

# 聚乙烯压力管道抗快速裂纹扩展性能的实验研究<sup>\*</sup>

刘秀国 刘厚俊 张玉凤 荆洪阳 霍立兴

姚家庆

(天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

(天津大学社会科学外国语学院, 天津 300072)

**摘要** 小尺寸稳态实验(简称 S4 实验)是模拟聚乙烯(PE)压力管道快速裂纹扩展的一种有效方法,可获得 PE 压力管道的止裂性能指标。已成为 PE 压力管道油气分配装置的设计规范和国际标准。介绍 S4 实验原理及天津大学自行研制开发的国内第一套 S4 实验装置,并在不同压力 and 不同温度下进行了 S4 实验。最后根据 ISO - FDIS 13477 规定,经实验得出了供试管材的止裂曲线。

**关键词** 聚乙烯压力管 小尺寸稳态实验 裂纹扩展 止裂曲线

随着科学技术的发展,聚乙烯(PE)压力管道的应用日益广泛。目前,世界上 PE 管材的年消费量约为 1 000 kt 以上,成为消费量仅次于聚氯乙烯(PVC)的第二大塑料管材,被广泛应用于燃气输送、给水、排污、农业灌溉、矿山砂浆工程等领域<sup>[1]</sup>。

国内在 PE 管道止裂性能方面的研究尚未有人涉足,天津大学材料科学与工程学院在国家自然科学基金的资助下,自行研制开发了一套小尺寸稳态实验(S4 实验)装置,并在不同的压力和温度下进行了一系列实验。笔者主要介绍 S4 实验原理、装置,以及对实验结果的分析。

## 1 S4 实验原理

### 1.1 几种常见实验方法

PE 压力管道抗快速裂纹扩展性能的实验方法主要有两大类:第一类是直接利用 PE 管道来做实验,如全尺寸实验<sup>[2]</sup>、S4 实验等,该类方法将原材料的种类、挤出成型时形成的残余应力及尺寸误差、裂纹扩展时介质压力变化等因素综合考虑。另一类是利用与 PE 压力管道相同材质的板材作实验,如高速双扭转实验(HSDT)<sup>[3]</sup>、冷冻舌法<sup>[4]</sup>和单边切口双层小试样法<sup>[5]</sup>等。该类方法简单易行,便于在实验室内进行,能得出材料的动态裂纹扩展阻力或动态裂纹韧性,以及裂纹在不同载荷作用下的扩展速度,同时也能得出材料的起裂、扩展及止裂条件,但是这类方法没有考虑管道扩展过程中介质压力的动态变化、材料中残余应力及管道外覆盖物等的影响。使其得出的结果与实际存在一定的差异。

综合分析实验的成本、价值等因素,S4 实验是工程应用中比较理想的实验方法。

### 1.2 S4 实验原理

英国帝国理工学院的 Leever 和 Yayla 首先提出并发展了 S4 实验,实验使用一个长  $7D_n$  ( $D_n$  为管

道外径)的压力管道,用刃状冲击物对管道的一端进行冲击而产生裂纹,并使裂纹扩展到管道的测试部分,同时管道已经充满气体,使压力达到实验所需的数值,轴向减压通过一系列减压片来实现<sup>[6]</sup>。临界压力是衡量压力管道好坏的一个主要的止裂性能指标,所谓临界压力就是能导致裂纹扩展的最小压力,也就是发生裂纹止裂的最大压力。在一定温度下,用刃状冲击物高速冲击管道的一端,得到裂纹快速扩展的临界压力,实验时,第一次选 0.4 MPa 左右的预测值,若裂纹扩展,则下次取其 1/2;若止裂,则下次取其 2 倍,这样反复 6 次,就能得到理想的临界压力。

在实验中,温度、管壁厚度等条件的差异会对实验结果产生影响。如低温时临界压力处于平稳状态,随着温度的升高,裂纹平均扩展速度明显下降,当高于一定温度后,则不可能产生快速裂纹的扩展,随着管壁厚度的增加,塑性明显下降,而管道直径的变大则使管材韧性提高。当实验使用低压缩的介质时,得到的临界压力值较高,而使用水做介质时,临界压力  $P_c$  值将更高。

## 2 S4 实验装置简介

笔者自行开发设计了一套 S4 实验装置,主要包括起裂装置、裂纹扩展部分、冷却装置及密封装置等,其主体部分见图 1。

### 2.1 裂纹起裂装置

刃状冲击物由铬钢加工而成,经热处理达到洛氏硬度 58。刃锋长度应为  $(0.4 \pm 0.05) D_n$ ,其高度应大于测试的厚度,在实验冲击过程中,刃锋部分进入测试管外表面的深度应小于  $1e_n$  ( $e_n$  为试管壁厚

