

长期服役环境下城镇 PE 燃气管道电熔焊接 界面结构与老化性能研究

邱迪¹, 李孟垠^{1*}, 种万臣¹, 倪志国¹, 王飞¹, 辛妍¹, 李翌翀¹, 高瑾²

(1.北京燃气集团有限责任公司, 北京 100032; 2.北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

摘要: **目的** 研究电熔焊接界面在长期服役期间的老化性能及其变化规律。**方法** 以服役 30 a 的 PE 燃气管道电熔焊接管件和新焊管件为样本, 通过超声相控阵无损检测和解剖的方法分析焊接界面的结构性能, 通过氧化诱导时间测试、红外光谱测试和结晶度测试对 PE 管的中间部位、焊接界面的老化行为进行对比研究。通过对服役焊接管件附近土壤进行分析, 确定影响管件服役老化的化学介质。**结果** 长期服役的 PE 电熔焊接界面存在不同程度的结构缺陷, 尤其在焊接界面处发生了明显的性能弱化。焊接界面的热氧稳定性和结晶性能均低于管材中间部位, 而管材中间部位的性能则低于新焊界面。相比新焊管件, 服役 30 a 的 PE 电熔焊接界面出现 C—O—老化峰, 发生一定程度老化。经检测, 土壤中存在的胺类、酮类和醇类有机物(如十二烷基二甲基叔胺)具有显著的化学活性, 会对 PE 材料产生老化作用。**结论** 土壤的温度及化学介质带来 PE 燃气管道电熔焊接部位 C—O 老化基团的产生, 将破坏聚乙烯的结构规整性, 导致其结晶度的下降, 影响到了电熔焊接界面的力学结合性能。本研究证实了土壤环境对 PE 带来的负面影响, 影响其使用寿命和安全性, 应加强关注土壤环境对 PE 燃气管道的长期服役安全问题。

关键词: 电熔焊接; 界面老化; PE 管道; 土壤环境; 城市燃气

中图分类号: TU996.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)02-0114-12

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.013

Structure and Aging Performance of Electro-fusion Welded Interfaces in Urban PE Gas Pipelines under Long-term Service Conditions

QIU Di¹, LI Mengyin^{1*}, ZHONG Wanchen¹, NI Zhiguo¹, WANG Fei¹, XIN Yan¹, LI Yichong¹, GAO Jin²

(1. Beijing Gas Group Co., Ltd., Beijing 100032, China; 2. Institute of Advanced Materials Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the aging performance and its changing law of the electro-fusion welded interfaces under long-term service. With the electro-fusion welded pipeline fittings and new welded pipeline fittings of PE gas pipeline in service for 30 years as samples, the structural performance of the welded interface was analyzed by ultrasonic phased array nondestructive testing and dissection, and the aging behavior of the middle part and welded interface of the PE pipeline was compared by oxidation induction time test, infrared spectrum test and crystallinity test. By analyzing the soil near the welded pipeline fittings

收稿日期: 2024-10-26; 修订日期: 2024-11-21

Received: 2024-10-26; Revised: 2024-11-21

引文格式: 邱迪, 李孟垠, 种万臣, 等. 长期服役环境下城镇 PE 燃气管道电熔焊接界面结构与老化性能研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 114-125.

QIU Di, LI Mengyin, ZHONG Wanchen, et al. Structure and Aging Performance of Electro-fusion Welded Interfaces in Urban PE Gas Pipelines under Long-term Service Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 114-125.

*通信作者 (Corresponding author)

in service, the chemical medium that affected the aging of the pipeline fittings in service was determined. The PE electro-fusion welded interface had different degrees of structural defects under long-term service, especially the obvious performance weakening at the welded interface. The thermal oxygen stability and crystallization properties of the welded interface were lower than those of the middle part of the pipeline, while the properties of the middle part of the pipeline were lower than those of the new welded interface. Compared with the new welded pipeline, the electro-fusion welded interface of PE in service for 30 years had C—O— aging peak, which led to a certain degree of aging. After testing, amines, ketones and alcohols (such as dodecyl dimethyl tertiary amine) existing in the soil had obvious chemical activity and caused aging effect on PE materials. The temperature of soil and chemical medium bring about the generation of C—O aging groups in the electro-fusion welded part of PE gas pipeline, which will destroy the structural regularity of polyethylene, lead to the decrease of its crystallinity, and affect the mechanical bonding performance of the electro-fusion welded interface. This study confirms the negative impact of soil environment on PE, affecting its service life and safety, so more attention should be paid to the long-term service safety of PE gas pipeline.

KEY WORDS: electro-fusion welding; interface aging; PE pipeline; soil environment; urban gas

聚乙烯 (PE) 燃气管道这一特种装备凭借其卓越的耐腐蚀性、柔韧性及抗震性能, 已在城镇燃气管网中得到广泛应用^[1-4]。然而, 在长期服役过程中, 管道结构性能不可避免地受到环境因素的影响, 逐渐出现退化^[5-8]。特别是在电熔焊接部位, 退化问题尤为突出。据某工程案例统计, PE 燃气管道的漏气事故主要集中在电熔焊接界面, 漏气事件中约 35% 源自该部位^[9], 成为管道漏气除外力施工破坏因素 (64%) 最大的影响因素。因此, 电熔焊接部位已成为燃气管道系统中的安全薄弱环节。深入研究电熔焊接界面在长期服役后的结构变化及老化性能, 对确保管网系统的安全运行具有重要意义。

虽然聚乙烯 (PE) 管道在服役过程中不会像金属材料那样发生腐蚀, 但其机械强度较钢管低, 抗损伤能力有限。此外, PE 管耐高温和低温的性能较弱, 在极端环境条件下容易受到影响。其对有机化学介质, 尤其是氧化性介质和表面活性剂的抵抗能力也存在局限。因此, 在复杂多变的服役环境中 (如土壤中的有机物质、温度波动及外力作用)^[10], PE 管道会逐渐出现老化现象。尤其是电熔焊接部位, 在土壤中的敏感化学介质和外部应力的综合作用下, 结构性能不断下降, 抗外力能力减弱, 最终可能导致漏气事故的发生。

近年来, 关于聚乙烯 (PE) 热氧化老化机理的研究已取得广泛进展, 其主要目的是评估材料性能, 并预测其使用寿命。Weon^[11]的研究系统检查了热老化对线性低密度聚乙烯 (LLDPE) 管道热性能的影响, 发现老化早期阶段结晶度有所增加, 同时伴随着管道表面羰基等含氧基团的生成, 表明材料发生了降解。Hoàng 等^[12]进一步研究了静水压力条件下蓝色 PE 管中抗氧化剂消耗的动态变化, 结果显示, 氧化诱导期的缩短与氢过氧化物生成的趋势一致。上述研究为 PE 材料的应用提供了一定的理论基础, 但是并未在 PE 管道服役于土壤环境这一重要环境背景下进行研究。

