

燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管制备及性能研究

王建儒, 孙宝财, 荆 炆, 胡瑞兵

(甘肃省特种设备检验检测研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:燃气管道在能源输送和供应中起着重要的作用,为获得耐用性更高、承压性更强的燃气管材,研究燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管的制备及性能。制备高质量 PE 材料,计算增强层钢丝用量,结合胶粘树脂制备燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管。测试该管材的气压爆破性能以及弯曲性能,验证管材处于不同温度时耐压性能变化、钢丝弹性模量以及钢丝用量对于管材抗压强度变化。试验结果显示,该管材的耐爆破压力超过 30 MPa,曲率与弯矩成正比例关系,且管材 350 mm 时开裂最严重,钢丝弹性模量不会影响管材的抗压强度,钢丝用量较大会导致管材抗压强度增加。

关键词:燃气管道;钢丝缠绕;增强 PE 复合管;气压爆破;耐压性能

中图分类号:TQ325.1+2

文献标志码:A

文章编号:1001-5922(2025)09-0026-04

Preparation and performance study of steel wire winding reinforced PE composite pipe for gas pipelines

WANG Jianru, SUN Baocai, JING Yang, HU Ruibing

(Gansu Province Special Equipment Inspection and Testing Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Gas pipelines play an important role in energy transmission and supply, and in order to obtain gas pipes with higher durability and stronger pressure, the preparation and performance of steel wire winding reinforced PE composite pipes for gas pipelines were studied. High-quality PE materials were prepared, the amount of steel wire with reinforcing layer was calculated, and steel wire winding reinforced PE composite pipes for gas pipelines were prepared by combining adhesive resin. The pneumatic burst performance and bending performance of the pipe were tested, and the changes in compressive performance, elastic modulus of steel wire and steel wire dosage were verified for the compressive strength of the pipe under different temperatures. The test results showed that the bursting pressure of the pipe exceeded 30 MPa, the curvature was proportional to the bending moment, and the cracking was the most serious when the pipe was 350 mm, and the elastic modulus of the steel wire would not affect the compressive strength of the pipe, and the compressive strength of the pipe would increase if the amount of steel wire was large.

Key words: gas pipeline; wire winding; reinforced PE composite pipe; pneumatic blasting; pressure resistance

燃气管道最常使用的管材一般为铝塑复合管和钢丝网骨架塑料复合管,其中,铝塑复合管是用铝管作为嵌入金属层,通过热熔粘合剂与内外层聚乙烯塑料复合而成,具有质轻、单根长度大、价格低廉、施

工作业方便等优点,被广泛用于低压天然气输送^[1-3]。但是这种铝塑复合管容易发生磨损,耐腐蚀性能较差,不能满足燃气管道建设施工的需求。

徐含等设计了一种适用于复合管道的新型非金

收稿日期:2024-01-23;修回日期:2024-06-16

作者简介:王建儒(1989-),男,硕士,工程师,主要从事自带示踪线 PE 复合管与燃气管道研究;E-mail:zhaolulu8687@163.com。

基金项目:甘肃省特种设备检验检测研究院项目(项目编号:T202116)。

引文格式:王建儒,孙宝财,荆 炆,等.燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管制备及性能研究[J].粘接,2025,52(9):26-29.

属管道接头,通过理论公式计算了管道接头处的接头厚度和 GF 带缠绕长度^[4]。刘亚明等针对复合管外保护层聚乙烯耐紫外光老化性能进行研究^[5]。基于此,本文研究在高密度 PE 材料表面缠绕钢丝,制备出燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管,并且测试该复合管的基本性能,为今后天然气管道结构改进提供全新方向。

1 实验部分

1.1 实验材料与设备

制备过程中所使用的原材料如表 1 所示。

表 1 原料详情

Tab. 1 Raw material details

材料名称	厂家
聚乙烯辛烯共聚物	东莞市尚品新材料科技有限公司
高密度 PE 原料	东莞秀之升塑胶有限公司
黑色母料	湖南省升阳新材料有限公司
胶粘树脂	山东昌耀新材料有限公司
抗氧化剂	济南鲁辉化工有限公司
润滑剂	青州市浩宇特陶新材料有限公司