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50075061)

收稿日期:2002-08-29



图 1 S4 实验装置主体部分

度),除了刃锋部分外,冲击物的任何部分都不能直接冲击测试管的外表面。本装置用摆锤方式代替了英国帝国理工学院的竖直冲击方式,同时利用轨道方式纠偏,提高了起裂的精度。刀和纠偏轨道(即为放置刀的支撑物)示意图见图 2 和图 3。

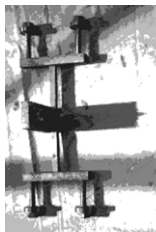


图2 刀



图3 纠偏轨道

2.2 隔离板

隔离板处于裂纹的起裂部分和测试主体的交界处,它使裂纹起裂部分和测试部分的压力有了明显的区别,也正是隔离板的作用保证了测试部分压力的稳定性,不会因起裂瞬间压力的骤减使测试部分失去要求的压力值而导致实验数据失效。

2.3 管道总长

测试管的总长必须大于 $5D_n$ ,其容量至少 70% 被液体充满,这些液体在压力的作用下可以促使测试管发生径向膨胀,从而加速裂纹的扩展,有助于模拟实际的裂纹快速扩展状态,获得理想的实验数据。同时还应使用精确的压力测试装置,确保测量管的静态压力达到  $\pm 1\%$  的精确度。

2.4 减压挡板

减压挡板的作用是防止在裂纹快速扩展的瞬间管材内液体压力骤降,保证得到合理的实验数据,减压挡板的直径应控制在 $(0.95 \pm 0.01) d_{min}$  (管道内径) 范围内,其倾斜度为  $0.4D_n$ ,见图 4。



图 4 减压挡板

2.5 密封端盖

密封端盖是 S4 实验装置的关键部件,这是因为实验要求端盖具有完好的密封作用。由于实验一般要求在低温状态完成,因此实验中首先应将测试管置于冷却箱中降温至实验要求的温度,然后进行冲击,这就要求密封端盖不但具有良好的密封性能以保持管内的液体压力,而且又便于实验时的快速装卸。因此本装置在端盖的四周采用了可压缩的密封圈进行密封,端盖的直径小于管材的内径,以满足快速装卸的要求,当把端盖装入到管材内部后,挤压密封圈,并推动其与管材的内壁紧密接触,完成实验的密封。

2.6 测试部位

测试部位应选择在压力管道比较平直的部位,对实验用管材的轴向不能进行任何形式的热处理。

2.7 冷却装置

实验用管的冷却采用低温箱(北京低温设备厂制造),实验前把测试管置于低温箱中冷却到实验需要的温度,冷却条件应根据管壁厚不同按 ISO 1167 确定。应采取措施确保实验前管材的温度不会有太大的提高,在测试管从低温箱中取出的短时间内完成裂纹的起裂。

3 实验结果

用自制的 S4 实验装置对中密度 PE 管道(PE 80, 直径为 200 mm, 河北亚大塑料制品有限公司)进行实验,不同温度和不同压力下的实验结果见表 1。

表 1 不同温度和压力下的 S4 实验结果

| 温度 / $^{\circ}\text{C}$ | 压力 / $\text{MPa}$ | 裂纹扩展长度 / $\text{mm}$ | 是否止裂 |
|-------------------------|-------------------|----------------------|------|
| - 40                    | 0                 | 440                  | 是    |
|                         | 0.5               | 1 480(全裂)            | 是    |
|                         | 0.8               | 1 480(全裂)            | 否    |
|                         | 1.0               | 1 480(全裂)            | 否    |
| - 35                    | 0.8               | 320                  | 是    |
|                         | 1.2               | 455                  | 是    |
|                         | 1.75              | 950                  | 否    |
| - 20                    | 1.6               | 760                  | 是    |
|                         | 1.6               | 880                  | 是    |
|                         | 1.8               | 900                  | 是    |
|                         | 1.75              | 1 480(全裂)            | 否    |
|                         | 1.9               | 1 480(全裂)            | 否    |
| - 10                    | 1.2               | 760                  | 是    |
|                         | 1.6               | 1 050                | 否    |
|                         | 1.8               | 1 005                | 否    |
| 0                       | 1.0               | 290                  | 是    |
|                         | 1.0               | 220                  | 是    |
|                         | 1.6               | 310                  | 是    |
|                         | 1.6               | 300                  | 是    |
|                         | 1.8               | 370                  | 是    |
|                         | 1.9               | 350                  | 是    |

