

服役环境下高密度聚乙烯(HDPE)压力管道损伤行为研究进展

李宏伟¹, 赵博^{2*}, 周天宇², 苑一琳², 于宇新², 赵志娟²

1. 哈尔滨飞机工业(集团)有限责任公司, 哈尔滨 150060

2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029

摘要 高密度聚乙烯 HDPE 压力管道以其优异的性能在燃气、给水等领域获得广泛应用, 但对 HDPE 压力管道的损伤行为认知的缺乏, 导致设备工程安全需求无法满足。总结了 HDPE 最主要的 2 种损伤模式即老化损伤和应力损伤的研究进展与不足, 阐述了老化损伤和应力损伤的损伤机理, 总结了环境因素和内部因素对老化损伤、应力状态对应力损伤的影响机理及损伤演化过程, 并分析了其损伤表征方法的进展和不足。结合特种设备特别是承压设备行业的需求, 分析了现有研究的不足, 并展望了未来工程研究的方向。

关键词 高密度聚乙烯; 老化损伤; 应力损伤; 特种设备

近年来, 高分子材料在工程界“以塑代钢”的发展进程中具有广阔的应用前景。其中高密度聚乙烯(HDPE)以其良好的化学稳定性, 以及较高力学性能和优异的耐环境开裂性能, 在特种设备相关特别是压力管道领域获得广泛应用。以燃气管道为例, 世界先进国家均已将 HDPE 管道作为城市燃气管道的首选材料。美国 1968 年 HDPE 燃气管占安

装总数的 12%, 以后几乎每隔 6 年翻一番, 到 1984 年已全部使用 HDPE 燃气管。中国 2016 年 HDPE 燃气管道总长达到 10 万 km, 管材年用量已超过 50 万 t, 平均年增长率约 5.2%, 目前发展仍然处于黄金阶段^[1]。

HDPE 虽然具有诸多良好性能, 但由于高分子材料本身特定的固有性质, 其损伤行为相对金属材

收稿日期: 2022-12-11; 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2022MK205); 中国特种设备检测研究院青年科技英才项目(KJYC-2023-07, KJYC-2023-09); 国家重点研发计划项目(2019YFF0302201)

作者简介: 李宏伟, 高级工程师, 研究方向为金属材料加工, 电子信箱: 15046786858@139.com; 赵博(通信作者), 正高级工程师, 研究方向为特种设备材料失效与保护, 电子信箱: zhaobo19840626@163.com

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.15.009

料具有巨大差异。近些年学界和工程界对此进行了大量研究^[2-3],但现有研究对材料损伤行为认知程度还不足以满足承压设备的安全防护需求。特别是 HDPE 管道应用于燃气输送领域时间远小于金属管道,失效模式也完全不同(图 1)。对其从安全评价到检测方法的工程经验缺乏系统性积累,目前还未形成完整的承压设备安全评价标准体系^[4-5],认知程度还不足以满足承压设备安全防护需求,给设备安全运行带来较高风险隐患。



图1 服役过程中的 HDPE 压力管道典型失效模式

1 老化损伤

HDPE 压力管道的老化原因主要可分为内部和外部 2 种。内部原因是材料本身的特性,如结构类型、添加物成分和结晶特性等。外部原因是服役工况造成的,对于 HDPE 压力管道主要为存储、埋地和裸露期间的光照、温度、应力、湿度、土壤酸碱性和微生物侵蚀等工况环境因素。聚乙烯燃气管道的使用寿命一般为 50 年,部分耐慢速裂纹扩展性能(SCG)优越的产品甚至可以超过 100 年^[6]。但在实际运行过程中,由于持续受到复杂环境的影响,可加速管道老化,造成提前失效。

1.1 损伤机理

大量研究结果表明,聚烯烃的老化损伤过程是自由基的自氧化支化链反应过程。材料在短时间内受到超越聚合物键能的外界能量输入发生断键,最终分解形成自由基,自由基在环境中氧的作用下可与其他化学键链段反应,导致包括链引发、链增长、链支化和链终止一系列反应阶段,最终导致材料的老化损伤形成。具体化学反应方程式如下所示^[6-7]。

链引发:



链增长:

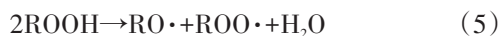


链支化(氢过氧化物浓度不同,反应路径不同):

在氢过氧化物浓度较低时,则



在氢过氧化物浓度较高时,则



链终止:



由以上式可知,游离基 $ROO \cdot$ 的生成是聚合物老化损伤反应的关键步骤。因此从化学反应动力学上讲,聚合物在环境中的老化速度直接取决于游离基的浓度,而不是环境氧的浓度。因此,一般在富氧条件下,可提供较高外界能量的环境因素往往超过氧含量因素,可成为材料老化程度的决定性条件。

对于 HDPE 燃气管道,其老化特性和常规 HDPE 存在一定差异。多年来随着工程界对高分子材料认知的深入,以及材料加工制作水平的提升,使得 HDPE 管道从 PE63、PE80 到 PE100 逐级提升。其中最直观的表现是分子量的分布方式从单峰、双峰到多峰历经了多阶段的变化,由聚合物的结构调整提供了较高的屈服强度和较高的耐环境开裂能力,为保证抗土壤沉降能力,其断裂伸长率一般超过 500%^[8-10]。因此,HDPE 压力管道对老化损伤更加敏感,性能改变也更加显著。笔者曾经研究过压塑成型的 PE80 级 HDPE 老化损伤前后的分子量变化规律,发现材料的分子量随老化损伤发生由平均分布趋向正态分布的变化,这说明老化反应引起的热力学熵增过程是促使 HDPE 压力管道用材性能下降的重要表现。

1.2 研究进展与不足

1.2.1 环境因素影响

光照被学术界长期以来认为是 HDPE 老化损

伤的最重要环境因素。自然环境下的太阳光谱是一种连续光谱,本质是集合各种波长的太阳辐射能,能引起高分子聚合物的光氧化反应。表1是不同化学键键能及具有相近能量的紫外线波长对照表,可以看出,当波长为290~400 nm时,可以破坏组成HDPE的C—H和C—C等主要化学键。此外,HDPE中多含有杂质和添加剂,可能存在一定的催化效果,使得材料在中长波段也会产生光敏特性,从而加速聚合物损伤^[11-12]。

根据国内外相关研究工作,受504 h和0.76 W/m²的辐照后,HDPE的表面约100~200 μm以下已不存在键级别的老化损伤特征(图2),但材料的力学性能特别是断裂伸长率具有数量级程度的下降^[13-14]。这说明辐照造成的损伤不仅会改变分子结构,也可以改变HDPE分子链的折叠和旋转,甚至改变分子链的空间排列和材料的结晶特性,进而使得材料的抗裂纹慢速扩展能力大幅下降^[15]。该

结果阐释了原子尺度损伤的重要性,但对材料性能变化的机理层面解释还欠缺验证,尚需进一步进行深入研究。

热也是引发HDPE老化损伤的重要环境因素之一,其作用主要为加速聚合物老化损伤的化学反应速度。但热的活化作用相对较小,在老化损伤中表现为热降解和热交联。热降解加速分子的热运动致使C—C发生断裂,热交联促使聚合物分子形成三维结构,或在一个分子内生成环状结构^[16]。有研究认为,在热损伤的初期热降解和热交联互相竞争,往往部分性能表征变化趋势有所反复^[17-18]。一般情况下,环境大气中的温度升高有限,必须结合氧的作用发生氧化反应,才可能对具有HDPE这类稳定结构的高分子聚合物产生老化损伤^[19-20]。

在聚合物老化损伤过程中,水可同时起到物理和化学2种破坏作用:一方面可溶解或吸附HDPE及其添加剂中的水溶性物质、亲水基团或分离电解质;另一方面可以在聚合物表面形成凝露,通过长期渗透进入聚合物内层,促进材料膨胀,从而降低其电学性能和物理机械性能。此外,在自然降水过程中,水会冲洗和萃取聚合物表面上可溶于水的添加剂,以及已经形成的老化层而露出新鲜基体,降低了防护效能^[21]。然而,水对聚合物的老化也可能具有阻碍作用,这集中体现在聚合物表面形成的水膜可以阻碍外部的光、热、氧和臭氧的侵袭,或者清洗去聚合物老化过程中生成的降解反应催化剂,起到延缓老化的作用^[22]。此二者互为相反作用,其主导反应需要结合具体情况进行分析。