关于管道薄弱的电熔焊接部位研究, 现有文献大多集中在焊接界面的超声相控阵无损检测和力学行

为方面, 而对焊接界面的结构老化性能研究相对较少。Zheng 等^[13]通过超声无损检测对 PE 管道电熔焊接界面的安全性进行了评估, 发现 EF 接头的缺陷主要包括 4 类: 熔合界面不良、空隙、结构变形和过度焊接。其中, 熔合界面不良的典型形式为冷焊、未去除的氧化皮和熔合界面污染。李广印等^[14]通过拉伸和压扁试验, 对新焊接的电熔焊接界面进行力学性能和老化性能测试, 结果显示, 影响聚乙烯焊接界面性能的主要缺陷为过焊、冷焊、未去除氧化皮和电阻丝错位。这些缺陷导致含缺陷接头的断裂应力仅为正常焊接界面的 68%。上述研究主要针对工程的宏观性能, 而对焊接界面老化的结构性能少见报道。PE 燃气管道作为我国目前应用极广的燃气输送方式之一, 目前针对长期服役条件下电熔焊接界面的老化行为研究较为有限。在中国, PE 燃气管道的使用相对于 50 a 的设计寿命尚处于中期阶段, 管道老化性能及其长期影响未得到充分认识, 因此针对长期实际服役的 PE 燃气管道焊接界面开展老化性能研究意义重大。

本研究结合北京地区某小区的燃气管网改造工程, 获得珍贵的已服役 30 a 的 PE 电熔焊接管件, 以此为研究对象, 深入剖析其界面结构。通过差示扫描量热法 (DSC)、热重分析 (TG)、氧化诱导时间分析 (OIT)、傅里叶红外光谱分析 (FT-IR) 等测试分析手段, 对电熔焊接界面典型位置的热氧老化、结晶度、热质量损失等性能进行系统研究, 并与新焊接管件进行对比分析。同时, 结合 PE 管道的服役土壤环境, 探讨环境因素对电熔焊接这一安全薄弱部位长期老化行为的影响, 进一步揭示服役环境对 PE 管道安全性能的作用机制。

1 试验

1.1 材料

北京某小区聚乙烯 (PE) 燃气管网已服役 30 a, 是我国最早采用 PE 燃气管道的区域。结合该小区的

燃气管网改造工程中,收集了服役 30 a 的 3 个不同规格的电熔焊接管件样品(套袖、变径、三通),详细的电熔焊接管件信息及新电熔焊接对比管件见表 1。

表 1 PE 燃气电熔连接管件

Tab.1 Electro-fusion connection fittings of PE gas pipeline

编号	管件类型	管内径/mm	服役年限/a
1	套袖	50	30
2	变径	110 变 90	30
3	三通	63	30
4	套袖	50	0

1.2 性能测试

土壤样本的预处理按照 HJ 834—2017《土壤和沉积物 半挥发性有机物的测定 气相色谱-质谱法》^[15] 的要求进行。需要 20 g 细土,不含杂质,用四分法粗分。经过研磨、提取、浓缩和容量固定后,获得土壤浓缩液进行测试。

对土壤样本进行气相色谱-质谱联用(GC-MS)分析,气相色谱仪入口温度为 280 °C,无分流,注射量为 1.0 μL,柱流速为 1.0 mL/min(恒流)。柱温:在 35 °C 下启动 2 min,然后以 15 °C/min 的速度升至 150 °C,保温 5 min,然后以 3 °C/min 的速率升至 290 °C,保温 2.0 min。质谱仪测试离子源温度为 230 °C,电离能为 70 eV,界面温度为 280 °C,四极杆温度为 150 °C,质量扫描范围为 35~450 m/z,溶剂延迟时间为 5 min,数据采集模式为全扫描模式。

采用 BAMBOO-300E 型超声无损检测仪对电熔焊接部位进行超声相控阵无损检测。根据获得的相控阵检测图谱,并参 GB/T 32563—2016《无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法》^[16],对电熔焊接界面的质量进行了初步分析与评价。对电熔焊接套袖沿管径方向等分(8份),并在套袖中间位置划线,将其左右划分为 I 区和 II 区进行区分。

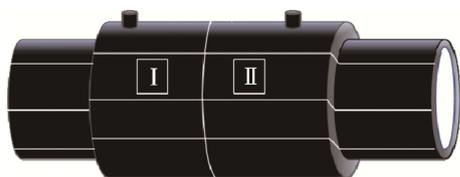


图 1 试样画线分区

Fig.1 Sample line partition

沿图 1 中所示位置对试件进行切割,采用 5 位字母与数字组合进行编号,如图 2 所示。按照 GB/T 19808—2005《塑料管材和管件公称外径大于或等于 90 mm 的聚乙烯电熔组件的拉伸剥离试验》^[17] 的要求,对切割后的管件样品进行拉伸剥离,获得焊接界面。

使用高分辨率相机对切割后面、焊接界面进行拍

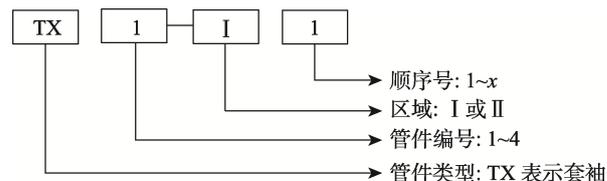


图 2 试样编号

Fig.2 Sample number

照。采用 KEYENCE 200 系列激光共聚焦显微镜对电熔焊接界面的典型部位进行显微形貌观察。使用差式扫描量热仪(TA Instruments),参考 GB/T 19466.3—2004^[18]对焊接界面、管材截面中间处进行 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 30~170 °C。

基于 DSC 曲线,对熔融峰面积进行积分,得到试样的熔融焓 ΔH ,计算结晶度:

$$X_c = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100}} \times 100\%$$

式中: X_c 为结晶度; ΔH 为熔融焓, J/g; ΔH_{100} 为结晶度 100% 时的熔融焓,通常聚乙烯的 ΔH_{100} 为 293 J/g^[18]。

采用热失重仪(TA Instruments),参考 GB/T 33047.1—2016^[19]对焊接界面、管材截面中间处进行热质量损失测试,测试气氛为氮气,气体流速为 50 mL/min。温度控制过程:以 20 °C/min 的速率从室温加热到 600 °C。

采用差式扫描量热仪(TA Instruments),参考 GB/T 19466.6—2009^[20]对焊接界面、管材截面中间处进行氧化诱导时间测试。测试条件:在氮气气氛下(气体流速为 50 mL/min),以 20 °C/min 的速率升温到 210 °C,并保温 3 min,将气体切换为同流速的氧气,保温 60 min,保温结束后,将气体切换为氮气,冷却至室温。

采用红外光谱仪(Thermo Fisher Scientific)对焊接界面、管材截面中间处进行表面反射傅里叶红外光谱测试。测试条件:波数范围为 400~4 000 cm^{-1} ,反射晶体为金刚石,入射角为 45°,扫描次数为 32 次,分辨率为 0.35 cm^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 电熔连接界面缺陷分析

电熔焊接工艺及外部环境服役环境可能会对电熔焊接界面造成冷焊、过焊、电阻丝错位等多种质量缺陷问题,因此有必要对收集的电熔焊接管件进行电熔连接界面缺陷分析。对收集的服役 30 a 的电熔焊接管件及新焊管件进行了超声相控阵无损检测,具体检测结果如图 3 所示。结果表明,1 号、2 号和 3 号管件 I 区焊接质量较差,均存在电阻丝错位问题,II 区焊接质量相对较好。相比之下,4 号管件的 I 区和

