

基于应变硬化和循环载荷的 PE 管材慢速裂纹增长试验新方法评述

陈国华, 黄晓之*

(华南理工大学 安全科学与工程研究所, 广州 510640)

摘要:慢速裂纹增长是聚乙烯(PE)管材发生脆性破坏的主要原因。目前,传统的慢速裂纹增长试验普遍存在试验时间过长,可再现性较差等问题,限制了对 PE 管材耐慢速裂纹增长性能的准确评价,降低了 PE 管材的开发速度。对此,国外学者提出了两种快速评价的试验新方法—应变硬化法(SH)和循环载荷缺口圆柱棒法(CRB)。本文分别介绍了这两种方法的试验流程,从基本原理和试验研究两方面综述了它们的研究进展,提出了研究 PE 管材在常温下发生应变硬化响应的试验条件,将线弹性断裂理论与循环载荷缺口圆柱棒法试验法进行结合,改进基于循环载荷缺口圆柱棒试验的管道预测寿命方法,指明了如何将这两种方法应用于其它塑料管材是后续研究的发展方向。

关键词:聚乙烯管材; 慢速裂纹增长; 应变硬化试验法(SH); 循环载荷缺口圆柱棒试验法(CRB)

引言

聚乙烯(Polyethylene, PE)管材具有成本低廉、耐腐蚀性良好、寿命较长等优点,而且在多年的生产实践中已制定出完善的配套系统^[1],在给排水和燃气输送等领域中已逐渐取代传统的金属管和水泥管,得到了普遍的应用。PE 管材虽然有诸多优良性能,但是 PE 管材在实际使用过程中也很难避免发生失效破坏。根据美国塑料管数据库委员会的事故报告统计,因 PE 管断裂导致的泄漏占事故总数的 31.7%^[2],而慢速裂纹增长(Slow Crack Growth, SCG)被公认为是 PE 管材在长期承受内压情况下发生脆性断裂破坏进而导致泄漏的主要原因,因此必须严格评价 PE 管材的耐 SCG 性能^[3]。

当前评价 PE 管材耐 SCG 性能的传统试验方法多是通过将试样预制缺口,然后在将试样浸泡在高温的表面活性环境中,使试样发生慢速裂纹增长,最终采用试样的破坏时间来表征其耐 SCG 性能的好坏,这类试验方法被称为耐环境应力开裂(ESCR)法,主要包括:切口管试验(NPT)、单边缺口拉伸试验(PENT)、全缺口拉伸实验蠕变(FNCT)试验、锥体(Cone)试验等^[4]。然而 ESCR 法不仅试验时间冗长,而且需要大量的试验材料,试验再现性也比较差,这些缺陷都一定程度上阻碍了 PE 管材的更新换代^[5]。随着对评价 PE 管耐 SCG 性能方法的要求不断提高,国外的研究者们针对 ESCR 法中存在的种种缺点设计开发出一些新的 SCG 试验方法,其中应变硬化试验法^[6](Strain Hardening Test Method,以下简称 SH 法)和循环载荷缺口圆柱棒试验法^[7](Cyclic Cracked Round Bar Test Method,以下简称 CRB 法)因试验时间的大幅减少和试验数据的稳定可靠引起了国内外学者的广泛关注和重视。

本文分别介绍了这两种方法的试验流程,并对它们的基本原理和研究进展进行了归纳总结,指出当前研究中存在的局限和不足,最后对这两种方法的研究方向进行了展望,以期后续研究提供参考。

1 应变硬化试验法

1.1 SH 法试验流程

该方法首先将 PE 颗粒压模成厚度为 0.3 或 1mm 的哑铃片状试样,如图 1 所示^[8],然后在 80℃ 下以

10.14028/j.cnki.1003-3726.2018.02.003

收稿:2017-04-10;修回:2017-11-06;

基金项目:国家质检总局科技计划项目(2016QK142);

作者简介:陈国华(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事过程装备安全可靠性与结构完整性研究;

* 通讯联系人, E-mail: jackhuang1993@foxmail.com.

20mm/min 的速度对试样进行拉伸,当试样被拉伸到自然拉伸比(Natural Draw Ratio,NDR)时,其应力-应变曲线上会出现应力陡然增加的应变硬化区间,这部分曲线的斜率被定义为应变硬化模量 G_p ,如图 2 所示^[6]。该值可由公式 $G_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i}$ 计算得到。

其中 σ 为试样在拉伸过程中承受的真应力, λ 为试样的拉伸比,即试验中某时刻记录的试样标矩间拉伸长度与试样初始标距的比值, N 为应变硬化区间中(通常为拉伸比 8~12)的测量点个数。