仪器设备详情如表 2 所示。

表 2 设备详情

Tab. 2 Equipment details

设备名称	型号	厂家
电子天平	ES520	长沙米淇仪器设备有限公司
高速搅拌机	SYJ-5-10	献县旭升建筑试验仪器有限公司
挤出机	75B	佛山市南海区精东机械有限公司
耐压爆破试验机	XGY-10	河北可道试验机科技有限公司
千斤顶	WDW-10000	济南恒乐兴科仪器有限公司
恒温水浴锅	SHY	深圳市鼎鑫宜试验设备有限公司
静液压力试验机	HSBHT	承德市华塑检测仪器有限公司

1.2 材料制备

1.2.1 高质量 PE 材料制备

使用电子天平分别称取称量 40 phr 的聚乙烯辛烯共聚物和 50 phr 高密度 PE 原料,同时倒入烧杯中,使用搅拌棒混合均匀。将混合后的原料与 0.3 phr 抗氧化剂和 2.5 phr 的润滑剂同时倒入高速搅拌机中,在室温环境下混合搅拌,搅拌机的转速设定为 2 000 r/min,按照 10 °C/min 的升温速率逐渐升高搅拌机温度,以便实现所有聚乙烯材料都能被润滑剂完全包覆。当温度达到 75 °C 时,停止加热,保证各个原料均匀混合,室温环境使混合料均匀降温,待混合料降至室温以后转移至挤出机中^[6-8]。使用牵引挤出法将混合料从挤出机中挤出,设定挤出机的真空度为 0.1 MPa。挤出之后的混合料在后方的试验中用于制备燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管。

1.2.2 增强层钢丝用量计算

使用力平衡法计算复合管中缠绕钢丝的数量 M :

$$M = \frac{4r_i(r_i + r_o)[3N - \delta_p(r_o/r - 1)]\cos\alpha}{d^2(\delta_g \sin^2\alpha - \delta_p)} \quad (1)$$

式中: r_i 与 r_o 分别表示本文所制备管材的内径和外径; α 用于表示钢丝缠绕时的轴向与方向之间形成的夹角; N 与 δ_p 分别代表公称压力与聚乙烯强度; δ_g 与 d 分别表示钢丝的拉伸强度与直径。使用四层钢丝缠绕制备复合管^[9-11]。

1.2.3 钢丝缠绕增强 PE 复合管制备

将上文制备的高质量 PE 材料在挤出之前与黑色母料混合,使得挤出的高质量 PE 料为黑色,把挤出机的温度设定为 200 °C,挤出高质量 PE 材料,将其作为复合管材的芯管材料。在冷却定型后,先使用左旋缠绕的方式在芯管表面缠绕一层钢丝,完全固定以后再采用右旋缠绕的方式在芯管外再缠绕一层钢丝,按照式(1)中的实际计算结果,确定钢丝用量,两次缠绕的角度均为 55°。完成两层钢丝缠绕以后在管材外部包覆一层胶粘树脂^[12-14],使用以上方法继续在该树脂外缠绕两层钢丝,钢丝缠绕完成后再将胶粘树脂涂覆在第四层钢丝上。把黑色高质量 PE 材料均匀包覆在含有四层钢丝的管芯上,最终制备出燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管。

1.3 性能测试

1.3.1 气压爆破性能测试

本文所制备的复合管材应用在燃气管道上,需要考虑管材爆破压力,以 GB/T 32439—2015 标准为依据,使用耐压爆破试验机测试不同升压时间长度下,本文所制备管材的爆破压力变化情况,该试验机的极限压力为 30 MPa。