II 区均未发现孔洞、电阻丝错位或脱壳等明显的质量缺陷, 表明其焊接质量良好。

对收集到的 4 个管件进行切割, 截面宏观形貌如图 4 所示。可以看出, 1 号管件的切割截面上管件承

插不到位, 2、3 号管件的电阻丝都出现错位, 4 号管件的焊接界面无明显缺陷。

结合无损检测图, 取各管件典型部位的切割截面进行对比, 如图 5 所示。1 号管件 I 区的管材与管件

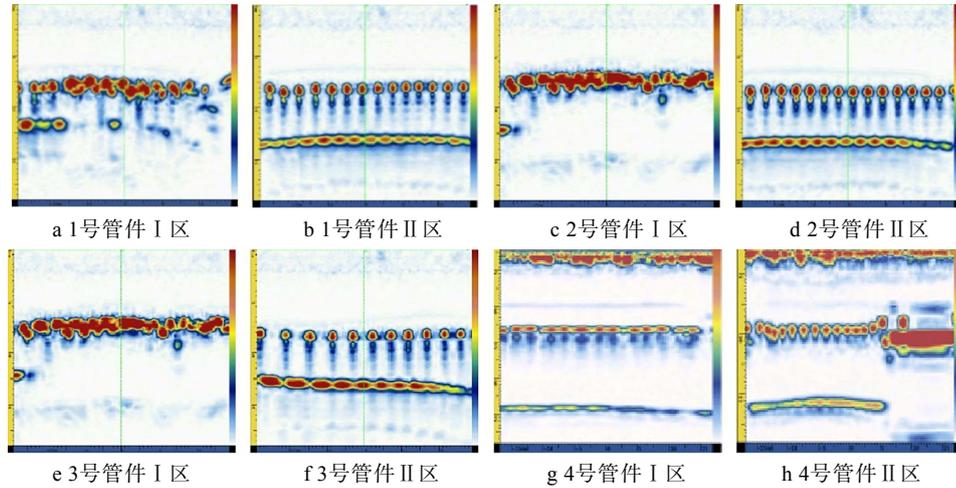


图 3 相控阵无损检测谱图

Fig.3 Nondestructive testing spectrum of phased array: a) No.1 pipeline fitting zone I; b) No.1 pipeline fitting zone II; c) No.2 pipeline fitting zone I; d) No.2 pipeline fitting zone III; e) No.3 pipeline fitting zone I; f) No.3 pipeline fitting zone II; g) No.4 pipeline fitting zone I; h) No.4 pipeline fitting zone II



图 4 电熔焊接管件切割截面宏观照片

Fig.4 Macro-picture of cutting section of electro-fusion welded nozzle: a) No.1 pipeline fitting; b) No.2 pipeline fitting; c) No.3 pipeline fitting; d) No.4 pipeline fitting

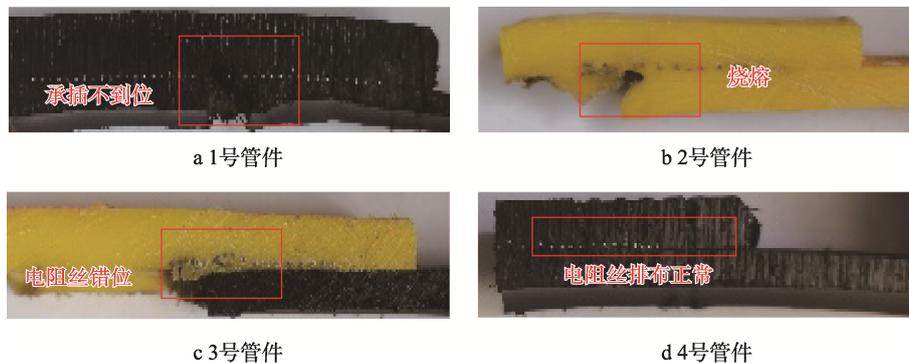


图 5 管件电熔焊接截面典型部位宏观照片

Fig.5 Macro-picture of typical parts of the welded section of pipeline fittings: a) No.1 pipeline fitting; b) No.2 pipeline fitting; c) No.3 pipeline fitting; d) No.4 pipeline fitting

承插不当，II区管材插入过深，导致I区实际焊接面积减少，增加焊接界面断裂风险。2、3号管件的电阻丝错位，导致端部出现孔洞甚至烧熔。

对电熔焊接界面进行拉伸剥离，各电熔焊接管件均存在16个样品，试样的典型剥离界面照片如图6

所示。结果显示，1~3号管件的电熔焊接界面多表现韧性断裂特征，而4号管件（对照组）几乎未发生界面剥离，不同界面断裂类型占比如图7所示。结果表明，服役30a的电熔焊接管件相比于新焊接头，其界面结合能力有所下降。



图6 电熔焊接界面剥离照片

Fig.6 Picture of the interface stripping: a) No.1 pipeline fitting; b) No.2 pipeline fitting; c) No.3 pipeline fitting; d) No.4 pipeline fitting

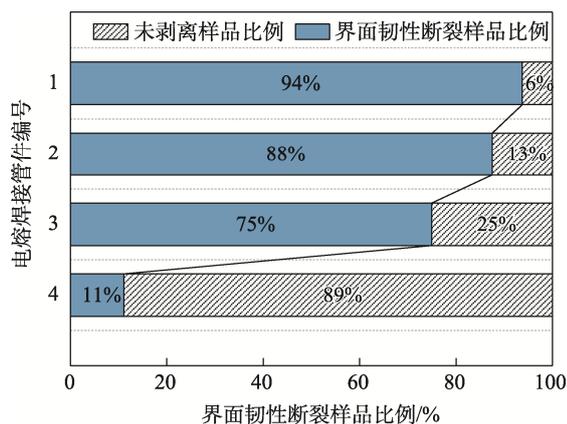


图7 剥离类型占比

Fig.7 Proportion of stripping types

使用KEYENCE 200系列共聚焦显微镜对4个电熔焊接管件的典型界面微观形貌进行了观察，结果如图8所示。1号管件断裂表面表现出典型的韧性断裂特征，表面粗糙且不规则，反映出材料在断裂过程中经历了显著的塑性变形。断裂表面的纤维状结构是由

于材料在拉伸过程中具有良好的延展性。2号和3号管件的断裂特征较为一致，断裂表面粗糙且不规则，说明其为韧性断裂的特征，表明焊接质量较好。4号新管件的大部分焊接界面未发生剥离，少量表现出较为理想的韧性断裂特征。断裂表面同样粗糙且不规则，显示材料在受力断裂时经历了显著的塑性变形，表明新管件具有良好的焊接质量。

2.2 焊接界面老化性能对比分析

取各管件的电熔焊接界面管材部分，并将管材中间部位作为对照组，进行傅里叶红外光谱（FTIR）、差示扫描量热法（DSC）、热失重分析（TGA）以及氧化诱导时间（OIT）性能对比分析，评价长期服役30a焊接界面的老化结构性能。获得的热失重曲线如图9所示，结果表明，所有样品的热降解过程为一步降解反应，降解温度范围集中在400~550℃。在热降解的初始阶段（400℃以下），分子链结构基本保持稳定，质量几乎没有变化。当温度升高至440~470℃时，化学键逐步断裂，聚合物大分子随机裂解为小分

