高刚韧平衡阻燃抗静电聚丙烯复合材料的制备及矿用管材应用研究

刘国刚[1],孙炜歆[2],杨 坤[2],包 涵[2],李文慧[2],朱会岐[2]

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

摘 要:为提高煤矿井下特殊工况管道材料的综合性能,制备一种高刚韧平衡矿用阻燃抗静电聚丙烯(FRPP)管材专用材料。以自制高刚韧平衡聚丙烯组合物为基体,采用红磷阻燃剂与超导炭黑协同改性,结合母粒法工艺制备高浓度功能母粒,系统研究母粒添加量对材料性能的影响。结果表明,当高刚韧平衡聚丙烯组合物和母粒质量比为1∶1时,FRPP复合材料的表面电阻降至10^6 Ω,有焰燃烧时间为2 s,满足MT 113—1995标准要求。此时,FRPP复合材料的弯曲模量高达1 009.00 MPa,具备良好的低温韧性,能够有效解决传统高密度聚乙烯(HDPE)钢丝网骨架复合管在长距架设时下垂的问题。在现场应用中,FRPP管道在许用应力、安全系数及抗下垂能力方面表现优秀,具有工程应用价值。

关键词:聚丙烯;阻燃性能;抗静电性能;管材专用料;钢丝网骨架复合管;煤矿管道

中图分类号:TQ325 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0073-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.013

Preparation of High Rigidity–Toughness Balanced Flame Retardant and Antistatic Polypropylene Composites and Their Application in Mining Pipes

LIU Guogang[1], SUN Weixin[2], YANG Kun[2], BAO Han[2], LI Wenhui[2], ZHU Huiqi[2]

(1. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China;
2. CHN Energy Baorixile Energy Co. , Ltd. , Hulun Buir 021599, China)

Abstract: To improve the comprehensive performance of pipeline materials used in special underground coal mine conditions, a high rigidity-toughness balanced flame retardant and antistatic polypropylene (FRPP) special pipe material was prepared. Using a self-developed high rigidity-toughness balanced polypropylene composition as the matrix, red phosphorus flame retardant and superconducting carbon black were employed for synergistic modification, and a high-concentration functional masterbatch was prepared via the masterbatch process. The effects of masterbatch addition on material properties were systematically investigated. The results showed that when the mass ratio of the high rigidity-toughness balanced polypropylene composition to the masterbatch was 1∶1, the surface resistivity of the FRPP composite decreased to 10^6 Ω, and the flame burning time was 2 s, meeting the requirements of the MT 113—1995 standard. At this ratio, the flexural modulus of the FRPP composite reached as high as 1 009.00 MPa, and it exhibited good low-temperature toughness, effectively addressing the sagging problem of traditional high-density polyethylene (HDPE) steel wire mesh skeleton composite pipes during long-distance installation. In field applications, the FRPP pipe demonstrated excellent performance in terms of allowable stress, safety factor, and sag resistance, showing promising engineering application value.

Keywords: Polypropylene; Flame retardancy; Antistatic property; Special materials for pipes; Steel wire mesh skeleton composite pipe; Coal mine pipeline

收稿日期Submitted date 2026-01-15;修回日期Revised date 2026-02-11;录用日期Accepted date 2026-03-06

基金项目:北京低碳清洁能源研究院科技创新项目(S930023072)

联系人,21109295@ceic.com

引用本文:刘国刚,孙炜歆,杨坤,等.高刚韧平衡阻燃抗静电聚丙烯复合材料的制备及矿用管材应用研究[J].塑料科技,2026,54(8):73−78.

Citation:LIU G G, SUN W X, YANG K, et al. Preparation of high rigidity-toughness balanced flame retardant and antistatic polypropylene composites and their application in mining pipes[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 73-78.

