

PE燃气管烧熔漏气案例失效原因及热影响区 结构性能退化研究

张长青¹, 李超², 詹赐明², 王朋振², 高瑾^{2*}

¹中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京

²北京科技大学新材料技术研究院腐蚀与防护中心, 北京

收稿日期: 2022年10月14日; 录用日期: 2022年11月17日; 发布日期: 2022年11月24日

摘要

本文采用宏观/微观形貌、傅里叶红外光谱、差示扫描量热法(DSC)和热失重法等对城市管网中烧熔失效的PE燃气管的表观性能和结构老化性能与未服役管材进行了比较分析, 阐明了烧熔PE燃气管失效漏气的本质原因。烧熔管材在服役过程中已经发生了结构劣化, 性能下降; 但烧熔区域由于高温氧化发生小分子链的再结晶, 结晶度、熔融温度和耐热氧老化性能相对提高; 未烧熔区域受到烧熔区的影响, 性能明显下降; 提出应重点关注结构严重劣化的PE燃气管烧熔热影响区的范围。

关键词

聚乙烯燃气管, 热烧蚀, 差示扫描量热法(DSC), 氧化诱导时间(OIT), 傅里叶红外光谱(FTIR)

Study on the Causes of Failure in the Case of Ablation and Failure of Polyethylene Gas Pipes and Structural Performance Degradation of Heat-Affected Zone

Changqing Zhang¹, Chao Li², Ciming Zhan², Pengzhen Wang², Jin Gao^{2*}

¹Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing

²Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing

Received: Oct. 14th, 2022; accepted: Nov. 17th, 2022; published: Nov. 24th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 张长青, 李超, 詹赐明, 王朋振, 高瑾. PE 燃气管烧熔漏气案例失效原因及热影响区结构性能退化研究[J]. 化学工程与技术, 2022, 12(6): 399-409. DOI: 10.12677/hjcet.2022.126052

Abstract

This paper presents a comparative analysis of the apparent and structural aging properties of polyethylene gas pipe which was hot-melting and failure in urban networks and unused pipes, using macro/microscopic morphology, Fourier transform infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry (DSC) and thermal weight loss, to clarify the essential causes of failure and gas leakage of PE gas pipes. The ablative pipe has structural deterioration and performance degradation taken place during the service. However, the crystallinity, melting temperature and thermal oxygen ageing properties of the ablative polymer area were relatively improved due to the recrystallisation of short chains polymer as a result of high temperature oxidation behavior. The performance of the vicinity of ablative area was significantly reduced affected by thermal ablation diffusion. It was proposed that the focus should also be put on the extent of the ablation heat-affected zone where the pipe was severe structural deterioration.

Keywords

Polyethylene Gas Pipe, Thermal Ablation, Differential Scanning Calorimetry, Oxidation Induction Time, Fourier Transform Infrared Spectroscopy

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚乙烯(PE)管道以其耐腐蚀、寿命长、柔韧性好、重量轻、施工快捷方便等优势发展迅猛，短短的30多年已经在中低压燃气管网中取代了过去的传统管材(钢管、铸铁管等)的地位，2010年PE燃气管道总长仅3.5万km，但到2016年天然气管道总长达到10万km，近几年PE燃气管材用量每年已超过50万吨，平均年增长率约5.2%，其发展仍然处于黄金阶段。是现今城镇燃气首选管材[1]-[7]。

但是聚乙烯(PE)管道与金属管道相比有众多优势的同时也存在不可忽视的不足：PE管的机械强度比钢管低，适用燃气最高使用压力、管径有限制，抗损伤能力弱；耐高热、低温能力弱；抗有机化学介质(特别是氧化性介质、表面活性剂)能力有限；表面能与蠕变特性影响到钢塑转换部位连接密封长效性；虽然在管道设计、施工各阶段考虑到了聚乙烯(PE)结构与性能的不足，但服役过程中环境的复杂多样性对其薄弱部位的作用仍然是管道长寿命服役的重要制约点，带来服役漏气事件的发生[8]-[23]。

PE燃气管在服役过程中会遇到高温或者电击穿(高压输电线漏电，雷电等)的极端环境带来管材的破坏，因此耐烧蚀性能研究对于聚合物材料的安全服役意义重大[24] [25] [26] [27]。Kinsler M等[24]很早便意识到这一问题的严重性，并对电击穿土壤形成电弧的条件和概率进行了模拟实验；胡京等[25]通过工频电弧试验。模拟了与输电线路临近的包裹有PE防护层的埋地金属管道在雷击下的烧蚀行为，试验结果为埋地管道的防雷设计提供了依据。刘宏亮等[26]对皱纹铝护套高压交联聚乙烯绝缘电缆缓冲层的烧蚀机理进行了研究，提出电缆径向电流集中是导致烧蚀故障的原因，结合仿真模型揭示了径向电流集中的物理机理，为相关故障诊断及防护提供了理论和试验依据。现今，随着城市输电网络及地下管网的不断发展，PE燃气管的安全服役面临的威胁也将加大。我们仅做到抢修、堵漏、恢复正常是远远不够的，必须对

