

# 基于 ANSYS 不同螺旋槽规格的钢丝应力分析

覃荷瑛<sup>1,2</sup>, 张贺丽<sup>1,2</sup>, 唐 慧<sup>1,2</sup>, 朱万旭<sup>1,2</sup>

(1. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学  
土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要** 目的 研究在钢绞线中心丝上设置螺旋式凹槽并植入光纤光栅的智能钢绞线, 解决对大应力应变钢绞线损伤破坏全过程的实时监测问题. 方法 螺旋槽的角度对光纤光栅传感器的应变灵敏度起着关键性作用, 同时螺旋槽宽和槽深影响了钢绞线的应力情况, 基于 ANSYS 有限元软件, 通过改变不同螺旋槽角度、宽度和深度, 对螺旋槽中心丝的最大应力、最大位移和螺旋槽内应力变化率方面进行分析. 结果 不同螺旋槽规格对智能钢绞线的力学性能及应变监测量程有着重要的影响, 当螺旋槽钢丝槽深 0.3 mm, 槽宽 1.2 mm, 角度为 45° 时, 该螺旋槽钢丝的最大应力和最大位移适中, 螺旋槽内应力变化率为 57.1%, 应力集中情况较小, 对钢绞线承载力影响较小. 结论 该 ANSYS 分析为螺旋槽中心丝对智能钢绞线力学性能及大量程应变监测性能提供有效的依据.

**关键词** ANSYS; 钢绞线; 中心丝; 螺旋槽; 应力

中图分类号 TU317<sup>+</sup>.3 文献标志码 A

## The Stress Analysis of Different Spiral Groove Steel Wire Based on ANSYS

QIN Heying<sup>1,2</sup>, ZHANG Heli<sup>1,2</sup>, TANG Hui<sup>1,2</sup>, ZHU Wanxu<sup>1,2</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, China, 541004; 2. College of Civil Engineering and Architecture Guilin University of Technology, Guilin, China, 541004)

**Abstract:** In order to realize the real-time monitoring of the damage and failure process of large stress and strain steel strand, the composite technology that the spiral groove steel wire is proposed to replace the steel center wire and the fiber Bragg grating sensor stick into the spiral groove, is put forward. The angle of spiral groove plays a key role in the strain sensitivity of fiber Bragg grating sensors, at the same time, the stress condition of the steel strand is influenced by the width and depth of the spiral groove, therefore, different spiral groove specifications have an important influence on the mechanical properties and strain monitoring range of smart steel wire, When the spiral steel wire groove depth 0.3 mm, width 1.2 mm, angle of 45 degrees, the maximum stress and

收稿日期: 2016-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272358); 广西科技计划科技基地和人才专项项目(2016AD05036)

作者简介: 覃荷瑛(1972—), 女, 副教授, 博士, 主要从事混凝土结构及其新材料研究.

maximum displacement of spiral groove steel wire is moderate, and the stress change rate of internal spiral groove is 57.1%; Moreover, the fact that the stress concentration is small has little effect on the bearing capacity of steel strand. Based on ANSYS finite element software, spiral groove center wire of the maximum stress value, maximum displacement, variation rate of spiral groove stress and other aspects will be analyzed under changing different spiral groove angle, width and depth, which provide the effective basis for the mechanical properties of the intelligent steel wire and the large range strain monitoring performance with the center wire of the spiral groove.

**Key words:** ANSYS; steel strand; center wire; spiral groove; stress

钢绞线广泛用于桥梁、大跨度建筑、体育馆、核电站、天文台索网支撑体系<sup>[1-3]</sup>等各领域,钢绞线经常作为结构中的关键受力构件,实时监测其应力状况关乎整个结构的安全性和可靠性.已经有国内外学者利用光纤光栅对钢绞线进行应变监测进行了一定的研究<sup>[4-6]</sup>.与传统传感器相比,光纤光栅传感技术通过栅格反射波长的移动来感应外界物理量的微小变化,具有测量线性度高、重复性好,可对结构的应力、应变进行高精度的、绝对的、准分布式的数字测量;同时还具有抗电磁干扰能力强、耐高温、传感器体积小、接线简单、可实现数据远距离传输的特性.

