高温热氧老化对聚乙烯燃气管道焊接接头性能的影响

孙明道[1],邵元锐[2],曹 丹[1],闫 涛[1],李宝增[2]

(1.河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院,河南 郑州 450016;
2.平顶山学院电气与机械工程学院,河南 平顶山 467000)

摘 要:文章系统研究高温热氧老化对聚乙烯(PE)燃气管道焊接接头力学性能及寿命的影响。通过拉伸试验、冲击试验、动态热机械分析、断口形貌分析和傅里叶变换红外光谱分析等方法,评估不同老化时间下PE管道焊接接头的拉伸强度、冲击强度和储能模量等力学性能变化。结果表明:高温热氧老化能够显著降低焊接接头的力学性能,在120 ℃下力学性能降低尤为明显。微观结构分析显示,老化过程诱发材料内部裂纹增加,氧化反应加剧,进一步削弱焊接接头的承载能力。FTIR谱图检测到老化过程中生成的氧化产物,如—OH和C═C,进一步证实材料的氧化反应。研究结果为PE燃气管道的工程应用和安全维护提供参考。

关键词:聚乙烯管道;焊接接头;热氧老化;力学性能
中图分类号:TQ322.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0150-06
DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.027

Effect of High-temperature Thermo-oxidative Aging on Properties of Polyethylene Gas Pipeline Welded Joints

SUN Mingdao[1], SHAO Yuanrui[2], CAO Dan[1], YAN Tao[1], LI Baozeng[2]
(1. Henan Boiler and Pressure Vessel Inspection Technology Research Institute, Zhengzhou 450016, China;
2. School of Electrical and Mechanical Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: The effects of high-temperature thermo-oxidative aging on the mechanical properties and service life of welded joints of polyethylene (PE) gas pipelines were systematically investigated. The changes in tensile strength, impact strength, and storage modulus of PE welded joints at different aging times were evaluated through tensile testing, impact testing, dynamic mechanical analysis, fracture morphology analysis, and Fourier-transform infrared spectroscopy. The results showed that high-temperature thermo-oxidative aging can significantly reduce the mechanical properties of welded joints, with the reduction being particularly pronounced at 120 ℃. Microstructural analysis revealed that the aging process induced an increase in internal cracks and intensified oxidation reactions, further compromising the load-bearing capacity of the welded joints. FTIR spectra revealed oxidation products formed during the aging process, such as —OH and C═C, further confirming the oxidation reaction in the material. These findings provide a reference for the engineering application and safety maintenance of PE gas pipelines.

Keywords: PE pipeline; Welded joint; Thermal oxidative aging; Mechanical properties

聚乙烯(PE)管道因其优异的耐腐蚀性、良好的韧性和较低的安装成本,在燃气、给水和化工等领域得到广泛应用[1-3]。然而,PE管道在长期使用过程中,尤其是在高温和氧气存在的苛刻环境下,会发生热氧老化,导致材料性能显著下降。这种老化现象不仅影响管道的力学性能,还可能导致管道泄漏、破裂等安全事故,给社会和经济带来巨大损失[4]。因此,研究PE管道焊接接头在热氧老化条件下的力学性能及寿命评价具有重要的实际意义。近年来,相关国家标准如GB/T 19810—2005、GB/T 1843—2008和GB/T 43922—2024等,对PE管道的焊接接头性能和检测

收稿日期Submitted date 2025-07-18;修回日期Revised date 2025-08-25;录用日期Accepted date 2025-09-29
基金项目:河南省基本科研业务费支持项目(2023KY07)
联系人,sunmingdao2008@163.com
引用本文:孙明道,邵元锐,曹丹,等.高温热氧老化对聚乙烯燃气管道焊接接头性能的影响[J].塑料科技,2026,54(9):150-155.
Citation:SUN M D, SHAO Y R, CAO D, et al. Effect of high-temperature thermo-oxidative aging on properties of polyethylene gas pipeline welded joints[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 150-155.