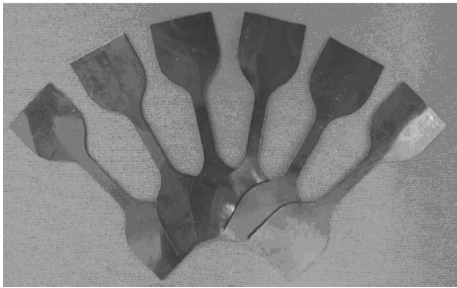


图 1 SH 法的试样^[8]

Figure 1 Specimens of SH test method^[8]

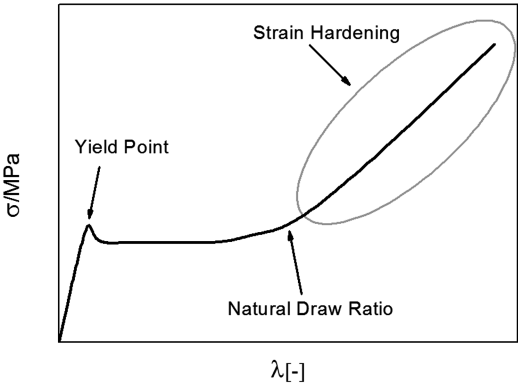


图 2 SH 法的应力-应变曲线^[6]

Figure 2 Stress-strain curve of SH test method^[6]

1.2 SH 法研究进展

1.2.1 SH 法的基本原理 1983 年,Lustiger 等^[9]基于分子链折叠理论提出 PE 的 SCG 微观模型,阐述系带分子链的解缠是 PE 发生 SCG 的主要原因,一些学者^[10~13]对 SCG 细观过程中出现的银纹现象进行了详细的分析,将银纹化定义为脆性断裂破坏的先兆,得到了大多数学者的认同,并在后续研究中被广泛采用。上个世纪 90 年代,许多学者开展了相关的研究工作,Cawood 等^[14]、Rose 等^[15]、O’Connell 等^[16]将 PE 试样拉伸到其自然拉伸比来模拟银纹中微纤维结构以研究 SCG,他们发现试样蠕变率的降低和失效时间的显著增加之间有直接联系。而 Lagarón 等^[17,18]通过对罗曼光谱试验的结果进行研究后发现,相对于耐 SCG 能力较强的试样,耐 SCG 能力较差试样的系带分子链在被拉伸时会承受更大的载荷,以此强调了系带分子链对 SCG 的控制作用。Huang 等^[19,20]研究发现在 PE 的 SCG 过程中,随着无定形区被拉长和空洞的出现,空洞之间的连接区域,即由系带分子链组成的微纤维也慢慢被拉长,由于这些微纤维具有很大的蠕变柔量,它们的强度比随机分布的晶粒的屈服强度还要大以至于产生应变硬化响应,当系带分子链被拉断时,裂纹就会向前扩展。因此微纤维的应变硬化与 SCG 之间的关联性很强。

SABIC(沙伯基础工业公司)的研究人员在上述学者的研究基础上,发现 PE 试样在高温下进行拉伸时其会呈现出显著的应变硬化特征,于是他们定义应变硬化模量这个概念,提出了将 PE 固有的应变硬

化特征用于评价耐 SCG 性能的应变硬化试验法,并分别从分子微观和热动力学的角度对 SH 法的基本原理进行了解释。Kurelec 等^[21]、McCarthy 等^[22]根据前人研究的成果总结出控制银纹扩展和裂纹增长的本征材料参量是“微纤维组成的有效缠结分子链网络的密度”,而这个参量可以通过测量应变硬化模量来直接表征,同时他们认为控制慢速裂纹增长的决定性因素是银纹中微纤维的蠕变,而高温条件有利于分子链发生滑移和解缠,从而促使微纤维产生固有的应变硬化响应以抵抗其蠕变。Deblieck 等^[23]用热动力学中的 HT(Haward and Thackray)理论对应变硬化过程中的焓贡献与熵贡献进行区分,他们认为应变硬化过程是一个单纯缠结分子链网络的熵响应,反映的是熵贡献,而焓贡献会导致对应变硬化值的高估,所以在对应变硬化值进行测量时应尽量反映熵贡献、避免焓贡献,而在 PE 的 α 转变温度(80℃)已经尽可能地排除这种焓贡献的影响,所以一般选择在 80℃ 下对 PE 的应变硬化模量进行测量。

总而言之,SH 法的基本原理可概述为:PE 在高温环境下被拉伸时容易产生系带分子链的滑移和解缠,导致银纹中的微纤维产生应变硬化响应,这个 PE 的固有特征可以通过在高温下测量其应变硬化模量来进行表征,从而用于评价耐 SCG 性能。