根据 ISO – FDIS 13477 的规定,裂纹扩展长度小于 4.7D<sub>n</sub>为止裂,得出在不同温度下的临界压力值范围,见表 2。

表 2 不同温度下得到的临界压力值范围

| 温度 / °C | 临界压力值范围 / MPa |
|---------|---------------|
| -40     | 0.5 ~0.8      |
| -35     | 1.2 ~1.75     |
| -20     | 1.6 ~1.8      |
| 0       | > 1.9         |

在研究了不同温度的临界压力之后,对不同压力下的临界温度进行了探索,目前实验正在进行中,已完成了 0.8 MPa 下的实验,见表 3。

表 3 0.8 MPa 下临界温度的范围

| 温度 / °C | 是否止裂 | 临界温度范围 / °C |
|---------|------|-------------|
| -40     | 否    | -40 ~ -35   |
| -35     | 是    |             |
| -30     | 是    |             |

通过对实验数据的综合分析,利用统计学原理得到了 S4 实验的止裂曲线,见图 5。图 5 中止裂曲线的下方代表止裂区,管道在符合止裂区条件下应用,裂纹会止裂,实践应用时是安全的;止裂曲线的上方是裂纹扩展区,同样,管道在符合扩展区条件下应用,裂纹会快速扩展,应用时则存在危险。

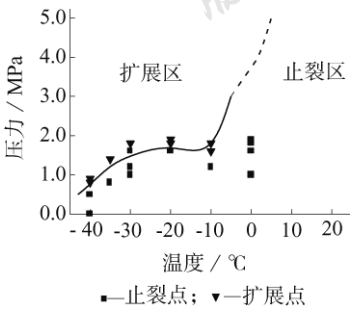


图 5 止裂曲线

对 PE 管道进行冲击,得到了几种典型的裂纹。

图 6 示出止裂的裂纹(0℃、1.0 MPa);图 7 则显示出扩展的裂纹(-20℃、1.9 MPa)。



图6 止裂的裂纹 图7 扩展的裂纹

4 结语

小尺寸稳态实验是测试 PE 压力管道止裂性能的理想实验,与全尺寸实验相比,它具有成本低、周期短、易于操作等优点,同时又比小试样实验具有更能模仿实际状态的特点,从而能获得更理想的实验数据。笔者所做的研究工作详实、准确,可以应用于生产实践中,促进 PE 管道在我国的广泛应用和发展。

参考文献

- 1 孙逊. 聚乙烯管道的发展对我国合成树脂工业的影响. 中国塑料, 1999, 13(12): 2
- 2 Venizelos G P, Greenshields C J, Ivankovic A, et al. Fast brittle fracture of plastic pipes part 2 – gas pressurised. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 1997, 26(9): 394
- 3 Ritchie S J K, Leever P S. *The High Speed Double Torsion Test Impact and Dynamic Fracture of Polymers and Composites*, ESIS 19 (Edited by J G Williams and A Pavan). London: Mechanical Engineering Publications, 1995. 137
- 4 Dear J P, Williams J G. Simple method of determining the fracture resistance for rapidly propagating cracks in polymers. *J Materials Sci*, 1993, 28(1): 259
- 5 Ivankovic A, Williams J G. Local modulus analysis of rapid crack propagation in polymers. *Int J Fracture*, 1993, 64(4): 251
- 6 Yayla P, Leever P S. Rapid crack propagation in pressurised plastic pipe. II. Critical pressures for polyethylene pipe. *Technology and Medicine Source: Engineering Fracture Mechanics*, 1992, 42(4): 675

TEST RESEARCH OF RAPID CRACK PROPAGATION RESISTANCE OF PE PRESSURE PIPE

Liu Xiuguo, Liu Houjun, Zhang Yufeng, Jing Hongyang, Huo Lixing  
( College of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)  
Yao Jiaqing  
( College of Social Science and Foreign Languages, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT** The small scale steady state test ( S4 ) being now an international standard for the specification of polyethylene fuel-gas distribution pipe was an effective method used to simulate rapid crack propagation on a polyethylene pipe in order to attain value of crack arrest. The issue introduced the rig of the small scale steady state ( S4 ) pipe test and the experimental theory, the rig was firstly designed by Tianjin University in China, and S4 test was held in different temperature and different pressure, then the curve of crack arrest was described according to ISO – FDIS 13477.

**KEYWORDS** polyethylene pressure pipe, the small scale steady state test, crack propagation, curve of crack arrest