方法均提出明确要求，为管道的安全使用提供参考。PE管道的老化问题一直是材料科学和工程领域的研究热点。近年来，国内外研究人员围绕PE管道的老化性能开展大量研究，主要集中在材料的氧化反应、力学性能变化以及寿命预测等方面[5-8]。李宏伟等[9]和郑度奎等[10]综述中国油气管道技术的现状与发展趋势，强调老化对管道安全性的影响。金裕程等[11]研究高密度聚乙烯(HDPE)对双峰PE抗熔垂性能的影响，发现材料的热稳定性和力学性能有所改善。汪保宏等[12]基于有限元方法对室外PE管道热熔焊接工艺进行优化，提高了焊接接头的性能。卢涛等[13]和李兆璞等[14]研究热熔焊接工艺参数对PE管道焊接质量的影响，为实际工程提供参考。涂东坤等[15]利用智能非线性超声检测技术对燃气PE管道的力学性能退化进行研究，提出了一种新的检测方法。刘长平等[16]综述PE燃气管道老化评价方法的研究进展，指出当前方法的局限性。张琦等[17]探讨了燃气PE管热氧老化的非线性超声评价方法，为老化检测提供新的思路。尽管当前研究已取得一定进展，但仍存在若干亟待解决的问题。首先，大多数研究集中在单一老化因素下(如温度或时间)，对复杂工况下(如高温热氧耦合)PE管道焊接接头性能研究相对不足。其次，对老化后焊接接头的寿命预测主要依赖经验模型，缺乏系统性的理论支撑。此外，虽然非线性超声检测技术已初步应用于PE管道的老化评价，但其在实际工程中的应用仍面临挑战。

鉴于上述研究现状与不足，本研究系统研究热氧老化条件下PE管道焊接接头的力学性能，评估不同老化时间下其拉伸强度、冲击强度和储能模量(E')等力学性能变化，表征焊接接头的微观结构变化以及在老化过程中氧化产物生成和分子链结构变化，旨在为PE管道的长期使用和安全维护提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE100管材，HE3490LS，沧州明珠塑料股份有限公司。

1.2 仪器与设备

热熔对接焊机，SDY-250，无锡市胜达塑管熔接设备有限公司；高温老化试验箱，BRK-408，广州珀泰检测仪器有限公司；电子万能拉伸试验机，UTM5504X，深圳三思纵横科技股份有限公司；冲击试验机，PTM7000，深圳三思纵横科技股份有限公司；动态热机械分析仪(DMA)，DMA 850，美国TA仪器公司；冷场扫描电子显微镜(SEM)，SU8010，日本日立高新技术公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，IRTracer-100，日本岛津制作所。

1.3 样品制备

1.3.1 焊接接头样品制备

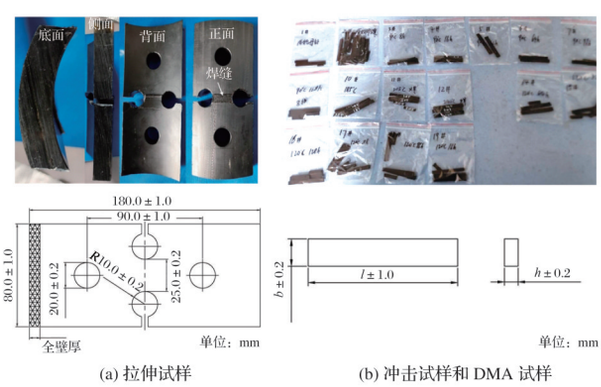
热熔焊接接头样品依据评定合格的PE100管材焊接工艺进行制备。具体工艺参数为：热熔温度220 ℃、卷边高度2 mm、吸热压力0.5 MPa、吸热时间182 s、切换时间6 s、增压时间6 s、冷却时间25 min、卷边压力1.5 MPa。为了降低焊接接头的应力集中度和减少拉伸数据的分散性，对焊接接头进行卷边切除处理。

1.3.2 性能测试样品制备

图1为试样尺寸。PE焊接管道拉伸试样取样位置沿平行于管道轴线方向，焊缝熔合区位于试样中心，加工依据GB/T 19810—2005，按A型试样的尺寸和形状进行加工。试样“腰部”采用钻孔加工方式，孔的中心连线与焊缝中心重合。试样腰部的加工面平滑处理，表面粗糙度(R_a)为3.2 μm，其余界面不作要求。PE焊接管道冲击试样取样位置沿平行于管道轴线方向，焊缝熔合区位于试样中心，按照GB/T1843—2008进行测试。采用无缺口试样，尺寸为：长度(l)=(80±1) mm，宽度(b)=(10.0±0.2) mm，厚度(h)=(4.0±0.2) mm。PE焊接管道热机械分析试样尺寸根据DMA仪器设备要求，沿垂直于管道轴线方向，取全热熔焊缝区。加工制备悬臂模式试样尺寸为：l=(17±1) mm，b=(5.0±0.2) mm，h=(2.0±0.2) mm，R_a=3.2 μm。SEM样品从焊接接头试样的拉伸试验断口面上截取。FTIR分析样品从焊接接头冲击试样断口处截取。

