

FBG 封装工艺对自感知预应力筋材应力 松弛性能影响研究

覃荷瑛, 宁健

(桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:钢绞线丝作为工程结构主要受力构件,对其进行健康监测尤为重要。光纤光栅传感器的凹槽内嵌封装工艺的出现,实现了钢绞线受力与监测的一体化。为探究凹槽内嵌封装工艺对钢绞线以及钢丝松弛性能的影响,分别开展对光圆钢绞线、环氧钢绞线及镀锌钢丝的等温松弛试验。结果表明:刻制凹槽并不会显著提高钢绞线的松弛率,而开丝重捻及重复张拉的过程则会对钢绞线的松弛率产生较大的影响。

关键词:光纤光栅传感器;自感知钢绞线;镀锌钢丝;应力松弛

中图分类号: U444

文献标志码: A

钢绞线具有较高的纵向抗拉强度,并广泛应用于桥梁、岩土、预应力混凝土结构等主要工程领域当中^[1]。作为结构中的关键受力部件,钢绞线的拉力及保持拉力的能力往往会直接影响着整个结构的刚度和强度。通常装配有高强度预应力钢绞线的结构或建筑物设计使用年限能达到几十年甚至更久,意味着在漫长的持荷过程中钢绞线容易产生应力松弛,从而导致结构的刚度降低。

应力松弛是在恒定温度和变形的条件下,钢绞线的应力随时间增加而降低的现象,主要由金属内部错位运动使一部分弹性变形转化为塑性变形而引起^[2-3]。由于预应力钢材的拉应力松弛特性往往关系到结构应力在未来的可能变化,过于低估可能引起结构安全问题,因此应力松弛常用作评估钢绞线性能的一项重要指标^[4]。如今,国内外已有许多学者针对钢绞线及钢丝的松弛性能进行过相关的研究探讨。王传远^[5]通过进行大量试验总结分析,论述了如何正确进行松弛试验,并分析了影响试验结果的关键因素;杨锡阶^[6]在5级试验温度环境下进行了应力松弛试验研究,发现温度对应力的影响非常明显;Shakya, AM^[7]探索了温度对低松弛预应力钢绞线力学性能的影响,提出了低松弛预应力钢绞线力学性能随温度变化的经验关系;WANG X X^[8]则提出了一种简化的钢丝、半平行钢绞线和螺旋钢绞线应力松弛模拟的有限元建模方法,推导了钢丝应力松弛与蠕变的简化关系,并通过

试验验证了所提出的蠕变标定和结构索应力松弛模拟的有效性。这些关于松弛性能的研究,现在普遍还集中于初始应力和温度两大影响因素的研究,对于构件本身外在条件(如制造后的卷曲存放、传感器封装操作、试验标准等)的研究尚少,且不够深入。尤其随着新型传感技术的兴起,人们更倾向于让受力筋材同时承担起“监测”的职能,为达到这一目的,就需要对筋材进行一些特殊的处理,这种处理对于普通钢绞线、钢丝松弛率究竟有着怎样的影响,需更进一步的探究。

目前,光纤光栅传感器用于各类结构的钢绞线、钢丝等材料中的受力监测日益发展^[9-11]。在材料中设置凹槽封装光纤光栅传感器,一方面保护了纤细质脆、抗剪能力差的光纤光栅,同时改善了光纤光栅传感器监测性能,如增大量程、增加或降低监测灵敏度等^[12-13]。但设置凹槽对原材料产生了损伤,也势必影响其松弛性能,该文针对凹槽内嵌 FBG 传感器的自感知钢绞线及镀锌钢丝的封装工艺对其松弛性能的影响进行系列的研究,旨在为 FBG 传感器自感知钢绞线及钢丝的实际工程应用提供更可靠依据。

1 自感知预应力筋材的 FBG 传感器封装工艺

凹槽内嵌封装是针对光纤光栅自感知钢绞线的应变健康监测提出的一种新工艺,这种工艺不仅提高了

收稿日期:2021-10-15(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51768014);广西科技重大专项(编号:桂科 AA18118008)

