

桥梁拉索 HDPE 护套日光老化试验

张春雷¹, 李国平¹, 雷洛^{1,2}

(1. 同济大学 桥梁工程系, 200092 上海; 2. 四川省交通运输厅 公路规划勘察设计研究院, 610041 成都)

摘要: 为了研究生产和使用过程中的初应变对 HDPE 护套老化的影响, 设计了人工日光老化试验和拉伸试验. 通过 1 套铁制夹具对 HDPE 试片张拉施加初应变; 将施加初应变的试片和无初应变的试片放入人工日光老化试验箱进行老化试验; 再将老化试验后的试片裁剪、加工成试件进行拉伸试验; 分析并比较各组试件的拉伸特性. 结果表明, 各组试片均未出现明显老化现象, 未反映出初应变是 HDPE 护套开裂的主要原因. 建议对试验方法进行完善.

关键词: 桥梁工程; HDPE; 护套开裂; 初应变; 日光老化试验; 拉伸试验

中图分类号: U443.48

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0091-05

Photo-aging test on HDPE sheath of bridge cable

ZHANG Chun-lei¹, LI Guo-ping¹, LEI Luo^{1,2}

(1. Dept. of Bridge Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China; 2. Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Transport Department, 610041 Chengdu, China)

Abstract: To search the influence of initial strain induced in production and service period on HDPE sheath, an artificial photo-aging test and a tensile test were designed. A kind of iron fixture was devised to produce initial strain on HDPE test pieces. The aging tests were conducted on test pieces with and without initial strain in artificial photo-aging test chamber. The tensile tests were undertaken on specimens cut and processed from test pieces after aging test. Comparisons and analysis were made on tensile properties of the specimens. The results show that no obvious aging phenomenon exists in the specimens, it is not appropriate to conclude that the initial strain is the main cause of sheath crack. It is suggested that the test method should be improved.

Key words: bridge engineering; HDPE; sheath crack; initial strain; photo-aging test; tensile test

HDPE (High density polyethylene) 作为拱桥、斜拉桥、悬索桥中拉索的护套已得到了大量的应用. 然而, 在施工及使用过程中, 由于受到外部荷载和环境作用, HDPE 护套将出现不同程度的病害, 如护套表层褪色、出现龟裂等.

国内针对桥梁拉索用 HDPE 材料老化进行的研究相对较少, 如李国芬等对南京三桥斜拉索护套所用的 HDPE 材料做了人工日光老化试验和盐

雾试验^[1]. 而针对 HDPE 材料本身的性能试验研究却得到了广泛开展, 如耐环境应力开裂性能 (ESCR)、户外自然老化力学性能、老化后微观结构分析与机械性能对比等方面^[2-4]. 国外主要在包含 HDPE 材料在内的高分子材料的性能方面进行了广泛的试验研究. 如 Parsons M 等对应变速率对 HDPE 慢速裂缝增长的影响进行了研究, Kurelec L 等提出将应变强化模量作为 HDPE 耐环境应力开裂的度量, Schouwenaars R 等对加工缺陷引起的 HDPE 管慢速裂纹增长和失效进行了研究, Gulmine J V 等对聚乙烯材料进行了紫外线和氙灯照射人工老化, 并利用电子显微镜等分析了材料结构及性质方面的变化^[5-8].

目前, 国内外主要针对材料本身或工程管道用 HDPE 的性能开展研究, 但拉索用 HDPE 护套

收稿日期: 2011-06-23.

基金项目: 交通部西部交通科技资助项目(2006 318 223 02-01);
高等学校博士学科点专项科研基金资助项目
(20090072110045).

作者简介: 张春雷(1987—), 男, 博士研究生;
李国平(1958—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 李国平, lgtpj@tongji.edu.cn.

因承受较大的初应变而具有不同于纯材料和工程管道用 HDPE 的特点. 本试验正是基于以上考虑, 设计了 HDPE 试片并对其施加初应变, 然后将试片放入老化箱进行老化试验, 老化结束后将试片切割成试样再进行拉伸试验. 通过上述过程研究试片老化后的外观及其力学性能, 探讨初应变对 HDPE 护套光老化的影响, 寻求桥梁拉索护套褪色、开裂等病害的原因.

1 人工日光老化试验

如前所述, 为了真实模拟桥梁拉索用 HDPE 护套的使用情况, 需要对 HDPE 试片进行张拉, 然后再进行人工日光老化试验.