1.3.2 弯曲力学性能测试

使用千斤顶结合两点集中式加载方式,测试本文所制备管材的弯曲性能,荷载值通过压力传感器测量获得。千斤顶加载之前先使用千斤顶开展预加载,确定各项试验仪器显示均正常就开始使用正式加载^[15-17]。加载弯曲力时,设定位移增量为 5 mm,从加载开始计时 10 min 后读取弯曲数值,使用游标卡尺测定不同加载力下管材直径变化,每次加载间隔 15 min。通过式(2)计算管材的弯曲半径 Q :

$$Q = O_i / (2 \times \theta_0) \quad (2)$$

式中: O_i 与 θ_0 分别表示管材被测试的长度与管材端部倾角。利用式(3)计算管道的端部弯矩 H :

$$H = G \times l \quad (3)$$

式中: G 与 l 分别代表传感器读数与支撑点与斜向加载点之间的距离。通过式(4)计算管材的曲率 K :

$$K = 1/Q \quad (4)$$

设定加载位移分别为 5、10、15 mm 时,通过计算获得这两组加载位移下,管材的弯曲变化情况,由此确定本文所制备管材的弯曲性能。

1.3.3 不同温度下测试承压性能

恒温水浴锅的温度分别设定为 30、80、150 °C，用夹具分别控制本文所制备的管材置于不同温度的水浴锅中，水浴锅中的水位比管材高 10 mm。管材在水浴锅中浸泡 60 min^[18]。结束浸泡以后测试水温与管材温度，确定各个温度中的管材均保持在原有温度范围中。启动静液压试验机，在 10 MPa 压力下向管材施加压力，升压速率为 20 mm/min，记录管材发生破裂时的压力等数值。

管材发生破裂以后，通过计算破坏位置的周长变化率 Z 获得管材发生破裂位置的膨胀程度：

$$Z = (z - \pi r_0) / \pi r_0 \times 100\% \quad (5)$$

式中： z 表示管材五等分位置处的周长。使用式(5)计算不同温度处理后各个管材破裂中心位置的周长变化率。

1.3.4 钢丝弹性模量对管材性能的影响

本文所制备的管材性能优劣主要受到 PE 内部的钢丝绳影响，研究不同钢丝弹性模量下，所制备管材的压力变化情况。钢丝弹性模量由 $0.2 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5$ MPa，使用静液压试验机测试不同钢丝弹性模量下，管材的抗压强度变化。

1.3.5 钢丝数量对管材性能影响

钢丝用量设定为 200 根，通过静压试验机分别测试不同钢丝数量下管材抗压强度变化。

2 结果讨论

2.1 爆破性能测试分析

不同爆破升压时长下，本文所制备的复合管爆破压力变化情况结果如表 3 所示。

表 3 爆破压力测试结果

Tab.3 Burst pressure test results

升压时长/s	压力/MPa	升压时长/s	压力/MPa
10	2.15	70	19.78
20	2.45	80	20.15
30	2.69	90	23.68
40	5.74	100	26.95
50	15.45	110	29.88
60	18.66	120	30.01

由表 3 可知，升压初期，管材的压力值变化较小，且数值较低，说明升压初期该复合管并没有发生明显变化。升压 40 s 时，管材出现一个显著上升变化，说明该时间阶段，管材的内部压力发生明显变化，管材中承受压力也变大。待升压 120 s 时，试压设备已经达到极限压力，但是管材的压力仍旧保持上升变化，说明该极限下，本文所制备的管材并没有发生爆破，说明管材耐爆破压力超过 30 MPa，具有良好的爆破压力性能。

2.2 弯曲性能测试结果分析

不同加载位移下，管材的弯矩变化结果如图 1 所示。

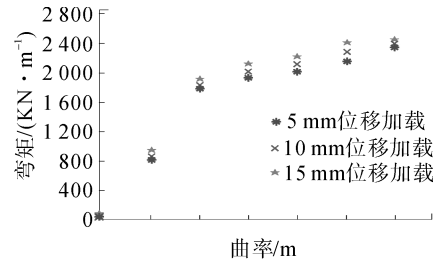


图 1 弯矩测试结果

Fig.1 Bending moment test results

由图 1 可知，不同加载位移条件下，管材的弯矩变化差异并不大，且曲率增加后，管材的弯矩保持上升变化趋势，曲率增加与弯矩变化之间呈现出正比例关系。三种不同试验条件下，位移加载条件较大情况下，管材弯矩更大。