我国煤炭可采储量约1 430亿t。2025年我国原煤产量达到48.3亿t。煤炭在我国一次能源消费中占比达55%，是保障能源安全的战略能源和工业原料[1]。井下作业环境恶劣、道路狭窄、瓦斯浓度高、开采条件差等缺点导致井下工人开采作业劳动强度大、危险系数高[2-3]。因此，实现煤炭资源高效、安全开采，对国民经济健康、可持续发展具有重要支撑作用。

管道系统是煤矿安全生产和高效运行的关键基础设施，承担给排水、瓦斯抽放、压风和物料输送等重要工程任务[4-6]。传统金属管道具备良好机械强度和安全系数，但存在质量大、易腐蚀结垢、安装及维护成本高等缺点。早期用于替代金属管道的玻璃钢管道因脆性大、易破损、无法回收等缺点而逐渐淡出矿用管道市场。聚氯乙烯(PVC)管道则因韧性和安全性差、不可回收等缺点而被市场淘汰[7-9]。超高分子量聚乙烯(UHMWPE)管道虽性能优异，但加工难度大，成本高，应用范围受限[10-12]。

近年来，钢丝网骨架塑料复合管(简称钢丝网复合管)兼具金属管的强度与塑料管的耐腐蚀性和柔韧性，已在煤矿、化工园区、沿海城市供水改造等领域替代传统钢管，在现代管道工程中占据重要地位[13-15]。目前，该类管材主要采用高密度聚乙烯(HDPE)作为内外层承压层，具有耐腐蚀、质轻、安装便利及可回收等优点[16-18]，但其强度和模量较低、耐热和耐环境开裂性能(ESCR)较差，在应用中易发生管道下垂、接头拉脱及漏水等安全事故，造成施工和维护成本增加，效率降低。聚丙烯存在阻燃性差和易积累静电等固有缺陷，难以直接满足矿井严苛的安全要求[19-23]。因此，需要对其进行阻燃与抗静电双重改性，开发新型管材专用料。

因此，本研究自制高刚韧平衡聚丙烯组合物，引入红磷阻燃剂和超导炭黑，制备具有良好阻燃性、抗静电性能及刚韧平衡的阻燃抗静电聚丙烯(FRPP)管道专用料，旨在克服HDPE管道的下垂缺陷，降低全生命周期的运营成本，为矿用管材的研发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

高刚韧聚丙烯组合物，NICE1050，熔体流动速率(MFR)为0.25 g/10 min (230 ℃，2.16 kg)，自制；均聚聚丙烯(PPH，2101)、无规共聚聚丙烯(PPR，4220)，中国石油化工股份有限公司北京燕山分公司；聚烯烃弹性体(POE)，8150，陶氏化学公司；高浓度阻燃抗静电母粒，MFR为0.04 g/10 min (230 ℃，2.16 kg)，自制；导电炭黑，JK-003，美国卡博特公司；红磷母粒，1 400目，清远市一丞阻燃材料有限公司；硬脂酸，质量分数≥99%，南通蒙亚化工有限公司；聚乙烯蜡，AC316A，美国霍尼韦尔公司；抗氧剂，B225，德国BASF公司。

1.2 仪器与设备

加压式密炼机，35L，昆山科信橡塑机械有限公司；单螺杆挤出机，Φ120 mm，昆山科信橡塑机械有限公司；双螺杆挤出机，Φ75 mm，昆山科信橡塑机械有限公司；钢丝网骨架复合管生产线，Φ75 mm，昆山市众捷塑料机械有限公司；注塑机，Systec80/420-200，恩格尔奥地利有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，Nova Nano SEM450，美国FEI公司；熔体流动速率仪，7026.000，美国CEAST公司；万能力学试验机，5965，美国CEAST公司；缺口冲击试验机，9050，美国CEAST公司；表面电阻测试仪，Victor38，深圳驿生胜利科技有限公司；微机控制静液压试验机，MTSH-6，天津市美特斯试验机厂。

1.3 样品制备

1.3.1 高刚韧聚丙烯组合物的制备

将PPH、PPR和POE按照3∶5∶2的质量比在高速混合机中混合3~5 min。将混合物料转移至螺杆挤出机料斗，在160~230 ℃、主机转速为300 r/min条件下挤出，造粒。

1.3.2 高浓度阻燃抗静电母粒的制备

将100 phr的聚丙烯组合物、70 phr的红磷母粒和25 phr的导电炭黑、2 phr的聚乙烯蜡和2 phr的硬脂酸以及1 phr的抗氧剂均匀混合，加入密炼机，在210 ℃条件下密炼10~15 min。物料塑化混炼均匀后，将物料投入单螺杆挤出机料斗，在150~220 ℃、主机转速200 r/min条件下挤出造粒，制得高浓度阻燃抗静电母粒(简称阻燃抗静电母粒)，在100 ℃烘干2 h，备用。