1.2.2 SH 法的合理性研究 为了验证 SH 法评价 PE 管材耐 SCG 的性能的合理性,SABIC 的研究人员采用 ESCR 法的试验结果作为 SH 法的标准参量进行相关研究^[21,22,24,25]。Kurelec 等^[21]、McCarthy 等^[22]分别用 ESCR 法和 SH 法对不同等级的高密度聚乙烯(HDPE)进行试验,发现应变硬化模量与 ESCR 试验中的失效破坏时间呈明显正相关(如图 3 所示)。他们对试验数据进一步分析和比较后发现,SH 法可以区分不同种类 HDPE 耐 SCG 性能的差异。Van Beek 等^[24]、Havermans 等^[25]通过对比 SH 法和其它 SCG 试验方法的过程与结果,由试验结果间良好的相关性证实了 SH 法与其它通过加工缺口发生 SCG 的方法在失效机理上是完全相同的,并指出 SH 法不需要对试样预测缺口就可以将试验时间由 ESCR 法所需的几千小时大幅减小至几个小时,而且其试验步骤也比较简单,试验结果更加稳定,不仅可用于研究开发新的 PE 管材,也适用于大批量 PE 管产品生产中的性能检测环节。

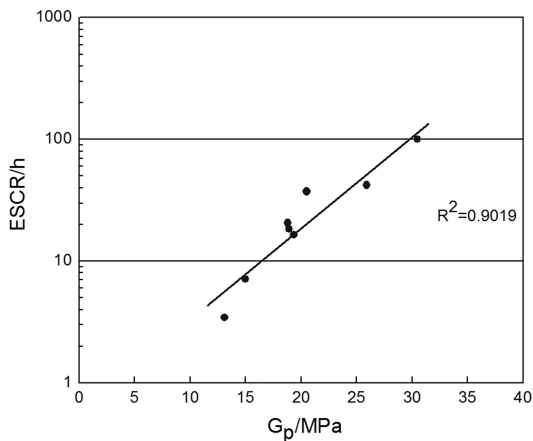


图 3 失效时间与应变硬化模量的关系^[22]

Figure 3 The failure time of ESCR versus strain hardening modulus^[22]

然而,SABIC 的试验中选择的管材种类基本都是 HDPE。对 SH 法应用于 PE 管材的普适性缺乏深入的研究, Van der stok 等^[8]对这方面进行了试验研究,他们选取了包括上世纪 80 年代生产的中密度聚乙烯(MDPE)在内的第一、第二、第三代 PE 管材和近几年新开发的 PE100-RC 管材,在 8 个不同地区的实验室进行 SH 法和 ESCR 法的联合对比试验(Round Robin Test),对所有试验数据综合分析后发现 SH 法不仅能够准确评价 PE 管材的耐 SCG 性能,而且试验结果的标准偏差及变异系数普遍都小于 5%,可再现性比较强。Adib 等^[26]选择了十种不同的乙烯和丁烯共聚而成的 PE80 和 PE100,并分别对其进行 PENT、圆周切口拉伸法(CDNT)和 SH 法的试验。结果表明,对于 PENT 和 CDNT 中试样的失效破

坏时间,应变硬化模量对其都有相当良好的正相关性。

分析材料特征参数对 PE 耐 SCG 性能的影响一直以来都是 SCG 研究的热点,经过多年广泛而深入的试验研究和分析已经得到了不少成果,其合理性业已获得认可。近年来,有学者尝试将 SH 法与这种研究手段结合来进行对比试验研究。Zhang 等^[27]在不同预应变等级的条件用 SH 法对 PE80 和 PE100 进行试验,发现在同样的试验条件下 PE100 的应变硬化模量要大于 PE80,他们认为这与 PE100 的结晶度更高有较大关联。Fawaz 等^[28]通过对 6 种不同种类 PE 管材的 SH、CRB、NPT 法试验数据进行分析比较,发现这三种方法的试验结果有较好的一致性。同时他们将材料特征参数的测量排名结果与 SH 法进行比较,结果表明 SH 法对一些影响 PE 管材耐 SCG 性能的参数细微差异非常敏感,如分子量及其分布、结晶度、短支链的类型和数量等。

1.2.3 SH 法的改进研究 通过研究者们的对比研究及分析论证,SH 法评价 PE 耐 SCG 性能的合理性和准确性已经得到了广泛的认同。然而 SH 法的试样因厚度太薄等原因不易制出,而且在拉伸试验过程中需要使用光学引伸计等昂贵设备以避免滑移,这些不易满足的试验条件可能会成为 SH 法发展和普及于工程领域的一大阻碍,有学者针对这类问题对 SH 法进行了一定程度的改进研究。Maxwell 等^[29]发现对于线性低密度聚乙烯(LLDPE)这种管材,通过将增加试样厚度至 3mm 以及将拉伸速率减小至 3mm/min 可以提高其在 SH 法中的敏感度和可重复性,使其可以在常温下进行 SH 试验并获得比较理想的试验数据。Cheng 等^[30,31]在常温下分别以 0.5mm/min 和 7mm/min 的拉伸速度对 1.9mm 的 PE 试样进行拉伸试验,将应力-位移曲线上的相关区域斜率定义为硬化刚度以替代 SH 法中的应变硬化模量,并在与 ESCR 试验中的数据进行线性拟合后发现它们之间也有比较好的相关性。同时,他们利用方差分析法(ANOVA)对该试验和 ESCR 试验的数据进行分析,结果表明该试验的过程对试验数据的可变性没有显著的影响,且测量结果要比 ESCR 试验更精确,可再现性更好。然而对 SH 法在常温条件下使用的研究目前还比较少见,因此这些试验结果的可靠性仍需更多相关研究来验证。

