization value	Rounded value
Design variable	Stiffener height/mm	7	7.435 8	7.4
	Stiffener width/mm	12	12.323 0	12.3
	Ring width/mm	3	2.006 2	2.0
State variable	Maximum deformation/mm	1.292 4	0.917 59	
Objective function	Idler quality/kg	1.720 8	1.733 7	

关重要的一环。由前文可得,改进后辊筒的内壁采用圆形截面加强筋结构,其壁厚为10 mm,经优化后得出加强筋尺寸为高7.4 mm、宽12.3 mm。因此,托辊辊筒的挤出模具主要按照该优化后辊筒的结构和尺寸进行设计,符合辊筒挤出成型的要求,使辊

筒的尺寸、外观和内部质量等均达到成型指标,且满足成型效率。辊筒挤出模具如图8所示。

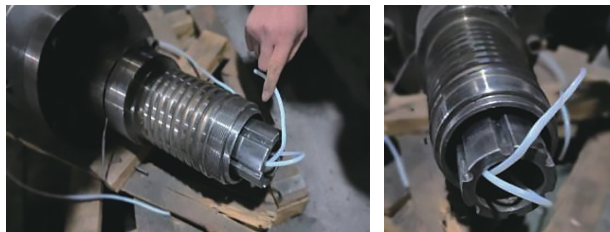


图8 辊筒挤出模具

Fig. 8 Roller extrusion mould

3.2 机头温度

挤出成型过程中有多个温度,通常会重点监测料筒不同段的温度,尤其是机头及口模部位的温度情况。为保证制品质量,温度应稳定。鉴于PE-UHMW较高的分子量和较差的熔融流动性,温度越高越有利于材料的成型挤出,因此,其成型温度一般大于200℃。

3.3 熔体压力

在挤出成型过程中,由于螺杆及筒体的结构、机头、滤网及滤板之间的摩擦,使得成型过程中产生了一定的压力。在塑料转化为熔融状态及获取紧密塑件时,此压力扮演着至关重要的角色,它的大小变化对塑料制品的挤出质量也有很大的影响,随着压力的增加,制品的成型性能也会随之增加。

3.4 牵引速度

通常情况下,挤出成型生产的塑料制品具有连续性,所以,牵引装置的配置是必要的。由机头、口模挤出的塑料制品,由于受到牵引而产生拉伸取向。随着拉伸取向度的提高,塑料制品的拉伸强度也随之提高,通常,牵引速度与挤出速度相当。牵引速度数值为1~2 m/min较为合适。

3.5 工艺参数优化

根据产品的质量和经济性、所设计的模具的作用、耐用性和生产周期,以矿用PE-UHMW托辊辊筒挤出工艺参数为研究对象,选取机头温度(A)、熔体压力(B)、牵引速度(C)通过三因子三水平正交试验,制备不同的辊筒样品,通过本体取样,以拉伸强度为优化指标,进行工艺参数的优化。试验方案选用 $L_9(3^4)$ 正交表,数据及结果见表8。

由表8正交试验分析可知,不同参数对挤出结果的影响程度排序为:牵引速度>挤出温度>熔体压力。根据极差分析结果,可以确定挤出工艺的最优参数组合是 $A2B2C3$;当牵引速度为1.5 m/min与

表8 挤出工艺参数正交试验方案及结果

Tab. 8 Extrusion parameters orthogonal experiment scheme and results

Experiment group number	Experimental factors			Test index
	$A/^\circ\text{C}$	B/MPa	$C/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	Tensile strength/MPa
1	220	13	1	28.3
2	220	14	1.5	31.6
3	220	15	2	31.5
4	230	13	1.5	32.8
5	230	14	2	32.9
6	230	15	1	29.5
7	240	13	2	31.7
8	240	14	1	29.1
9	240	15	1.5	31.4
$K1$	91.4	92.8	86.9	
$K2$	95.2	93.6	95.8	
$K3$	92.2	92.4	96.1	
$k1$	30.467	30.933	28.967	
$k2$	31.733	31.200	31.933	
$k3$	30.733	30.800	32.033	
Range	1.266	0.400	3.066	

2 m/min时,试验结果差距相对较小,且都可满足生产要求。考虑生产周期及能源利用率,因此可确认最优参数组合为 $A2B2C2$,即:机头温度为230℃、熔体压力为14 MPa、牵引速度为1.5 m/min。