1.3.3 高温老化样品制备

将PE管道焊接接头A型试样拉伸、冲击试样在智能温控恒温恒湿试验箱中进行90 ℃和120 ℃高温热氧老化，老化周期分为8、16、32、64、96、128 h，共6个试验周期，每个周期平行取样3个。将每个老化周期后的试样分别进行性能测试。



(a) 拉伸试样 (b) 冲击试样和DMA试样

图1 试样尺寸

Fig.1 Sample size

1.4 性能测试与表征

拉伸性能测试：按照GB/T 19810—2005在室温条件下进行测试，拉伸速率为5 mm/min。依据GB/T 19810—2005中PE管道焊接接头的尺寸，设计专用拉伸夹具，夹具分为上下两部分，通过两个销钉与试件连接。图2为拉伸试验夹具姿态。

冲击强度测试：依据GB/T 1843—2008进行测试，采用悬臂梁模式，摆锤能量为22 J，冲击速度为3.5 m/s，跨距为$62^{+0.5}_{-0}$。

DMA测试：采用17.5 mm单悬臂测量模式，在室温条件下通过频率扫描法进行测试，振荡频率范围为0.1~50.0 Hz。

SEM测试：采用冷场扫描电子显微镜，加速电压为5 kV，工作距离为7.9 mm。

FTIR测试：采用透过率测定模式进行测试，扫描次数为16次，分辨率4 cm^{-1}，测定方式为FTIR-ATR，波数范围为4 000~500 cm^{-1}。



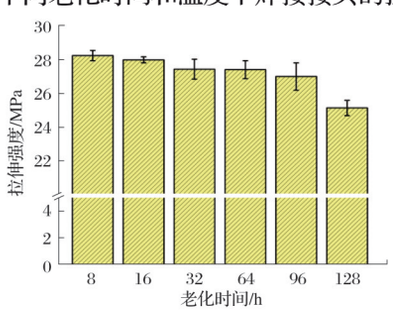
图2 拉伸试验夹具姿态

Fig.2 Tensile test fixture posture

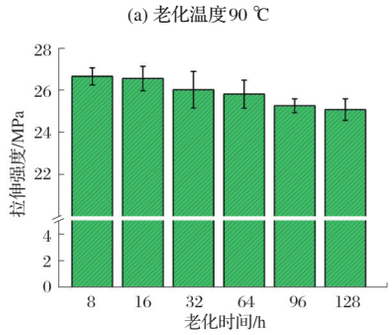
2 结果与讨论

2.1 高温热氧老化对PE管道焊接接头拉伸强度的影响

图3为不同老化时间和温度下焊接接头的拉伸强度。



(a) 老化温度90 ℃



(b) 老化温度120 ℃

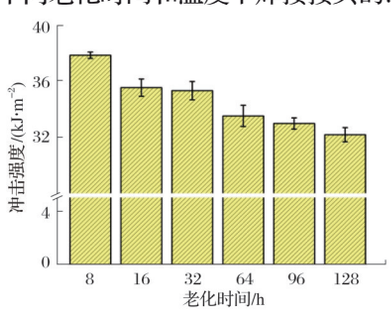
图3 不同老化时间和温度下焊接接头的拉伸强度

Fig3 Tensile strength of welded joints at different aging times and temperatures

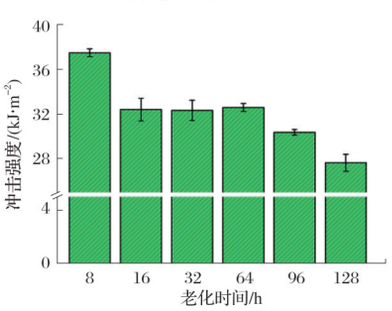
从图3可以看出，高温热氧老化显著降低了PE管道焊接接头的拉伸强度。在90 ℃老化温度下，PE管道焊接接头的拉伸强度表现出明显的下降趋势。老化初期(8~64 h)，焊接接头的拉伸强度降低速率相对较慢。经过8 h老化后，焊接接头的拉伸强度降低至28.25 MPa，相较于未经老化的焊接接头试样降低1.8%。在8~64 h的老化过程中，拉伸强度的降幅仅为4.3%。