PE 燃气管失效的原因进行科学分析, 认清事件的本质, 才能防患于未然, 保障 PE 燃气管的长效安全服役。

因此, 本文针对 PE 燃气管烧熔失效案例, 对管材薄弱位置(烧熔区域与附近烧熔热影响区)的结构性能进行剖析, 阐明了 PE 燃气管性能退化与失效漏气的关系, 提出应重点关注结构严重劣化的 PE 燃气管烧熔热影响区的范围, 这对 PE 燃气管烧熔漏气事故的抢修及管材继续服役至关重要, 为 PE 燃气管网的管理和建设提供了依据。

2. 实验部分

2.1. 主要原料

发生烧熔失效漏气的 PE 燃气管材, 北京燃气集团(编号 1);

未服役 PE 燃气管材, 河北一塑管道制造有限公司(编号 2)。

PE 燃气管信息详见表 1。

Table 1. Basic information on PE gas pipes

表 1. PE 燃气管基本信息

编号	敷设地址	服役年限/年	失效部位	失效原因	管径/压力	埋深/m	壁厚/mm	外径/mm
1	大山子金凤成祥 南侧低压线	<1	管材	烧熔	D80/低压	1.0	7.17	80
2					DE110		7.03	110

2.2. 主要设备及仪器

差示扫描量热仪, 60 Aplus, 日本岛津公司;

热重分析仪设备, Q5000IR, 美国热分析仪器公司(TA Instruments)公司;

全反射红外光谱仪, Nicolet FTIR 6700, 赛默飞世尔科技。

2.3. 性能测试与结构表征

宏/微观形貌分析: 采用相机对服役管道的失效部位(烧熔各部位)、管材整体进行拍照, 对加工制得的试样拍照, 获取它们的宏观形貌照片。将管材的外表面、烧熔部位切取小部分加工成长 \times 宽 \times 厚为 10 mm \times 10 mm \times 2 mm 的试样, 喷金处理后, 采用 JEOL 扫描电镜进行微观形貌观察。

傅里叶红外光谱(FTIR)分析: 测试范围为 350~7000 cm⁻¹; 反射晶体为 ZnSe; 设置入射角 45°; 扫描次数 32 次; 分辨率为 0.35 cm⁻¹; 采用 OMNIC Series 软件自动基线矫正进行基线处理。

DSC 分析: 参考国家标准 GBT 19466.1-2004《塑料差示扫描量热法(DSC)第 3 部分: 熔融和结晶温度及热焓的测定》进行 DSC 测试; 测试气氛为氮气; 升温速率为 20 °C/min; 气体流速为 50 mL/min; 温度范围为 -25 °C~170 °C。根据得到的 DSC 曲线, 获得熔融温度 T_{eim}、熔融峰温 T_{pm}; 计算熔融转变曲线中熔融峰的面积得到熔融焓 ΔH , 并通过式(1)计算结晶度。

$$X_C = \Delta H / \Delta H_{100} \quad (1)$$

式中:

X_C: 结晶度(%);

ΔH : 峰的熔融焓(J/g);

ΔH_{100} : 结晶度为 100%时目标样品的熔融焓(J/g), 聚乙烯 ΔH_{100} 的文献经验值为 293 J/g。

TG 分析：依据 GB/T 33047.1-2016《塑料聚合物的热重法(TG)》第一部分通则进行热重测试：环境为惰性气体(氮气)，扫描温度范围为 25℃~550℃，升温速率为 20℃/min。

氧化诱导时间分析：参照国家标准 GBT 19466.6-2009《塑料差示扫描量热法(DSC)第 6 部分：氧化诱导时间(等温 OIT)和氧化诱导温度(动态 OIT)的测定》进行氧化诱导时间测试。由于未服役管道在 210℃ 下测试的氧化诱导时间大于 100 min，超出测量范围，不符合国家标准的要求，因此选择 230℃ 进行测试。测试条件详见表 2。

Table 2. Test conditions for oxidation induction time

表 2. 氧化诱导时间测试条件

测试参数	服役管道	未服役管道
N ₂ 气流量/(cm ³ /min)	100	100
空气流量/(cm ³ /min)	100	100
通氧开始时间/min	15	16
测试温度/℃	210	230

3. 结果与讨论

3.1. 宏/微观形貌分析

图 1 为未服役管材及烧熔管材外表面宏观形貌图。可以看到，未服役管道外观良好，表面光滑，颜色均匀，无明显的划痕和凹陷。烧熔管材的烧熔部位有明显的褶皱痕迹，表面鼓起；未烧熔区域表面有轻微的压痕。

