

# 纤维增强 PE 材料增韧效果的研究

庄 茁, 郭永进, 曲绍兴, 董亚民

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

**摘 要:** 以聚乙烯(PE)材料为基体, 应用玻璃纤维随机或定向分布, 增加材料的强度、刚度和断裂韧性, 是发展高压大口径复合材料天然气管道的需要。本文基于 PFRAC 程序的动态断裂分析能力<sup>[1]</sup>, 增加了各向异性材料的本构条件, 发展了对纤维增强复合材料未开裂和开裂管道的计算功能。由力学性能的试验结果, 提供了材料的本构关系, 对未开裂和开裂的管道进行了计算分析。结果表明, PE 管道经纤维增强之后, 与纯 PE 材料的管道相比, 其环向位移下降到 53%(纤维随机分布)~5%(纤维沿管道轴向 80 度分布); 裂纹驱动力相应下降到 50%~17%, 充分反映了纤维对 PE 材料的增强和增韧效果。

**关键词:** 断裂力学; 有限元; 复合材料; 管道

中图分类号: TU318 文献标识码: A

## 1 引言

在 西 欧 和 北 美, 天 然 气 高 压 输 送 管 道 应 用 的 是 大 直 径 的 钢 制 管 道, 而 低 压 分 布 管 线 上 使 用 的 是 小 直 径 的 聚 乙 烯 (PE) 管 道。天 然 气 管 道 开 裂 事 故 偶 有 发 生, 其 严 重 后 果 是 导 致 裂 纹 迅 速 扩 展 的 灾 难<sup>[1-2]</sup>。这 种 问 题 被 认 为 是 断 裂 动 力 学 研 究 领 域 中 最 重 要 的 问 题 之 一。研 究 目 的 是 保 证 在 正 常 使 用 情 况 下 管 道 不 开 裂, 或 由 于 某 些 非 确 定 因 素 引 起 的 微 裂 纹 不 至 于 迅 速 扩 展, 使 破 坏 程 度 限 于 尽 可 能 小 的 局 部 范 围。

PE 材 料 与 钢 制 管 道 相 比, 成 本 至 少 降 低 1/3, 比 重 仅 为 钢 材 的 1/8; 对 于 防 止 天 然 气 管 道 的 应 力 腐 蚀, PE 材 料 更 明 显 地 优 于 钢 材, 使 用 寿 命 可 达 50 年, 而 钢 材 仅 为 30 年。正 是 由 于 PE 材 料 的 先 进 性 能, 天 然 气 工 业 界 希 望 改 进 PE 管 道 的 材 料 性 能, 在 成 本 低 于 钢 材 的 前 提 下, 使 工 作 压 力 从 目 前 的 低 于 1.0MPa 提 高 到 7.0MPa, 直 径 的 应 用 范 围 从 目 前 的 限 于 300mm 以 下 提 高 到 500mm, 甚 至 更 高。这 样 才 能 在 天 然 气 高 压 输 送 管 道 上 部 分 或 全 部 地 取 代 钢 制 管 道。

以 PE 材 料 为 基 体, 玻 璃 纤 维 随 机 或 定 向 分 布, 复 合 成 新 的 材 料, 增 强 了 材 料 的 强 度、刚 度 和 断 裂 韧 性, 是 发 展 高 压 大 口 径 复 合 材 料 天 然 气 管 道 的 需 要。正 是 由 于 纤 维 增 强 复 合 PE 材 料 比 强 度 和 比 刚 度 高 的 特 点, 再 考 虑 到 复 合 PE 材 料 管 道 容 易 加 工 成 型、安 装 和 维 护 等 优 点, 它 被 认 为 是 二 十 一 世 纪 的 天 然 气 输 送 管 道 材 料。通 过 材 料 本 构 性 能 的 试 验 和 有 限

收稿日期: 1999-03-30; 修订日期: 1999-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19672027)

作者简介: 庄茁(1952), 教授, 博士

要通过实际管道的开裂试验来进一步证明理论分析的正确性, 并指导工业化的生产和应用。

纤维增强复合材料(各向异性)和各向同性材料的失效模式有着很大的区别, 基体材料的断裂和分层, 纤维的脱胶、拔出和断开为其主要的失效模式<sup>[11-12]</sup>, 因此分析和实验过程也更为复杂。因为裂纹后面纤维藕断丝连的桥联作用, 会降低裂纹尖端后面的位移和裂纹驱动力的数值。因此, 应用本文方法对纤维增强复合材料的动态断裂问题的分析结果是偏于保守的。发展纤维动态桥联模型和数值分析方法是我們目前正在进行的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] P E O'Donoghue, S T Green, M F Kanninen and P K Bowles. The development of fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with applications to gas transmission and distribution piping[J]. Computers & Structures, 1991, 38(5/6): 501-513.
- [2] P Vanspeybroeck. New test methods to evaluate the resistance to rapid crack propagation in pressurized polyethylene pipes[M]. In: Proceedings of Plastics Pipes Eight, Netherlands, D1/6, 1992.
- [3] Z Zhuang. The development of finite element methods for the investigation of dynamic crack propagation in gas pipelines[M]. Ph. D thesis, University College Dublin, Ireland, 1995.
- [4] M F Kanninen, P E O'Donoghue, C P Leung, S C Grigory, H R Couque and C H Popelar. A fracture mechanics methodology for preventing rapid crack propagation in PE gas distribution pipes[M]. In: Proceedings of Twelfth Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, Boston, Massachusetts, USA, September, 1991.
- [5] P E O'Donoghue. Personal communication to Z. Zhuang, 1996.
- [6] C G Koh, D R J Owen, D Peric. Explicit dynamic analysis of elasto-plastic laminated composite shells: implementation of non-iterative stress update schemes for the HOFFMAN yield criterion[J]. Computational Mechanics, 1995, (16): 307-314.
- [7] R D Mindlin. Influence of Rotatory Inertia and Shear on Flexural Motions of Isotropic[J]. Elastic Plates. J. of Applied Mechanics, 1951, (18): 31-38.
- [8] Zhuang Zhuo, P E O'Donoghue. Driving Force and Deformation Analysis for Dynamic Crack Propagation in Gas Pipelines under Different Boundary Conditions[J]. ACTA Mechanica Solida Sinica, 1997, 10(1): 86-94.
- [9] 庄茁, P E O'Donoghue. 能量平衡结合有限元数值计算分析天然气管道裂纹稳定扩展问题[J]. 工程力学, 1997; 14(2): 59-67.
- [10] Z Zhuang (庄茁), P E O'Donoghue. Material Fracture Toughness Determination for Polyethylene Pipe Materials Using Small Scale Test Results[J]. Acta Mechanica Sinica, 1997, 13(1): 63-80.
- [11] Y C Gao, Y W Mai and B Cotterell. Fracture of fiber-reinforced materials[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 1988, (39): 550-572.
- [12] J W Hutchinson, H M Jensen. Models of fiber debonding and pullout in brittle composites with friction[J]. Mechanics of Materials, 1990, (9): 139-163.

(下转 051 页)