4 托辊辊筒试制及耐磨性能试验

4.1 辊筒试制

根据挤出成型的工艺路线,将不同的原料混合改性,通过挤出机模具挤出^[19]。挤出过程中根据试验的数据控制好工艺参数,最终实现PE-UHMW托辊辊筒的一次挤出成型。试制的复合材料托辊辊筒如图9所示。



图9 矿用PE-UHMW托辊辊筒样品

Fig. 9 Sample of PE-UHMW idler roller for mining

4.2 耐磨性能测试

托辊在工作中是通过自身转动及与皮带的摩擦而运输物料,因此辊筒的耐磨性能是重要的检测项目。将成型后的辊筒常温放置48 h,然后对其本体取样,依据GB/T 1689-2014,进行阿克隆磨耗试验。由于试验采用试件旋转方式,因此本体取样为圆环试样,外径为80 mm,内径略大于胶轮轴直径,厚度为10 mm,试样制备如图10所示。

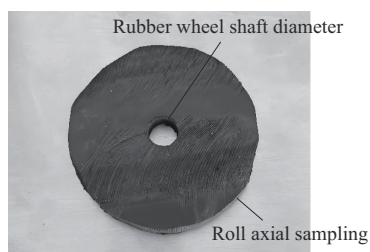


图10 阿克隆磨耗试样

Fig. 10 Akron wear sample

试验过程中,令试样与砂轮在特定倾斜角度及规定负荷下进行摩擦,测定试样在1.61 km (调节预置数至3 416转)里程内的磨耗体积。

试样数量不少于5个,重复上述试验,利用GB/T 1689-2014中的相关公式计算试样磨耗体积,分析并处理试验数据。以算术平均值表示试验结果,统计结果见表9,允许偏差为 $\pm 10\%$ 。

表9 试制托辊辊筒的耐磨性能测试结果

Tab. 9 Abrasion resistance test results of trial-produce idler rollers

Sample number	Abrasion volume/cm ³	Mean value/cm ³
1	0.19	0.208
2	0.21	
3	0.21	
4	0.23	
5	0.20	

将表9中的测试结果与产品性能要求进行对比,根据MT 820-2006中的要求,阿克隆磨耗试验中1.61 km里程内磨耗体积不应超过0.7 cm³,而PE-UHMW双抗复合材料辊筒的平均磨耗体积约为0.21 cm³,仅为标准要求的30%,因此,该辊筒耐磨性能良好。

5 结论

(1)通过添加阻燃剂和抗静电剂,研究出一种新型PE-UHMW双抗复合材料以满足煤矿井下产品的使用要求。该材料上表面电阻均值为 $3.5 \times 10^5 \Omega$,下表面电阻均值为 $4 \times 10^5 \Omega$,有焰燃烧时间均值为1.35 s,无焰燃烧时间均值为9.29 s,均满足MT/T 113-1995标准要求,可用于制造煤矿井下用托辊产品。

(2)使用ANSYS Workbench仿真软件对该PE-UHMW托辊和传统金属托辊进行静力学分析,结果显示PE-UHMW托辊在等效应力和减重上优于传统托辊。

(3)对PE-UHMW托辊结构进行了改进及优化设计,结果显示,辊筒内壁带圆形截面加强筋及圆环的结构最优,该结构下托辊变形较小,受力也更

加均匀;通过响应面优化法得到加强筋最佳尺寸为宽12.3 mm、高7.4 mm,圆环最佳厚度为2.0 mm。优化后托辊在受到较小应力的同时,其变形量较优化前减少了42.6%,质量则变化不大,但比金属托辊减轻75%,大大降低了运行阻力,提高了托辊的性能。

(4)设计一体化挤出成型工艺,根据辊筒仿真结果设计挤出模具。经正交试验法选出最佳工艺参数组合:机头温度为230 ℃、熔体压力为14 MPa、牵引速度为1.5 m/min,克服了PE-UHMW塑料挤出成型中的难题。最后,通过本体取样进行了辊筒的耐磨性能试验,验证了工艺的可靠性。