1.3.3 FRPP样品的制备

表1为FRPP的配方。将高刚韧聚丙烯组合物和高浓度阻燃抗静电母粒按比例加入高速混合机，在70 ℃条件下混合8~10 min。将混合物料投入双螺杆挤出机，在160~220 ℃、主机转速300 r/min条件下挤出造粒，制得FRPP粒料。采用二次挤出工艺，改善填料分散效果，提升制品性能。母粒法能够有效解决材料生产中的粉尘问题，改善作业环境，借助失重称精确计量，提高配方准确性。

将粒料在100 ℃的烘箱中烘干2 h，在220~250 ℃条件下采用注塑机注塑成型标准测试样品条。

表1 FRPP的配方

Tab.1 Formula of FRPP 单位：%

样品编号	$w_{高刚韧聚丙烯组合物}$	$w_{高浓度阻燃抗静电母粒}$
S0	100	0
S1	90	10
S2	80	20
S3	70	30
S4	60	40
S5	50	50
S6	40	60
S7	0	100

1.3.3 FRPP管材的制备

管材为三层复合结构。内层和外层均为实壁结构，采用改性FRPP材料；中间增强层由高强度钢丝缠绕成网状

结构，采用专用胶黏剂与内外层牢固结合。

图1为FRPP管材的生产工艺。按照配方称量物料，经高速混合机充分混合，在70 ℃条件下烘干4 h。采用喂料机将物料送入挤出机，在170~210 ℃条件下挤出内层管，经牵引、冷却定型后，按照承压要求选用相应钢丝规格及缠绕数量(缠绕角度约55°)，将管材放入300 ℃烘箱加热，与150~200 ℃下挤出的中间胶黏剂复合。在190~220 ℃条件下挤出外层保护层，牵引速度为0.5 m/min，冷却定型。成品经切割，抽检合格后，在210 ℃下进行热熔翻边封口，安装内芯和扣压法兰接头，入库。

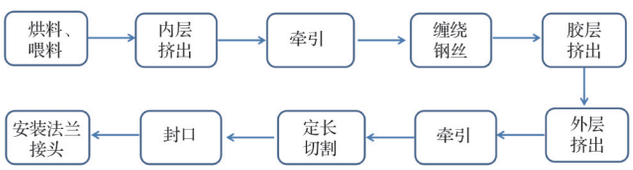


图1 FRPP管材的生产工艺

Fig.1 Production process of FRPP pipe

1.4 性能测试与表征

燃烧性能和抗静电性能测试：按照MT 113—1995进行测试。燃烧性能测试样品尺寸为360 mm×50 mm×5 mm，抗静电性能测试样品尺寸为300 mm×300 mm×5 mm。

MFR测试：按照GB/T 3682.1—2018进行测试，载荷2.16 kg，温度230 ℃。

力学性能测试：拉伸强度按照GB/T 1040.1—2025进行测试，测试环境温度(23±2) ℃，拉伸速度50 mm/min。弯曲强度按照GB/T 9341—2008进行测试，测试环境温度(23±2) ℃，加载速度2 mm/min。悬臂梁缺口冲击强度按照GB/T 1843—2008进行测试。静液压性能按照GB/T 32439—2015进行测试，介质为水，温度20 ℃，施加内压力5.0 MPa。

SEM测试：将冲击样条于液氮中冷冻脆断，断面喷金后，在扫描电子显微镜下观察填料的分散及断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 阻燃抗静电母粒添加量对FRPP性能的影响

2.1.1 抗静电性能

图2为母粒添加量对FRPP表面电阻的影响。从图2可以看出，高刚韧聚丙烯组合物(S0)属于绝缘体，表面电阻达10^{16} Ω。在母粒添加量较低时，表面电阻无明显变化。当母粒质量分数为40%时，体系开始形成稳定的导电逾渗网络，表面电阻降至3×10^{9} Ω。当母粒添加量为50%时，表面电阻进一步降至10^{6} Ω，满足MT 113—1995对矿用管道的抗静电要求(≤10^{8} Ω或≤10^{9} Ω)。这表明炭黑填充体系存在明显的逾渗阈值，一旦形成连续导电通路，电阻急剧下降并趋于稳定[24]。