然而，当老化时间超过64 h后，拉伸强度的下降速率明显加快。在128 h的老化条件下，与96 h的试样相比，拉伸强度骤降7.0%。这说明，在90 ℃的环境下，焊接接头在经历一定时间的老化后，其性能会加速恶化。在120 ℃老化温度下，PE管道焊接接头的拉伸强度下降趋势更为显著。老化时间一旦超过32 h，拉伸强度就开始出现较大幅度的下降。当老化时间达到128 h时，焊接接头的拉伸强度相较于原始焊接接头试样下降12.7%。这表明在更高的温度下，PE管道焊接接头的拉伸强度对老化时间更为敏感，强度降低更为明显。对比90 ℃与120 ℃两种老化温度下的拉伸强度变化，可以发现120 ℃下的拉伸强度降低更为显著，高温加速了材料的氧化反应，导致材料的力学性能更快地劣化。在高温长时间老化条件下，PE分子结构发生改变，连接分子链开始变得松弛，在拉伸应力作用下，连接分子链不断被拉出，加速焊接接头的断裂[18-19]。

2.2 高温热氧老化对PE管道焊接接头冲击性能的影响

图4为不同老化时间和温度下焊接接头的冲击强度。



(a) 老化温度90 ℃



(b) 老化温度120 ℃

图4 不同老化时间和温度下焊接接头的冲击强度

Fig4 Impact strength of welded joints at different aging times and temperatures

母材的初始冲击强度为43.16 kJ/m^2，而原始焊接接头试样为38.98 kJ/m^2，表明焊接工艺对冲击强度有一定负面影响。从图4可以看出，在90 ℃老化温度下，PE管道焊接接头的冲击强度呈现明显的衰减趋势。随着老化时间的延长，冲击强度逐渐下降，衰减速率先快后慢再快。这种变化可能与防老剂的消耗有关。在老化初期，防老剂迅速消耗，导致冲击强度快速下降，防老剂逐渐耗尽，衰减速率减缓，最终材料结构发生显著变化时，衰减速率再次加快。在120 ℃老化温度下，冲击强度同样呈衰减趋势，且衰减更为显著。随着老化时间的延长，冲击强度下降速度更

快，衰减速率呈现“快-慢-快”的特点。高温加速防老剂的消耗和材料的氧化反应，导致冲击强度在老化初期快速下降，随后衰减速率减缓，最终因材料结构的进一步劣化而再次加快[20-21]。对比 90 ℃与 120 ℃两种老化温度下的冲击强度变化，在120 ℃下，冲击强度下降速度更快，尤其是在老化初期和后期，衰减速率明显高于90 ℃，这表明温度对PE管道焊接接头的冲击强度有显著影响，高温加速了材料的老化过程，导致冲击强度更快下降。

2.3 高温热氧老化对PE管道焊接接头 E' 和损耗模量(E'')的影响

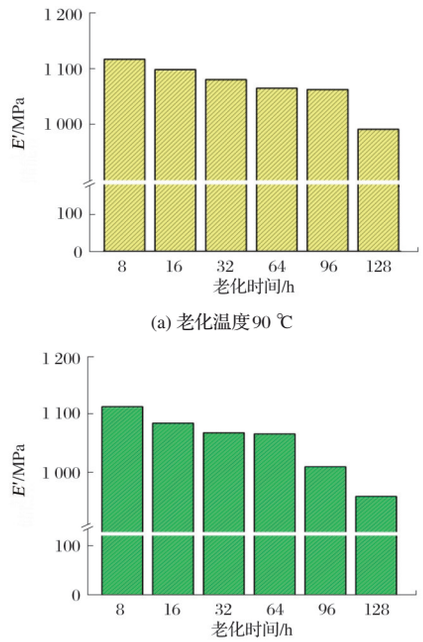
表1为不同老化时间和温度下焊接接头的DMA测试数据。图5为不同老化时间和温度下焊接接头的 E'。