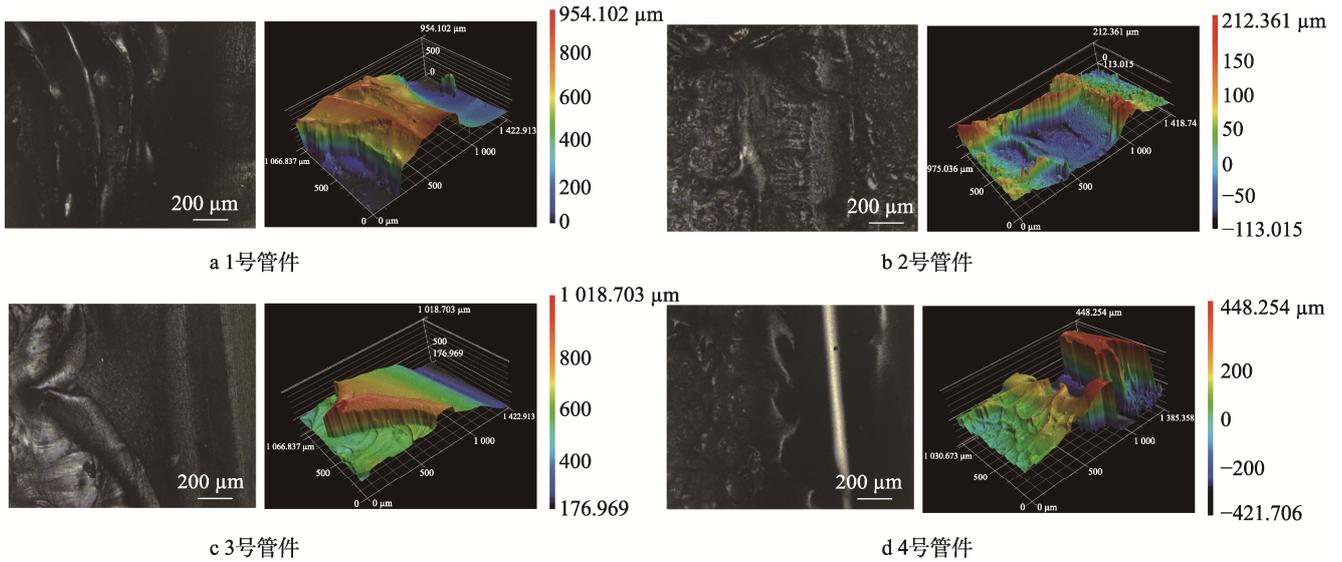


图 8 电熔界面典型部位 (管材) 显微形貌

Fig.8 Microstructure of typical parts (pipelines) at the electro-fusion interface: a) No.1 pipeline fitting; b) No.2 pipeline fitting; c) No.3 pipeline fitting; d) No.4 pipeline fitting

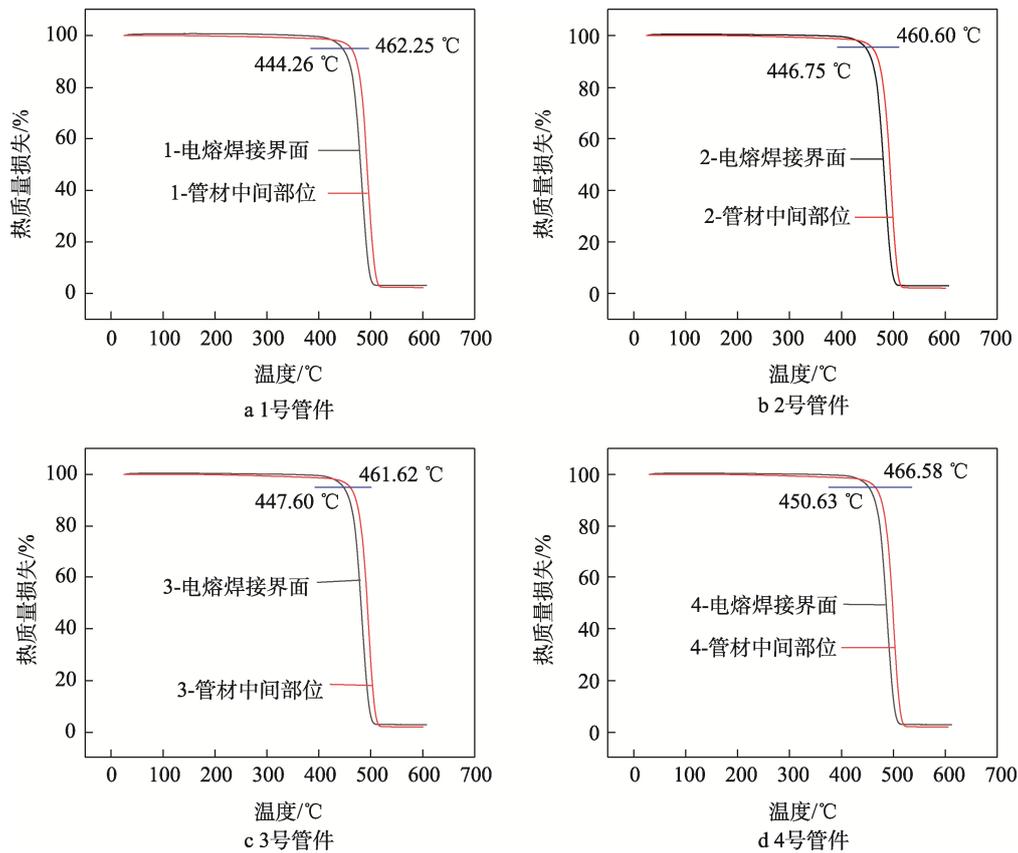


图 9 PE 管材热质量损失曲线

Fig.9 Thermogravimetric curve of PE pipelines: a) No.1 pipeline fitting; b) No.2 pipeline fitting; c) No.3 pipeline fitting; d) No.4 pipeline fitting

子链, 小分子聚合物在高温下挥发, 导致样品质量明显下降。当温度进一步升高至 550 °C 以上时, 仅留下少量残渣 (热质量损失少于 10%)。这种降解行为表明, 聚乙烯在高温下经历了典型的热氧化降解过程, 大分子链的断裂和挥发性产物的释放是其主要的

质量损失机制^[21-22]。

长期服役与新焊接界面、界面与管材中间部位的对比如图 10 所示。可以看出, 在同一管件上, 电熔焊接界面的热降解温度普遍低于管材中间部位, 1 号管件的焊接界面热降解温度 (444.26 °C) 显著低于