2.1.2 阻燃性能

表2为母粒添加量对FRPP燃烧性能的影响。从表2可以看出，高刚韧聚丙烯组合物(S0)遇明火持续燃烧，有焰燃烧时间大于60 s，不符合矿用安全标准。随着母粒添加量的增加，燃烧性能得到改善。当母粒添加量为40%时，6条样品的有焰燃烧时间总和为17 s，无焰燃烧时间总和为35 s，满足MT 113—1995的要求(有焰燃烧时间≤18 s，无焰燃烧时间≤120 s)。S5及更高添加量样品的阻燃性能更佳，有焰燃烧时间趋近0 s。

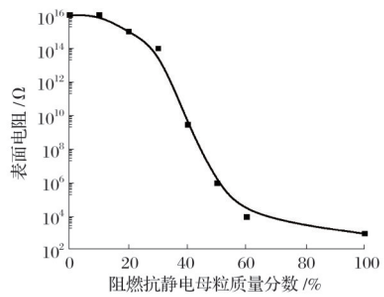


图2 母粒添加量对FRPP表面电阻的影响

Fig.2 Effect of masterbatch addition on surface resistivity of FRPP

表2 母粒添加量对FRPP燃烧性能的影响

Tab.2 Effect of masterbatch addition on flame retardancy of FRPP

单位：s

样品编号	有焰燃烧时间(6条之和)	无焰燃烧时间(6条之和)
S0	>60	
S1	>60	
S2	55	157
S3	42	60
S4	17	35
S5	2	0
S6	1	0
S7	0	0

2.1.3 MFR

图3为母粒添加量对FRPP的MFR的影响。从图3可以看出，随着母粒添加量的增加，FRPP的MFR逐渐降低。这主要与炭黑粒子在基体中形成的物理交联结构有关，该结构使聚合物分子链的运动产生限制。降低MFR有助于提高管材料熔体强度，但过低的MFR将会影响生产效率。挤出管材理想的MFR范围通常为0.10~0.30 g/10 min。S4和S5配方的MFR均在此范围内，符合加工流动性要求。

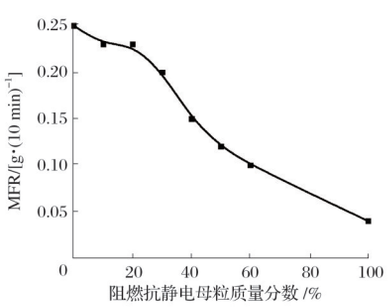


图3 母粒添加量对FRPP的MFR的影响

Fig.3 Effect of masterbatch addition on MFR of FRPP

2.1.4 力学性能

表3为母粒添加量对FRPP力学性能的影响。从表3可以看出，随着母粒添加量的增加，FRPP的拉伸强度和弯曲强度基本保持稳定，弯曲模量逐步增大。这表明炭黑等填料具有增强增刚效果，有利于管材的环刚度与抗变形能力提升。值得注意的是，断裂伸长率和缺口冲击强度随着母粒含量增加而下降。这是因为高硬度的炭黑粒子聚集，一方面该粒子与聚丙烯基体的相容性降低，另一方面分子链滑移受到阻碍，材料耗散冲击能量的能力削弱，导致韧性降低[25]。图4为不同测试温度下S5的冲击强度。从图4可以看出，S5表现出良好的低温韧性，能够拓宽其在极寒地区的应用范围。

综上所述，相较于矿用HDPE管道，以聚丙烯为基材开发的FRPP具有显著优势，达到同等阻燃抗静电效果所需改性剂添加量更少，对力学性能的负面影响较小。虽然聚丙烯的长期耐蠕变性能低于HDPE，但在10年服役寿命内，其拉伸强度与耐压能力更高。因此，采用改性聚丙烯作为新一代矿用管材基体，具有应用潜力。

表3 母粒添加量对FRPP力学性能的影响

Tab.3 Effect of masterbatch addition on mechanical properties of FRPP

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弯曲强度/MPa	弯曲模量/MPa	悬臂梁缺口冲击强度(23 ℃)/(kJ·m^{-2})
S0	23.62	27.61	21.12	843.00	31.92
S1	21.85	22.32	20.27	862.00	19.97
S2	21.78	21.22	20.33	911.00	18.35
S3	22.59	15.87	20.80	920.00	18.31
S4	22.76	13.98	20.86	944.00	17.54
S5	21.48	13.21	21.03	1 009.00	16.55
S6	20.38	11.58	21.47	1 024.00	15.99
S7	10.35	8.38	16.13	1 066.00	14.77

