

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.008

阻燃抗静电长玻纤增强聚丙烯复合材料托辊的开发及应用

韩宝虎¹, 包涵¹, 孙炜歆¹, 吕朋¹, 杨坤¹, 刘国刚²

(1. 国能宝日希勒能源有限公司, 内蒙古呼伦贝尔 021599; 2. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘要: 针对带式输送机金属托辊自重重大、能耗高、不耐腐蚀、冬季易结冰等问题, 以及传统高分子材料托辊自身模量低、耐高低温性能差等缺点, 首先以超高流动聚丙烯(PP)为基体树脂, 对其进行功能化改性, 制备阻燃抗静电PP(FRPP), 然后通过挤出/长纤维浸渍等工艺开发出阻燃抗静电长玻璃纤维增强PP复合材料(FRPP-LFT), 最后通过注塑工艺制备了FRPP-LFT托辊。测试了FRPP和FRPP-LFT的物理力学性能以及阻燃性能, 对制备的托辊进行了受力计算和有限元分析, 并进行了抗外压性能测试和落锤冲击测试。结果表明, 相比于FRPP, FRPP-LFT的比强度和比模量分别提高了2.38倍和3.08倍, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的缺口冲击强度达到 22.55 kJ/m^2 , 负荷变形温度高达 $165.30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 线膨胀系数显著降低至 $80\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, 有焰燃烧时间为 2.03 s , 表面电阻率为 $1\times 10^6\text{ }\Omega$; FRPP-LFT托辊筒体在抗外压性能测试中的载荷达到 $7\text{ }000\text{ N}$, 安全系数达到了 10.97 , 挠度仅为 0.284% , 低温落锤冲击后托辊形貌保持完整。现场应用情况证明, FRPP-LFT托辊轻量化效果显著且不易结冰, 经过季节交替, 托辊筒体未出现蠕变和塌腰变形的现象, 表明托辊耐高低温性能极佳, 可安全适用于户外全天候的场景。

关键词: 托辊; 聚丙烯; 全天候; 长纤维浸渍; 阻燃抗静电; 冲击强度

中图分类号: TQ317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0058-07

Development and application of rollers based on flame-retardant and antistatic long glass fiber reinforced polypropylene composites

HAN Baohu¹, BAO Han¹, SUN Weixin¹, LYU Peng¹, YANG Kun¹, LIU Guogang²

(1. CHN Energy Baorixile Energy Co., Ltd., Hulunbair 021599, China;

2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract : Belt conveyor metal rollers are characterized by their heavy weight, high energy consumption, poor corrosion resistance, and a propensity to accumulate ice during winter. Concurrently, conventional polymer rollers exhibit limitations such as low modulus and poor performance at extreme temperatures. To address these issues, firstly, the ultra-high flow polypropylene (PP) was used as the matrix resin, and the functional modification of PP was done for preparing flame retardant and antistatic PP (FRPP), then the flame-retardant and antistatic long glass fiber reinforced polypropylene composite (FRPP-LFT) was developed using extrusion and long fiber impregnation techniques. Finally, FRPP-LFT rollers were prepared by injection molding process. The physical and mechanical properties, retardancy of FRPP and FRPP-LFT were tested. The stress calculation and finite element analysis of the prepared rollers were carried out, and the external compressive resistance test and drop hammer impact test were conducted. The results show that, compared to FRPP, the specific strength and modulus of FRPP-LFT are increased by 2.38 times and 3.08 times respectively, the notched impact strength at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 22.55 kJ/m^2 , the temperature of deflection under load reaches $165.30\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the coefficient of linear expansion is significantly reduced to $80\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, flaming combustion time is only 2.03 s and surface resistivity is $1\times 10^6\text{ }\Omega$. The FRPP-LFT roller shell can withstand a load of $7\text{ }000\text{ N}$ in the external compressive resistance test, the safety factor is 10.97 and the deflection is 0.284% . After low-temperature drop hammer impact, the FRPP-LFT roller retains its integrity. Field applications reveal that the FRPP-LFT roller offers substantial weight reduction, reduces icing, and shows no signs of creep or waist collapse deformation following seasonal transitions, which suggests that the roller has excellent high and low temperature resistance and can be safely used in outdoor all-weather scenarios.

Keywords : roller ; polypropylene ; all-weather ; long fiber impregnation ; flame-retardant and antistatic ; impact strength

通信作者: 刘国刚, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高分子材料加工改性、制品开发及应用等

收稿日期: 2025-01-02

引用格式: 韩宝虎, 包涵, 孙炜歆, 等. 阻燃抗静电长玻纤增强聚丙烯复合材料托辊的开发及应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 58-64.