中间部位 (462.25 °C), 其他管件表现出相同规律。在相同取样位置, 服役 30 a 电熔连接管件的热降解温度普遍低于新焊管件。

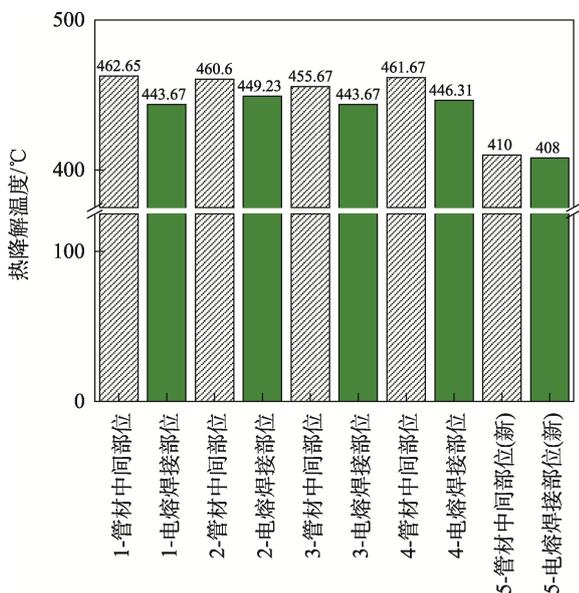


图 10 PE 管材热降解温度 $t_{d0.05}$

Fig.10 Thermal degradation temperature of PE pipe $t_{d0.05}$

获得的氧化诱导时间曲线如图 11 所示, 本质上是试样在高温氧气条件下启动自催化氧化反应的时刻。这是通过计算 2 个关键点之间的时间间隔来实现的, 即从氮气到氧气的过渡以及热流率曲线拐点处切线与水平基线延伸的交点。

长期服役与新焊接界面、界面与管材中间部位的对比如图 12 所示。在同一电熔焊接管件的不同部位, 电熔焊接界面的氧化诱导时间普遍低于管材中间部位, 这表明在焊接过程中, 抗氧化剂发生了一定损耗。在相同取样位置, 服役 30 a 电熔连接管件的抗氧化诱导时间普遍低于新焊管件, 这表明在长期的服役过程中, 电熔焊接部位及管材均受到土壤环境老化作用, 造成抗氧化剂损耗。

对电熔套袖管材中间部位和电熔焊接界面进行了差示扫描量热法 (DSC) 测试, 所获得的 DSC 曲线如图 13 所示。曲线中向下的峰代表了试样在加热过程中吸收的最大热量, 即聚乙烯材料从固态转变为熔融态的吸热过程。作为热塑性材料, 聚乙烯在加热至 100 °C 以上时, 分子链段开始解缠, 并逐渐熔化。

通过对曲线的分析可以看出, 所有新管材的熔融温度均高于旧管材, 且旧管材外表面的熔融温度低于其截面中间部位。这表明管材外表面由于长期服役或

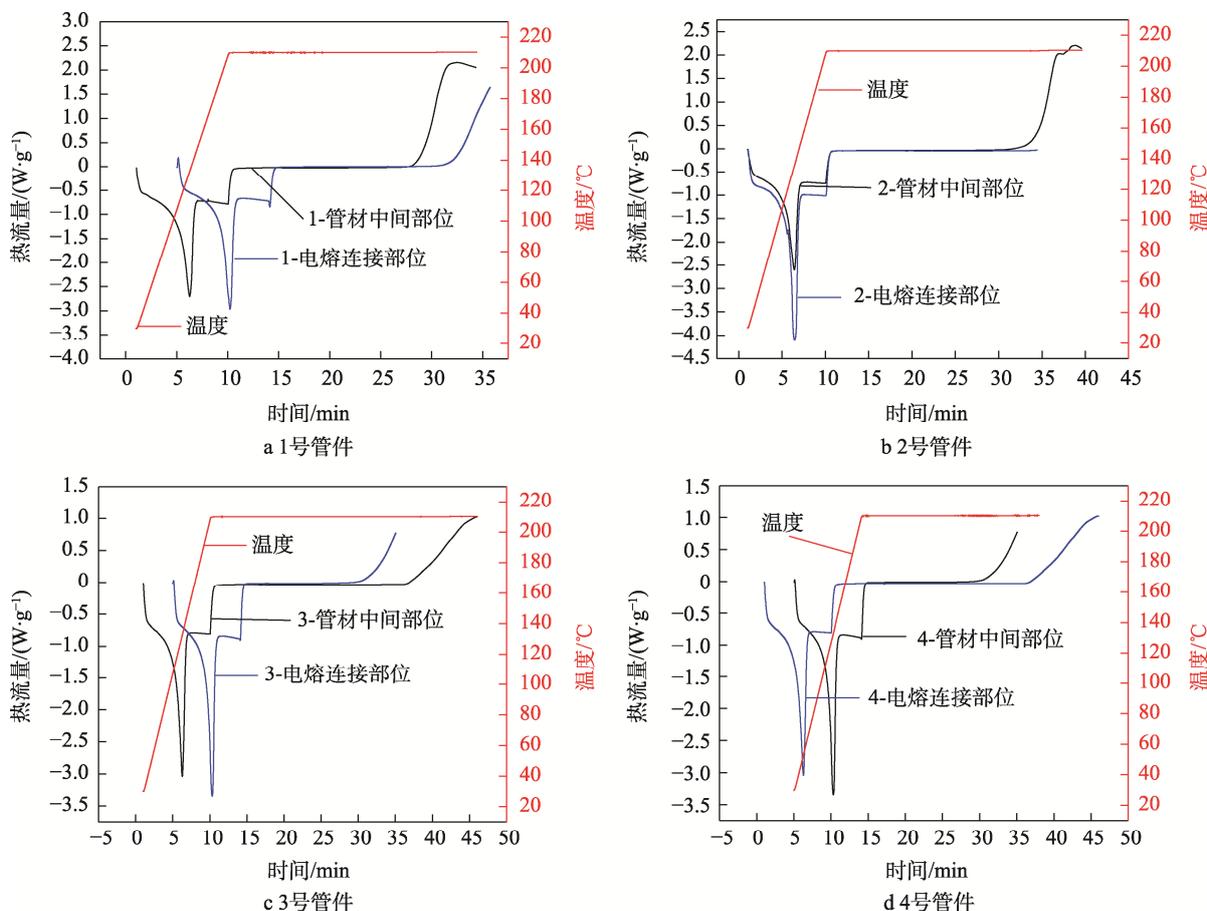


图 11 PE 管材氧化诱导时间曲线

Fig.11 Oxidation induction time curve of PE pipelines: a) No.1 pipeline fitting; b) No.2 pipeline fitting; c) No.3 pipeline fitting; d) No.4 pipeline fitting

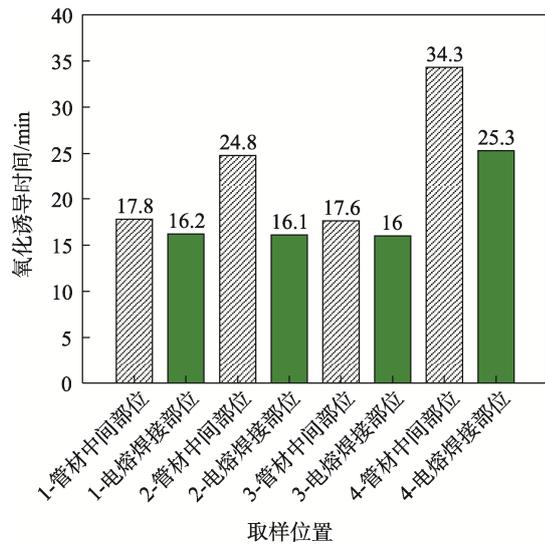


图 12 PE 管材氧化诱导时间
Fig.12 Oxidation induction time of PE pipelines

环境影响,可能经历了一定程度的降解,导致熔融温度降低。进一步的结晶度计算结果(见图 14)表明,在同一电熔焊接管件上,管材中间部位的结晶度均高于电熔焊接界面。在相同取样位置,服役 30 a 电熔连接管件的结晶度低于新焊管件。