SABIC 利用应变硬化模量和 PE 管材耐 SCG 性能之间的正相关性,开发出了 SH 法这种步骤简单、试验耗时少、结果稳定可靠的 SCG 试验方法。通过将 SH 法和其它 SCG 试验方法进行对比研究,验证了此法对 PE 管材耐 SCG 性能进行评价和排名的合理性与准确性。2015 年,SH 法正式成为国际标准 ISO18488^[6]。然而,目前对 SH 法应用于常温环境的研究还比较欠缺,而大部分的 PE 管材在工程应用中都处于常温环境,因此笔者认为该问题是今后研究中需要关注的焦点。

2 循环载荷缺口圆柱棒试验法

2.1 CRB 法试验流程

该方法首先对圆柱棒样品预制环形缺口,制作出缺口圆柱棒(Cracked Round Bar,CRB)试样,接着在常温(23℃)下对试样施加频率为 10Hz、加载比率为 0.1 的循环拉伸载荷 F 从而使其发生 SCG 直至失效破坏,记录失效破坏时的周期数 N_f 和应力范围值 $\Delta\sigma_0$,并拟合出它们之间的线性关系。如果试样的几何尺寸和试验参数不同于规定标准,比较失效周期和应力范围的作用关系是无效的,此时可以用 Benthem-Koiter 公式推导出的应力强度因子 ΔK_I 来替代应力范围值 $\Delta\sigma_0$ 以描述裂纹尖端的应力分布。缺口圆柱棒试样及循环疲劳载荷的示意图如图 4 所示^[32],缺口圆柱棒的几何形状使得裂纹尖端存在较强的约束和较小的塑性变形,保证了裂纹的快速萌生及扩展,从而大幅缩短试验时间。通常耐 SCG 性能越好的 CRB 试样在相同试验条件下的失效破坏时间越长。

需要特别指出的是,为了更准确地测量初始裂纹长度,该试验只分析发生显著脆性断裂的样品表面,因此需要避免试验应力过大使试样发生韧性断裂,样品断面图如图 5 所示^[32]:相对光滑的断面是典型的由 SCG 引发的脆性断裂,而韧性断裂导致较为粗糙的表面只出现于很小的韧带部分,而且由于测试应力过大不能作为试验数据进行评价。

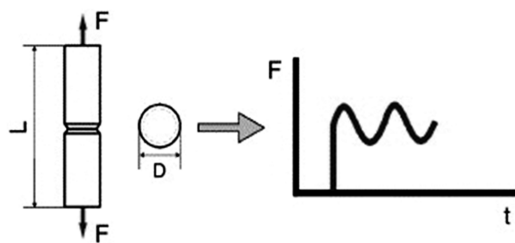


图 4 缺口圆柱棒试样和疲劳载荷条件^[32]

Figure 4 CRB specimen and fatigue loading condition^[32]

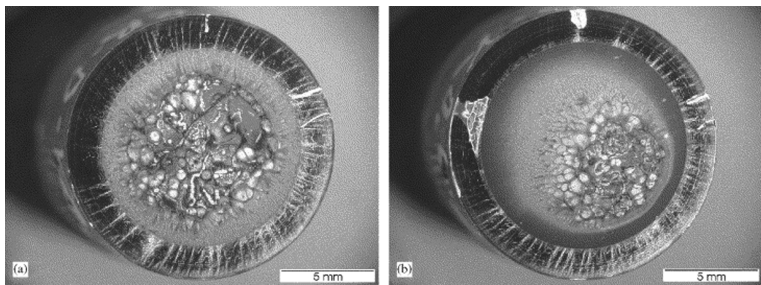


图 5 CRB 试样在 23℃下受疲劳载荷作用后的断裂表面

(a)韧性破坏 (b)脆性破坏^[32]

Figure 5 Fracture surfaces of CRB specimens of PE after fatigue loading at 23℃

(a)ductile failure (b)brittle failure^[32]

2.2 CRB 法研究进展

2.2.1 CRB 法的基本原理 上个世纪 90 年代,日本学者基于 SCG 的微细观模型首先提出 PE 缺口圆柱棒受循环载荷作用产生疲劳裂纹增长的试验^[33,34],他们设计的以线弹性断裂力学(LEFM)为核心的试验基本思路被沿用至今。而 Shah 等^[35]、Parsons 等^[36,37]论述 PE 发生疲劳破坏的主要机理是蠕变裂纹增长(Creep Crack Growth,CCG),并明确 LEFM 适用于聚合物材料的两个基本条件,一是试样的受荷必须在线性粘弹性范围内,二是裂纹尖端的塑性变形必须限制在一个小区域内。Hamouda 等^[38]、Plummer 等^[39]、Favier 等^[40]研究发现在 LEFM 的范畴内,缺口圆柱棒试样受静载荷和受循环载荷产生 SCG 的失效机理的性质是完全相同的。