表1 不同老化时间和温度下焊接接头的DMA测试数据

Tab.1 DMA test data of welded joints at different aging times and temperatures

试样序号	老化温度/℃	老化时间/h	E'/MPa	E''/MPa
1	原始母材	0	1 202.93	159.57
2	原始焊接接头	0	1 175.90	176.64
3	90	8	1 117.35	159.57
4	90	16	1 098.79	176.64
5	90	32	1 080.95	154.23
6	90	64	1 065.29	156.22
7	90	96	1 063.04	146.21
8	90	128	991.56	149.01
9	120	8	1 110.28	147.14
10	120	16	1 082.53	150.64
11	120	32	1 066.47	128.98
12	120	64	1 064.72	146.11
13	120	96	1 009.48	148.10
14	120	128	959.74	152.70

初始状态下，原始焊接接头的 E' 为1 175.90 MPa，较母材(1 202.93 MPa)下降2.3%；而 E'' 则从159.57 MPa上升至176.64 MPa，增加10.7%。这表明焊接过程本身已使接头区域的刚性降低，而黏性耗能增加。从表1和图5a可以看出，在90 ℃老化条件下，PE管道焊接接头的 E' 和 E'' 表现出显著变化。随着老化时间的延长，E' 从1 117.35 MPa连续降至991.56 MPa，降幅达11.3%。这一变化表明，在90 ℃条件下，材料的刚性逐渐丧失。与此同时，E'' 在156.22~142.54 MPa之间波动，总体波动幅度8.76%，但未表现出单调趋势。这表明在90 ℃老化过程中，材料的黏性耗能变化相对较小，主要以刚性损失为主。从表1和图5b可以看出，在120 ℃老化条件下，PE管道焊接接头的 E' 和 E'' 变化更为显著。随着老化时间的延长，E' 从1 110.28 MPa降至959.74 MPa，降幅13.6%，下降速率高于90 ℃。这表明高温加速了材料的刚性损失。与此同时，E'' 表现出更为复杂的非单调变化：从147.14 MPa先升至150.64 MPa，后降至128.98 MPa (32 h时最低)，随后回升至152.70 MPa，整体微升3.8%。这表明在120 ℃条件下，高温加速链段降解与重排的竞争过程，导致材料的黏性耗能先降低后增加。对比90 ℃与120 ℃两种老化温度下 E' 和 E'' 的变化，可以发现120 ℃下的劣化更为显著。在相同老化时间下，120 ℃组的 E' 均低于90 ℃组，且差值随时间扩大，在128 h差值达31.82 MPa，表明120 ℃对材料刚性的劣化作用增强。



(a) 老化温度90 ℃

(b) 老化温度120 ℃

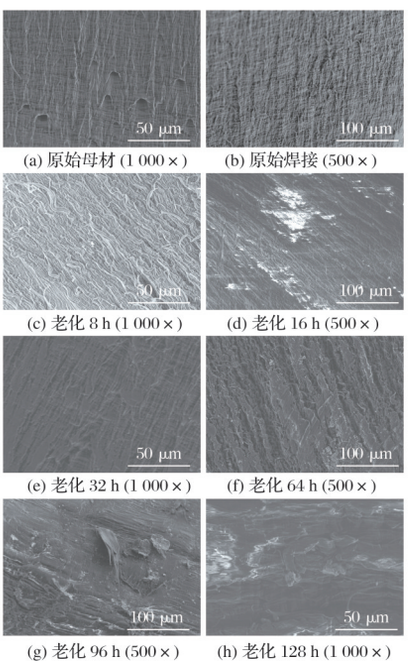
图5 不同老化时间和温度下焊接接头的 E'

Fig5 E' of welded joints at different aging times and temperatures

2.4 高温热氧老化下PE管道焊接接头的SEM分析

图6为老化温度为90 ℃时不同老化时间下焊接接头断口的SEM照片。从图6a可以看出，PE管道原始母材断裂面平整，微观结构均匀，无明显裂纹孔洞或缺陷，呈现出典型的韧性断裂特征，表明其具有良好的韧性和抗拉伸能力。从图6b可以看出，原始焊接件与原始母材相比，原始焊接件断裂面存在少许不规则的裂纹和孔洞。这可能源自焊接过程中的热应力或局部微观缺陷，局部区域有脆断迹象，表明焊接过程导致材料的韧性和抗拉伸能力略有下降。从图6c可以看出，断裂面的裂纹数量有所增加，但整体仍保持一定的韧性，局部区域有轻微的脆性断裂特征，表明老化初期材料的微观结构开始发生变化。从图6d可以看出，断裂面的裂纹进一步扩展，局部区域的脆性断裂特征更为明显。随着老化时间的增加，裂纹扩展速度加快，材料的韧性下降较快[22]。从图6e可以看出，断裂面出现明显的脆性断裂特征，裂纹贯穿整个截面，局部区域有明显的脆性断裂区域，随着老化时间延长，材料的微观结构发生了显著变化，可能是由于晶粒长大或相变，使材料的韧性大幅下降。从图6f可以看出，断裂面的脆性断裂特征更加明显，裂纹数量和长度显著增加，随着老化时间进一步增加，裂纹扩展速度加快，材料的韧性几乎消失，断裂更为迅速。从图6g可以看出，断裂面完全呈现脆性断裂，裂纹贯穿整个截面，材料的拉伸性能显著下降，老化时