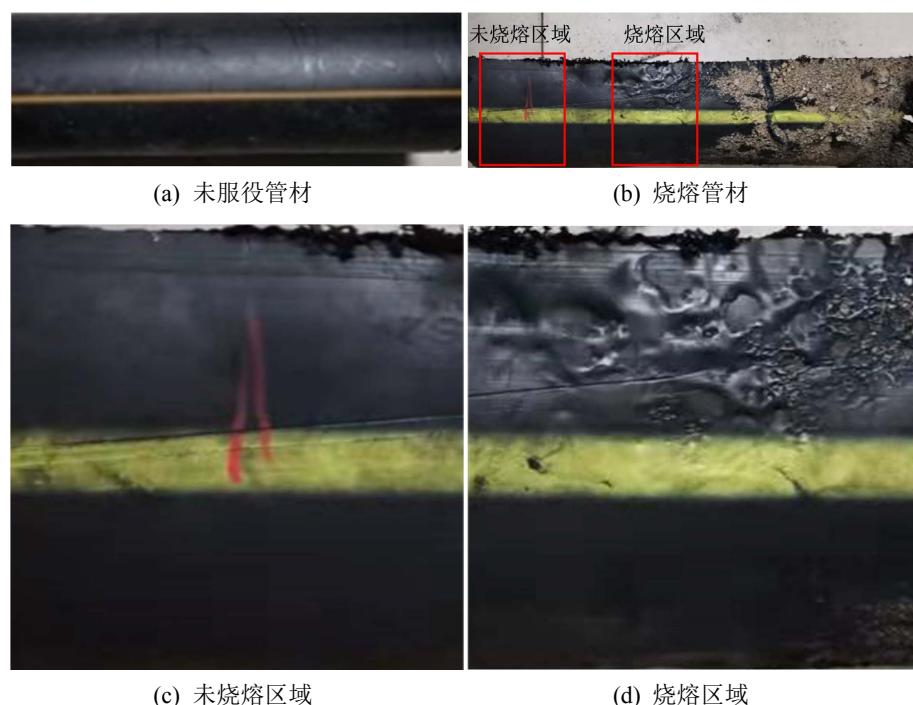


Figure 1. Macroscopic morphology of the external surface of unused PE pipe and ablative pipe
图 1. 未服役管材及烧熔 PE 管材外表面宏观形貌图

图 2 为未服役管材及烧熔管材外表面微观形貌图。烧熔区表面极度不平整，管材表面有很多杂乱的白色粒子和碎片的存在。未服役管材和未烧熔部位表面光滑平坦，几乎没有孔洞和沟壑，表明未烧熔区域表面未受到烧熔区高温烧熔的影响。

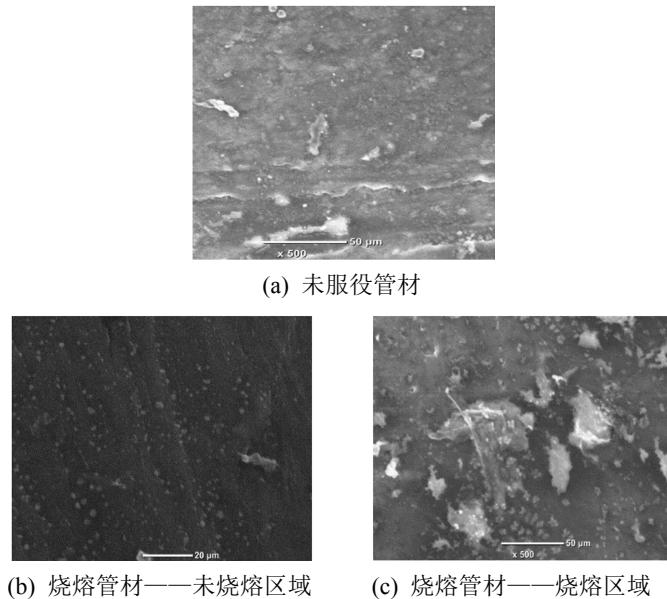


Figure 2. Microscopic morphology of the unused PE pipe and ablative pipe
图 2. 未服役管材和烧熔 PE 管材微观形貌图

3.2. 结构老化性能分析

采用 FTIR 光谱、DSC、热失重和氧化诱导时间，对烧熔管材和未服役管材的结构老化性能进行了分析。

3.2.1. 傅里叶红外光谱

对烧熔和未烧熔区域及未服役管材进行 FTIR 测试，结果见图 3。

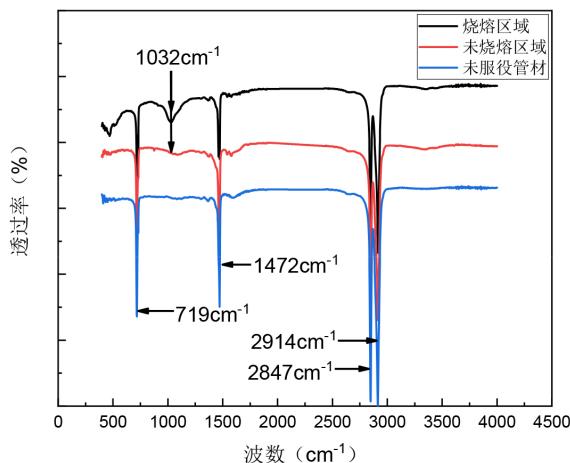


Figure 3. FTIR spectrum
图 3. 傅里叶红外光谱图

根据图3和表3可知,烧熔和未烧熔区域在 1032 cm^{-1} 处都产生了-C-O-的吸收峰,这说明两区域的化学结构都发生了氧化,管材结构劣化,但未烧熔区该吸收峰的相对强度要低,说明其老化程度较轻。未服役管材没有出现-C-O-的特征吸收峰,因此未发生老化。

3.2.2. 熔融转变温度及结晶度

图4是烧熔管材和未服役管材的DSC测试结果。从图4的DSC曲线中可以得知熔融温度(T_{cim})和峰温度(T_{pm}),并计算得到材料的结晶度,见图5。由图可知三种材料的峰温度差异较小;烧熔区域熔融温度大于未烧熔区域,与未服役管材差异较小;未服役管材结晶度最高,未烧熔区域最低。