表1 不同典型化学键键能与不同波段紫外线能量对比

化学键	键能/ (kJ·mol ⁻¹)	波长/nm	光波能量/ (kJ·mol ⁻¹)
C—H	413.6	290	418
C—F	441.2	272	446
C—O	351.6	340	356
C—C	347.9	342	354
C—N	290.9	400~410	303~297
C—Cl	328.6	350~364	346~333
N—H	389.3	300~306	404~397
O—H	463.0	259	468

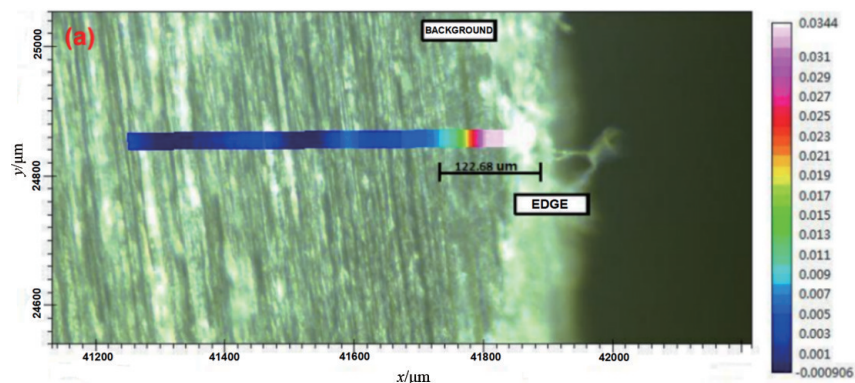


图2 经504 h紫外辐照后HDPE的羰基指数结果

1.2.2 内部因素影响

聚合物的结构状态及其组成和配方在很大程度上决定着材料的耐老化损伤性能。其中聚合物分子结构中的影响因素有支链、羰基、分子量、结晶度等^[23-24]。HDPE是一种高分子饱和开链烃,为石蜡型结构,但作为高分子材料,分子链上常带有甲基支链、较长的烷基支链,甚至还有十字链;在链结构中,至少有3类碳碳双键:链端双键、链内双键、链侧双键。支链和双键的存在,作为分子链上的结构缺陷结构,成为起始的活性中心发生氧化,加速了对氧的吸收,导致材料的老化损伤。特别是对于薄膜类表面积较大的制品,支链数大、叔碳—氢键多,更易发生老化损伤^[25-26]。分子量分布对高分子的老化损伤具有很大影响。一般情况下,分子量分布越宽、端基越多,越容易发生老化损伤。

此外,高分子的物理形态,特别是结晶性能和老化损伤性能也具有直接关联。一般认为,老化损伤优先从非晶区开始,结晶性能对其影响分为2个方面:一方面,结晶减少无定形态,使得HDPE不易老化;另一方面,结晶使得微晶区边缘分子链折叠弯曲,易发生断键造成老化损伤^[27]。但根据实际经验,同等条件下HDPE的抗老化损伤性能随结晶度增大而提高。由于HDPE是典型的半结晶聚合物,晶区与非晶区的比例和组成形式随材料本性、成型方法和添加剂等不同而差异显著。因此,调整材料结晶度也可能成为未来承压设备工程界提升聚合物抗老化损伤能力的手段之一^[28]。

2 应力损伤

从2000年至今,中国工程界对于HDPE压力管道失效性的分析逐渐展开,结果显示:静荷载、动荷载、脉冲荷载等引起的力学失效为管道破坏的主要因素^[29]。引起应力载荷的因素较多,管道内压、应力集中、地质沉降以及施工损伤等均可成为应力来源。由于多年来中国的生产工艺水平不断提高,裂纹快速扩展导致设备破坏的事故得到极大遏制,目前工程界的关注重点已经转向在低于材料屈服强度范畴下裂纹慢速扩展。根据中国现行标准,