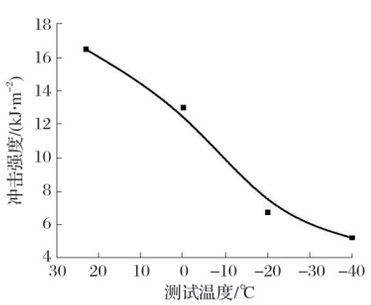
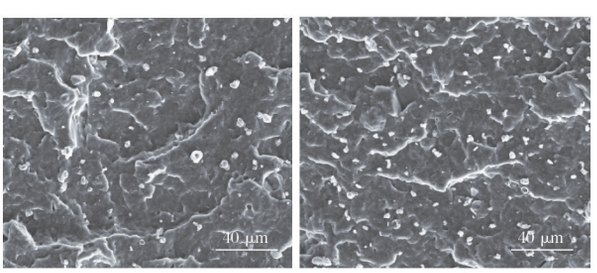


图4 不同测试温度下S5的冲击强度

Fig.4 Impact strength of S5 at different test temperatures



(a) S3 (b) S5

图5 S3和S5样品断面的SEM照片

Fig.5 SEM images of fracture surfaces of S3 and S5 samples

2.1.5 微观形貌

图5为S3和S5样品断面的SEM照片。从图5可以看出，填料在基体中分散均匀，未出现明显团聚。S3中炭黑含量较低，炭黑之间的间隙较大，无法形成有效导电网络，与其表面高电阻(10^{14} Ω)相符。相比之下，S5中炭黑颗粒相互接触或形成相邻聚集体，为电子跃迁提供有效路径，从而构建完整的导电通路，使其表面电阻显著降低。

2.2 FRPP管道敷设施工及设计分析

图6为矿用管道现场架设。在金属管道敷设中，支架间距统一设为4.0 m。从图6可以看出，将钢丝网复合管置于4.0 m间距支架上时，HDPE管(绿色)出现明显塌腰下垂，FRPP管(黑色)虽存在一定变形，但其形变量明显小于HDPE管(绿色)。该对比验证了高刚性FRPP材料在抑制管道下垂方面具有良好效果。



图6 矿用管道现场架设

Fig.6 Site erection of mine pipeline

鉴于非金属管道种类繁多，刚度差异大，其支架间距不能简单套用金属管标准，而需结合巷道条件、管径、介质、温度、支撑方式等因素综合计算确定。大型煤矿企业规定，符合MT/T 141—2005的塑料给排水管在水平敷设时，相对挠度形变量应小于管径的5%，支架间距通常不大

于1.0 m (如DN110 HDPE管间距≤0.8 m)。

$$相对挠度=\frac{形变量}{公称外径-形变量} \quad (1)$$

为了量化分析FRPP管的抗下垂性能,本研究基于管道特征参数,采用Abaqus软件计算公称压力为2.5 MPa的DN110、DN160、DN200和DN315 4种管道在1.5 m和4.0 m支架间距下的挠曲变形。表4为FRPP管道特征参数。表5为不同支架间距下FRPP管道的最大形变量及相对挠度。

从表5可以看出,在4.0 m支架间距下,DN315管道的相对挠度达到5.72%,超过规定限值。而在1.5 m支架间距下,DN110管道相对挠度为2.45%,满足要求。

表4 FRPP管道特征参数

Tab.4 Characteristic parameters of FRPP pipes

管道编号	公称外径/mm	壁厚/mm	公称压力/MPa	充水总重/(kg·m^{-1})	弹性模量/MPa	泊松比
DN110	110.0	7.5	2.5	9.8	1 002.9	0.4
DN160	160.0	10.0	2.5	21.2	1 023.2	0.4
DN200	200.0	11.0	2.5	32.0	1 023.4	0.4
DN315	315.0	15.0	2.5	80.0	1 047.5	0.4