Table 3. Characteristic peaks of the main functional groups at FTIR spectra
表3. 傅里叶红外光谱主要官能团对应特征峰

振动频率/ cm^{-1}	官能团	振动模式
2880~2972	-CH-	反对称伸缩振动
2843~2882	-CH-	对称伸缩振动
1350~1490	-CH-	面内弯曲振动
719	-CH-	面内摇摆振动
1020~1275	-C-O-	伸缩振动

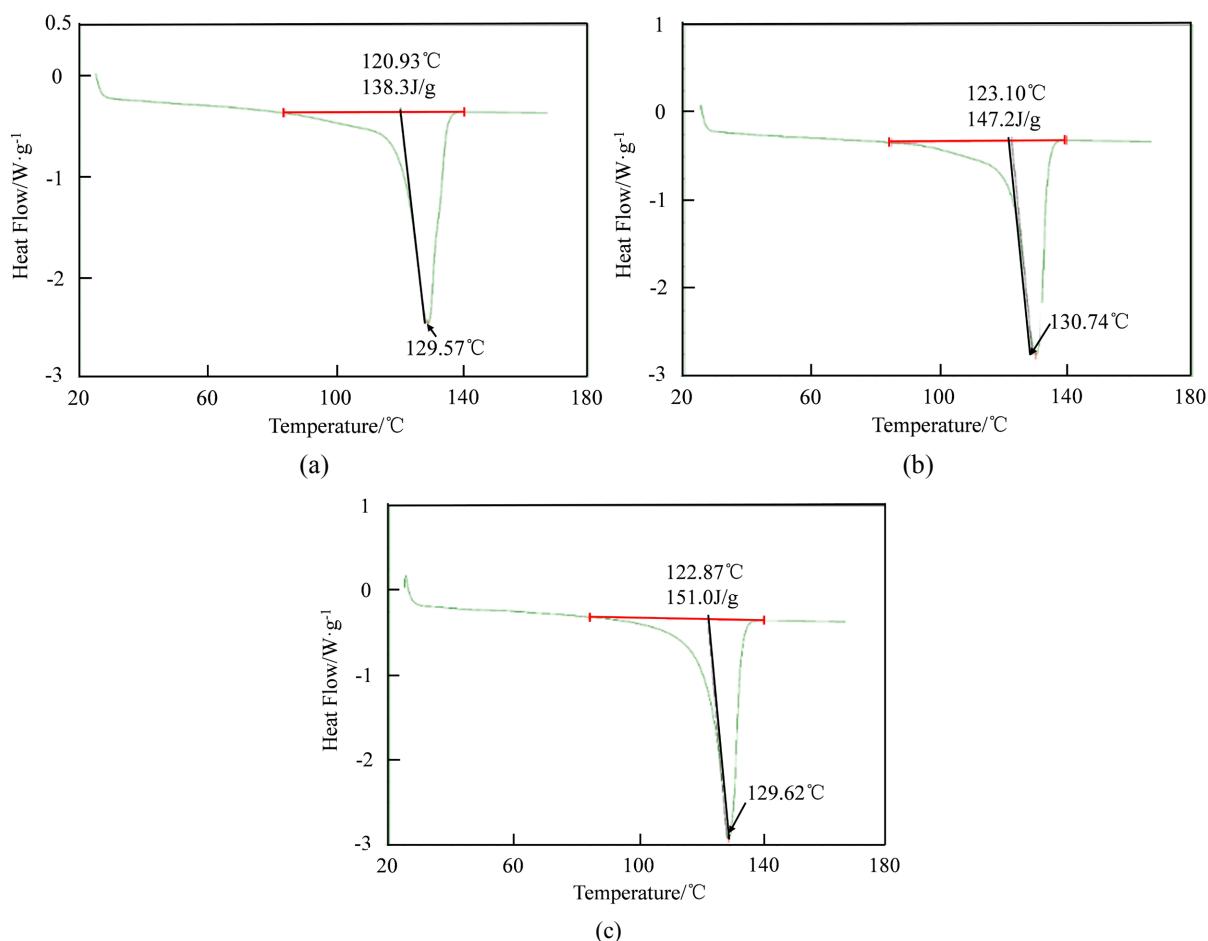


Figure 4. DSC curves, (a) Ablative part; (b) The part without ablation; (c) Unused PE pipe
图4. DSC 曲线, (a) 烧熔区域; (b) 未烧熔区域; (c) 未服役 PE 管材