奥地利 Leoben 大学的研究人员在借鉴前人研究成果的基础上,将 LEFM 中的应力强度因子断裂准则引入疲劳裂纹试验中以表征裂纹失稳增长的程度,并将试样的脆性破坏过程分为裂纹萌生与裂纹增长两个阶段,开发出循环载荷缺口圆柱棒试验方法。

简而言之,CRB 法的基本原理是利用缺口圆柱棒在受循环载荷作用时发生疲劳裂纹扩展的行为来模拟 PE 管材中发生的裂纹萌生和裂纹增长,并基于 CCG 理论和 LEFM 中的应力强度因子准则对其进行分析研究,最后用试样的失效时间(失效周期数)来表征 PE 管材的耐 SCG 性能。

2.2.2 CRB 法的合理性研究 在开发出 CRB 法后,Leoben 的研究者们着力于将其与其它 SCG 试验方法的结果进行对比分析以验证其合理性^[32,41~44]。Pinter 等^[32]分别用 CRB 法和 FNCT 对五种不同牌号的 PE80 和 PE100 管材进行试验,结果表明它们对所有试样的排名结果都是相同的,而且相对于 FNCT 法在高温环境下仍然冗长的试验时间,CRB 法在常温只需要几天即可得到试验结果。此外,研究者们发现应力范围值 δ_0 和应力强度因子 ΔK_I 越小,失效时间越长,于是他们推测 PE 管材在更低的负载条件下的耐 SCG 性能越好。Frank 等^[41]将 PENT、FNCT 法与 CRB 法的试验结果进行对比,由结果间较好的线性相关关系证明了不论对相同还是不同等级的 PE 管材,CRB 法都能对它们之间耐 SCG 性能的强弱差别进行准确的评价,如图 6 所示。而且对于 ESCR 法中失效时间长达 10000h 以上的 PE100-RC 管材,

CRB 法只需要大约 58h 的试验时间就能使其失效。同时,他们分别在欧洲和国际范围内进行了两次联合对比试验(Round Robin Test),结果发现不同地区实验室得到的 CRB 法试验数据之间的一致性非常好,验证了此法良好的可再现性。此外,他们将 CRB 法中断裂表面的标准 SEM 图像与其三维表面形貌进行对比,由此提供了更多有利于扩大断裂表面特征范围的有效信息^[42]。Redhead 等^[43]研究发现对于不同种类的 PE 管材,CRB 法与材料特征参数试验的排名结果间有较好的一致性,而且 CRB 法可以准确地区分出微小的分子和形态特征差别。Kratochvila 等^[44]选取九种不同的 PE100 和 PE100-RC 管材,并分别用 CRB 法和切口管试验、二缺口蠕变试验、夏比冲击试验对它们的耐 SCG 性能进行排名,发现 CRB 法与这些标准测试方法的排名结果是相一致的,由此证明了 CRB 法的合理性及正确性。

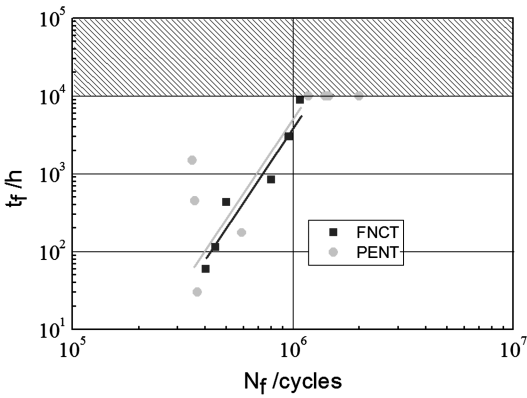


图 6 FNCT 和 PENT 法与 CRB 法的试验结果对比^[41]
Figure 6 Comparison between cyclic CRB test with FNCT and PENT results^[41]