1.1 试验依据

由于国内还没有桥梁拉索用 HDPE 护套的老化试验标准, 所以试验借鉴了国家标准中的电缆试验标准^[9]中附录 A 中的人工气候老化试验方法(氙灯法). 该标准中规定放入老化箱的试件保持 5% 的伸长率, 而在本试验中采用了拉索护套可能产生的实际初应变. 下面对拉索护套可能产生的实际应变值进行分析.

在护套的挤制过程中, 聚乙烯在 100 ℃ 的时候开始凝固冷却直至温度降至 20 ℃. 一般取护套的温度收缩系数为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 则挤制过程中产生的轴向和横向拉伸应变为

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T = 1.0 \times 10^{-4} \times 80 = 0.008. \quad (1)$$

桥梁设计时, 拉索中钢丝束的恒载应力约为其静力抗拉强度标准值的 30% ~ 35%, 常用钢丝束的强度标准值为 1 570 MPa, 因钢丝束的弹性模量约为 $1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$, 故恒载作用下钢丝束应变约为 $2\,415.4 \text{ } \mu\varepsilon$; 可变荷载作用下钢丝束的应力幅一般不超过其抗拉强度标准值的 10%, 其相应的应变幅约为 $805.1 \text{ } \mu\varepsilon$ ^[10]. 可变荷载作用产生的应变幅是较小的. 热挤 HDPE 护套对钢丝束有很好的握裹力, 故近似认为护套的应变与钢丝束相等.

通过以上分析可以发现, 钢索护套长期的应变主要是生产过程中产生的应变和恒载作用下产生的应变. 其中轴向的长期应变为两者之和, 即 $10\,415 \text{ } \mu\varepsilon$, 横向的长期应变为生产过程中产生的应变, 即 $8\,000 \text{ } \mu\varepsilon$. 因此, 试验中就以该数值分别作为试片的轴向和横向的初应变.

试验箱采用标准规定的氙灯老化试验箱, 考虑到标准新近的修订情况, 将老化试验时间延长到 3 000 h 以上. 根据李国芬^[1]等在南京长江第三大桥斜拉索的防腐系统研究中提到的, 人工加速

老化试验的光照条件下, 试验箱中的 200 h 相当于大气环境中 1 a. 因此, 本试验采用的超过 3 000 h 老化时间相当于大气中 15 a, 满足拉索寿命要求.

1.2 试片制作及初应变实现

本试验的试件为施加初应变的 HDPE 矩形试片, HDPE 的原料采用韩国三星 110A, 由国家化学建筑材料测试中心制造, 采用注塑工艺成型.

本试验设计了 1 套铁制夹具来实现 HDPE 板的张拉, 如图 1 所示. 夹具的 4 条边由 4 根铁条组成, 通过调节 4 个角上相互垂直的螺栓可以实现相对移动. 4 根铁条上都有螺栓孔, 可将打好对应孔洞的 HDPE 试件安装上去; 盖上压板、拧紧螺栓后, HDPE 板的 4 边就可被夹具固定; 通过调节螺栓, 就可以实现试件随 4 根铁条伸缩.

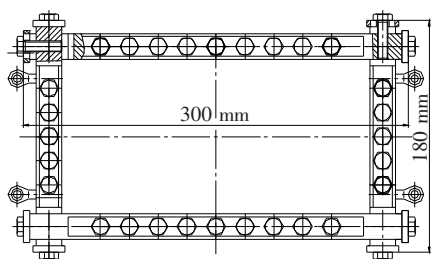


图 1 铁制夹具示意图

为了实现试验要求的初应变, 试片拉伸过程中需要对其应变值进行控制. 试片应变测点的布置如图 2 所示. 测点编号方法为“横向/竖向分辨号—测点号”, 设定 1 为竖向测点对, 2 为横向测点(对).

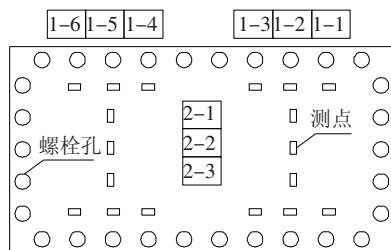


图 2 测点布置示意图

本试验原计划通过在试片表面粘贴应变片来测量其应变值, 但由于应变片与 HDPE 片之间的粘结不牢固, 张拉过程中发生滑脱, 测量数据无效. 之后只能在试片上粘贴标记, 采用电子游标卡尺测量成对标记处的拉伸值. 由于电子游标卡尺读数精度为 0.1 mm, 相当于标距间的应变为 $1\,000 \text{ } \mu\varepsilon$, 近似满足试验要求.