HDPE压力管道属于承压类特种设备,内压等级从0.6~1.6 MPa不等,应力因素成为管道运行全生命周期中不可避免的失效或失效诱导问题^[30]。

2.1 损伤机理

对于HDPE材料来说,应力损伤的本质都是屈服,但不同情况下的屈服机理不完全相同。对于受内压的承压设备而言,屈服机理主要分为2种:剪切屈服和银纹损伤。韧性失效是典型的剪切屈服过程,其本质是HDPE在内压作用下所受到的应力达到或超过材料的屈服极限,主要微观发生机制是聚合物内部的球晶破碎和片晶滑移过程所致^[31-33]。

银纹损伤主要是由于材料内部缺陷或空穴处产生超过屈服极限的应力集中产生,此时由于HDPE具有冷流特性,银纹内的微纤在应力作用下断裂形成裂纹,裂纹尖端又成为新的应力集中处,产生新的银纹。银纹—裂纹转化过程不断重复,使得裂纹不断发展最终导致材料开裂。此时裂纹扩展必将伴随着银纹内的微纤断裂,其本质原因是低应力水平下分子链的解缠结过程。因此,材料的物性在此类屈服中被认为是决定裂纹扩展速率的最重要因素^[34]。

李孝三等^[35]采用显微镜观测聚乙烯(PE)在室温下受恒定低应力作用经过一段时间后发生的断裂形貌,结果显示材料断裂前会经历一个裂纹慢速增长的过程。一旦施加应力后材料在微观上即开始耐慢速裂纹扩展(SCG)过程产生塑性破坏,塑性破坏区前沿由一系列银纹所组成,银纹内的实体为粗纤分子间作用力已遭破坏,但连结分子尚未充分伸展。董孝理^[36]认为对于有裂纹的样条,由于存在裂纹尖端应力集中,无法仅用应力水平表征载荷,而可以根据断裂力学采用应力强度因子 K 来表征载荷。应力强度因子 K 是应力 σ 和裂纹长度 a 的函数,如式(9)所示。已有研究表明^[37-38],HDPE的裂纹演化的信息包括裂纹长度、银纹区长度、裂纹张开位移等,其中裂纹长度和银纹区长度最重要。在诱导期内,裂纹并不增长,但裂纹尖端的钝化、银纹化、二次裂纹等现象均可观测。诱导期长、而裂纹增长速度小的情况下,HDPE的耐SCG性能较好。

$$K = Y\sigma\sqrt{a} \quad (9)$$

式中, Y 为与样条有关的常数, σ 为应力, a 为裂纹长度。

2.2 研究进展与不足

2.2.1 应力状态影响

长期以来, 应力水平是各国学者在研究高分子聚合物应力损伤与失效的研究重点, 并且已经对材料发生的韧性失效、脆性失效时和老化协同失效进行了大量研究。但是对于承压设备而言, 约束状态也是影响损伤和失效的重要因素, 前期研究在此方面则少有涉及。

与试样进行单轴拉伸试验时的单轴约束不同, 承压设备在运行过程中主要受到双向约束, 此时材料处于单向不为零的平面应力状态。但设备在设计阶段多采用单轴拉伸的试验结果作为基础数据, 使得实际损伤状态和实验室结果产生较大偏离, 对设备安全带来一定风险。近年来, 各国学者已充分认识到原有经典试验方法的缺陷, 并采用小冲杆测试技术等多种平面应力状态的试验方法, 对各类不同约束变形机制的材料力学性能测试和性能表征研究^[39]。结果表明, 无论是弹性阶段还是塑性阶段, 材料在平面应力下的形变行为均与单轴应力状态完全不同, 力学性能的解析结果差异极大, 引起学界一定关注。但是, 目前学界研究仅能推进至对材料力学性能与力值曲线的数值解析, 表征方法也局限于数学模型和数值模型推导, 研究结果难以认知材料微观结构改变的本质。