傅里叶红外光谱分析 (FTIR) 通过分析特征官能团的吸收峰位移,揭示高分子材料在化学基团结构上

的变化^[23-24]。对 4 个管件的焊接连接部位及管材中间部位进行傅里叶红外光谱分析,结果如图 15 所示。各峰值对应的特征官能团见表 2。结果表明,各谱图在 2 919、2 846、1 470、717 cm^{-1} 附近均出现了明显的聚乙烯特征吸收峰。服役 30 a 电熔焊接管件及新焊管件的焊接部位均出现 1 045 cm^{-1} 的 C—O 特征吸收峰,说明该部位发生了氧化反应,管材结构开始劣化。进一步分析发现,在同一焊接界面上,焊接界面处的 C—O 特征吸收峰的吸收强度均大于管材中间部位,说明焊接产生了一定氧化作用,新焊管件的焊接部位出现 C—O 特征吸收峰也印证了这一点。除此之外,新焊接管件的电熔焊接界面 C—O 特征吸收峰强度弱于服役 30 a 管件的电熔焊接界面,说明了服役环境对于 PE 燃气管电熔焊接界面的老化作用。

2.3 服役土壤环境对电熔连接界面老化影响

服役 30 a 的电熔焊接管件长期处于土壤环境作用中,基于此,收集焊接接头样本附近的土壤样本信息。此处土壤紧实,颗粒较粗,随着深度的增加土壤变潮湿,具有较多的大小不一的石块或土块,埋深为 1 m。

通过国家气象中心“临床实验室收集数据系统”对“全国 1 h 土壤温度(00~100 cm)”监测地图中关于北京地区的土壤温度数据进行粗略估计。北京地区的地表下 1 m 处的温度波动较小,夏季(7~8 月)1 m

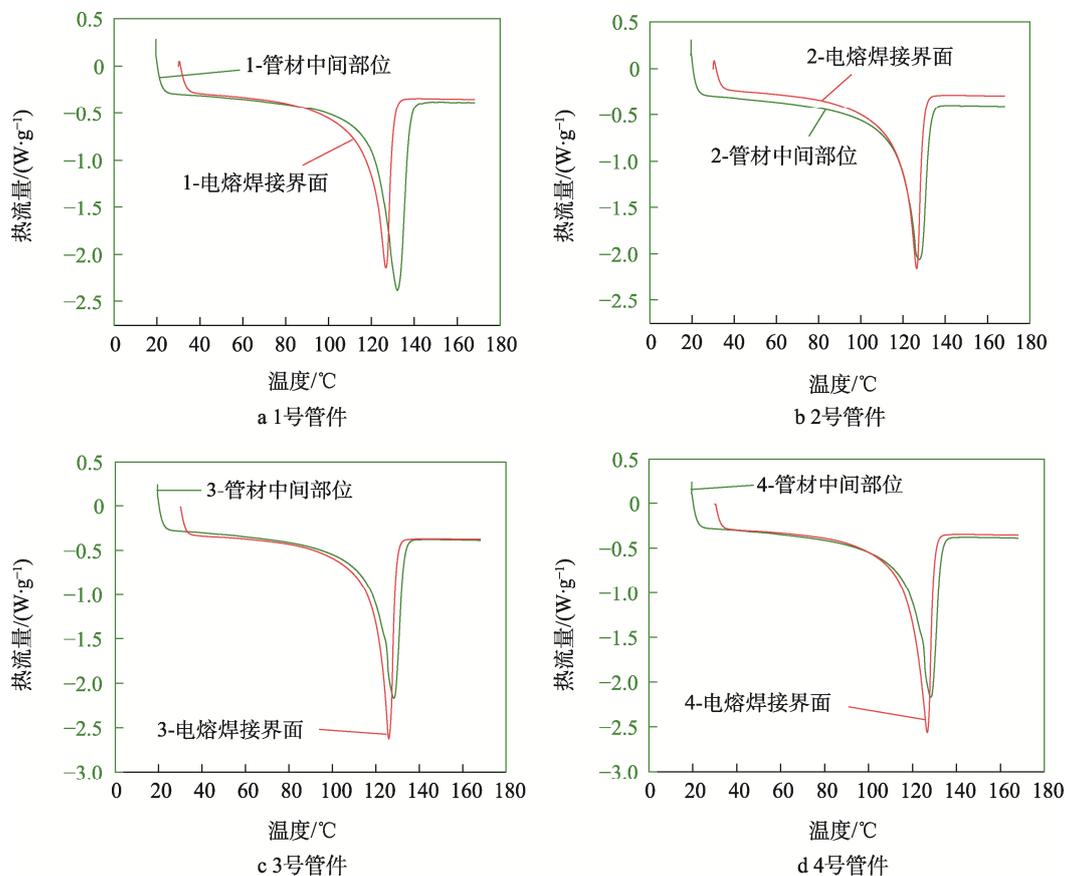


图 13 PE 管材 DSC 曲线
Fig.13 DSC curve of PE pipelines: a) pipe fitting No.1; b) pipe fitting No.2; c) pipe fitting No.3; d) pipe fitting No.4

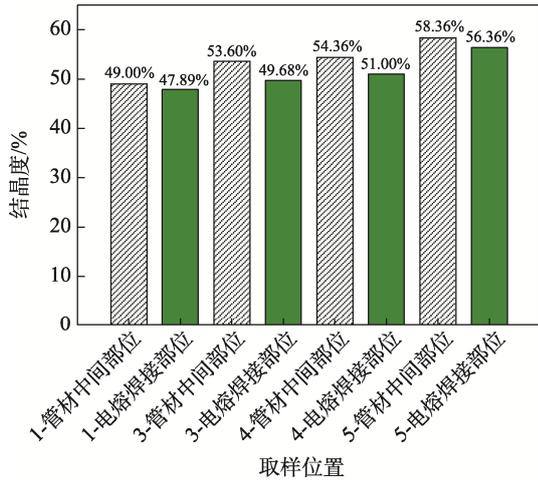


图 14 PE 管材结晶度
Fig.14 Crystallinity of PE pipe

深度土壤温度为 18~22 °C。冬季 (1~2 月) 1 m 深度温度约为 3~5 °C。鉴于高密度聚乙烯 (HDPE) 材料的正常服役温度范围为 -20~40 °C，推测在此温度条件下，PE 管道的热老化影响较小。

为了深入探究服役土壤中的有机成分，本文对所收集的焊接管件附近的土壤样品进行了气相色谱-质

谱联用 (GC-MS) 分析。分离土壤中的有机物质，并生成对应的特征峰。随后，将特征峰与有机物质数据库中的谱库进行比对，精准识别出土壤中的具体有机组分。土壤样品的质谱图如图 16 所示，各特征峰及其对应的有机物见表 3。