作者简介:覃荷瑛,女,博士,教授。E-mail:qinheyinlxc@163.com

恶劣使用环境下光纤在钢绞线中布设存活率及使用寿命,还能克服光纤本身极限拉应变较低的缺陷,提高监测量程^[14]。具体封装过程如下:将 1×7 标准型预应力钢绞线打散,取出中心丝,刻制直线凹槽;预张拉该中心丝,在持荷状态下将 FBG 传感器粘贴至凹槽内,卸掉荷载,重新将外丝与中心丝捻合。FBG 传感器自感知钢绞线的封装结构如图 1 所示。

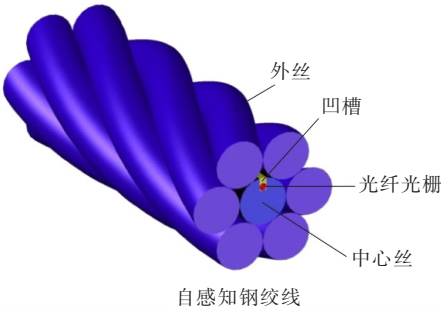


图 1 内嵌预压式封装结构示意图

2 FBG 封装工艺对预应力筋材松弛性能影响研究

2.1 试验概况

应力松弛率是预应力筋材的固有特性,与筋材本身的组成结构及表面状态密切相关,钢绞线和钢丝组成结构相差较大,表面环氧和镀锌处理均会引起应力

松弛率的变化。因此该文选用工程结构常用的 3 种预应力筋材:光圆钢绞线、环氧钢绞线以及镀锌钢丝,以分析筋材本身结构及表面状态对应力松弛率的影响。FBG 传感器自感知筋材因内嵌 FBG 传感器的需要,对筋材进行了打散、刻槽、重新捻合、重复张拉等一系列工艺处理,这些处理势必引起筋材应力松弛率的改变。为研究这些后期处理对筋材松弛率的影响,该文将 3 种筋材分为 A、B、C 3 组,B 组为对照组,原材料未经任何处理;A 组为 FBG 传感器自感知筋材;为区分自感知筋材两个主要工艺打散钢绞线及设置凹槽对松弛率的影响程度,增设了 C 组试件,C 组试件与 A 组试件工艺处理唯一不同点就是不设置凹槽,对钢绞线,剥离外丝与中心丝后重捻制,再进行与 A 组相同的重复张拉试验,镀锌钢丝无开丝重捻制过程,只进行重复张拉。每组取 3 根试件,试件信息如表 1 所示。

RLT1305 型微机伺服控制松弛试验机,配备有数据自动采集系统,机身长 2.4 m,试验机放置于一个独立试验室,室内安装有空调,可控制室内环境温度恒定。引伸计的标距为 1 000 mm,精度范围为±1%,分辨率为 $5 \times 10^{-6} L_0$ 。根据应力松弛试验机的机身长度,截取试件长度为 2.7 m。在每组松弛试验取样的附近另取两个试样,用以测得试件的最大破断力平均值,依据规范松弛试验的初始力 F 。取破断力平均值的 70%,即光圆钢绞线和环氧钢绞线的初始力取 182 kN,镀锌钢丝的初始力取 48 kN。

表 1 试件分组

试件编号	钢材类型	直径/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	公称破断 力/kN	1 000 h 应力 松弛率/%	处理方式
G-A	1×7 光圆钢绞线	15.2	1 860	1.95×10^5	260	≤ 2.5	凹槽封装 FBG 并标定
G-B							—
G-C							开丝重捻制后标定
H-A	1×7 环氧钢绞线	15.2	1 860	1.95×10^5	260	≤ 6.5	凹槽封装 FBG 并标定
H-B							—
H-C							开丝重捻制后标定
D-A	单根镀锌钢丝	7.0	1 770	2.0×10^5	68	≤ 2.5	凹槽封装 FBG 并标定
D-B							—
D-C							循环张拉