本质上, HDPE 是典型的半结晶高分子材料, 微观上由柔性高分子链段结合无取向片晶组成。拉应力下呈大变形机制下的黏弹性变形特征, 且形变中的各种微观损伤机制复杂, 受应力状态影响更大^[40-41]。但目前研究尚未发展到针对 HDPE 在平面应力作用下的内部微观结构变化异同表征, 导致应力损伤机制认知不够深入。笔者也曾采用液压鼓胀技术对圆片状 HDPE 微小试样进行损伤与断裂特性认知, 研究结果表明平面应力状态下材料早期损伤阶段产生的银纹和裂纹呈相互垂直, 与单轴应力状态下的相互平行状态截然不同, 这也说明约束状态对材料应力损伤影响的根源在于微观机制的改变, 但相应研究尚需进一步开展。

2.2.2 表征方法研究

目前, 对 HDPE 损伤的表征方法多局限于传统的多维度试验与计算力学方法结合, 不但工作量巨大, 且准确性不高, 是目前困扰应力损伤认知的最重要桎梏之一^[42-44]。近年来, 各国学者尝试采用应变能理论对 HDPE 的损伤行为进行描述。Pawlak 等^[45]和 Jiang 等^[46]分别通过实验和数值模拟方法讨论了聚合物材料的纤维特性及损伤引起的银纹化现象。Shojaei 等^[47]基于超弹-塑性的连续损伤框架, 探究了循环载荷与聚合物疲劳损伤程度和零件寿命的关系。Narayan 等^[48]提出了一种非晶态聚合物变形和破坏的梯度损伤理论。但受限于表征手段精度, 已有研究无法从微观角度对材料损伤机理进行阐述, 表征结果也趋于经验认知, 导致难以从宏观失效反演至微观损伤, 研究成果不足以指导工程^[49-50]。

一般认为, 材料在应力作用下的损伤过程本质是由外力做功导致材料内能变化, 致使材料微观结构改变。损伤发生取决于应变能能否达到微观结构改变发生的能垒阈值^[51-52]。根据经典热力学理论, 经典聚烯烃类材料的微观损伤类型如共价键断裂、分子链解缠绕、片晶滑移等的能垒差异较大, 存在通过能量识别方法表征的可能。声发射法作为一种对能量变化识别较为灵敏的无损检测方法, 在非金属材料及复合材料的损伤行为检测中历来为学界重点关注。

目前研究已从声发射法对材料失效检测扩展至对材料损伤的判定和表征^[53-55]。Zhao 等^[56]发现在聚碳酸酯复合材料中玻纤和基体发生脱粘行为时可表现出较强的声发射特征信号。Wang 等^[57]认为通过声发射累积命中数和排放累积能量等参数可对玄武岩纤维增强的水泥砂浆材料损伤的不同阶段进行识别。Carvelli 等^[58]发现, 采用声发射信号可以分辨碳纤维布增强的聚苯硫醚(PPS)复合材料层合板在拉应力下损伤的 3 种失效模式。但学界对声发射方法表征 HDPE 的损伤研究开展较少, 目前尚未存在突破性进展。Yuan 等^[59]对 HDPE 在单轴拉应力持续加载下的试样损伤过程进行声发射信号采集和机理分析, 研究结果表明, HDPE 材