HAN Baohu, BAO Han, SUN Weixin, et al. Development and application of rollers based on flame-retardant and antistatic long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 58-64.

带式输送机是一种重要的中短距离使用的散装物料输送设备,广泛应用于煤炭、港口、冶金、矿山、电力等行业^[1-4]。相比于铁路或卡车的运输方式,带式输送机系统具有运载能力大和效率高等优点,相同运输负荷下可降低劳动强度25%~35%,降低能耗35%~50%,降低运输成本40%~60%,被视为未来的主流运输方式^[5-7]。托辊作为带式输送机的重要组成部分,承托着输送带及物料,保证输送机平稳运行。根据输送机长度不同,输送线会有上百至数万只托辊,约占整机成本的30%,占维护成本的30%~70%,因此,托辊长寿命的平稳运行显得尤为重要。输送机约50%以上的能耗源于输送带与托辊之间的摩擦和托辊自身的旋转摩擦,传统的金属托辊较重,且不耐磨、耐腐蚀,因此,解决托辊的机械式摩擦耗能并实现托辊轻量化,对于提升带式输送机的经济效益,实现节能减排具有重要意义。

相比于金属托辊,非金属托辊在结构和材料使用上更具多样性,并且具有优良的力学性能、轻质以及出色的耐磨和耐腐蚀性能、经济高效、易于制造和节能降噪等优点^[8-9]。RKM Roller Company, Innoveyor, Rulmeca, ABEC-Apollo, Sandvik Mining, MESTO等国外公司采用超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)材料制备托辊筒体,其中MESTO公司的Moxie型号托辊相比钢制托辊减重50%,噪音仅为钢制托辊的1/4^[10]。RKM Roller Company和Innovatory等采用聚氯乙烯(PVC)生产出具有轻质、低噪音、防腐蚀和较低摩擦系数的托辊,降低了材料黏附筒体上的可能性。国内的北京异强塑料制品有限公司、淄博汇川机电设备有限公司、山东华斯达工贸有限公司、南京泰宇矿用设备有限公司等采用PE-UHMW, PVC和聚酰胺(PA)等通过挤出成型制备非金属托辊筒体,托辊轻量化效果较为显著。

相比于井工矿一年四季基本恒温的场景,我国北部的露天矿面临着复杂的气候环境,如国能宝日希勒露天煤矿位于呼伦贝尔草原中部,冬季极寒下的温度达到-51.9℃,夏季高温时达到44.1℃,全年温差跨度接近100℃。矿上现用碳钢托辊自重大、能耗高、更换强度大、耐磨和耐腐蚀性差,且因煤炭水分高,冬季运行时极易积冰和附着杂物,造成设备震颤和运行不畅,给安全生产和设备平稳运行带来巨大挑战。因此,笔者聚焦于露天矿户外季节交替的情况,开发出适用于全天候的高强、高韧和轻

量化的阻燃抗静电非金属托辊。

1 实验部分

1.1 主要原料

超高流动聚丙烯(PP): M100, 熔体流动速率(MFR)为100 g/10 min (测试温度230℃, 负荷2.16 kg), 南京扬子石油化工有限公司;

玻璃纤维(GF): 4805-2400tex, 美国欧文斯科宁公司;

马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH): PO 1020, 美国埃克森美孚公司;

十溴二苯乙烷: SAYTEX 8010, 美国雅宝公司;

三氧化二锑: 天津市福晨化学试剂厂;

导电炭黑: CHEZACARB AC 80, 美国卡博特公司;

聚乙烯蜡: AC316, 美国霍尼韦尔公司;

硬脂酸: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司;

抗氧剂: Irganox® B225, 德国BASF公司。

1.2 主要仪器与设备

往复式销钉螺杆挤出机: SJW-100 (20L/D), 江苏新达科技有限公司;

连续长纤维浸渍包覆造粒机组: Ø-36, 长径比36:1, 南京创博机械设备有限公司;

高速混合机: SHR-10A, 张家港云帆机械有限公司;

注塑机: Systec80/420-200, 奥地利恩格尔有限公司;

表面电阻测试仪: VICTOR 38, 深圳市驿生胜利科技有限公司;

酒精喷灯燃烧试验机: LD-52157, 北京航天伟创设备科技有限公司;

MFR测试仪: 7026, 美国INSTRON公司;