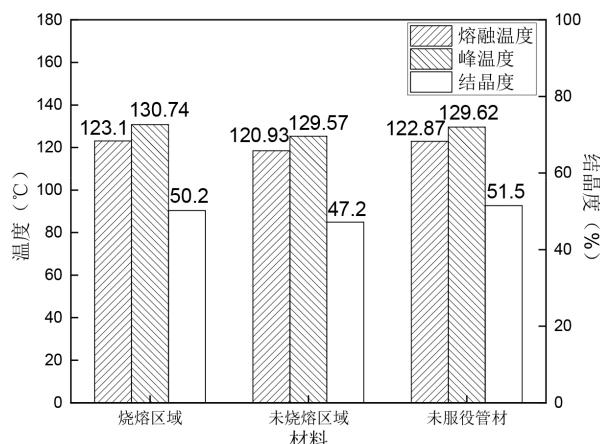


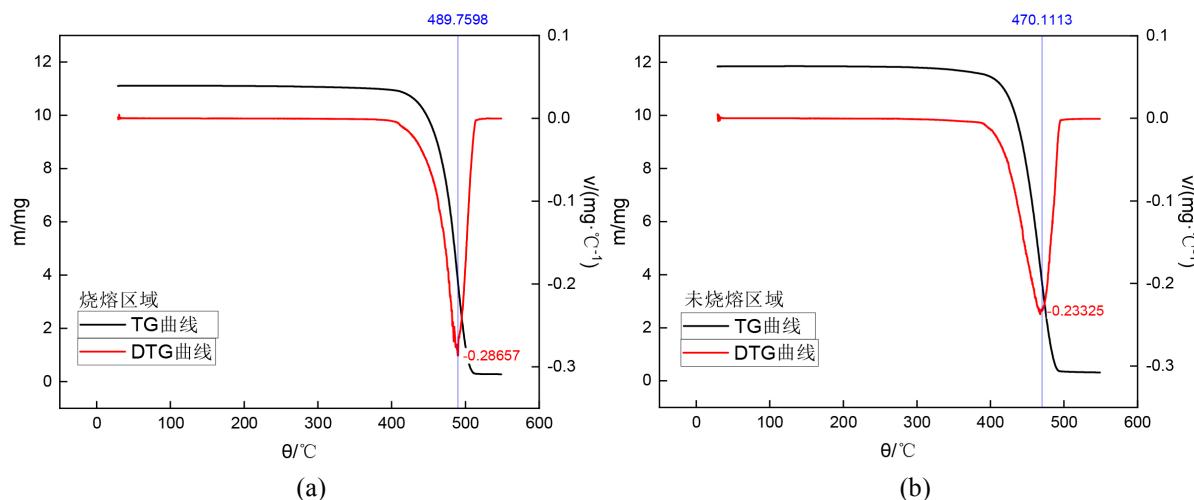
Figure 5. Melt temperature, peak temperature and crystallinity of ablative PE pipe and unused pipe

图 5. 烧熔管材和未服役 PE 管材的熔融温度、峰温度和结晶度

聚乙烯是半结晶型高聚物，非晶区密度较低，成为热氧化反应的主要场所[28]。烧熔管材在服役过程中受到土壤环境的作用而发生结构老化，形成的含氧官能团降低了高聚物链段规整性及长分子链断裂为小分子链，致使结晶度下降。当 PE 管材局部区域发生烧熔时，在热氧老化作用下发生高分子长链的断裂和活性小分子链的再结晶，因此烧熔区域的结晶度比未烧熔区域高；同时烧熔区域附近受到高温的影响，聚合物分子链会发生不同程度的断裂，导致结晶度进一步下降，则管材强度必然受到影响。因此烧熔区域在高温下裂解发生交联碳化，使得 T_{cim} 提高；未烧熔区域的管材结构老化导致 T_{cim} 降低；烧熔和结构老化对 T_{pm} 的影响较小。

3.2.3. 热失重

图 6 是烧熔管材和未服役管材经热失重测试得到的 TG-DTG 曲线图。从图 6 可知，三种材料的热降解过程都为一步降解反应，最终失重率均可以达到 97% 以上；在 400℃~500℃ 的试样质量急剧下降，整个热分解过程中失重速率在 0~0.3/(mg·℃⁻¹) 范围内；相比烧熔区域和未服役管材，未烧熔区域的最大失重速率最小。图 5 描述了 TG-DTG 曲线中样品失重率为 0.5% 和 95% 时的热分解温度及最大失重速率时的热分解温度。



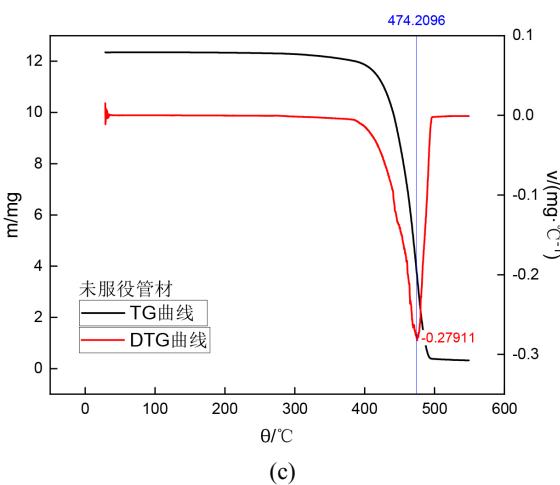


Figure 6. TG-DTG curves, (a) ablative part; (b) the part without ablation; (c) unused PE pipe
图 6. TG-DTG 曲线, (a) 烧熔区域; (b) 未烧熔区域; (c) 未服役 PE 管材