料在不同塑性变形阶段声发射信号差异明显,其中振幅和能量最为敏感(图 3^[59])。这说明采用声发射

法进行 HDPE 应力损伤的表征存在可行性,但损伤机理和声信号的关联性还需要进一步研究。

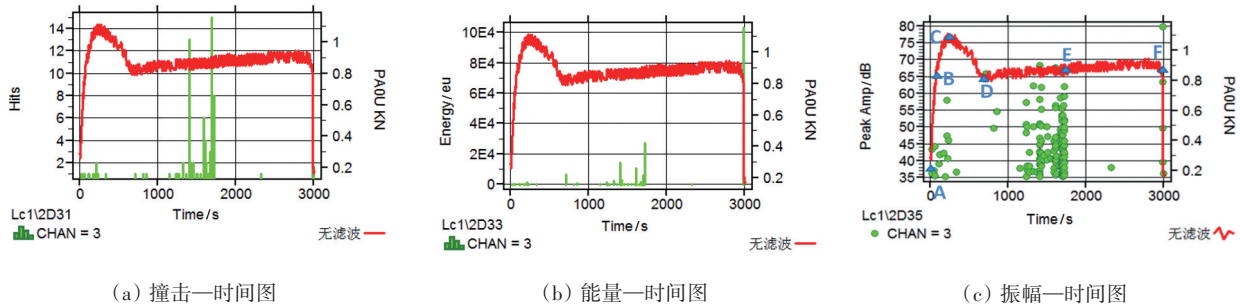


图3 形变过程中的声发射信号特征

3 结论

1) 深入认知 HDPE 压力管道的损伤特性是目前特种设备工程界和学术界最为关注的问题之一。特别是在目前国内已基本掌握生产与使用技术、形成相当规模生产能力的前提下,掌握从微观损伤机理到宏观失效模式的演变过程和表征方法,进而合理管控工程风险,是推广中国产品形成有效工业内循环的必要路径。

2) 现有研究结果对 HDPE 压力管道的老化损伤和力学损伤的发生原因、演化过程及影响因素已进行了较为明确的阐述,特别是对材料内部和外界环境中影响损伤进程的主要因素,以及其在老化损伤和力学损伤过程中在材料-化学微观反应中的作用,已经具有了较为清晰的认知。

3) 现有研究局限于传统材料学和材料力学框架,对于 HDPE 管道特有的对称约束应力状态下的材料损伤机理认知不明。同时,HDPE 材料的老化损伤和应力损伤引发的失效模式和传统金属材料差异显著,传统检测方法难以适用。这是影响 HDPE 管道安全评价体系建立的首要因素,也是未来研究中亟需解决的问题。

参考文献(References)

- [1] 骆宏伟, 胡德源. 国内聚乙烯燃气管专用料的开发现状及市场[J]. 化工管理, 2021(12): 1-2.
- [2] Lai H S, Fan D S, Jia Y F, et al. Key Technical challenges of high density polyethylene(HDPE) pipe in nuclear equipment[J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34(12): 45-54.
- [3] Mehdizadeh-Kafash M. Deformation and fracture behaviour of high-density polyethylene pipe materials: experimental and numerical approach[D]. Lille: École Doctorale Sciences Pour L'ingénieur, 2009.
- [4] 唐捷. 塑料内胆复合材料全缠绕 CNG 气瓶安全技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [5] 侯向陶, 许忠斌, 顾云柱. 塑料管道失效分析及寿命预测的研究进展[J]. 中国塑料, 2014, 28(7): 11-16.
- [6] 赵兴民, 赵建平, 燕集中. 高密度聚乙烯管材光氧老化性能及寿命预测[J]. 中国塑料, 2021, 35(6): 33-39.
- [7] Costa L, Luda M P, Trossarelli L. Ultra-high molecular weight polyethylene—II. Thermal and photo-oxidation[J]. Polymer Degradation & Stability, 1997, 58(1/2): 41-54.
- [8] 王洋. 城镇燃气聚乙烯管道热氧老化寿命预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [9] 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.
- [10] 代星辰, 黄奕昶, 关凯书. 基于压痕测试技术的聚乙烯老化化学性能评价[J]. 机械工程材料, 2023, 47(1): 106-110.
- [11] 白晓涓, 杨梦欢, 肖星星, 等. 加工对一些塑料添加剂影响的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2013, 42(6): 1-4.
- [12] 冯敬. 塑料抗老化助剂的应用[J]. 化工新型材料, 2014, 42(7): 235-239.
- [13] 彭向阳. 应用显微红外法的硅橡胶复合绝缘子伞裙老化深度研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1350-1356.
- [14] Zhao B, Guo J, Yu Y X, et al. A Study on small punch test to characterize mechanical property of aged high-density polyethylene (HDPE)[J]. Key Engineering Materials, 2017, 734: 104-115.