缺口制样机: 6595, 美国INSTRON公司;

冲击试验机: 9050, 美国INSTRON公司;

万能力学试验机: 5965, 美国INSTRON公司;

接触角测量仪: OCA20, 德国Dataphysics公司;

密度梯度仪: Sstypea, 北京仕家万联科技有限责任公司;

热变形维卡测试仪: 6921.000, 美国INSTRON公司;

热机械分析仪: TMA402F3, 德国耐驰公司;

扫描电子显微镜(SEM): Nova Nano SEM450, 美国FEI公司。

1.3 试样制备

阻燃抗静电 PP (FRPP)的制备:将超高流动 PP、复合阻燃剂(十溴二苯乙烷与三氧化二锑质量比为 3:1)、导电炭黑、硬脂酸、聚乙烯蜡等物料,依次加入到高速混合机中并充分混合均匀,将上述 PP 基混合物料加入到往复式销钉螺杆挤出机中挤出造粒(挤出温度为 160~230 °C,螺杆转速为 120 r/min),制备出高流动性的 FRPP (MFR≥30 g/10 min,测试温度 230 °C,负荷 2.16 kg)。

阻燃抗静电长 GF 增强 PP 复合材料(FRPP-LFT)的制备:将 FRPP, PP-g-MAH 与抗氧剂等按照一定配比加入到高速混合机中混合均匀,将混合料加入到连续长纤维浸渍包覆造粒机组中(挤出温度为 200~250 °C,螺杆转速为 100 r/min),在螺杆剪切和混合作用下将熔体输送至浸渍模头,通过牵引机按比例将 GF 引入到浸渍模头,浸渍温度为 230~280 °C,经拉丝、冷却、切粒后制备出 FRPP-LFT 浸渍颗粒。

托辊配件及测试样品制备:先将 FRPP-LFT 在 100~120 °C烘箱中干燥 2~6 h,通过注塑机注塑出筒体、轴承座、端盖和标准测试样条,注射温度为 230~280 °C,注射压力为 90 MPa。

1.4 性能测试

FRPP-LFT 托辊产品需满足 MT 821-2006《煤矿用带式输送机托辊技术条件》、MT/T 1019-2006《煤矿用托辊管体技术条件》和 MT/T 113-1995《煤矿井下用聚合物制品阻燃抗静电性通用试验方法和判定规则》中的性能指标要求。

MFR 按 GB/T 3682.1-2018 的 A 法进行测试,测试温度 230 °C,负荷 2.16 kg。

抗静电性能、阻燃性能按 MT/T 113-1995 进行测试。

水接触角按 GB/T 30693-2014 进行测试。

密度按 GB/T 1033.2-2010 进行测试。

负荷变形温度按 GB/T 1634.2-2019 的 A 法进行测试。

线膨胀系数按 GB/T 36800.2-2018 的 A 法进行

测试。

拉伸性能按 GB/T 1040.2-2022 进行测试,测试速度为 10 mm/min。

线膨胀系数按 GB/T 36800.2-2018 的 A 法进行测试,温度区间为-50~50 °C。

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 进行测试,测试速度为 2 mm/min。

悬臂梁缺口冲击强度按 GB/T 1843-2008 进行测试。

筒体抗外压性能按 GB/T 9647-2015 进行测试。

托辊及筒体耐外冲击性能按 GB/T 14152-2001 进行测试。

SEM 表征:将低温冲击样条的断面喷金后,在 SEM 上观察填料分散和断面形貌。

2 非金属托辊材料的筛选与开发

2.1 非金属托辊材料的筛选

以市售非金属托辊常用聚合物材料为原料进行加工和性能测评,筛选最佳的树脂材料,测试结果见表 1。结果表明,PA 的拉伸强度和弯曲模量最大,密度相对较小,显示出高比强度和高比模量,有助于托辊的轻量化设计,但是由于酰胺键强极性的特点,PA 吸湿性强且尺寸稳定性差,水接触角为 49.10°,亲水性较大,限制了其在极寒地区户外的应用。PVC 具有居中的拉伸强度和弯曲模量,但其密度较大,因此,比强度和比模量都最低,且抗静电改性后的疏水性变差。PE-UHMW 的拉伸强度和弯曲模量均最低,但是其密度最小,具有居中的比强度和比模量和优异的疏水性能。由于 PE-UHMW 具有极高的分子量,分子链间会产生大量的物理缠结,很难通过熔融方法进行加工,采用其他方法的生产效率极低,后改性难度大,易造成功能填料分散不均,产品容易形成应力集中点,导致产品失效。1.80 MPa 下的负荷变形温度结果表明,3 种单一高分子材料的负荷变形温度仅在 60 °C 左右,在长期温度交替和重载作用下,材料易发生蠕变和塌腰,严重时可能造成生产事故。