目前国内外最主要的方法是将钢绞线中心丝替换成智能玻璃纤维增强聚合筋(GFRP-OFBG)<sup>[7-9]</sup>、智能碳纤维增强聚合筋(CFRP-OFBG)<sup>[10-13]</sup>、智能芳纶纤维增强聚合筋(AFRP-OFBG)<sup>[14]</sup>、智能混杂纤维增强聚合筋(HFRP-OFBG)<sup>[15-18]</sup>等实现对钢绞线的应变监测,但智能纤维增强筋与钢绞线不属于同一材料,存在着应变传递问题,且使钢绞线极限承载力降低,应力应变监测量程较低,不能监测到钢绞线的损伤破坏全过程.

笔者将螺旋槽钢丝代替普通钢绞线中心丝,光纤光栅封装在螺旋槽内实现对钢绞线的应变监测,螺旋槽钢丝不仅作为钢绞线的中心丝存在于受力构件中,同时作为光纤光栅传感器的载体监测该钢绞线的应变情况.螺旋槽具有一定的倾角,螺旋槽内的光纤光栅感受螺旋形的小应变,利用几何关系,推导出

出钢绞线的大应变,使光纤光栅的监测量程增大.对不同螺旋槽规格的中心丝进行 ANSYS<sup>[19-20]</sup>应力分析,对比不同螺旋槽规格对钢绞线中心丝的力学性能影响,为设计出既不影响力学性能又能实现大量程监测的智能钢绞线提供可靠的依据.

## 1 螺旋槽中心丝三维实体模型

### 1.1 建立三维实体模型

采用 SolidWorks 软件<sup>[21-22]</sup>,建立不同螺旋槽规格的钢绞线中心丝三维实体模型,将模型导入 ANSYS 中进行应力分析.螺旋槽的截面形式为圆的一部分,如图 1 所示.圆柱面上,圆柱螺旋线的切线与通过切点的圆柱面直母线之间所夹的锐角  $\alpha$  称为螺旋角,  $\tan \alpha = \frac{2\pi R}{L}$ ,螺旋角的定义图如图 2 所示.以螺旋角  $\alpha = 45^\circ$ 、槽深  $d = 0.3 \text{ mm}$ 、槽宽  $b = 1.4 \text{ mm}$ 、钢绞线中心丝半径  $R = 2.5 \text{ mm}$  为例,建立三维实体模型如图 3 所示.

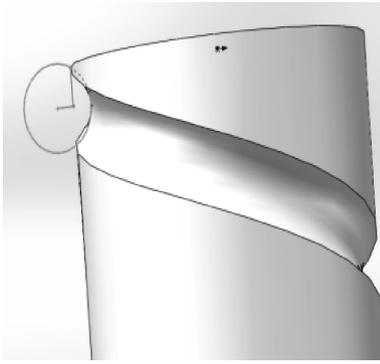
笔者建立螺旋角分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、槽深分别为  $0.3 \text{ mm}$ 、 $0.4 \text{ mm}$ 、 $0.5 \text{ mm}$ 、槽宽分别为  $1.0 \text{ mm}$ 、 $1.2 \text{ mm}$ 、 $1.4 \text{ mm}$  的钢绞线中心丝模型进行应力对比分析.

### 1.2 模型分析

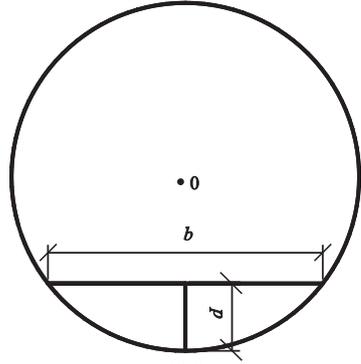
(1) 导入模型及网格划分.通过 SolidWorks 绘图软件绘制半径  $2.5 \text{ mm}$ 、螺旋槽深  $0.3 \text{ mm}$ 、槽宽  $1.4 \text{ mm}$ 、螺旋角  $45^\circ$  的螺旋槽中心丝三维实体模型,并导入 ANSYS 中如图 3 所示.模型采用四节点的四面体单元类型,即 solid285,材料属性参数为:弹性模量

$1.95 \times 10^5$  MPa,泊松比 0.3,采用智能网格

划分,结果如图4所示.