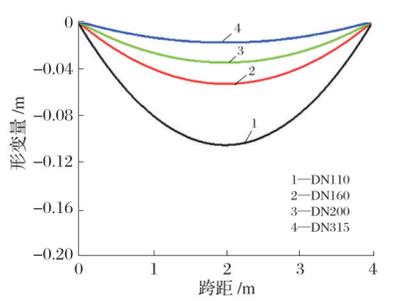
表5 不同支架间距下FRPP管道的最大形变量及相对挠度

Tab.5 Maximum deformation and relative deflection of FRPP pipes under different support spacings

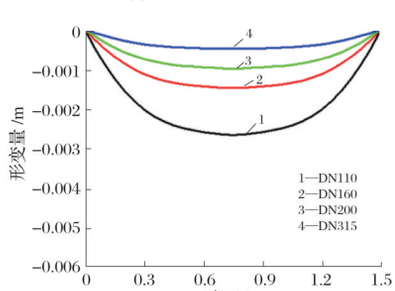
管道规格	形变量/m		相对挠度/%	
	支架间距1.5 m	支架间距4.0 m	支架间距1.5 m	支架间距4.0 m
DN110	-0.002 7	-0.104 3	-2.45	-95.45
DN160	-0.001 5	-0.051 9	-0.94	-33.13
DN200	-0.001 0	-0.035 6	-0.50	-17.50
DN315	-0.000 5	-0.016 0	-0.10	-5.72

注:表中取负值,表示管道在支架上敷设时,变形向下。

图7为不同支架间距下FRPP管道的挠曲变形模拟曲线。从图7可以看出,在相同间距下,管径增大则挠曲变形减小。这是因为管径增大,横截面惯性矩增幅大于管道(含水介质)总质量增幅。非金属管道敷设中不应套用4.0 m的金属管支架间距。



(a) 支架间距4.0 m



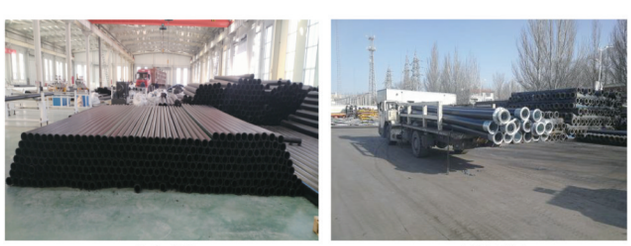
(b) 支架间距1.5 m

图7 不同支架间距下FRPP管道的挠曲变形模拟曲线

Fig.7 Bending deformation simulation curves of FRPP pipe under different support spacings

2.3 FRPP管材的应用及面临问题

图8为FRPP管材生产及运输现场。依据不同煤矿的具体要求,制备多种规格及压力等级的FRPP管材,煤矿开展现场试用。结果表明,FRPP管道具备HDPE管道的各项优点,同时在耐环境应力开裂性能、许用应力、安全系数及抗下垂方面表现较好,获得煤矿用户认可。



(a) 生产现场 (b) 运输现场

图8 FRPP管材生产及运输现场

Fig.8 Production and transportation sites of FRPP pipes

国家能源集团运营78座煤矿,年管道需求量约为2 000 km,为FRPP产品提供广阔的应用场景[26]。作为高性能新兴产品,FRPP管道目前尚缺乏强制性或推荐性标准。矿用特殊工况的产品标准、配套件规范及检测方法体系尚不健全,制约新型产品的推广应用。对此,行业内龙头企业正积极牵头制定相关团体标准。随着FRPP管道成功应用案例的积累和服役时间的延长,该产品有望被更多大型煤炭企业纳入采购技术规范,从而催生新的发展机遇。

3 结论

本研究开发适用于煤矿井下环境的FRPP管材专用料，确定高刚韧聚丙烯组合物与阻燃抗静电母粒最佳配方为质量比1∶1。该配比下FRPP复合材料S5表面电阻降至10^6 Ω，红磷阻燃剂使有焰燃烧时间缩短至2 s，各项指标均满足MT 113—1995矿用安全标准。同时，S5兼具较高的刚性(弯曲模量1 009.00 MPa)与良好低温韧性，能够缓解传统HDPE钢丝网骨架复合管在长跨距架设中的下垂变形问题。数值模拟与现场应用结果均显示，FRPP管道的许用应力、安全系数及抗下垂能力优于HDPE管道，有助于降低支架密度，简化施工与维护流程，具备一定工程应用价值与经济效益。此外，FRPP管道市场潜力较大，适用于井下给排水、通风和瓦斯抽放等关键领域，但其大规模推广需要完善相关产品标准与行业规范。推动团体标准乃至国家标准的建立，对于释放其市场潜能具有重要作用。

参考文献

[1] 祖秉辉, 李长松. “双碳”背景下煤炭生产企业碳减排路径研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 464-474.