等温松弛试验依据国家标准 GB/T 21839—2008《预应力混凝土用钢材试验方法》进行,试验前将所有试件放置于恒温试验室不少于 24 h,试验室和试样的温度始终控制在(20±2)℃范围内。松弛加载方案按

图 2 进行。

在松弛的荷载测量期间,通过引伸计控制应变的保持,对力的调整均只用于保证 $L_0 + \Delta L_0$ 的恒定,试验开始后按照一定的标准时间间隔连续记录力的损

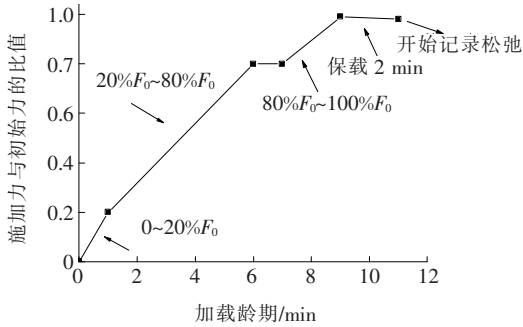


图 2 加载过程图

失,试验的记录时间为 120 h,可用 120 h 的松弛试验值对 1 000 h 及以上的长期应力松弛值进行外推。

应力松弛行为的程度通常使用松弛率来评估和测量,松弛率 $R(t)$ 定义为材料在恒温、恒应变条件下,等温应力松弛试验中任一时间的应力减少量与初始应力之比的百分率,可以表示为:

$$R(t) = \frac{(\sigma_0 - \sigma_t)}{\sigma_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: σ_0 为初始应力值; σ_t 为在 t 时刻材料的应力值。

2.2 试验数据处理与分析

筋材的应力松弛是长期的行为,各国规范标准均给出 1 000 h 松弛率的标准。中国国家标准 GB/T 21839—2008《预应力混凝土用钢材试验方法》规定对于低松弛的 1×7 预应力光圆钢绞线和 7 mm 直径的单根镀锌钢丝,其 1 000 h 应力松弛率不大于 2.5%, 1×7 环氧钢绞线的 1 000 h 应力松弛率不大于 6.5%。对 1 000 h 及以上的长期松弛值可以用不少于 120 h 的松弛试验值进行外推,但应提供充分证据证明外推的松弛值与实测的松弛值相当。目前中国标准提出的双对数函数外推方法为:

$$\log R(t) = A \times \log t + B \quad (2)$$

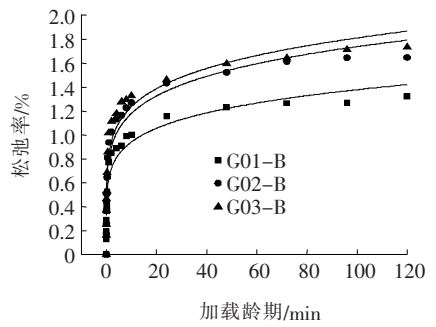
式中: A 和 B 为常数; $R(t)$ 为松弛率(%); t 为松弛持续时间(h)。

澳大利亚标准 AS/NZS 4672. 1. 2007《预应力钢材》给出的单对数函数外推方法为:

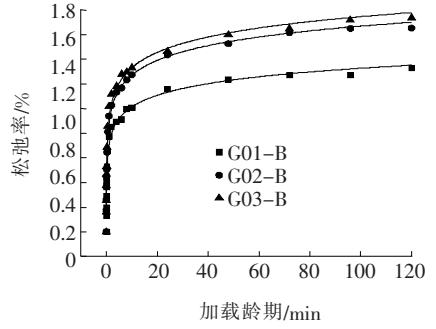
$$R(t) = A \times \ln t + B \quad (3)$$

取光圆钢绞线、环氧钢绞线和镀锌钢丝的 B 组未经任何处理的试件试验数据,分别按式(2)、(3)进行拟合,并与原实际松弛率进行比对,以判断哪种外推方法更有效。拟合结果见图 3~5 及表 2。

从图 3~5 及表 2 可以看出:采用双对数函数即式(1)拟合松弛率的效果较差,相关系数都在 0.95 以下,拟合曲线所得 60 h 以后松弛率明显大于实测松弛率,