(a) 圆柱面螺旋槽



(b) 横截面

图1 螺旋槽截面形式

Fig.1 Spiral groove cross section

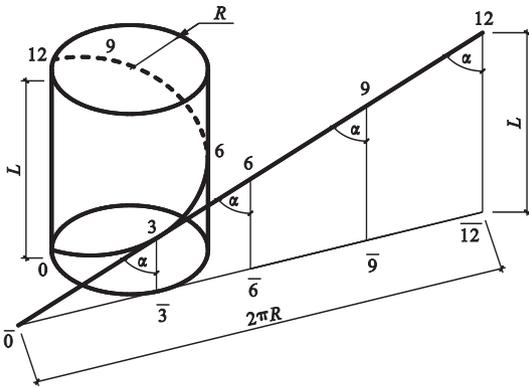


图2 螺旋角定义图

Fig.2 Definition of helix angle

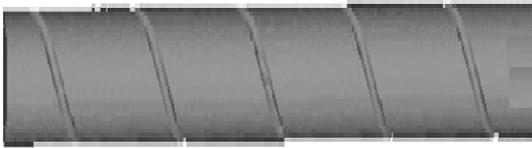


图3 螺旋槽中心丝三维实体模型图

Fig.3 3D entity model of spiral groove center wire

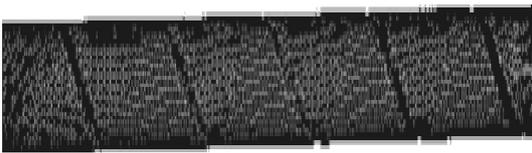


图4 螺旋槽中心丝模型网格划分图

Fig.4 Meshing model of spiral groove center wire

(2) 添加约束和荷载.对模型的一端面施加Z向的约束,并对该端面上任意一节点施加全部约束,保证模型不在其他方向无限移动.本次模拟在模型的另一端面施加拉应

力 1 300 MPa,约为极限抗拉强度的 70%.

(3) 运行 SLOVE 命令对模型进行求解运算,选择适当的求解器求解,保存结果.

## 2 结果对比分析

### 2.1 不同螺旋槽宽对钢绞线中心丝应力分析

以螺旋角  $45^\circ$ 、螺旋槽深 0.3 mm 为不变参数,改变螺旋槽宽,分析槽宽分别为 1.0 mm、1.2 mm、1.4 mm 对螺旋槽中心丝的力学性能影响.图5为三种不同螺旋槽宽的螺旋槽中心丝的第一主应力云图,从图中可知最大应力  $\sigma_{\max}$  和最大位移  $X_{\max}$ .运用 ANSYS 只显示螺旋槽内的应力分布,重点对比分析螺旋槽内的应力集中情况,图6为分别对应图5中螺旋槽中心丝的螺旋槽内的应力云图,云图中灰色表示不在应力显示范围内.由图5、图6得到的数据整理结果见表1.

当螺旋槽深不变,螺旋槽宽增大时,意味着深宽比的减小,也就是螺旋槽的相对深度减小.根据以上数据可知,对试件 A-1,槽的深宽比为 0.3,螺旋槽中心丝的最大应力为 3 054 MPa;对试件 A-2,槽的深宽比为 0.250,螺旋槽中心丝的最大应力为 2 867 MPa,相比试件 A-1,试件 A-2 的最大应力降低了 187 MPa;对试件 A-3,槽的深宽比为 0.214,螺旋槽中心丝的最大应力