通过分析发现,目前非金属托辊所用的聚合物

表 1 托辊用非金属材料性能

Tab. 1 Properties of non-metallic materials for roller

Materials	Tensile strength/ MPa	Flexural modulus/ GPa	Density/ (g·cm ⁻³)	Specific strength	Specific modulus	Water contact angle/(°)	Temperature of deflection under load/°C
PA	72.16	2.69	1.19	60.64	2.26	49.10	52.85
PVC	31.23	1.93	1.41	22.15	1.37	79.21	63.28
PE-UHMW	25.20	1.69	1.05	24.00	1.61	84.35	54.73

材料自身模量低、高低温性能不能兼顾,在长期服役过程中,筒体刚度不足且叠加自身蠕变,筒体易发生弯曲变形,导致轴承卡死失效,降低了托辊的使用寿命。同时,目前使用纯聚合物制造的托辊长度很难超过 535 mm,且筒体的壁厚显著增大,导致减重效果受限,市场上对于更长、更轻的托辊的需求尚未得到满足^[11]。

笔者选择 PP 为原料尝试开发新型的非金属托辊,PP 本身玻璃化转变温度较高,用于托辊时低温韧性很差,但是 PP 具有高模量和良好的加工性能,而其低温韧性差的问题可采用长纤维浸渍的方法进行弥补,通过注塑工艺,提高产量的同时提升产品的精密度,减少因产品尺寸差异导致的磨损。

2.2 非金属托辊用 FRPP-LFT 的开发

选用超高流动 PP 作为基体树脂,对其进行功能化改性,制备出高流动性的 FRPP,接着通过长纤维浸渍工艺实现高性能化,制备出 FRPP-LFT,随后结合复合材料特性和结构轻量化技术,实现托辊结构的一体化设计,并对材料、部件以及成品开展性能测试,最后通过安装及实地运行完成产品应用评价。对 FRPP 和 FRPP-LFT 材料开展关键性能测试,结果见表 2。

表 2 托辊用 FRPP 和 FRPP-LFT 性能

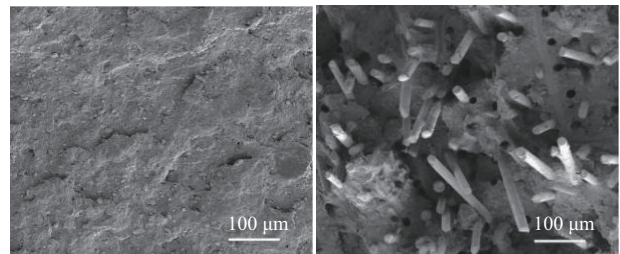
Tab. 2 Properties of FRPP and FRPP-LFT for roller

Properties	FRPP	FRPP-LFT	
Tensile strength/MPa	27.95	113.20	
Flexural modulus/GPa	2.00	9.77	
Density/(g·cm ⁻³)	1.01	1.21	
Specific strength	27.67	93.55	
Specific modulus	1.98	8.07	
Izod notched impact	23 °C	4.30	22.43
strength/(kJ·m ⁻²)	-50 °C	1.74	22.55
Temperature of deflection under load/°C	60.06	165.30	
Coefficient of linear expansion/K ⁻¹	95×10 ⁻⁶	80×10 ⁻⁶	
Water contact angle/(°)	86.25	84.75	
Surface resistivity/Ω	1×10 ⁴	1×10 ⁶	
Flaming combustion time (flame retardant)/s	1.20	2.03	

表 2 结果显示,FRPP 的拉伸强度为 27.95 MPa,弯曲模量为 2.00 GPa,对 FRPP 进行增强改性后,FRPP-LFT 的拉伸强度为 113.20 MPa,弯曲模量为 9.77 GPa,FRPP-LFT 的比强度和比模量相比 FRPP 分别提高了 2.38 倍和 3.08 倍。FRPP 缺口冲击强度在 23 °C 时为 4.30 kJ/m², -50 °C 时仅有 1.74 kJ/m²,表明 FRPP 的低温性能差,不能直接作为托辊材料户外使用。FRPP-LFT 的缺口冲击强度在 23 °C 时为 22.43 kJ/m²,在 -50 °C 时为 22.55 kJ/m²,表明