通常,聚乙烯的热降解反应为无规断链反应,可以分为三个过程:降解初期,随着温度升高至熔融温度,聚合物发生熔融,其相对分子质量降低,但聚合物质量基本不变;降解中期,大分子链断裂为大量小分子链,随小分子链的挥发,聚合物质量急剧下降;降解后期,聚合物完全碳化,剩余残渣质量基本不变[29] [30]。

由图 7 可知,烧熔区域在 $m_{0.5\%}$ 时的热分解温度最高,未服役管材最低。烧熔管材在服役过程中结构发生老化,当大分子链开始断裂为小分子链时,相比未服役管材形成的可挥发分少,因此需要在更高温度下发生进一步的链断裂;由于烧熔区域高聚物发生再结晶,尤其是非晶区,热分解温度进一步升高。

烧熔区域在 $m_{95\%}$ 时的热分解温度最高,未烧熔区域和未服役管材差异较小。这表明,烧熔区域的聚合物结构与未服役管材和未烧熔区域已有较大的差异,材料老化过程中产生的氧化基团断裂时需要的能量要比使 C-C 键高更,致使烧熔区域的热分解严重滞后[31]。

烧熔区域的 V_{max} 对应温度最高,未烧熔区域最低,这与 $m_{95\%}$ 的结果比较吻合,说明烧熔区域聚合物结构的变化对管材的整个热分解过程都产生了影响。

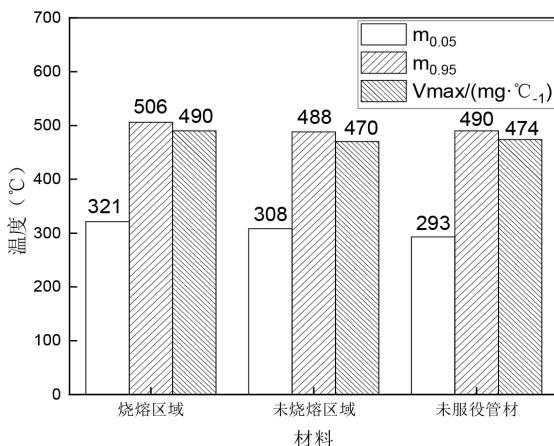


Figure 7. Temperatures of weight loss of 0.5% and 95% and maximum loss rates for ablative PE pipe and unused pipe

图 7. 烧熔 PE 管材和未服役管材热失重为 0.5% 和 95% 及最大失重速率的对应温度

3.2.4. 氧化诱导时间

氧化诱导时间是评价高分子材料耐热降解能力的重要指标；同一测试温度下高分子材料的氧化诱导时间越长，则材料的热氧化稳定性更好。图8和图9是烧熔失效PE管和未服役管材的氧化诱导时间测试结果。