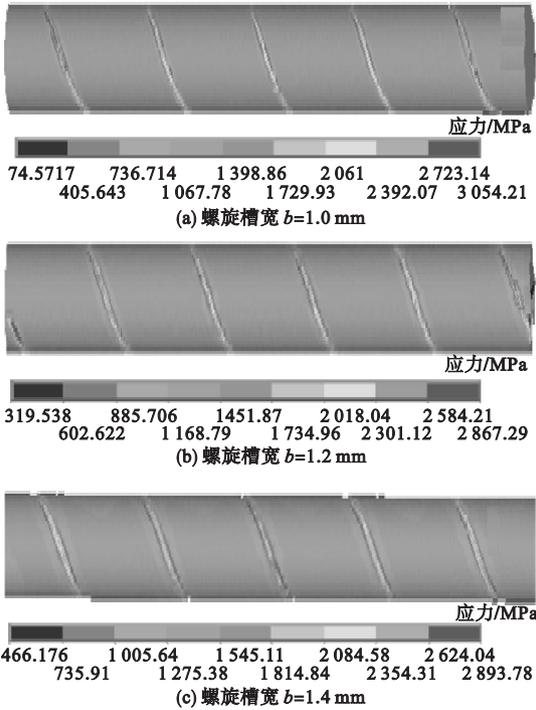


图 5 3 种不同螺旋槽宽的螺旋槽中心丝应力分布图

Fig. 5 Stress distribution of spiral groove center wire with three different groove width

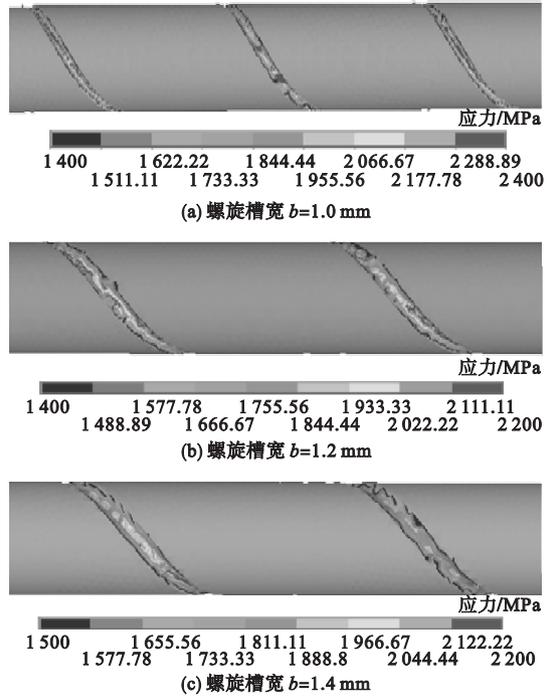


图 6 3 种不同螺旋槽宽的螺旋槽内应力分布图

Fig. 6 Stress distribution of internal spiral groove with three different groove width

表 1 不同槽宽的螺旋槽中心丝应力分析结果

Table 1 The analysis results of stress of spiral groove center wire with different groove width

试件编号	$R/mm$	试件参数			深宽比 $\lambda = \frac{d}{b}$	$\sigma_{\max}/$ MPa	$X_{\max}/$ mm	螺旋槽内力 范围/MPa	螺旋槽内应 力变化率/%
		$d/mm$	$b/mm$	$\alpha/(^\circ)$					
A-1	2.5	0.3	1.0	45	3 054	0.550	1 400 ~ 2 400	71.4	
A-2	2.5	0.3	1.2	45	2 867	0.553	1 400 ~ 2 200	57.1	
A-3	2.5	0.3	1.4	45	2 894	0.722	1 500 ~ 2 200	46.7	

为 2 894 MP, 相比试件 A-2, 试件 A-3 的最大应力升高了 27 MPa, 说明深宽比较小时, 螺旋槽中心丝的最大应力较小, 而本批构件的小深宽比是建立在增大螺旋槽宽度的基础上, 螺旋槽宽的增大可降低深宽比, 但同时增大了中心丝的削弱面积, 从而导致构件的最大应力开始有上升趋势. 当螺旋槽宽从 1.0 mm 增大到 1.2 mm 时, 螺旋槽内的应力变化率从 71.4% 降低至 57.1%; 当  $b$  从 1.2 mm 增大到 1.4 mm 时, 螺旋槽内应力变化率从 57.1% 降低至 46.7%, 应力变化减缓, 应力集中程度逐渐减小. 同样由图 6 可看出 A-1 的螺旋槽内应力云图的色标变化较

大, A-2 次之, A-3 的色标变化最平缓, 即应力集中情况相对最轻. 但随着螺旋槽宽的增大, 构件的最大位移  $X_{\max}$  有增大趋势, 螺旋槽宽从 1.0 mm 增加到 1.2 mm, 最大位移只从 0.550 mm 增大到 0.553 mm, 最大位移增加较小, 无明显的差别; 当螺旋槽宽增大到 1.4 mm 时, 最大位移为 0.722 mm,  $X_{\max}$  增大尤为明显, 说明螺旋槽宽增大到一定程度时, 对构件的最大位移影响较大.