间过长引发材料的微观结构进一步恶化，裂纹扩展速度极快，材料的韧性完全丧失。从图6h可以看出，断裂面的脆性断裂特征最为明显，裂纹数量和长度均达到最大值，材料几乎无法承受拉伸力，老化时间过长导致材料的微观结构完全恶化，裂纹扩展速度极快，材料的韧性完全丧失，断裂更为迅速。

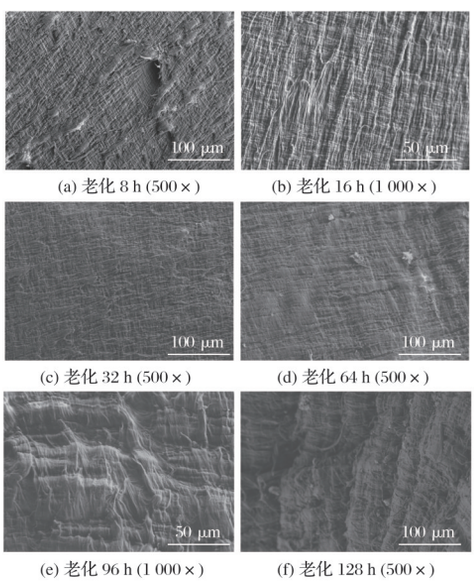


(a) 原始母材 (1 000×) (b) 原始焊接 (500×)
(c) 老化 8 h (1 000×) (d) 老化 16 h (500×)
(e) 老化 32 h (1 000×) (f) 老化 64 h (500×)
(g) 老化 96 h (500×) (h) 老化 128 h (1 000×)

图6 老化温度为90 ℃时不同老化时间下焊接接头断口的SEM照片

Fig.6 SEM images of welded joint fracture at different aging times at an aging temperature of 90 ℃

图7为老化温度为120 ℃时不同老化时间下焊接接头断口的SEM照片。从图7a可以看出，断裂面边缘出现少量细小裂纹，裂纹数量有所增加，但未贯穿整个截面，整体仍保持一定的韧性，局部区域有轻微的脆性断裂特征，韧性略有下降。从图7b可以看出，断裂面的裂纹扩展不明显，与120 ℃温度下老化8 h的材料比较，材料劣化并不明显。从图7c可以看出，断裂面出现明显的脆性断裂特征，裂纹贯穿整个截面，局部区域有明显的脆性断裂区域，断裂面边缘的裂纹数量显著增加，且部分裂纹已经贯穿整个截面。随着老化时间的延长，材料的微观结构发生了显著变化，可能是由于晶粒长大或相变，使材料的韧性大幅下降。从图7d可以看出，断裂面的脆性断裂特征更加明显，裂纹数量和长度显著增加，断裂面边缘的裂纹已经完全贯穿整个截面，且部分区域出现明显的脆性断裂。老化时间进一步增加，裂纹扩展速度加快，材料的韧性几乎消失，断裂更为迅速。从图7e可以看出，断裂面完全呈现脆性断裂，裂纹贯穿整个截面，材料的拉伸性能显著下降。断裂面边缘的裂纹已经完全贯穿整个截面，且部分区域出现明显的脆性断裂。老化时间过长，材料的微观结构进一步恶化，裂纹扩展速度极快，材料的韧性几乎完全丧失。从图7f可以看出，断裂面的脆性断裂特征最为明显，断裂面边缘的裂纹已经完全贯穿整个截面，裂纹数量和长度达到最大值，材料几乎无法承受拉伸力。老化时间过长，材料的微观结构完全恶化，裂纹扩展速度极快，材料的韧性完全丧失，断裂更为迅速。老化温度120 ℃对材料的影响比90 ℃老化更为显著，裂纹扩展速度更快。随着老化时间的延长，材料的微观结构逐渐发生变化，老化温度120 ℃下热应力更大，在热应力的作用下引发球晶生长或相变，使材料的抗拉伸能力减弱，韧性下降。