2.3 不同温度下承压破坏形貌分析

3 种不同环境浸泡之后的管材，经过加压测试之后，外部破坏形貌如图 2 所示。

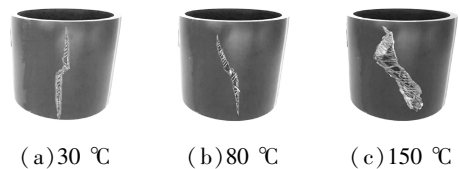


图 2 温度对承压破坏影响

Fig.2 Effect of temperature on pressure failure

由图 2 可知，管材所处环境温度越高，管材破坏越严重。图 2(a) 中管材只出现 PE 材料破坏，钢丝没有出现破坏；图 2(b) 中管材的钢丝出现少量断裂，但是大部分钢丝仍旧处于整齐排列形貌；图 2(c) 中管材出现严重破坏，钢材几乎完全断裂。对比来看，管材所处环境温度较高情况下，管材使用性能下降，不能实现长期使用。但是本文制备的管材应用在燃气管道上，不会处于高热环境，所以不会发生严重破损。

2.4 承压破坏周长变化率分析

不同温度处理后的管材，经过压力爆破后，爆破面的周长会出现较为严重的变化，不同温度处理后管材承压破坏周长变化率结果如表 4 所示。

表 4 周长变化率

Tab.4 Perimeter change rate

管材长度/mm	30 °C 处理管材变化率/%	80 °C 处理管材变化率/%	150 °C 处理管材变化率/%
50	3.45	4.63	5.24
100	3.97	5.04	5.96
150	4.05	5.61	6.04
200	4.82	5.93	6.86
250	5.06	6.17	7.08
300	5.95	6.58	7.92
350	6.28	6.97	8.14
400	6.12	6.15	7.99
450	5.04	5.96	7.81
500	4.28	5.84	7.26

由表 4 可知,管材长度增加会影响管材破裂位置的周长变化率,较长管材的周长变化率更大;但是,当试验所用的管材长度达到 350 mm 时,周长变化率几乎不会再发生变化,说明试验用的管材在 350 mm 的位置出现最大爆破口,处理温度越高的管材,爆破范围越大。这一特征与图 3 中的结果对应。

2.5 钢丝弹性模量对性能影响分析

制备过程中调整所用钢丝材料的弹性模量,测试不同弹性模量下,本文所制备管材的抗压强度变化情况。试验结果如图 3 所示。

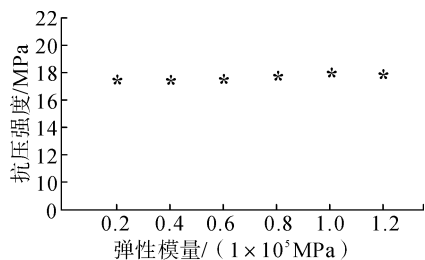


图 3 钢丝弹性模量对管材压力影响

Fig. 3 Effect of wire elastic modulus on pipe pressure

由图 3 可知,管材中的钢丝弹性模量发生变化,但是管材的整体抗压强度并没有发生明显波动,只出现小范围的上升趋势变化。由此可以判断,管材中所使用钢丝的弹性模量并不是影响管材抗压强度的关键因素。

2.6 不同钢丝数量对性能影响分析

钢丝使用数量与管材抗压强度性能之间的关系如表 5 所示。

表 5 钢丝数量对压力影响

Tab. 5 Effect of steel wire quantity on pressure

钢丝数量 根	抗压强度 MPa	钢丝数量 根	抗压强度 MPa
20	5.25	120	14.88
40	8.75	140	15.79
60	11.37	160	16.32
80	12.54	180	17.89
100	13.82	200	18.54