从图 16 和表 3 可以看出，土壤样品中检测到 4 类有机化合物，分别为酮类 (如 2,6-二甲基-6-硝基-2-庚烯-4-酮)、醇类 (如 1-十六烷醇)、胺类 (如十二烷基二甲基叔胺) 和酯类 (如 1-(1-甲氧基-2-丙氧基) 丙-2-基 2-甲基丁-2-烯酸酯)。这些有机物质含有极性较强的官能团，具备较高的化学活性，可能对 PE 管材的长期服役产生潜在影响。质谱分析显示，胺类化合物 (85.98%) 在土壤中占据主导地位，而酯类含量最少 (0.89%)。

土壤中存在的胺类、酮类和醇类有机物 (如十二烷基二甲基叔胺) 具有显著的化学活性^[25]，长期暴露在此环境中，温度及这些化学介质带来的 PE 燃气管道电熔焊接部位 C—O 老化基团的产生，将破坏聚乙烯的结构规整性，导致其结晶度的下降，影响到了电熔焊接界面的力学结合性能。本研究证实了土壤环境对 PE 带来的负面影响，影响其使用寿命和安全性。应加

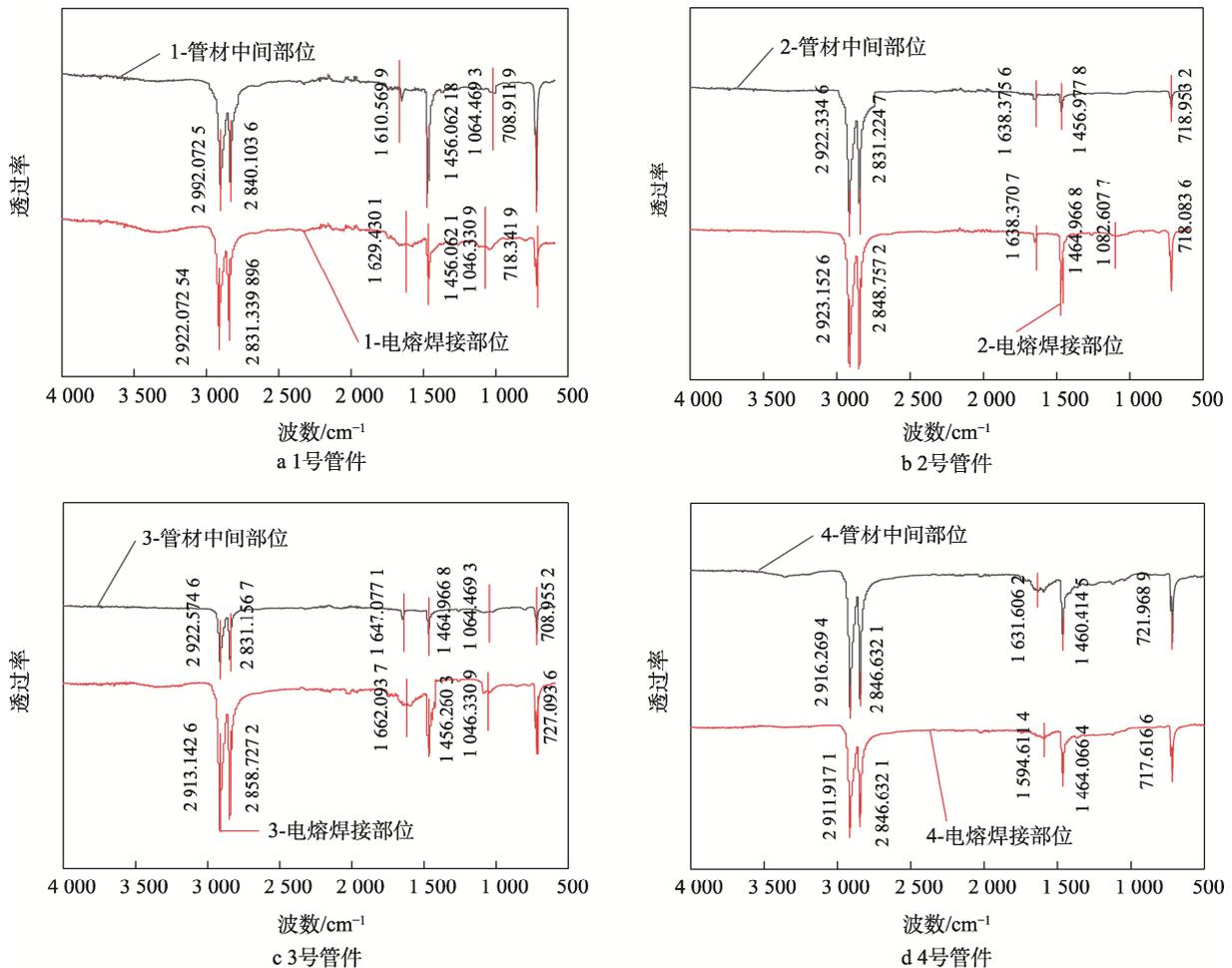


图 15 PE 管材傅里叶红外谱图

Fig.15 Fourier infrared spectrum of PE pipes: a) No.1 pipeline fitting; b) No.2 pipeline fitting; c) No.3 pipeline fitting; d) No.4 pipeline fitting

表 2 傅里叶红外光谱基团
Tab.2 Groups of Fourier infrared spectrum

波数/cm ⁻¹	基团	振动模式	波数/cm ⁻¹	基团	振动模式
3 395 附近	O—H	伸缩振动	1 600 附近	C=C	伸缩振动
2 912 附近	—CH ₂ —	反对称伸缩振动	1 045 附近	C—O	伸缩振动
2 842 附近	—CH ₂ —	对称伸缩振动	716 附近	—CH ₂ —	面内摇摆振动

表 3 服役土壤中的有机物质
Tab.3 Organic substances in the soil

序号	保留时间/min	峰面积百分比/%	分子式	分子量	CAS 号	化合物名称
1	6.681	0.56	C ₉ H ₁₄ O	138	54458-61-6	2,3,4,5-四甲基-2-环戊烯-1-酮
2	8.657	2.22	C ₉ H ₁₅ NO ₃	185	73583-56-9	2,6-二甲基-6-硝基-2-庚烯-4-酮
3	8.861	1.32	C ₇ H ₁₆ O	116	625-06-9	2,4-二甲基-2-戊醇
4	8.889	0.89	C ₁₂ H ₂₂ O ₄	230	0	1-(1-甲氧基-2-丙氧基)丙-2-基 2-甲基丁-2-烯酸酯
5	8.943	1.03	C ₇ H ₁₆ O	116	625-06-9	2,4-二甲基-2-戊醇
6	13.398	85.98	C ₁₄ H ₃₁ N	213	112-18-5	十二烷基二甲基叔胺
7	18.313	8.01	C ₁₆ H ₃₄ O	242	36653-82-4	1-十六烷醇