(a) 老化 8 h (500×) (b) 老化 16 h (1 000×)
(c) 老化 32 h (500×) (d) 老化 64 h (500×)
(e) 老化 96 h (1 000×) (f) 老化 128 h (500×)

图7 老化温度为120 ℃时不同老化时间下焊接接头断口的SEM照片

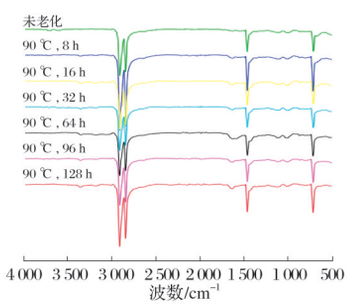
Fig.7 SEM images of welded joint fracture at different aging times at an aging temperature of 120 ℃

2.5 高温热氧老化下PE管道焊接接头FTIR分析

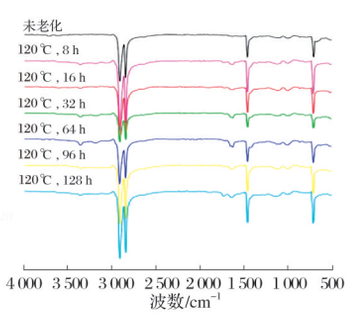
图8为不同老化时间和温度下焊接接头的FTIR谱图。从图8a可以看出，随着老化时间的延长，3 400 cm^{-1}附近逐渐出现—OH伸缩振动吸收峰，表明氧化过程中生成了醇类或过氧化氢基团。同时，在1 640 cm^{-1}处出现了C═C共轭双键吸收峰，其强度随老化时间延长而增强，反映出PE主链发生β-断裂或脱氢反应，导致不饱和结构增加。这些变化表明，在90 ℃下，氧化反应主要以链断裂和轻度氧化为主[23-24]。这种结构变化与E'的持续下降具有一致性，表明老化过程中材料的力学性能逐渐劣化。具体来说，链断裂和不饱和结构的增加会导致材料的刚性和韧性下降，从而影响其冲击性能。因此，在90 ℃老化条件下，PE管道焊接接头的冲击性能会随着老化时间的延长而逐渐下降。这种氧化反应的积累效应会逐渐削弱材料的抗冲击能力，使其在长期使用中更容易发生断裂或损坏。从图8b可以看出，在120 ℃老化条件下，PE管道焊接接头的氧化反应更为显著，产物种类更为复杂。除3 400 cm^{-1}和1 640 cm^{-1}处出现与90 ℃类似的吸收峰外，还在1 092~1 264 cm^{-1}范围内出现了新的C—O伸缩振动峰，对应醚、酯或醇类氧化产物。这表明高温下氧化路径更加多样，可能涉及分子链的支化、交联或进一步的功能化反应，导致材料结构发

生更深层次的重排与劣化。这种复杂的氧化反应不仅加速链断裂，还可能通过交联或支化改变材料的本体结构，进一步削弱其力学性能。

对比90 ℃与120 ℃两种老化温度下的FTIR光谱分析结果，可以发现120 ℃下的氧化反应更为复杂和剧烈。在90 ℃下，氧化反应主要表现为链断裂和轻度氧化，生成羟基和C═C双键等氧化产物。而在120 ℃下，除了这些氧化产物外，还出现了C—O基团，表明氧化反应路径更加多样，涉及分子链的支化和交联。这种复杂的氧化反应导致材料的结构发生更深层次的重排，进一步削弱材料的力学性能。此外，在120 ℃下的氧化产物积累速度更快，与E'更大幅度地下降相对应，表明高温加速材料的老化过程。



(a) 老化温度90 ℃



(b) 老化温度120 ℃

图8 不同老化时间和温度下焊接接头的FTIR谱图

Fig.8 FTIR spectra of welded joints at different aging times and temperatures

3 结论

对PE100燃气管道焊接接头的高温热老化性能进行研究，发现高温条件不仅加速材料氧化反应，还导致更复杂的结构变化，从而显著降低材料的力学性能。在老化温度120 ℃下，随着老化时间的延长，PE管道焊接接头的拉伸强度和冲击强度更快地劣化。高温不仅加速材料的刚性损失，还引发更复杂的黏性耗能变化，这种性能的快速下降可能会使材料在较短时间内就无法满足使用要求，从而增加了管道系统的失效风险。FTIR分析揭示了老化过程中生成的氧化产物，进一步证实了材料的氧化反应。在120 ℃老化温度下，氧化反应更为剧烈，诱发更复杂的结构变化，C—O基团的出现表明氧化反应不仅局限于表面，还深入到材料内部，导致材料的力学性能下降更为显著。因此，在高温环境下，需要更加注重材料的抗老化性能和防护措施，以确保管道系统的长期稳定运行。