[2] 古文哲, 杨宝贵, 顾成进. 煤炭管道输送技术应用前景研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 158-163.

[3] 叶俊平, 张芳芳, 范蕊, 等. 煤矿管道选材与防腐技术的研究及应用[J]. 能源与节能, 2024, (6): 319-321.

[4] 程新亮, 孙东旭, 任帅, 等. 煤柱宽度对埋地管道安全性的影响机制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2026, 22(1): 64-71.

[5] 李冰晶. 矿用充填复合管道安全技术要求及建议[J]. 煤矿机械, 2024, 45(2): 109-111.

[6] 董鹏涛. 基于煤矿井下管道防腐技术应用的探讨[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(21): 175-177.

[7] 胡正勇, 徐鹏, 牛芝雅. 聚氯乙烯/炭黑电力屏蔽材料的制备及性能分析[J]. 塑料科技, 2021, 49(6): 28-31.

[8] 姜铁竹, 杨雷, 钟棉军, 等. 矿用CPE复合材料瓦斯管的研制[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(3): 114-117.

[9] 曹沛森, 刘芳, 王海奇. 具有疏水性能的PVC抗静电复合塑料管材的制备与表征[J]. 塑料科技, 2021, 49(1): 23-25.

[10] 谢远洋, 钟璐玮, 韩松涛, 等. 超高分子量聚乙烯材料研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 188-192.

[11] 赵海峰, 赵耀鑫, 王梦尧. 大管径超高分子量聚乙烯复合管道的研制和应用实例[J]. 云南化工, 2022, 49(9): 80-82.

[12] 姜磊, 张君鹏. 超高分子量聚乙烯管在大尹格庄金矿充填管网优化中的应用[J]. 黄金, 2022, 43(9): 53-56.

[13] 孔维云. 钢丝网骨架聚乙烯塑料复合管施工工艺研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(12): 78-80.

[14] 梁超. 浅析海洋平台海水系统管材: 钢骨架塑料复合管材[J]. 山东化工, 2024, 53(2): 180-181.

[15] 周铄. 高分子复合材料在给排水管道中的应用研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(6): 63-66.

[16] 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.

[17] 王晗, 鹿立新, 李雁飞. 炭黑含量对阻燃抗静电聚乙烯流变性能及力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 39-42.

[18] LUO Y, XIONG S Y, ZHANG F, et al. Preparation of conductive polylactic acid/high density polyethylene/carbon black composites with low percolation threshold by locating the carbon black at the Interface of co-continuous blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(17): 50291.

[19] 胡洪亮, 谢文彬, 李晶辉. 石墨烯协效阻燃聚合物复合材料的研究进展[J]. 化工技术与开发, 2023(9): 26-30.

[20] PORFYRIS A D, VAFEIADIS A, GKOUNTELA C I, et al. Flame-retarded and heat-resistant PP compounds for halogen-free low-smoke cable protection pipes (HFLS conduits)[J]. Polymers, 2024, 16(9): 1298.

[21] 王帅, 王克俭, 马伊, 等. 一种阻燃抗静电聚丙烯的流变性能[J]. 化工学报, 2017, 68(8): 3023-3029.

[22] 董红艳, 魏风军. SBR/$CaCO_3$协同改性聚丙烯复合物及其在输送带覆盖胶中的应用研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 130-135.

[23] 王鑫, 蒋敏, 陈思月, 等. 聚丙烯复合材料界面增强的研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 127-131.

[24] 杨玲玲, 瞿小兰, 汤璐, 等. 聚乙烯/炭黑复合体系电性能的研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(3): 47-50.

[25] 杨衡彬, 韩宏昌, 王海峰, 等. 聚丙烯/炭黑/废纸纤维导电复合材料的性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(3): 42-46.

[26] 王志伟, 李易丞, 周露. 新型聚丙烯矿用管材潜在应用市场分析[J]. 能源科技, 2021, 19(3): 93-95.