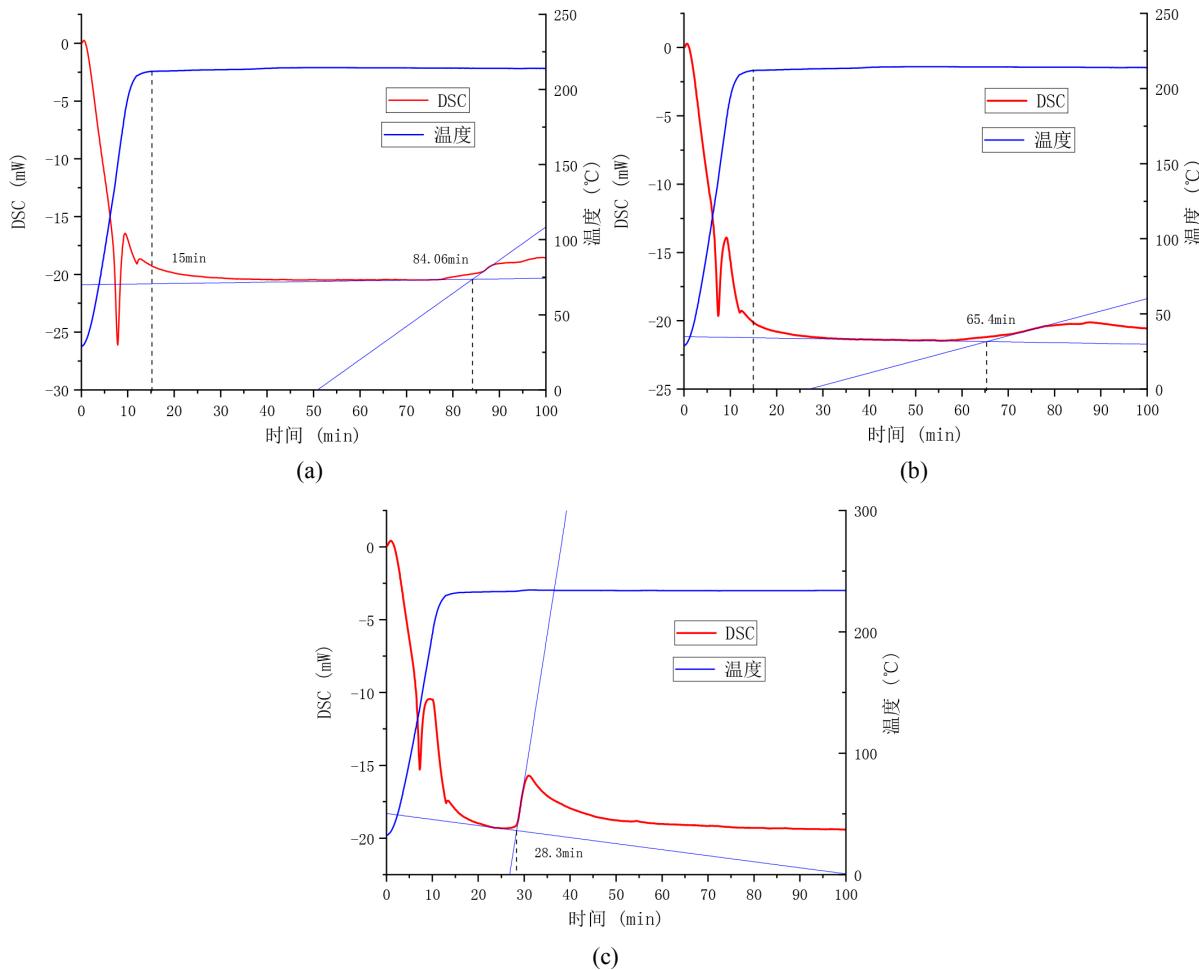


Figure 8. Test results of oxidation induction time, (a) ablative part; (b) the part without ablation; (c) unused PE pipe
图8. 氧化诱导时间测试结果, (a) 烧熔区域; (b) 未烧熔区域; (c) 未服役PE管材

图9显示，未服役管材的OIT测试温度更高(230°C)，因此耐热氧老化性能最强；烧熔区域的氧化诱导时间(69.06 min)远高于未烧熔区域(50.4 min)。结果表明，相比未服役管材，烧熔管材在服役过程中受到土壤环境的作用，结构发生劣化，结晶度降低，热氧稳定性降低；而烧熔区域由于高温氧化的影响，结晶度增大，因此抗热氧老化性能高于未烧熔区域。

3.3. 失效原因分析

PE高分子链的抗热降解(T_d : 300°C左右)、阻燃性(氧指数: 17左右)有限，被电缆事故大电流击穿，表面温度超过降解温度，继而被烧熔；本质是聚乙烯高分子链特征决定了其在服役过程中遇到高温或大电流这种极端环境会带来管材的破坏；烧熔区域及附近的热影响区结构发生劣化，耐热氧老化性能退化，结晶度出现不同程度的降低，强度受损，管材抗服役环境作用和外力破坏的能力下降，因此易发生漏气

事故；特别是烧熔区附近表面正常管材的整体性能显著低于未服役的管材，抗服役环境老化能力下降，成为管材服役的薄弱部位。因此需要对 PE 燃气管的烧熔热影响区的范围进行重点研究，避免带来更大的安全隐患。