- [15] 何嘉平, 杨波, 向健平, 等. 聚乙烯管材 SCG 性能评价及寿命预测论述[J]. 塑料, 2020, 49(1): 152-155.
- [16] 吕志勇, 尹应乐, 陆杰, 等. 高透紫外硬质硅橡胶的制备及其性能研究[C]. 2015 年全国高分子学术论文报告会论文摘要集——主题 J 高性能高分子, 2015: 130.
- [17] 杨军忠, 刘伟, 景振华, 等. HDPE/LDPE 复合交联物的热降解研究[J]. 塑料工业, 2006, 34(7): 43-46.
- [18] 夏超. 尼龙 66 无氧热降解交联行为的研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [19] 代军, 晏华, 郭骏骏, 等. 结晶度对高密度聚乙烯热氧老化特性的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(9): 65-71.
- [20] 代军, 晏华, 郭骏骏, 等. 低密度聚乙烯热氧老化行为及老化动力学[J]. 塑料, 2017, 46(1): 121-124.
- [21] 揭敢新, 郭燕芬, 陶友季, 等. 湿热、干热自然老化中水分对聚碳酸酯老化行为的影响[J]. 塑料, 2014, 43(1): 71-74.
- [22] 甘润德. 工程塑料老化与防老化概述[J]. 兵工塑料, 1974(1): 33-44.
- [23] 曹绪龙, 祝仰文, 韩玉贵, 等. 聚合物分子结构与老化稳定性关系研究[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(2): 58-61.
- [24] G·W·埃伦斯坦. 聚合物材料: 结构·性能·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [25] 高苏闽, 刘亚涛, Benjamin H S, 等. 分子量分布及短支链结构对 HDPE 剪切诱导结晶的影响[J]. 上海塑料, 2018(1): 53-58.
- [26] 杨素, 杨苏平, 陈枫, 等. 聚乙烯短支链与其结晶度关系的定量研究[J]. 现代塑料加工应用, 2006, 18(2): 33-35.
- [27] 代军, 晏华, 郭骏骏, 等. 结晶度对聚乙烯热氧老化特性的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(1): 41-48.
- [28] 王爱东, 杨霄云, 于海鸥, 等. 耐热氧老化聚丙烯复合物: CN102408630A[P]. 2012-04-11.
- [29] 郭依帛, 强晔. 城镇聚乙烯燃气管道失效风险源分析[J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(5): 47-51.
- [30] 建设部. 城镇燃气设计规范: GB 500282006[S]. 北京: 中国建设工业出版社, 2006.
- [31] Brown N, Lu X. A fundamental theory for slow crack growth in polyethylene[J]. Polymer, 1995, 36(3): 543-548.
- [32] Frank A, Freimann W, Pinter G, et al. A fracture mechanics concept for the accelerated characterization of creep crack growth in PE-HD pipe grades[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(18): 2780-2787.
- [33] Jiang H, Zhang J W, Yang Z R, et al. Modeling of competition between shear yielding and crazing in amorphous polymers' scratch[J]. International Journal of Solids & Structures, 2017, 124: 215-228.
- [34] 戴连奇, 彭雄, 吴亦建, 等. 塑料的弹性体增韧及其影响因素[J]. 塑料工业, 2017, 45(9): 24-27.
- [35] 李孝三, 漆宗能. 聚乙烯管材的开裂动力学与机理[J]. 高分子通报, 1992(4): 218-227.
- [36] 董孝理. 聚乙烯耐蠕变开裂的断裂力学实验方法与聚合物长时标开裂试验装置[J]. 塑料工业, 1997, 25(6): 98-100.
- [37] Ivashchuk A D. Modeling of plastic zones in the process of shear deformation of a half layer containing a crack [J]. Materials Science, 2003, 39(6): 788-795.
- [38] Li Xiao, Zhao Bo, Yu Yuxin, et al. Investigation on constitutive and ductile damage mechanism of high-density polyethylene under tensile and bending conditions[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2023, 14(2): 1-10.
- [39] Zhao B, Zhang S, Sun C, et al. Aging behaviour and properties evaluation of high-density polyethylene (HDPE) in heating-oxygen environment[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, 369: 012021.
- [40] 胡平, Tomit Y. 高分子材料平面应变拉伸变形局部化[J]. 力学学报, 1996, 28(5): 564-574.
- [41] 李凯, 叶天宇, 王记增. 受约束高分子链的拉伸[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(10): 1008-1023.
- [42] Reis J, Pacheco L J, Mattos H C. Influence of the temperature and strain rate on the tensile behavior of post-consumer recycled high-density polyethylene[J]. Polymer Testing, 2013, 32(8): 1576-1581.
- [43] Balobanov V, Verho T, Heino V, et al. Micromechanical performance of high-density polyethylene: Experimental and modeling approaches for HDPE and its alumina-nanocomposites[J]. Polymer Testing, 2020, 93: 106936.
- [44] Narayan S, Anand L. Fracture of amorphous polymers: A gradient-damage theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 146: 104164.
- [45] Pawlak A, Galeski A, Rozanski A. Cavitation during deformation of semicrystalline polymers[J]. Progress in Polymer Science, 2013, 39(5): 921-958.
- [46] Jiang H, Zhang J W, Yang Z R, et al. Modeling of competition between shear yielding and crazing in amorphous polymers' scratch[J]. International Journal of Solids & Structures, 2017, 124: 215-228.
- [47] Shojaei A K, Volgers P. A coupled hyperelastic-plastic-