2.2.3 CRB 法的拓展研究 裂纹萌生在 PE 管材的断裂失效过程中是十分重要的一部分,而传统的 ESCR 法都无法区分裂纹萌生和裂纹增长。针对这一问题, Frank 等^[45]选取 10 种 PE100 和 PE100-RC 的试样进行 CRB 法的试验,并绘制出裂纹张开位移与失效周期 N_f 的关系图。他们发现,在某个时间点裂纹张开位移的值由近似恒定变为逐步增加,据此将试样的失效过程分为裂纹萌生和慢速裂纹增长。此外,他们通过对比试验结果,发现在试样规定负载范围内,PE100-RC 的裂纹萌生过程比 PE100 要花费更长的时间,因此推测 PE 管材耐 SCG 的能力越强,其耐裂纹萌生的能力就越强。Redhead 等^[46]通过在三种不同加载比率 R 下对 CRB 试样进行试验,用 SEM 观察裂纹尖端过程区(Process Zone)的形状并测量长度,然后将其外推到 R 为 1(即静态载荷)的情况并与 Dugdale 模型的计算结果进行比较,结果发现过程区长度和 Dugdale 模型计算出的理论值比较接近,并在很大程度上取决于试验的加载比率变化。同时,他们还推理计算出在静态载荷下 CRB 试样发生裂纹萌生的时间,由结果的合理性证明了 CRB 法测定裂纹萌生的准确性。

CRB 法不仅可以准确评价 PE 管材的耐 SCG 性能,它还可以基于 CCG 理论对 PE 管材的寿命进行预测。Frank 等^[47]使 CRB 试样分别在不同温度下进行循环载荷拉伸试验,测量不同加载比率所对应的裂纹生长速率,并据此外推至静态载荷($R=1$)的情况,从中得到“合成”的 CCG 曲线并以此计算出与寿命预测相关的参数,接着将其代入 Paris-Erdogan 方程组中计算出试样在静态载荷条件下的寿命,最后在环向应力-失效寿命的关系图上分别绘制出 CRB 法与长期静液压试验的寿命预测曲线并进行比较,结果表明这两种曲线的吻合程度较好。Pinter 等^[48]通过使三种不同形状试样在 80℃ 且不同加载比率的条件下进行循环载荷拉伸试验来预测寿命,发现只有 CRB 试样的预测寿命和长期静液压试验测试出的寿命之间有较好的一致性,研究者们认为这是因为 CRB 试样的几何形状使其沿裂纹尖端的约束条件最大化,从而产生特殊平面应变条件以避免可能导致的 SCG 产生延迟的裂纹尖端塑性区域的大形变。经过大量的推理计算及试验结果分析对比^[47~51],利用 CRB 法的试验数据外推预测 PE 管材寿命的方法已被证实

其可靠性。由于该方法具有制样简单、试验时间短等特点,是一种很有潜力的寿命预测方法。

此外,近几年有学者基于 CRB 法的基本原理进行了相关试验及理论的创新研究。Pokharel 等^[52]让 CRB 试样受不同强度的电子束辐射,然后对其进行循环载荷拉伸,并观察相对应的断裂表面形貌,以此来研究疲劳失效和其结构性能间的关系。试验结果显示,随着辐射量的增加,CRB 试样的失效应变值减小,屈服应力上升,且疲劳失效曲线的斜率在试样受到高浓度辐射时会急剧增大,证明了电子束辐射对失效时间有十分显著的影响。Wee 等^[53]基于轴对称裂纹层系统(Crack Layer System)概念对缺口圆柱棒的 SCG 行为进行数学建模以推导出一个用于计算裂纹增长过程中参量的算法,他们将计算出的失效时间及裂纹长度与 CRB 法的试验数据进行对比,由结果间的相近证明此算法可以准确模拟出实际 SCG 试验的结果。

CRB 法是一种在常温下将循环载荷加载至缺口圆柱棒上以使其快速发生 SCG 的试验方法,其对 PE 耐 SCG 性能进行评价及排名的合理性及准确性已经通过大量的对比性试验得到验证。2015 年,CRB 法被 ISO 采纳,成为评价 PE 管材耐 SCG 性能的另一种新标准 ISO18489^[7]。同时,CRB 法应用于分析裂纹萌生和寿命预测的试验研究也取得了一定成果,然而目前将这些成果应用于工程实际的研究很少,因此作者认为在后续研究中可以从这方面着手,拓宽 CRB 法在工程领域的应用范围。

3 总结与展望

文中综述了两种评价 PE 管材耐 SCG 性能的试验新方法-应变硬化试验法和循环载荷缺口圆柱棒试验法的试验流程以及它们各自的研究进展。在目前业内都着力于缩短试验时间以加快高性能 PE 管材产品开发速度的趋势下,ESCR 法因其冗长的试验时间和较差的可再现性等缺陷已经很难满足 PE 管材的质量控制及性能检测需求,而这两种方法不但不需要将试样浸泡在表面活性剂中,而且试验所需时间较短、耗材较少、可再现性好,试验结果精确度和可靠度较高。可以预见,这两种已成为国际标准的试验方法有很大潜力替代现有的 ESCR 法,广泛应用于原料开发中的耐 SCG 性能评价和管材出厂的质量检测等领域。

然而,前人完成的研究主要集中在验证这两种方法的合理性和可靠性的对比试验上,将已有成果拓展应用于工程领域和断裂理论的研究并不多见。此外,将这两种方法应用于其它塑料管材的研究才刚刚开始,在这方面有待进一步的探究。因此,从以下几点对这两种方法的后续研究提出建议:

(1)对 SH 法而言,将温度由高温变为常温使试验环境更加贴近管道的实际工况,令试验结果更有工程应用价值。然而,在常温下 PE 管材的应变硬化响应有一定的不稳定性,因此可以通过改变试样的应变速率和厚度等试验参数来探究 PE 管材在常温下产生应变硬化响应的条件,并从时温等效原理和塑性不稳定性形成的角度对其进行分析,从中总结出规律性的结论;

(2)现有对线弹性断裂理论的研究大多缺乏与具体断裂现象结合,没有给工程实际提供足够的参考信息。而 CRB 法可以对裂纹萌生时间和裂纹张开位移等断裂过程中的关键参量进行精确测定,因此可以将线弹性断裂理论与 CRB 法测出的的试验数据进行结合,以定量分析粘弹性高聚物从微细观损伤发展为裂纹并扩展至失效破坏的过程;

(3)目前预测 PE 管材寿命的主要手段是长期静液压试验,然而这种方法不仅需要花费大量的材料和时间,而且试验数据的波动性较大。相较于长期静液压试验,用循环载荷 CRB 试验结果外推预测管材寿命的方法耗时较少,试验数据的稳定性也更好。但是该法在计算中忽略了裂纹萌生的过程导致预测结果较为保守,因此改进该法使其结果更加准确,以在未来的管材寿命预测中逐步替代现有的长期静液压强度法是一个值得期待的研究方向;

(4)在 SH 法和 CRB 法的研究成果被学界广泛认可,并成为评价 PE 管材耐 SCG 性能的标准方法之后,将它们应用于其它有同样检测需求的塑料管材(如聚丙烯、聚氯乙烯等)便成为了一个理所当然的研

究方向,而这两种方法的试验参数都是基于 PE 的固有材料特性进行设计,无法简单地直接应用于其它塑料管材,因此在这方面需要进行更多针对性的研究以获得与被测管材特性相适应的试验参数。

参考文献:

- [1] 王 晓,尹宗杰,张胜军,辛明亮,李茂东. 塑料工业,2015,43(12):93~94.
- [2] American Gas Association Plastic Pipe Database Committee. Plastic piping data collection initiative status report,2016.
- [3] 杨娜娜. 聚乙烯管道慢速裂纹扩展的粘弹性行为研究. 天津:天津大学硕士学位论文,2008.
- [4] 林海涛,黄继伟,凌新龙. 高分子材料科学与工程,2014,30(5):185~190.
- [5] 熊志敏,武志军,华晔,魏若奇,者东梅. 合成树脂及塑料,2016,33(4):60~63.
- [6] Polyethylene (PE) materials for piping systems-Determination of strain hardening modulus in relation to slow crack growth-test method,ISO 18488. 2015.
- [7] Polyethylene (PE) materials for piping systems-Determination of resistance to slow crack growth under cyclic loading-Cracked Round Bar test method,ISO 18489. 2015.
- [8] Van der stok E,Scholten F. Plastic Pipes XVI,Barcelona,Spain,2012.
- [9] Lustiger A,Markham R L. Polymer,1983,24(12):1647~1654.
- [10] Kramer E J. Adv Polym Sci,1983,52(1):1~56.
- [11] Brown H R,Argon A S,Cohen R E,Gebizlioglu O S,Kramer E J. Macromolecules,1989,22(2):1002~1004.
- [12] Brown H R. Macromolecules,1991,24(10):2752~2756.
- [13] Hui C Y, Ruina A, Creton C,Kramer E J. Macromolecules,1992,25(15):3948~3955.
- [14] Cawood M J,Channell A D,Capaccio G. Polymer,1993,34(2):423~425.
- [15] Rose L J,Channell A D,Frye C J,Capaccio G. J Appl Pol Sci,1994,54(13):2119~2124.
- [16] O'connell P A,Bonner M J,Duckett R A,Ward I M. Polymer,1995,36(12):2355~2362.
- [17] Lagarón J M,Pastor J M,Kip B J. Polymer,1999,40(7):1629~1636.
- [18] Lagarón J M,Capaccio G,Rose L J,Kip B J. J Appl Pol Sci,2000,77(2):283~296.
- [19] Huang Y L,Brown N. J Polym Sci Part B,1990,28(11):2007~2021.
- [20] Huang Y L,Brown N. J Polym Sci Part B;Polym Phys,1991,29(1):129~137.
- [21] Kurelec L,Teeuwen M,Schoffeleers H,Deblieck R. Polymer,2005,46(17):6369~6379.
- [22] McCarthy M, Deblieck R, Mindermann P, Kloth R, Kurelec L, Martens H. Proceedings of Plastic Pipes XIV, Budapest, Hungary,2008.
- [23] Deblieck R, Van beek D J M,Remerie K,Ward I M. Polymer,2011,52(14):2979~2990.
- [24] Van beek D J M-Havermans L,Deblieck R. Proceedings of EUROTEC, Barcelona, Spain,2011.
- [25] Havermans L,Kloth R,Deblieck R. Proceedings of Plastic Pipes XVI, Barcelona, Spain,2012.
- [26] Adib A,Dominguez C,Rodríguez J,Martín C,García R A. Polym Eng Sci,2014,55(5):57~62.
- [27] Zhang Y,Jar P Y B. J Mater Eng Perform,2016,25(10):4326~4332.
- [28] Fawaz J,Deveci S,Mittal V. Colloid Polym Sci,2016,294(8):1269~1280.
- [29] Maxwell A S,Pilkington G. Polym Eng Sci,2008,48(48):360~364.
- [30] Cheng J J,Polak M A,Penlidis A. J Macromol Sci Part A,2008,45(8):599~611.
- [31] Cheng J J,Polak M A,Penlidis A. Tunn Undergr Sp Tech,2011,26(4):582~593.
- [32] Pinter G,Haager M,Balika W,Lang R W. Polym Test,2007,26(2):180~188.
- [33] Nishimura H,Narisawa I. Polym Eng Sci,1991,31(6):399~403.
- [34] Nishimura H, Nakashiba A, Nakakura M,Sasai K. Polym Eng Sci,1993,33(14):895~900.
- [35] Shah A,Stepanov E V,Hiltner A,Baer E,Klein M. Int J Fract,1997,84(2):159~173.
- [36] Parsons M,Stepanov E V,Hiltner A,Baer E. J Mater Sci,1999,34(14):3315~3326.
- [37] Parsons M,Stepanov E V,Hiltner A,Baer E. J Mater Sci,2000,35(8):1857~1866.
- [38] Hamouda H B H,Simoes-betbeder M,Grillon F,Blouet P,Billon N,Piques R. Polymer,2001,42(12):5425~5437.
- [39] Plummer C J G,Goldberg A,Ghanem A. Polymer,2001,42(23):9551~9564.
- [40] Favier V,Giroud T,Strijko E,Hiver J M,G'Sell C,Hellinckx S,Goldberg A. Polymer,2002,43(4):1375~1382.
- [41] Frank A,Pinter G. Polym Test,2014,2014(33):161~171.
- [42] Frank A,Bruckmoser K,Redhead A,Gruber D P,Pinter G. Macromol Symp,2012, 311(1):103~111.