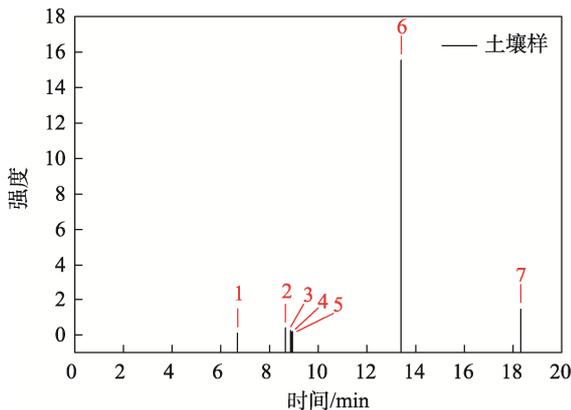


图 16 土壤试样质谱图
Fig.16 Mass spectrum of soil samples

强关注土壤环境对 PE 燃气管道的长期服役安全问题。

3 结论

1) 超声相控阵、剥离宏观形貌均说明服役 30 a 的电熔焊接管件的焊接界面存在少量电阻丝错位的工艺缺陷问题、孔洞缺陷, 并未带来服役 30 a 中的漏气事件。与新焊接管件相比, 长期服役焊接管件的界面结合能力明显发生退化。

2) 30 a 长期服役的电熔焊接界面的结晶性能、热降解性能、抗氧化性能明显低于新焊接界面, 同一焊接管件电熔焊接界面的结晶性能、热降解性能、抗氧化性能均弱于管材中间部位, 表明焊接工艺过程会使电熔焊接界面结构性能变化。

3) 服役 30 a 的 PE 燃气管道电熔焊接部位在服役土壤中的酮类、醇类、胺类和酯类等有机化合物与温度的长期协同作用下, 出现 C—O 老化基团, 聚乙

烯的结构规整性下降, 带来结晶度下降, 影响到了电熔焊接界面的力学结合性能。因此, 为预防埋地 PE 管件的老化失效问题, 建议在新建工程前对埋地部位土壤进行采集分析, 同时优化焊接工艺, 提升套筒品质, 保障燃气管线长期稳定运行。

参考文献:

- [1] KHELIF R, CHATEAUNEUF A. Reliability-Based Replacement of Polyethylene Gas Pipeline Networks[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(11): 8175-8185.
- [2] 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.
- [3] WANG M, YANG F, XIANG M, et al. Design of Molecular Structure for Commercial Polyethylene100 Pipe[J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(3): 84.
- [4] KHADEMI-ZAHEDI R, SHISHESAZ M. Application of a Finite Element Method to Stress Distribution in Buried Patch Repaired Polyethylene Gas Pipes[J]. Underground Space, 2019, 4(1): 48-58.
- [5] 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.
ZHAN Z W, WEI R. Analysis of a Natural Gas Pipeline Deflagration Accident[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2011(6): 44-45.
- [6] ZHAN Z W, WEI R. Analysis of a Natural Gas Pipeline Explosion Accident[J]. Special Equipment Safety Technology, 2011(6): 44-45.
- [7] CHUDNOVSKY A, ZHOU Z W, ZHANG H Y, et al.

- Lifetime Assessment of Engineering Thermoplastics[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2012, 59: 108-139.
- [8] KRISHNASWAMY R K. Analysis of Ductile and Brittle Failures from Creep Rupture Testing of High-Density Polyethylene (HDPE) Pipes[J]. *Polymer*, 2005, 46(25): 11664-11672.
- [9] LI X X, XING L L, TIAN X J, et al. Statistics and Cause Analysis of Leakage Cases in Urban Polyethylene Gas Pipelines[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(4): 107-114.
- [10] ZHA S X, LAN H Q, HUANG H. Review on Lifetime Predictions of Polyethylene Pipes: Limitations and Trends[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 198: 104663.
- [11] WEON J I. Effects of Thermal Ageing on Mechanical and Thermal Behaviors of Linear Low Density Polyethylene Pipe[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(1): 14-20.
- [12] HOÀNG E M, LOWE D. Lifetime Prediction of a Blue PE100 Water Pipe[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008, 93(8): 1496-1503.
- [13] ZHENG J Y, SHI J F, GUO W C. Development of Non-destructive Test and Safety Assessment of Electrofusion Joints for Connecting Polyethylene Pipes[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2012, 134(2): 021406.
- [14] 李广印, 包文红, 赵晓隆, 等. 焊接缺陷对聚乙烯管道焊接接头强度的影响[J]. *焊接*, 2022(6): 59-64.
LI G Y, BAO W H, ZHAO X L, et al. Influence of Welding Defect on Strength of Welded Joint of Polyethylene Pipeline[J]. *Welding & Joining*, 2022(6): 59-64.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 土壤和沉积物 半挥发性有机物的测定 气相色谱-质谱法: HJ 834—2017[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil and Sediment-Determination of Semivolatile Organic Compounds-Gas Chromatography /Mass Spectrometry: HJ 834—2017[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法: GB/T 32563—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Non-Destructive Testing—Ultrasonic Testing—Test Method for Phased-Array Ultrasonic Testing: GB/T 32563—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 塑料管材和管件公称外径大于或等于 90 mm 的聚乙烯电熔组件的拉伸剥离试验: GB/T 19808—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics Pipes and Fittings—Peel Decohesion Test for Polyethylene (PE) Electrofusion Assemblies of Nominal Outside Diameter Greater than or Equal to 90 mm: GB/T 19808—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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: GB/T 19466.3—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics—Differential Scanning Calorimetry (DSC) —Part 3: Determination of Temperature and Enthalpy of Melting and Crystallization: GB/T 19466.3—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 塑料 聚合物热重法(TG) 第 1 部分:通则: GB/T 33047.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics—Thermogravimetry (TG) of Polymers—Part 1: General Principles: GB/T 33047.1—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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: GB/T 19466.6—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics—Differential Scanning Calorimetry (DSC)—Part 6: Determination of Oxidation Induction Time (isothermal OIT) and Oxidation Induction: GB/T 19466.6—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [21] XIN W, ZHANG F Q, YUAN J. Thermal Degradation Kinetics of Recycled High-Density Polyethylene[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2016, 45: 37-41.
- [22] LIU Y F, CHEN G, CHEN L, et al. Study on Thermal Degradation of Silane Naturally Cross-Linked Polyethylene[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2015, 13: 84-87.
- [23] HU W X, LIU C Q, LIU W J, et al. The Study on the

- Stress and Photo-Oxidative Aging of Polyethylene Cable Sheath under Different Processing Conditions[J]. *Macromolecular Research*, 2018, 26(5): 426-437.
- [24] 付红梅, 朱光明, 刘文元, 等. 交联聚苯乙烯/云母复合材料抗紫外老化性能研究[J]. *材料研究学报*, 2016, 30(5): 336-342.
- FU H M, ZHU G M, LIU W Y, et al. Performance of Ultraviolet Aging Resistance of Cross-Linked Polystyrene/Mica Composites[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2016, 30(5): 336-342.
- [25] LI M M, BAO Q, LEI S M, et al. Study on the Impact of Soil Environment Organic Substances on the Ageing of Urban PE Gas Pipes in Service[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2024, 71(2): 143-153.