通过对备用试片进行张拉方法和过程的多次尝试, 得到如下张拉步骤: 1) 将试片置于铁制夹具上, 盖上短边压条并拧紧螺栓, 进行标距初值测量; 2) 调节螺栓施加横向(即拉索横向)张拉力,

待应变达到目标值的 1.5 倍左右时停止张拉; 3) 盖上长边压条、拧紧螺栓, 放松短边上螺栓, 量取试片标距并计算相应的应变值; 4) 调节螺栓施加竖向(即拉索轴向)张拉力, 直至应变值达到目标值, 停止张拉; 5) 将全部螺栓拧紧, 张拉过程完毕。

最后, 试片的应变均达到了拉索轴向 10 000 $\mu\epsilon$, 横向 8 000 $\mu\epsilon$ 的要求, 即成功模拟了桥梁拉索护套的长期应变值。

1.3 试验仪器及过程

试验在上海电缆研究所进行, 老化试验箱氙灯功率 6 kW, 辐射度规定为 290 ~ 800 nm 波长之间的谱带, 选择辐射强度 550 W/m² 作为参考. 试验箱内转架的直径为 800 ~ 900 mm、高为 365 mm, 转架每分钟旋转 1 周; 箱内温度为 (55 ± 3) °C, 相对湿度为 85% ± 5%. 试验以 18 min 喷水、光照和 102 min 单独光照为周期循环进行. 喷水水压为 0.12 ~ 0.15 MPa, 喷水嘴内径为 0.8 mm.

试件分为 3 组: 第 1 组(共 4 片)作为对照组, 保存于阴凉干燥处, 2 片施加初应变、2 片无初应变; 第 2 组(共 3 片)进行 0 ~ 1 512 h 光照老化试验, 1 片施加初应变、2 片无初应变; 第 3 组(共 3 片)进行 0 ~ 3 528 h 光照老化试验, 1 片施加初应变、2 片无初应变。

试验以每星期为 1 次循环, 其中 6 d 在老化箱中进行试验, 第 7 天将试片从老化箱移至 (-25 ± 2) °C 冷冻箱内, 进行冷热调节试验. 在 1 个试验循环中, 冷热调节试验需进行 3 次, 试片在冷冻箱内的时间为 2 h, 两次间隙时间等于或大于 1 h.

在达到规定的老化时间后取出试片, 置于环境温度下存放至少 16 h, 然后用有机溶剂洗净试片, 与第 1 组的对照试片进行对比观察。

2 拉伸试验

为了测定光老化后 HDPE 试件的性能变化, 考察初应变对 HDPE 材料力学性能的影响, 决定对其进行拉伸试验, 以测试其力学性能, 并与未进行光老化试验的试件进行对比。

2.1 拉伸试件加工制作

拉伸试件由试片裁剪、加工而成. 试件尺寸根据文献[11]的规定, 采用 1B 型试件, 试件尺寸如图 3 所示。

每块试件可以裁剪成 6 片拉伸试件, 对拉伸试件进行编号. 拉伸试件的裁剪是在上海塑料研

究所进行的. 首先将老化后的试板在剪板机上裁剪为矩形, 然后在万能工具铣床上精加工成符合上述尺寸要求的拉伸试件. 编号注明是否对试件施加了初应变以及试件的光老化时间. 拉伸试件的编号原则为: 板号 - 样品号, 比如, 1 号板 1 号片为“1-1”。

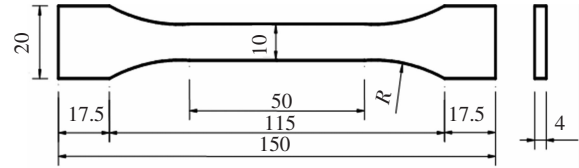


图 3 HDPE 拉伸试验试样尺寸 (mm)

2.2 拉伸试验设备及过程

拉伸试验同样是在上海塑料研究所进行的, 采用 Zwick/Roell Z010 型拉伸机, 见图 4, 拉伸速度为 10 mm/min. 整个过程的力和应变数据由计算机记录, 并通过试验机自带软件处理成图形和所需要的数据。