## 2.2 不同螺旋槽深对钢绞线中心丝应力分析

以螺旋角  $45^\circ$ 、螺旋槽宽 1.4 mm 为不变参数, 改变螺旋槽深, 分析槽深分别为

0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm 对螺旋槽中心丝的力学性能影响. 图 7 为三种不同螺旋槽深的螺旋槽中心丝的第一主应力云图, 图 8 为分别对应图 7 中螺旋槽中心丝的螺旋槽内的应力云图. 由图 7 中得到的最大应力和最大位移以及图 8 中得到的螺旋槽内应力范围总结归纳结果如表 2 所示.

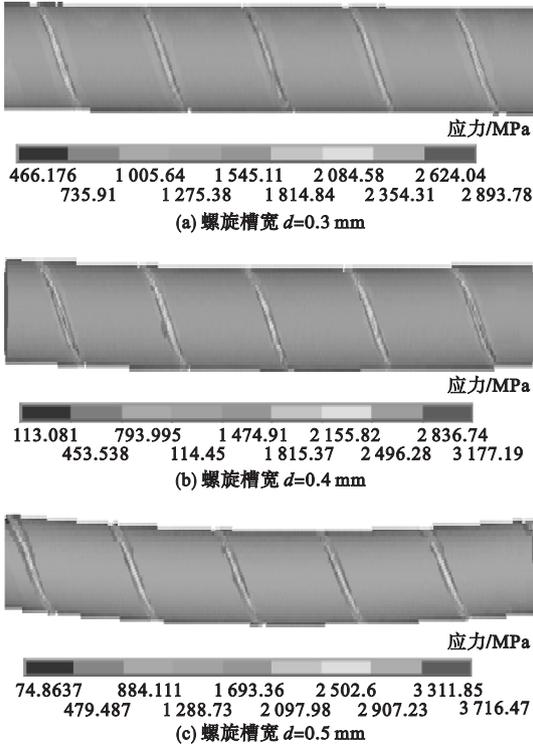


图 7 3 种不同螺旋槽深的螺旋槽中心丝应力分布图

Fig. 7 Stress distribution of spiral groove center wire with three different groove deep

表 2 不同槽深的螺旋槽中心丝应力分析结果

Table 2 The analysis results of stress of spiral groove center wire with different groove deep

试件编号	R/mm	试件参数			深宽比 $\lambda = \frac{d}{b}$	$\sigma_{max}/\text{MPa}$	$X_{max}/\text{mm}$	螺旋槽内应力/MPa	螺旋槽内应力变化率/%
		d/mm	b/mm	$\alpha/(\circ)$					
B-1	2.5	0.3	1.4	45	0.214	2 894	0.722	1 500 ~ 2 200	46.7
B-2	2.5	0.4	1.4	45	0.286	3 177	0.850	1 400 ~ 2 600	85.7
B-3	2.5	0.5	1.4	45	0.357	3 716	0.934	1 500 ~ 2 900	93.3

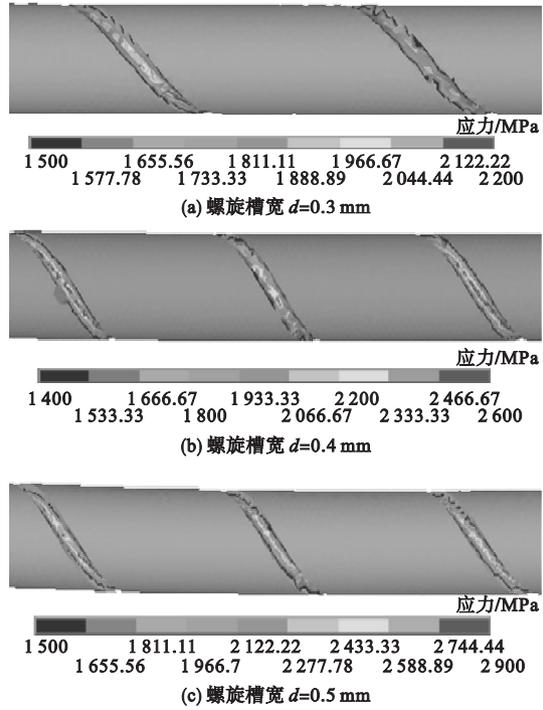


图 8 3 种不同螺旋槽深的螺旋槽内应力分布图

Fig. 8 Stress distribution of internal spiral groove with three different groove deep