FRPP-LFT 具有优异的常低温冲击性能。负荷变形温度测试结果显示,FRPP-LFT 的负荷变形温度高达 165.30 °C,远高于 FRPP 的 60.06 °C, -50 °C 至 50 °C 的线膨胀系数显著降低至 80×10⁻⁶ K⁻¹。相比于 FRPP,FRPP-LFT 的阻燃和抗静电性能略有降低,这是因为 GF 的引入,稀释了 FRPP 中功能助剂的含量,导致阻燃和抗静电性能有所降低,但仍满足矿用阻燃抗静电的需求。FRPP 材料的疏水性因 GF 的引入而略微降低,但依旧优于 PVC 和 PA 材料。

图 1 为 FRPP 和 FRPP-LFT 试样冲击断面的 SEM 照片。图 1a 显示,低温冲击断裂后的 FRPP 试样的阻燃剂和抗静电剂分布均匀,表面平整光滑,呈现明显的脆性断裂。由相关文献^[12-14]可知,纤维增强复合材料的性能主要受纤维在制品中的长度及纤维与 PP 之间的界面强度影响,吸收冲击能的方式有 3 种:纤维断裂、纤维拔出、树脂断裂。从图 1b 可以看出,纤维具有高的保留长度,FRPP-LFT 冲击断面发生明显塑性变形,而且孔洞很少,这说明 PP/LFT 复合材料破坏时主要发生纤维的断裂。



(a) FRPP

(b) FRPP-LFT

图 1 FRPP 和 FRPP-LFT 试样冲击断面的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photos of impact fracture of FRPP and FRPP-LFT samples

相比于单一聚合物基阻燃抗静电材料,通过挤出成型/纤维浸渍等方法制备的 FRPP-LFT 具有高模量、高强度、高负荷变形温度和冲击强度及低线膨胀系数,显著拓宽了产品的应用环境窗口,为产品在露天矿的轻量化、宽温度应用提供有力支撑。

3 非金属托辊设计和开发

3.1 托辊的受力计算和有限元分析

输送带线性负载主要受到输送效率和带速的影响^[15],带式输送机长度为 704 m,上托辊间距为 1.2 m,中心托辊和翼托辊的长度均为 530 mm,直径均为 159 mm,翼托辊与水平面形成 35° 的槽角,输送效率约为 2 000 t/h,输送带线速度为 4.0 m/s,按照公式(1)计算可得出输送带负载为 138.9 kg/m。

$$q = \frac{Q}{3.6 \cdot v} \quad (1)$$

式中: q 为输送带线性负载,单位 kg/m ; Q 为煤炭输送效率,单位 t/h ; v 为输送带线速度,单位 m/s 。

输送带带宽为 1.4 m ,厚度为 20 mm ,单位面积质量为 32 kg/m^2 ,计算得出输送带单位长度质量为 44.8 kg ,输送带的质量加到物料质量上,计算得出作用在托辊上的总单位长度质量为 183.7 kg/m 。

假设输送带与托辊之间无滑动,通过公式(2)可将输送带的线速度转换为托辊的角速度 ω ,经计算得出 $\omega=50.31\text{ rad/s}$ 。

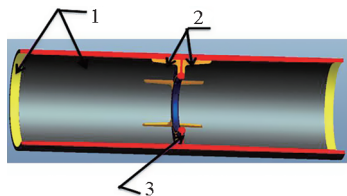
$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2)$$

式中: r 为托辊外半径。

结合托辊的角速度,按照公式(3)计算出托辊的旋转频率 $f=8.01\text{ Hz}$ 。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

托辊筒体作为承载的主要部件,应用中易发生应力集中及显著变形^[16],相比于翼托辊,中心托辊承受的载荷更重,为此,假设中心托辊承受 350 kg 的旋转动态线性力,托辊的旋转频率为 8.01 Hz ,对 $\varnothing 159\text{ mm} \times 530\text{ mm}$ 的托辊筒体进行结构设计,如图2所示,其中筒体壁厚为 7 mm ,环形加强筋高度为 25 mm ,轴向加强筋长为 125 mm ,筋厚为 3.0 mm 。在均匀载荷下,采用8节点壳单元,划分映射网格,共计 $38\,532$ 个单元, $77\,404$ 个节点,导入ANSYS软件中建立仿真模型,在ANSYS软件中调用Solve命令计算分析建立的仿真模型,利用后处理模块提取仿真结果,筒体的应力分布和形变分布如图3所示。