参考文献

- [1] 蒋卫良, 郝存根, 宋兴元, 等. 煤矿带式输送机关键技术发展现状与展望[J]. 智能矿山, 2020, 1(1):98-104.
JIANG Weiliang, XI Cungen, SONG Xingyuan, et al. Development status and prospect of key technology of coal mine belt conveyor [J]. Journal of Intelligent Mine, 2020, 1(1):98-104.
- [2] 李仟. 带式输送机托辊失效原因与改进措施分析[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(5):72-75.
LI Qian. Analysis on the failure reasons and improvement measures of belt conveyor roller[J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(5):72-75.
- [3] VASIĆ M, STOJANOVIĆ B, BLAGOJEVIĆ M. Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 117(1). DOI:1016/j.engfailanal.2020.104898.
- [4] 赵少迪, 鲍久圣, 徐浩, 等. 矿用带式输送机承载托辊的磁性液体润滑与密封性能[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21):211-219.
ZHAO Shaodi, BAO Jiusheng, XU Hao, et al. Magnetic fluid lubrication and sealing performance of mining belt conveyor roller[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21):211-219.
- [5] 杨言. 聚氨酯托辊力学特性分析与参数优化[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
YANG Yan. Analysis of mechanical characteristics and parameter optimization of polyurethane idler[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [6] ABDUL SAMAD M. Recent advances in UHMWPE/UHMWPE nanocomposite/UHMWPE hybrid nanocomposite polymer coatings for tribological applications: A comprehensive review[J]. Polymers, 2021, 13(4). DOI:10.3390/polym13040608.
- [7] CHANG T, YUAN C Q, GUO Z W. Tribological behavior of aged UHMWPE under water-lubricated condition[J]. Tribology International, 2019, 133:1-11.
- [8] 王新威, 张玉梅, 孙勇飞, 等. 超高分子量聚乙烯材料的研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(9):3 403-3 420.
WANG Xinwei, ZHANG Yumei, SUN Yongfei, et al. Research progress of ultra high molecular weight polyethylene[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9):3 403-3 420.

- [9] 王艺涵. UHMWPE及其复合材料成型工艺对摩擦学性能的影响及磨损预测[D]. 北京:机械科学研究总院,2023.
- WANG Yihan. Study on the influence of the molding process of UHMWPE and its composites on tribological properties and wear prediction[D]. Beijing: Mechanical Science Research Institute, 2023.
- [10] 刘睿喆. 阻燃型超高分子量聚乙烯研究进展[J]. 广东化工, 2024, 51(9):73-75.
- LIU Ruizhe. Research progress on flame-retardant ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(9):73-75.
- [11] 韩永强, 秦刚, 刘晓. 煤矿用抗静电 UHMWPE 复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(9):1-4.
- HAN Yongqiang, QIN Gang, LIU Xiao. Study on preparation and properties of antistatic UHMWPE composites for coal mines[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(9):1-4.
- [12] FADEL A K. Design and optimization of conveyor belt rollers[D]. Tromsø: UiT Norges Arktiske Universitet, 2024.
- [13] 江旗. 胶带输送机托辊密封结构机理及托辊强度分析[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.
- JIANG Qi. Structural mechanism and strength analysis of roller seal for belt conveyor[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019.
- [14] 张亚飞. 平面直线运输带式输送机托辊的改进与优化[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- ZHANG Yafei. Improvement and optimization of idler of plane linear belt conveyor[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [15] 刘肖东. 带式输送机托辊有限元分析及结构改进研究[J]. 机械管理开发, 2024, 39(7):190-192.
- LIU Xiaodong. Research on finite element analysis and structural improvement of belt conveyor roller[J]. Mechanical Management and Development, 2024, 39(7):190-192.
- [16] 高宇波. 煤矿胶带输送机托辊不同载荷工况受力分析[J]. 机械管理开发, 2024, 39(7):52-53, 56.
- GAO Yubo. Analysis of stresses on coal mine tape conveyor rollers under different loading conditions[J]. Mechanical Management and Development, 2024, 39(7):52-53, 56.
- [17] 姚艳萍, 李金泊, 都平安, 等. 矿用带式输送机托辊结构的优化设计[J]. 煤矿机械, 2024, 45(3):1-3.
- YAO Yanping, LI Jinbo, DU Pingan, et al. Optimization design of roller structure for mining belt conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(3):1-3.
- [18] 张志广, 倪斌庆, 谢竞慧, 等. 超高分子量聚乙烯塑料基体负重轮轻量化技术研究[J]. 塑料工业, 2023, 51(2):133-139.
- ZHANG Zhiguang, NI Binqing, XIE Jinghui, et al. Research on lightweight technology of UHMWPE plastic matrix road wheel [J]. China Plastics Industry, 2023, 51(2):133-139.
- [19] GUO Z, XU R, XUE P. Study on preparation of ultra-high-molecular-weight polyethylene pipe of good thermal-mechanical properties modified with organo-montmorillonite by screw extrusion[J]. Materials, 2020, 13(15). DOI:10.3390/ma13153342.