参考文献

[1] 王友义, 陈伟, 褚奇丽, 等. 燃气聚乙烯管长期静液压性能试验研究及失效分析[J]. 塑料科技, 2025, 53(7): 122-125.
[2] 李连鹏, 孙大勇, 赵胜利. 国内聚乙烯管材专用料的生产现状及展望[J]. 弹性体, 2023, 33(6): 92-96.
[3] 李兆璞, 乔亮, 闻炯明, 等. 热熔焊接工艺参数对聚乙烯管道力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2023, 51(9): 35-39.
[4] WANG Y, FENG G W, LIN N, et al. A review of degradation and life prediction of polyethylene[J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 3045.
[5] 王志刚, 杨波, 曾辰, 等. 高温内压环境下聚乙烯燃气管道老化性能评价研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(10): 84-89.
[6] WANG H, SHAH J, HAWWAT S E, et al. A comprehensive review of polyethylene pipes: Failure mechanisms, performance models, inspection methods, and repair solutions[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2024, 4(2): 100174.
[7] NASIRI S, KHOSRAVANI M R. Failure and fracture in polyethylene pipes: Overview, prediction methods, and challenges[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 152: 107496.
[8] ZHA S X, LAN H Q, LIN N, et al. Degradation and characterization methods for polyethylene gas pipes after natural and accelerated aging [J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 208: 110247.
[9] 李宏伟, 赵博, 周天宇, 等. 服役环境下高密度聚乙烯(HDPE)压力管道损伤行为研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(15): 89-96.
[10] 郑度奎, 李敬法, 宇波, 等. 临氢环境中聚乙烯管道寿命预测方法探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 882-893.
[11] 金裕程, 王璟璠, 赵世成. 高分子量PE-HD的添加对双峰聚乙烯抗熔垂性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 154-159.
[12] 汪保宏, 李俊, 史君林, 等. 基于有限元的室外PE管道热熔焊接工艺优化[J]. 制造技术与机床, 2023(7): 156-162.
[13] 卢涛, 文华斌, 张欣欣, 等. PE管道热熔焊接工艺参数的实验[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 69-74.
[14] 李兆璞, 武立文, 乔亮, 等. 聚乙烯管道热熔焊接技术研究进展[J]. 中国塑料, 2022, 36(10): 104-116.
[15] 涂东坤, 陈振华, 张琦, 等. 燃气PE管道力学性能退化的智能非线性超声检测[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(18): 7551-7557.
[16] 刘长平, 王宏, 冯佳俊, 等. 聚乙烯燃气管道老化评价方法研究进展分析[J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(S2): 58-62.
[17] 张琦, 涂东坤, 汪树民, 等. 燃气PE管热氧老化的非线性超声评价方法[J]. 无损检测, 2024, 46(5): 39-44.
[18] CONTINO M, ANDENA L, RINK M. Environmental stress cracking of high-density polyethylene under plane stress conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 241: 107422.
[19] 杨安康. 聚乙烯燃气管道热熔接头的力学特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
[20] 田瑶君, 秦军, 熊玉竹, 等. PE100材料的湿热老化性能及其寿命预测[J]. 塑料, 2015, 44(6): 9-11.
[21] LESKOVICS K, KOLLÁR M, BÁRCZY P. A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 419(1/2): 138-143.
[22] 舒文华, 汤晓英, 李博, 等. 模拟受火损伤对高密度聚乙烯管材力学性能的影响[J]. 化工设备与管道, 2017, 54(2): 67-73.
[23] SCHWARZINGER C, HINTERSTEINER I, SCHWARZINGER B, et al. Analytical pyrolysis in the determination of the aging of polyethylene[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 113: 315-322.
[24] 陈茹, 曹新苗, 赵广泰, 等. 伴随加工历史的聚乙烯的结构变化探析[J]. 塑料科技, 2025, 53(7): 56-61.