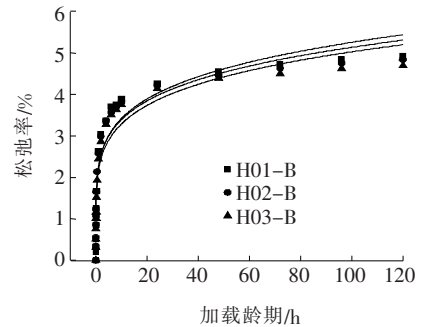


(a) 双对数拟合

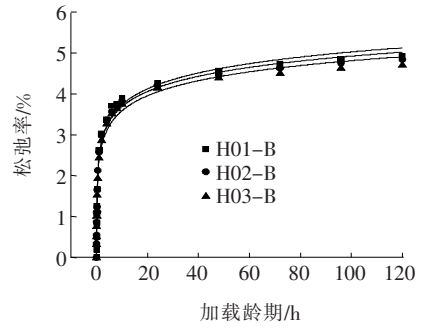


(b) 单对数拟合

图 3 光圆钢绞线 B 组试件拟合曲线图



(a) 双对数拟合



(b) 单对数拟合

图 4 环氧钢绞线 B 组试件拟合曲线

而且随着时间的增加,二者的差值越来越大,将使得 1 000 h 及以上的长期松弛率推算值会远大于实际的松弛率。采用单对数函数即式(2)拟合外推松弛率的效果较好,相关系数都在 0.98 以上,拟合曲线所得松

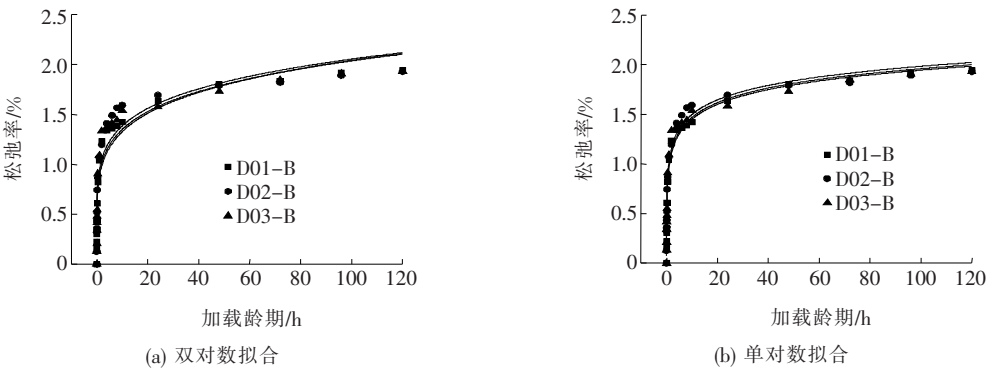


图5 镀锌钢丝B组试件拟合曲线图

表2 B组试件松弛数据拟合结果

试件编号	双对数拟合曲线 $\log R(t)=A \times \log t+B$					单对数拟合曲线 $R(t)=A \times \ln t+B$				
	A	B	相关系数 R^2	$R(1\ 000\ h)/\%$	$R(1\ 000\ h)$ 平均值/ $\%$	A	B	相关系数 R^2	$R(1\ 000\ h)/\%$	$R(1\ 000\ h)$ 平均值/ $\%$
G01-B	0.165 7	-0.191 3	0.940	2.022		0.136 0	0.698 3	0.993	1.641	
G02-B	0.168 3	-0.095 8	0.950	2.565	2.415	0.172 4	0.873 5	0.997	2.064	1.955
G03-B	0.165 8	-0.073 0	0.940	2.657		0.179 9	0.916 3	0.994	2.159	
H01-B	0.187 1	0.346 3	0.927	8.085		0.560 0	2.447 0	0.991	6.315	
H02-B	0.180 4	0.349 8	0.932	7.780	7.853	0.537 1	2.452 0	0.994	6.161	6.172
H03-B	0.184 9	0.331 5	0.929	7.695		0.533 1	2.359 0	0.993	6.041	
D01-B	0.187 2	-0.063 9	0.936	3.146		0.215 3	0.955 3	0.990	2.443	
D02-B	0.171 2	-0.029 3	0.919	3.050	3.090	0.211 1	1.013 3	0.987	2.462	2.453
D03-B	0.178 4	-0.047 6	0.913	3.073		0.213 5	0.978 1	0.982	2.453	