1—Roller wall; 2—Axial reinforcement; 3—Ring reinforcement

图2 托辊筒体轴向剖视图

Fig. 2 Axial sectional view of roller shell

对于未增强托辊筒体的最大应力和形变易发生在中部位置,由图3a可知筒体的最大应力为 10.319 MPa ,位于固定支撑端,结合材料的拉伸强度,筒体的安全系数达到了 10.97 。由图3b可以看出,筒体的最大形变为 $0.150\,76\text{ mm}$,位于固定支撑端与中部加强筋之间,结合形变量与跨度得出挠度为 0.284% 。

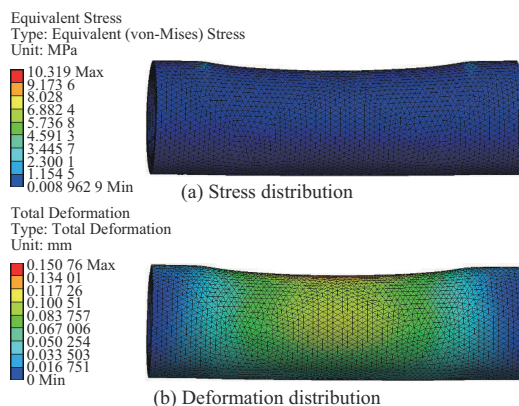


图3 托辊筒体的应力分布和形变分布

Fig. 3 Stress and deformation distribution of roller shell

3.2 托辊筒体抗外压性能测试

鉴于托辊筒体局部的轴向和环向复杂的加强结构设计,以及托辊高速运转对同心度的要求,通过注塑制备高精度托辊筒体,筒体质量仅为 2.63 kg ,约为同规格金属托辊筒体(厚 4 mm)质量的 $1/4$,轻量化效果十分显著。鉴于托辊筒体作为承载的主要部件,采用万能力学试验机的压缩模式,对 12 mm 壁厚的FRPP筒体和 7 mm 壁厚的FRPP-LFT筒体开展塑料管材抗外压性能的测试,测试曲线如图4所示。

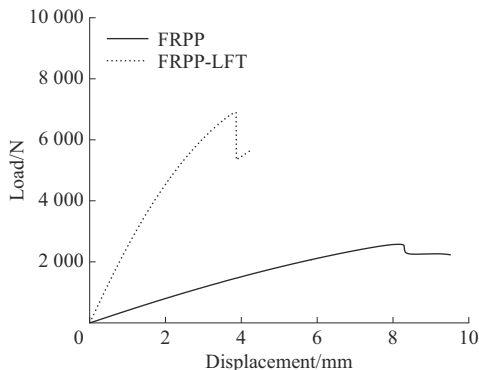


图4 FRPP和FRPP-LFT筒体抗外压性能测试曲线

Fig. 4 External compressive resistance test curves of FRPP and FRPP-LFT roller shell

图4显示,FRPP筒体可承受最大载荷约为 $2\,000\text{ N}$,FRPP-LFT筒体承受最大的载荷达到 $7\,000\text{ N}$,说明在FRPP-LFT中GF形成增强骨架,且托辊筒体内壁分布有环向和轴向的加强筋,可以在减薄和减重的同时不影响筒体的强度,有效提高托辊的抗变形能力和安全系数。

3.3 托辊筒体低温落锤冲击测试

鉴于现场冬季极寒应用场景,为保障托辊的安全运行,选用 $d90$ 型的 10 kg 落锤,在高度为 100 mm 和 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下对FRPP和FRPP-LFT托辊筒体进

行低温落锤冲击的测试,两种托辊筒体在落锤冲击后的形貌如图5所示。

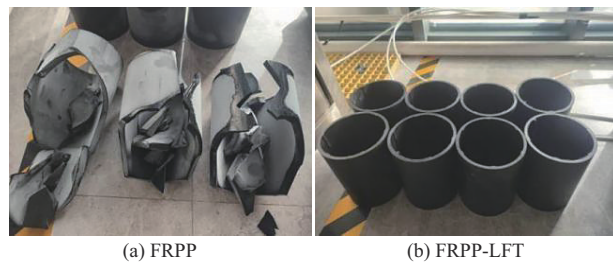


图5 FRPP和FRPP-LFT托辊筒体的低温落锤冲击照片
Fig. 5 Pictures of FRPP and FRPP-LFT roller bodies after low-temperature drop hammer impact