当螺旋槽宽为 1.4 mm 时,螺旋槽深度从 0.3 mm 增加到 0.4,构件的深宽比从 0.214 增加到 0.286,最大应力从 2 894 MPa 增加到 3 177 MPa,增大了 283 MPa;螺旋槽深度从 0.4 mm 增加到 0.5,构件的深宽比从 0.286 增加到 0.357,最大应力从 3 177 MPa 增加到 3 716 MPa,增大了 539 MPa;说明随着螺旋槽深或深宽比的增大,构件的最大应力逐渐增大,当螺旋槽深度达到 0.5 mm 时,

对中心丝的最大应力影响较大. 当螺旋槽深从 0.3 mm 增大到 0.4 mm 时,中心丝的最大位移从 0.722 mm 增大至 0.850 mm,螺旋槽

内的应力变化率从 46.7% 上升至 86.7%;当螺旋槽深从 0.4 mm 增大到 0.5 mm 时,中心丝的最大位移从 0.850 mm 增大至

0.934 mm,螺旋槽内的应力变化率从 86.7% 上升至 93.3%,说明螺旋槽中心丝的最大位移和螺旋槽内应力变化率都随着槽深的增大而增大.由图 8 可观察到螺旋槽深为 0.3 mm 的螺旋槽内应力云图的色标变化相对最小,槽深为 0.4 mm 时螺旋槽内应力云图的色标变化较大,而槽深为 0.5 mm 时螺旋槽内应力云图的色标变化相对最大,同样说明螺旋槽深的增大,槽内的应力集中程度也随之增大.

### 2.3 不同螺旋角度对钢绞线中心丝应力分析

以螺旋槽深 0.3 mm、螺旋槽宽 1.2 mm 为不变参数,改变螺旋角,分析螺旋角度分别为 30°、45°、60°对螺旋槽中心丝的力学性能影响.图 9 为三种不同螺旋角度的螺旋槽中心丝的第一主应力云图,图 10 为分别对应图 7 中螺旋槽中心丝的螺旋槽内的应力云图.由图 9 中得到的最大应力和最大位移以及图 10 中得到的螺旋槽内应力范围归纳结果如表 3 所示.

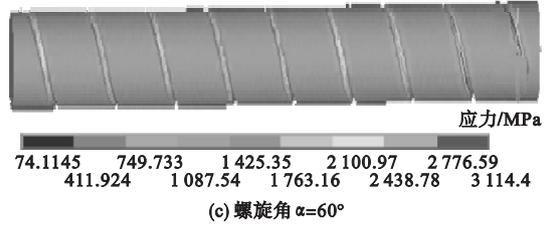


图 9 3 种不同螺旋角度的螺旋槽中心丝应力分布图

Fig. 9 Stress distribution of spiral groove center wire with three different groove deep

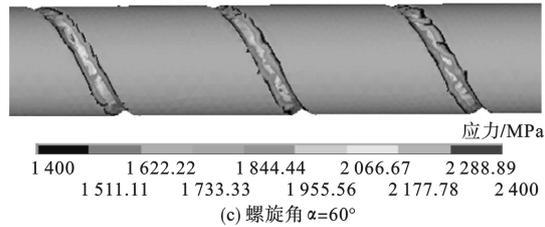
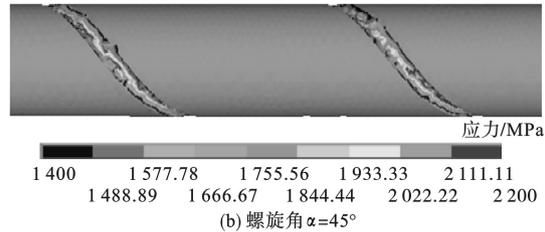
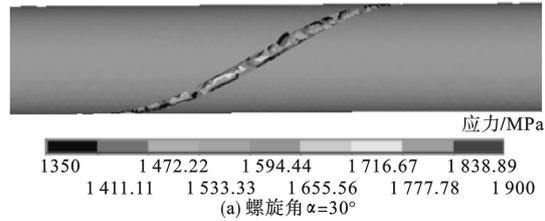