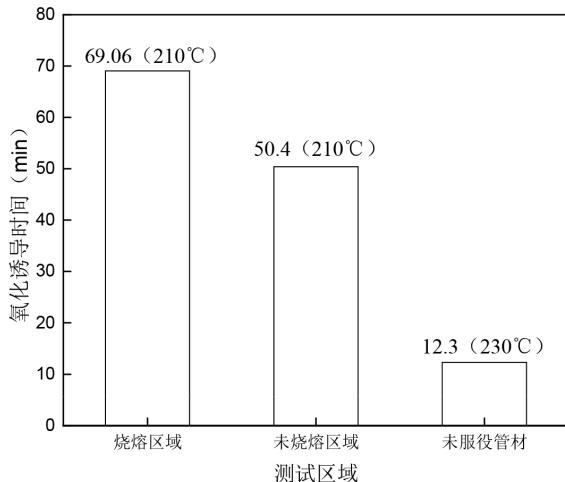


Figure 9. Oxidation induction time

图 9. 氧化诱导时间

4. 结论

1) PE 燃气管烧熔区及附近未烧熔区在服役环境和高温烧熔的作用下结构性能发生不同程度的劣化，管材耐热氧老化性能下降；相比未烧熔区，烧熔区的结晶度提高。

2) PE 燃气管材耐热、耐燃烧能力弱是发生管材极端环境(电击穿烧熔)失效的本质原因。

烧熔区附近热影响区的管材性能也显著降低，抗服役环境作用的能力大大减弱，成为管材服役的薄弱部位，在抢修时应尽量多截取事故管材。

参考文献

- [1] 张存森. PE 燃气鞍型三通管件改进措施[J]. 城市公用事业, 2012, 26(5): 41-44.
- [2] 熊志敏, 魏若奇. 纽约 2014 燃气管爆炸事故——管材管件失效调查分析介绍[C]//第 17 届全国塑料管道生产和应用技术推广交流会论文集. 贵阳: 住房和城乡建设部科技发展促进中心, 2015: 168-186.
- [3] 詹志炜, 魏瑞. 一起天然气管道爆燃事故的分析[J]. 特种设备安全技术, 2011(6): 44-45.
- [4] 金平强. 白蚁对 PE 燃气管道的破坏及防治措施[J]. 煤气与热力, 2013(33): 4-5.
- [5] 宗杰文. 埋地聚乙烯燃气管道白蚁侵蚀危害及预防措施[C]//中国燃气运营与安全研讨会. 常州: 《煤气与热力》杂志社有限公司, 2017: 996-1000.
- [6] 龙军. 埋地燃气聚乙烯管道白蚁侵危害与防治[J]. 煤气与热力, 2012, 32(7): 43-45.
- [7] 陈雪晶, 赵青根, 唐前. 红火蚁对 PE 燃气管道的损害及防治方法探讨[J]. 城市燃气, 2017(10): 10-13.
- [8] Chudnovsky, A., Zhou, Z., Zhang, H., et al. (2012) Lifetime Assessment of Engineering Thermoplastics. *International Journal of Engineering Science*, **59**, 108-139. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2012.03.016>
- [9] Krishnaswamy, R.K. (2005) Analysis of Ductile and Brittle Failures from Creep Rupture Testing of High-Density Polyethylene (HDPE) Pipes. *Polymer*, **46**, 11664-11672. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.09.084>
- [10] 杨波, 何嘉平, 翟伟, 等. 基于循环载荷法评价聚乙烯管材性能的可靠性研究[J]. 中国塑料, 2020, 34(3): 54-61.
- [11] Lang, R.W., Stern, A. and Doerner, G. (2010) Applicability and Limitations of Current Lifetime Prediction Models for Thermoplastics Pipes under Internal Pressure. *Macromolecular Materials & Engineering*, **247**, 131-145.

- <https://doi.org/10.1002/apmc.1997.052470109>
- [12] Zhou, W., Chen, D., Shulkin, Y., et al. (2001) Ductile Failure and Delayed Necking in Polyethylene. In: Moalli, J., Ed., *Plastics Failure Analysis & Prevention*, Elsevier, Amsterdam, 25-30.
<https://doi.org/10.1016/B978-188420792-1.50005-6>
- [13] Yi, Z., et al. (2018) Quantification of Strain-Induced Damage in Semi-Crystalline Polymers: A Review. *Journal of Materials Science*, **54**, 62-82.
- [14] Gurson, A.L. (1977) Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **99**, 2-15.
<https://doi.org/10.1115/1.3443401>
- [15] Detrez, F., Cantournet, S. and Seguela, R. (2011) Plasticity/Damage Coupling in Semi-Crystalline Polymers Prior to Yielding: Micromechanisms and Damage Law Identification. *Polymer*, **52**, 1998-2008.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.03.012>
- [16] Gu, G., Yong, X., Lin, C.H., et al. (2013) Experimental Study on Characterizing Damage Behavior of Thermoplastics. *Materials and Design*, **44**, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.062>
- [17] Balieu, R., Lauro, F., Bennani, B., et al. (2015) Damage at High Strain Rates in Semi-Crystalline Polymers. *International Journal of Impact Engineering*, **76**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.08.013>
- [18] Yi, Z. and Jar, P. (2015) Quantitative Assessment of Deformation-Induced Damage in Polyethylene Pressure Pipe. *Polymer Testing*, **47**, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.08.005>
- [19] 齐昌超, 杜忻洁, 王勇. 城镇燃气聚乙烯(PE)管检测技术研究[C]//2018 年全国天然气学术年会论文集. 成都: 中国石油学会天然气专业委员会, 2018.
- [20] Zhao, Y., Choi, B.H. and Chudnovsky, A. (2013) Characterization of the Fatigue Crack Behavior of Pipe Grade Polyethylene Using Circular Notched Specimens. *International Journal of Fatigue*, **51**, 26-35.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.01.016>
- [21] 姜锐涛, 吴志峰, 王志伟. 钢塑转换连接结构的研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(5): 86-91.
- [22] 孟晓丽, 王德国, 郭岩宝, 等. 基于模糊 Petri 网的燃气 PE 管道风险评价[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(4): 126-131.
- [23] 田丰, 金小燕. 核电站电缆安全使用寿命评定方法[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(12): 92-95.
- [24] Kinsler, M. and Hmrcik, L.V. (2002) A Damage Mechanism: Lightning-Initiated Fault-Current Arcs to Communication Cables Buried beneath Overhead Electric Power Lines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **35**, 163-168.
<https://doi.org/10.1109/28.740860>
- [25] 胡京, 蓝磊, 文习山. 工频电流对金属管道烧蚀试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(2): 55-58.
- [26] 刘宏亮, 刘若溪, 赵西元, 等. 径向电流集中诱发的高压交联聚乙烯电缆缓冲层烧蚀研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(8): 94-101.
- [27] 王晓杰, 万芯瑗, 郑凌娟, 等. 福建近海地区配网架空绝缘导线烧蚀原因分析[J]. 绝缘材料, 2021, 54(3): 78-83.
- [28] 羡瑜, 王翠翠, 王戈, 等. 造纸剩余物竹屑含量对竹质纤维-高密度聚乙烯复合材料力学及热性能的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(5): 47-52.
- [29] 辛闻, 张富青, 袁军, 等. 回收高密度聚乙烯的热降解动力学研究[J]. 山东化工, 2016, 45(7): 37-41.
- [30] 刘玉飞, 陈果, 陈磊, 等. 硅烷自然交联聚乙烯热降解研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015, 13(5): 84-87.
- [31] 袁聪慧, 王仕峰, 张勇, 等. 回收高密度聚乙烯结构与性能的研究[J]. 中国塑料, 2011, 25(10): 81-85.