经低温落锤冲击后,图5a中的FRPP托辊筒体发生了大面积的碎裂,断口平整,呈现出明显的脆性断裂。图5b中的FRPP-LFT托辊筒体形貌基本保持完整,仅出现局部裂纹,裂纹处的界面形貌粗糙,这主要是由于纤维保留长度长,彼此相互搭接,形成增强骨架,阻止裂纹的大范围蔓延,因此,FRPP-LFT托辊筒体具有优异的低温抗冲击性能。

3.4 托辊落锤冲击测试

按照 GB/T 14152-2001,分别在 23 °C 和 -50 °C 下对 FRPP-LFT 托辊开展 1 000 mm 高度的落锤冲击测试,冲击后的形貌如图6所示。

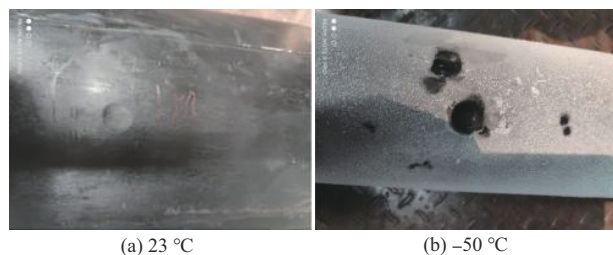


图6 FRPP-LFT托辊在23 °C和-50 °C下的落锤冲击图片
Fig. 6 Pictures of FRPP-LFT roller after drop hammer impact at 23 °C and -50 °C

图6结果表明,FRPP-LFT托辊面对近100 J冲击势能,在速度为4.5 m/s的快速冲击下,托辊表面仅有坑痕,未呈现破坏,说明FRPP-LFT托辊具有良好的高低温抗冲击性能,可安全地用于国能宝日希勒露天矿的全天候环境中。

4 托辊现场应用效果

FRPP-LFT托辊产品在第三方检测机构完成径向跳动、旋转阻力、轴向窜动、密封性能、阻燃性能、抗静电性能等关键指标的测评,相关结果见表3。表3的结果表明,FRPP-LFT托辊的所有关键指标符合标准要求。

表3 FRPP-LFT托辊性能测试结果

Tab. 3 Properties testing results of FRPP-LFT rollers

Properties	Standard value	Testing mean value
Radial circular runout/mm	≤1.0	0.7
Rotational resistance/N	≤3.0	2.7
Axial movement/mm	≤1.2	0.8
Axial displacement after falling/mm	≤1.2	1.1
Rotational resistance after falling/N	≤4.5	3.2
Immersion sealing performance/g	≤150	109
Water-drenching sealing performance/g	≤250	18
Flame	Flaming combustion time/s ≤10	2.10
retardant	Flameless combustion time/s ≤30	19.85
Surface resistivity/Ω	≤1×10 ⁸	1×10 ⁶

FRPP-LFT托辊于2023年12月安装于国能宝日希勒露天矿的208#主运输送线,输送效率达到2 000 t/h,输送带线速度为4.0 m/s,托辊的角速度和频率分别达到50.31 rad/s和8.01 Hz,说明托辊面临重载荷、高转速和近-50 °C下的极寒的应用场景。图7为托辊应用现场的照片,图7a为在冬季极寒时托辊开始应用时的照片,FRPP-LFT托辊质量仅为7.808 kg,为金属托辊的56.79%,现场应用表明,托辊安装便捷,显著降低了劳动强度,且托辊自身不易积冰。图7b为托辊经过9个月的运行后处于中期应用阶段时的照片,可以看出,经季节交替,托辊筒体表面仅出现轻微的磨耗,并未出现蠕变和塌腰变形的现象,表明FRPP-LFT托辊耐高低温性能极佳,可适用于户外全天候的场景。



图7 托辊应用现场图片

Fig. 7 Pictures of FRPP-LFT roller application site

5 结论

针对露天矿高寒、全年温差大、高载荷、高转速的应用场景,传统金属托辊具有能耗高、不耐腐蚀、冬季易积冰等缺点。为此,采用挤出/长纤维浸渍等工艺制备了FRPP-LFT,进一步通过结构设计和注塑等制备出具有高模量、高强度、高负荷变形温度和高冲击强度及低线膨胀系数的非金属托辊。