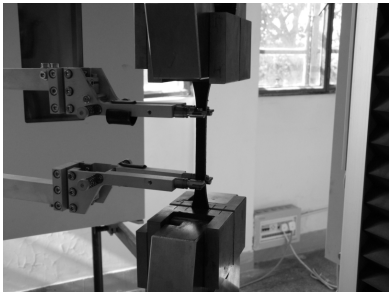


图 4 拉伸试验机

3 结果与讨论

为了分析初应变对于老化试验的影响, 对于人工光老化试验结束后的试片进行观察, 通过对比分析寻找其异同. 随后对加工成的试件进行拉伸试验, 对比其受力性能。

3.1 试验结果

3.1.1 老化后试件的外观变化

对于从老化箱中取出的试片, 通过目测, 观察其外观变化, 并与未进行老化试验的试片进行对比分析. 外观检测结果见图 5. 其中图 5(a)、(b) 为 3 528 h 光照试验后试片外观变化。

第 1 组无初应变的 2 片试片颜色基本不变, 无裂纹、凸起等现象, 相应的施加初应变的 2 片试片颜色要浅, 亦无裂纹、凸起等现象; 第 2 组试片经过光照试验后, 无初应变的 2 片试片颜色稍稍变浅, 施加初应变的 1 片试片比这两片和第 1 组的 4 片颜色都要浅, 该组试片均无裂纹、凸起等现象; 第 3 组结果与第 2 组相同, 经过光照试验后, 试片颜色明显变浅, 施加初应变的 2 片试片颜色

更浅一些,该组试片均无裂纹、凸起等现象. 根据比较可以看出,经老化后,无论有无施加应变,都没有出现明显的裂纹、凸起等现象. 试片的颜色经老化后变浅,有应力的试片比无应力的试片颜色变得更浅. 有初应变试片经过老化 3 528 h 后颜色

变化最大,无初应变老化 3 528 h 的试片次之. 切开试件观察试件的颜色变化,还可以看出,老化后的试件只在其表面出现褪色现象,而试件内部仍然为黑色,见图 5(c). 可见,光老化只是在试件表面出现,而内部并未受到氙灯光照的影响.



(a) 有初应变老化 3 528 h



(b) 无初应变老化 3 528 h



(c) 光老化试件切开后内部与表面颜色对比

图 5 试片试验后外观及内外颜色对比

3. 1. 2 试件拉伸试验结果

由试验机自带程序绘出的试件拉伸曲线图分析发现,所有试件拉伸曲线的形状相似,均有一个平稳的上升段、屈服点和发生屈服后的平稳下降段,如图 6 所示. 由此,可以得到各试件的屈服强度(定义为曲线最高点对应的应力值)、峰值应变(即屈服强度对应的应变值)和断裂应变(定义为下降段斜率突然增大的点所对应的应变值).

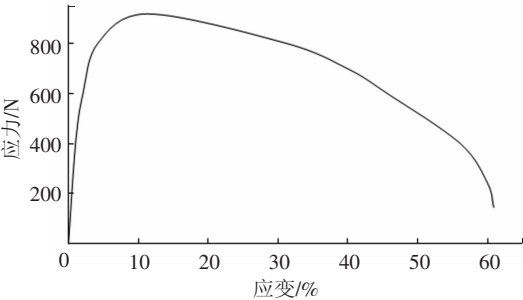


图 6 初应变的第一组试件拉伸曲线

通过对不同老化时间试件拉伸试验结果比较,发现试验数据离散性比较大,很难得到统一的规律,如表 1 所示. 对于施加初应变的试件,随着

老化时间的增长,试件的屈服强度有降低趋势,而峰值应变和断裂应变均有增加趋势,这可能是由于试验箱中温度所产生的热效应造成 HDPE 材料的流动性增加而导致的. 对于无初应变的试件,试件的屈服强度、峰值应变和断裂应变变化均无规律. 总体看来,试件的老化特性并不明显.

通过对施加初应变与无初应变的两组试件拉伸试验结果比较,可以发现,施加初应变的试件与无初应变的试件相比,其屈服强度是增加的,而其峰值应变和断裂应变是减少的,对于第 3 组试片,施加初应变的试件断裂应变要大于未施加初应变的试件. 这说明施加初应变会使得 HDPE 材料强度增大,但同时脆性也增加,即初应变在一定程度上增加了 HDPE 材料的老化进程.

总体上由拉伸试验结果来看,无论是施加初应变的试件还是无初应变的试件,其老化特性并不明显,尽管施加初应变在一定程度上增加了 HDPE 材料的老化进程,但其增加程度不足以导致材料出现裂纹、凸起病害现象. 试验未反映初应变是 HDPE 护套开裂的主要原因.