由表 5 可知,在管材制备过程中,增加管材中钢丝的用量,能够极大程度提升管材的抗压强度,使得管材的性能得到提升。但是实际使用时考虑到管材的柔韧度与钢丝缠绕的技术需求,以计算结果和实际管材制备技术为基础,选择管材中钢丝的用量。

3 结语

通过将钢丝与 PE 材料结合,采用缠绕工艺制备出燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管,对制备出的燃气管道用钢丝缠绕增强 PE 复合管进行性能测试,使用压力设备测试该管材在不同条件因素下该管材爆破压力情况与弯矩,并且确定温度因素、钢丝规格对于管材的性能影响,测试结果表明,该复合

管具有优异的耐压性能与耐弯性能,能够满足燃气管道的使用要求。

【参考文献】

- [1] 伍金奎,倪奉尧,孔涛,等. 抗紫外线高压钢丝缠绕增强聚乙烯复合管的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程,2023,39(6):106-110.
- [2] RAFIEE R, ARABIAN M N. Investigating long-term creep in a composite pipe subjected to transverse loading and aqueous condition[J]. Polymer Composites, 2023, 44(8): 4706-4718.
- [3] 贺冉,胡张齐,刘洋,等. 混杂纳米填料增强环氧树脂复合材料的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(6):6138-6144.
- [4] 徐含,张战欢,刘杰,等. 连续玻璃纤维增强 PE 复合管新型接头的设计[J]. 工程塑料应用,2023,51(3):76-81.
- [5] 刘亚明,白鹤,梁航,等. 柔性复合管外保护层 PE 耐紫外光老化性能研究[J]. 现代塑料加工应用, 2022, 34(5):28-31.
- [6] 郭晓阳,郭乃胜,褚召阳,等. 考虑巴西果效应的热再生沥青混合料沥青活性度[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(3):113-120.
- [7] 张文武,刘凯,何兆益,等. 厂拌热再生 RAP 沥青转移特性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(3):523-527.
- [8] 廖晨曦,苏敏,陈楚鹏. 养生时间对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2022, 21(3):1-4.
- [9] 韩璐娇. 钢琴桦木贴面用的胶粘材料制备[J]. 粘接, 2022, 49(7):17-20.
- [10] 张晓男,吴健伟,魏运召,等. 环氧基聚硅氧烷改性氰酸酯树脂研究[J]. 粘接, 2022, 49(12):1-5.
- [11] ATA S O, AKAY C, MUMCU E, et al. Adhesion of auto-mixed and manual-mixed self-adhesive resin cements to dentin on exposure to long-term high-altitude pressure [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2023, 95(2):323-331.
- [12] 徐含,张战欢,刘杰,等. 连续玻璃纤维增强 PE 复合管新型接头的设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(3):76-81.
- [13] 郭威,徐兴华,崔小鹏,等. 钢丝绳缠绕状态自动识别方法初探[J]. 海军工程大学学报, 2022, 34(2):7-12.
- [14] 刘志卫,吴承伟,童明俊,等. 钢丝缠绕剖分式超高压模具等张力预紧分析[J]. 高压物理学报, 2021, 35(1):46-51.
- [15] 滕方瑞,王小峰,蒋晶,等. 碳纳米管/纤维素在不饱和聚酯树脂中的分散性及力学性能研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(3):30-37.
- [16] 张学敏,黄浩瀚,李厚补,等. 聚酯纤维增强热塑性塑料复合管扣压接头密封性能研究与结构优化[J]. 中国塑料, 2022, 36(10):90-97.
- [17] 黄庭蔚,颜廷俊,王刚,等. 粘接性玻纤增强柔性管承压性能模拟及试验验证[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9):116-122.
- [18] 韦天然,张书胜,刘倩,等. 富氧空位的非晶氧化铜高选择性电催化还原 CO₂ 制乙烯(英文)[J]. 物理化学学报, 2023, 39(2):106-114.