(1)制备的Ø159 mm×530 mm FRPP-LFT托辊的质量仅为7.808 kg,为金属托辊的56.79%,表明与

金属材料相比,使用FRPP-LFT制备托辊,轻量化效果更佳,节能效果更显著。

(2)相比于FRPP,FRPP-LFT的比强度和比模量分别提高了2.38倍和3.08倍, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的缺口冲击强度达到 22.55 kJ/m^2 ,负荷变形温度高达 $165.30\text{ }^{\circ}\text{C}$,线膨胀系数显著降低至 $80\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,有焰燃烧时间为 2.03 s ,表面电阻率为 $1\times 10^6\text{ }\Omega$;托辊筒体在抗外压性能测试中的载荷达到 $7\text{ }000\text{ N}$,安全系数达到了10.97,挠度仅为 0.284% 。

(3)通过对材料、筒体和托辊的梯级性能测评,有效保障了FRPP-LFT托辊在露天矿的应用。托辊冬季不易结冰,经过季节交替,托辊筒体未出现蠕变和塌腰变形,说明其耐高低温性能极佳,可安全适用于户外全天候的场景。

参考文献

- [1] 陈太光, 郝存根. 基于数字孪生的煤矿带式输送机监控技术研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(10): 69–72, 84.
CHEN Taiguang, XI Cungen. Research on monitoring technology of coal mine belt conveyor based on digital twins[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(10): 69–72, 84.
- [2] LIU Y, MIAO C Y, LI X G, et al. Research on deviation detection of belt conveyor based on inspection robot and deep learning[J]. Complexity, 2021, 2021(1). DOI:10.1155/2021/3734560.
- [3] MAZURKIEWICZ D. Analysis of the ageing impact on the strength of the adhesive sealed joints of conveyor belts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1-3): 477–485.
- [4] 郝洪涛, 刘建昊. 带式输送机托辊组振动噪声仿真分析及参数优化[J]. 煤炭工程, 2024, 56(8): 218–224.
HAO Hongtao, LIU Jianhao. Simulation analysis and parameter optimization of vibration and noise of belt conveyor roller set[J]. Coal Engineering, 2024, 56(8): 218–224.
- [5] 蒋卫良, 韩东劲. 我国煤矿带式输送机现状与发展趋势[J]. 煤矿机电, 2008, 29(1): 1–6.
JIANG Weiliang, HAN Dongjin. Development situation and tendency of native mining belt conveyor[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2008, 29(1): 1–6.
- [6] 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.
- [7] 刘广建, 陈冲冲, 马艳娥, 等. 新型密封结构高分子托辊的摩擦磨损试验研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(11): 49–51.
LIU Guangjian, CHEN Chongchong, MA Yane, et al. Test research on friction and wear of new sealing structure polymer roller[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(11): 49–51.
- [8] 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.
- [9] 孙亚楠, 杨玮婧, 田广华. 托辊用材料的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2016, 45(3): 148–150.
SUN Yanan, YANG Weijing, TIAN Guanghua. The research progress of roller materials[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2016, 45(3): 148–150.
- [10] MASAKI M S, ZHANG L J, XIA X H. A design approach for multiple drive belt conveyors minimizing life cycle costs[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 526–541.
- [11] OPASIAK T, PERUŃ G. Influence of construction the rollers C type on resistance of rotating driven system of the belt conveyor[J]. Diagnostyka, 2016, 17(1): 81–86.
- [12] FU S Y, MAI Y W, CHING E C Y. Correction of the measurement of fiber length of short fiber reinforced thermoplastics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(11): 1 549–1 555.
- [13] 刘国刚, 马伊, 梁文斌, 等. 长玻纤增强聚丙烯复合材料性能研究[J]. 塑料科技, 2017, 45(10): 25–29.
LIU Guogang, MA Yi, LIANG Wenbin, et al. Study on properties of long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(10): 25–29.
- [14] 孙昌辉, 郭鹏, 张师军. 螺杆组合设计对玻纤增强聚丙烯性能的影响[J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31(5): 24–27.
SUN Changhui, GUO Peng, ZHANG Shijun. Effects of screw configuration design on properties of glass fiber reinforced polypropylene[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31(5): 24–27.
- [15] 张刚. 煤矿带式输送机托辊结构的仿真及结构优化研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(18): 207–209, 214.
ZHANG Gang. Simulation and structural optimization research on the roller structure of coal mine belt conveyor[J]. Automation Application, 2024, 65(18): 207–209, 214.
- [16] 翟建忠. 新型矿用带式输送机托辊有限元分析及结构优化[J]. 机械管理开发, 2023, 38(7): 177–178, 183.
ZHAI Jianzhong. Finite element analysis and structural optimization of new mining belt conveyor rollers[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(7): 177–178, 183.