弛率与实测松弛率相差很小,偏差在±0.2%之内。因此该文对各组试件1 000 h及以上的长期松弛率采用单对数函数即式(2)进行外推计算。

图6~8为每组试件平均松弛率数据及采用单对数函数拟合结果,表3为根据试验数据及单对数函数拟合的松弛率预测值。

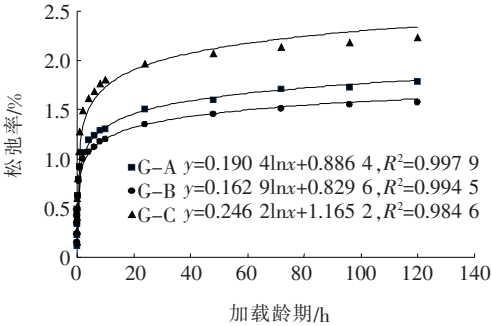


图6 光圆钢绞线松弛率及单对数函数拟合曲线

由图6~8及表3可以得出:① 应力松弛率采用单对数函数拟合预测效果较好,对所有试件,120 h应

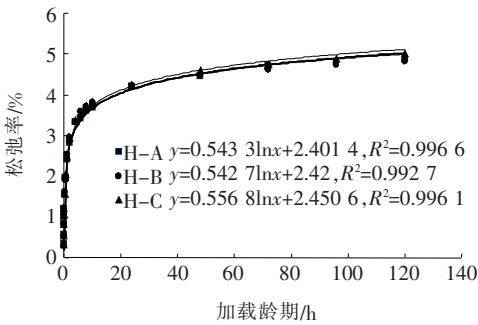


图7 环氧钢绞线松弛率及单对数函数拟合曲线

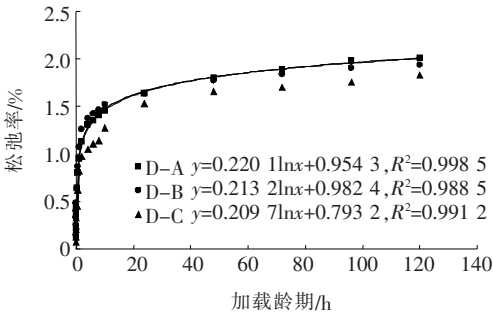


图8 镀锌钢丝松弛率及单对数函数拟合曲线

表 3 试件的松弛率

试件 编号	R (100 h)/ %	R_1 (120 h)/ %	R_2 (120 h)/ %	$[R_2(120\text{ h}) - R_1(120\text{ h})]/$ $[R_1(120\text{ h})]/\%$	R (1 000 h)/ %
G—A	1.763	1.780	2.013	0.99	2.202
G—B	1.580	1.571	1.936	2.43	1.955
G—C	2.299	2.233	1.830	4.98	2.866
H—A	4.903	4.892	5.002	2.27	6.154
H—B	4.919	4.821	5.018	4.08	6.169
H—C	5.015	4.999	5.116	2.34	6.297
D—A	1.968	2.013	2.008	-0.25	2.475
D—B	1.964	1.936	2.003	3.47	2.455
D—C	1.759	1.830	1.797	-1.81	2.242

注： $R_1(120\text{ h})$ 为试件 120 h 应力松弛率的实测值； $R_2(120\text{ h})$ 为试件 120 h 应力松弛率的单对数函数预测值。