表 1 老化时间及初应变对试件拉伸性能的影响

组别	屈服强度/MPa		峰值应变/%		断裂应变/%	
	有初应变	无初应变	有初应变	无初应变	有初应变	无初应变
1	23. 2	21. 5	10. 9	11. 0	58. 8	63. 8
2	23. 1	20. 8	11. 3	12. 8	62. 4	70. 4
3	22. 2	21. 3	11. 7	12. 0	74. 7	64. 0

注:表中的数值是同一组的试片各试件拉伸试验结果的平均值.

3.2 讨 论

国内普遍认为,桥梁拉索 HDPE 护套开裂与护套的初应变有关,而本试验在某种程度上反映出 HDPE 护套严重开裂的原因并不主要是应变的作用.事实上,国内一些无应力拉索护套也出现了开裂现象.

朱志鹏等^[12]指出:对材料老化产生影响的应力与其数值的大小有关;存在一个临界应力,当应力小于这个临界应力时,应力一方面降低链断裂活化能,加速老化反应,另一方面又会通过减少氧的扩散来阻碍老化反应,宏观上表现为应力对老化性能影响不大.根据 Chen R 等的研究^[13],应力对老化的影响随着应力的增大而增大,较小的应力对老化的促进作用并不明显.这也许解释了按目前桥梁拉索 HDPE 护套可能存在的初应变,本试验试片不会出现明显老化或开裂.

试验老化环境与护套所处的自然环境之间存在差别,护套实际是在循环应力作用下工作的,且在冬季所经历的低温环境时间在整个过程中的比例较冷热调节试验要大.低温、循环应力的作用均有可能是导致护套开裂的重要因素,这可以从冬季发生脆裂的 HDPE 管道的实例中得出.

4 结 论

1) 采用符合国家标准的施加初应变的 HDPE 材料经老化试验后未出现开裂,这与目前国内很多桥梁拉索 HDPE 护套存在开裂的现象不符.试验表明初应变并不是 HDPE 护套开裂的主要原因.

2) HDPE 材料的选取将影响试验的结果,因此再次试验时需要根据出现病害的已建桥梁拉索护套材料的调查结果,选取最具有代表性的材料品种作为样本,以揭示国内大量 HDPE 护套开裂的主要原因.

3) 试验反映了额定电压 10 kV、35 kV 架空绝缘电缆试验方法用于桥梁 HDPE 护套老化试验尚有不足之处,冷热循环控制宜考虑桥梁实际环境状况.用于桥梁 HDPE 护套老化试验方法尚需完善.

参考文献:

- [1] 李国芬,陈研,朱华平. 南京长江第三大桥斜拉索的防腐系统研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006,30(6):102-104.
- [2] 叶昌明. HDPE 耐环境应力开裂的机理、影响因素和改进[J]. 塑料科技,2002(5):55-58.
- [3] 刘亚平,李晖,魏绪玲. 高密度聚乙烯户外自然老化的力学性能研究[J]. 山东化工,2007,36(8):5-7.
- [4] 王俊,彭坚. HDPE 老化试验后的微观结构分析与机械性能对比[C]//第三届中美材料环境腐蚀与老化试验学术研讨会论文集. 广州:中国电工技术学会, 2004:13-23.
- [5] PARSONS M, STEPANOV E V, HILTNER A, *et al.* Effects of strain rate on stepwise fatigue and creep slow crack growth in high density polyethylene [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35:1857-1866.
- [6] KURELEC L, TEEUWEN M, SCHOFFELEERS H, *et al.* Strain hardening modulus as a measure of environmental stress crack resistance of high density polyethylene [J]. *Polymer*, 2005, 46(17):6369-6379.
- [7] SCHOUWENAARS R, JACOBO V H, RAMOS E, *et al.* Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(6):1124-1134.
- [8] GULMINE J V, JANISSEK P R, HEISE H M, *et al.* Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2003, 79(3):385-397.
- [9] GB 14049—1993. 额定电压 10kV、35kV 架空绝缘电缆试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1993.
- [10] 王力力,易伟健. 斜拉索的腐蚀案例与分析[J]. 中南公路工程,2007,32(1):93-98.
- [11] GB/T 1040.2—2006. 塑料拉伸性能的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [12] 朱志鹏,皮红,郭少云,等. 应力作用下高分子材料的老化行为研究[J]. 聚氯乙烯,2008,36(2):6-9.
- [13] CHEN R, TYLER D R. Origin of tensile stress-induced rate increases in the photochemical degradation of polymers [J]. *Macromolecules*, 2004, 37(14):5430-5436.

(编辑 魏希柱)