- continuum damage model for studying cyclic behavior of unfilled engineering polymers[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 107: 33–39.
- [48] Narayan S, Anand L. Fracture of amorphous polymers: A gradient–damage theory[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, 146: 104164.
- [49] Du X, Zhang J, Liu Y. Plastic failure analysis of defective pipes with creep damage under multi-loading systems[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 2017, 128–129: 428–444.
- [50] Choi B H, Weinhold J, Reuschle D, et al. Modeling of the fracture mechanism of HDPE subjected to environmental stress crack resistance test[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2009, 49(11): 2085–2091.
- [51] Samuels R J. Structured polymer properties—The identification and application of crystalline polymer structure [J]. *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition*, 1975, 13(1): 61–62.
- [52] Krishnaswamy R K, Lamborn M J, Sukhadia A M, et al. Rapid crack propagation failures in HDPE pipes: Structure—property investigations[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2010, 46(10): 1358–1362.
- [53] Mirsayar M M, Hartl D J. Damage detection via embedded sensory particles—Effect of particle/matrix interphase properties[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111536.
- [54] Lu D, Yu W. Correlation analysis between acoustic emission signal parameters and fracture stress of wool fiber [J]. *Textile Research Journal*, 2019, 89(21/22): 4568–4580.
- [55] Chelliah S K, Parameswaran P, Ramasamy S, et al. Optimization of acoustic emission parameters to discriminate failure modes in glass–epoxy composite laminates using pattern recognition[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(4): 1253–1267.
- [56] Zhao W J, Lee J, Kim H, et al. Semi-empirical investigation of the interfacial shear strength of short fiber polymer composites[J]. *Polymer Testing*, 2019, 74: 99–103.
- [57] Wang X, Zhang H P, Xiong Y. Classification and identification of damage mechanisms in polyethylene self-reinforced laminates by acoustic emission technique[J]. *Polymer Composites*, 2011, 32(6): 945–959.
- [58] Carvelli V, D’Ettorre A, Lomov S V. Acoustic emission and damage mode correlation in textile reinforced PPS composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 163(3): 399–409.
- [59] Yuan Y L, Shen G T, Zhang J J, et al. Experiment research on tensile process of type IV gas cylinder liner—HDPE based on acoustic emission[M]//*Advances in Acoustic Emission Technology*. Singapore: Springer, 2021: 281–295.

Research progress on damage behavior of high-density polyethylene (HDPE) pressure pipeline in service environment

LI Hongwei¹, ZHAO Bo^{2*}, ZHOU Tianyu², YUAN Yilin², YU Yuxin², ZHAO Zhijuan²

1. Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150060, China

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute(CSEI), Beijing 100029, China

Abstract HDPE pressure pipeline has been widely used for its excellent properties in gas, water supply and other fields. However, lack of knowledge and research on damage behavior of HDPE pressure pipeline has resulted in the shortage of safety requirements for equipment engineering. This paper summarizes the research progress of the two main damage modes of HDPE, i. e., aging damage mode and stress damage mode, and expounds the damage mechanisms, evolution processes and influencing factors. It also reviews the existing research problems and looks ahead the future research direction in special equipment engineering.

Keywords HDPE; aging damage; stress damage; special equipment ●



(责任编辑 王志敏)