力松弛率预测值和实验值误差均在 5% 以内；② A 组试件均比原筋材 B 组试件的应力松弛率大，但所有试件中，外推 1 000 h 的应力松弛率，光圆钢绞线及镀锌钢丝小于 2.5%，环氧钢绞线小于 6.5%，均满足规范要求。因此经 FBG 封装工艺处理后的 FBG 自感知筋材，其应力松弛率有所增加，但均在规范规定的范围内，符合规范标准；③ 图 6 中光圆钢绞线 A、B、C 3 组试件的松弛率相差较大，A 组、C 组分别比 B 组试件 120 h 的应力松弛率增大 13.37%、42.23%，远大于环氧钢绞线和镀锌钢丝 3 组之间的差别，分别为 3.9%、5.47% 及 1.47%、3.69%。这说明 FBG 封装工艺对光圆钢绞线的应力松弛影响较大，对环氧钢绞线和镀锌氧钢丝影响较小；④ 在光圆钢绞线和环氧钢绞线中，A 组的应力松弛率比 C 组小，而对镀锌钢丝恰好相反，因此可以得出，FBG 封装工艺引起钢绞线应力松弛率的主要原因是钢绞线打散和重新扭绞的处理，而凹槽的设置可以减少其应力松弛率，FBG 封装工艺引起钢丝应力松弛率增大的主要原因是钢丝设置的表面凹槽；⑤ 图 7 中反复张拉的镀锌钢丝 C 组试件比原筋材 B 组试件的应力松弛率小，说明 FBG 封装工艺中反复张拉标定的流程有利于减少应力松弛率。

3 结论

依据 GB/T 21839—2008《预应力混凝土用钢材试验方法》分别对光圆钢绞线、环氧钢绞线和镀锌钢丝

3 种钢材进行等温松弛试验，探究 FBG 凹槽内嵌封装工艺对选用钢材的影响。通过对 9 组试件 120 h 的监测分析，得到以下结论：

(1) 在 10 h 之前，所有试件的松弛率均随着时间的增长急剧增大，这段时间内钢材的应力松弛发展最为迅猛，10 h 后，松弛率的增长速度逐渐趋于平缓，应力松弛逐渐趋于稳定。

(2) 相较于双对数函数，单对数函数拟合曲线所得松弛率与实际松弛率的偏差更小，拟合相关系数更高，且满足推算要求（偏差在±0.2%之内，拟合相关系数>98%），采用单对数拟合能更好地反映试件应力松弛的变化。

(3) 刻制凹槽使钢丝本身横截面积发生变化，造成了一定的损伤，在刻槽后镀锌钢丝的松弛率会升高，而重复张拉过程却能有效降低镀锌钢丝的松弛率。但对于光圆及环氧钢绞线而言，刻制凹槽并不会使松弛率提升，反而会降低松弛率，真正引起钢绞线松弛率升高的主要因素是开丝重新捻制的过程。

(4) 采用 FBG 内嵌封装工艺后，光圆钢绞线、环氧钢绞线的松弛率均有所提高。光圆钢绞线所受影响较大，其 A 组试件的平均松弛率比 B 组试件增大了 13.3%，而环氧钢绞线 A 组试件的平均松弛率仅比 B 组增大 1.5%，但两种钢绞线外推 1 000 h 的松弛率仍能满足规范要求。

参考文献：

[1] CHEN,Z H,YU Y J,WANG X D,et al. Experimental Research on Bending Performance of Structural Cable [J]. Construction and Building Materials,2015,96:279—288.

[2] ATIENZA J M,ELICES M. Role of Residual Stresses in Stress Relaxation of Prestressed Concrete Wires[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2007,19(8):703—708.

[3] YAN J B,XIE J,DING K R. Stress Relaxation Behavior of Prestressing Strands under Low Temperatures[J]. PCI Journal,2020,65(1):41—56.

[4] 段建华. 预应力钢绞线松弛试验方法标准的探讨[J]. 金属制品,2010,36(1):63—66.

[5] 王远传,赵勇. 预应力混凝土用钢绞线等温松弛试验方法的探讨[J]. 工程质量,2018,36(5):73—75.

[6] 杨锡阶,王时越,缪云伟. 温度对预应力钢绞线松弛性能的影响及不确定度评定[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(10):219—221.