- [43] Redhead A, Pinter G, Frank A. Macromol Symp, 2012, 311(1): 41~48.
- [44] Kratochvilla T R, Frank A, Pinter G. Polym Test, 2014, 40(1): 299~303.
- [45] Frank A, Berger I J, Arbeiter F, Pinter G. Proceedings of Plastic Pipes XVII, Chicago, USA, 2014.
- [46] Redhead A, Frank A, Pinter G. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 101(1): 2~9.
- [47] Frank A, Pinter G, Lang R W. Proceedings of Plastic Pipes XV, Vancouver, Canada, 2010.
- [48] Pinter G, Arbeiter F, Berger I J, Frank A. Proceedings of Plastic Pipes XVII, Chicago, USA, 2014.
- [49] Frank A, Pinter G, Lang R W. Proceedings of Annual Technical Conference-ANTEC, Chicago, USA, 2009.
- [50] Frank A, Hutar P, Pinter G. Macromol Symp, 2012, 311(1): 112~121.
- [51] Frank A, Berger I J, Arbeiter F, Hutar s P, Pinter G. Proceedings of Plastic Pipes PPXVIII, Berlin, Germany, 2016.
- [52] Pokharel P, Jian W, Choi S. Radiat Phys Chem, 2016, 126(1): 103~110.
- [53] Wee J W, Choi B H. Int J Solids Struct, 2016, 97/98(1): 189~199.

Review on New Test Methods Based on Strain Hardening and Cyclic Loading of Slow Crack Growth for Polyethylene Pipes

CHEN Guo-hua, HUANG Xiao-zhi*

(*Institute of Safety Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

Abstract: Slow crack growth is the main reason of fracture failure for polyethylene (PE) pipes. Currently, the test for slow crack growth which commonly used in the industry is lack of efficiency and reproducibility, which restrict the accurate evaluation for performance of slow crack growth resistance and development of PE pipes. In order to solve these problems, foreign scholars put forward two new test methods of fast evaluation—Strain Hardening Test Method (SH) and Cyclic Cracked Round Bar Test Method (CRB). Test procedures of these two methods are separately introduced, and research progresses of these two methods are reviewed from rationale and experimental study. It is suggested that future research should be in four aspects: investigating the test condition of strain hardening response at room temperature, combining the linear elastic fracture theory with CRB method, improving the life prediction method based on CRB method and indicating how these two methods can be applied to other plastic pipes.

Key words: Polyethylene pipes; Slow crack growth; Strain hardening test method (SH); Cyclic cracked round bar test method (CRB)