图 10 3 种不同螺旋角度的螺旋槽内应力分布图

Fig. 10 Stress distribution of internal spiral groove with three different spiral angle

表 3 不同螺旋角度螺旋槽中心丝的应力分析结果

Table 3 The analysis results of stress of spiral groove center wire with different spiral angle

试件编号	R/mm	试件参数			深宽比 $\lambda = \frac{d}{b}$	$\sigma_{max}/\text{MPa}$	$X_{max}/\text{mm}$	螺旋槽内 应力/MPa	螺旋槽内 应力变化率/%
		d/mm	b/mm	$\alpha/(^\circ)$					
C-1	2.5	0.3	1.2	30	0.25	2 772	0.543	1 350 ~ 1 900	40.7
C-2	2.5	0.3	1.2	45	0.25	2 867	0.553	1 400 ~ 2 200	57.1
C-3	2.5	0.3	1.2	60	0.25	3 114	0.615	1 400 ~ 2 400	71.4

当螺旋槽宽为 1.2 mm,槽深为 0.3 mm

时,构件的深宽比为 0.25 保持不变,螺旋角

由  $30^\circ$  增加到  $45^\circ$ , 最大应力由 2 772 MPa 增大到 2 867 MPa, 增大了 95 MPa, 最大位移从 0.543 mm 增大到 0.553 mm, 增大了 0.01 mm; 螺旋角由  $45^\circ$  增加到  $60^\circ$ , 最大应力由 2 867 MPa 增大到 3 114 MPa, 增大了 247 MPa, 最大位移从 0.553 mm 增大到 0.615 mm, 增大了 0.062; 可以得出最大应力和最大位移随着螺旋角度的增大而增大, 当增大到  $60^\circ$  时, 对  $\sigma$  和  $X$  增大幅度较为明显, 主要是因为随着角度的增大, 螺距减小, 同样长度范围内的螺旋槽圈数增加, 整体削弱程度提高, 从而对  $\sigma_{\max}$  和  $X_{\max}$  的影响较大. 螺旋角由  $30^\circ$  增加到  $45^\circ$ 、 $60^\circ$ , 螺旋槽内应力变化率从 40.7% 分别提高到 57.1%、71.4%, 分别提高了 16.4%、30.7%; 由图 9 和图 10 可看出, 随着螺旋角角度的增大, 螺旋槽越密集, 螺旋槽内的应力变化越剧烈, 应力集中程度较大, 说明螺旋角对中心丝的应力集中情况影响较大.

### 3 结 论

(1) 在螺旋角和螺旋槽深度一定时, 随着螺旋槽宽的增大, 最大位移增大, 最大应力和槽内应力变化率均减小. 可通过适当增大螺旋槽宽, 减小螺旋槽的相对深度来减小螺旋槽中心丝的应力集中情况.

(2) 螺旋槽中心丝的最大应力、最大位移和槽内应力变化率均随着螺旋槽深和螺旋角的增大而增大, 在三种变化参数中, 增大螺旋槽深对中心丝的应力集中情况最明显.

(3) 当螺旋槽的深宽比一定时, 可通过减小螺旋槽角度减缓螺旋槽中心丝应力集中程度.

### 参考文献

[1] 姜鹏, 朱万旭, 刘飞, 等. FAST 索网疲劳评估及高疲劳性能钢索研制[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 243-249.  
(JIANG Peng, ZHU Wanxu, LIU Fei, et al. Fatigue performance evaluation of fast cable-net

structures and development of a new type of steel cable system with high fatigue resistance [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(9): 243-249.)

- [2] 韦福堂, 朱万旭, 田蕾蕾. 国家天文台 FAST 工程索网安装施工技术[J]. 施工技术, 2014(2): 18-20.  
(WEI Futang, ZHU Wanxu, TIAN Leilei. Cable nets installation technology of national observatory fast engineering [J]. Construction technology, 2014(2): 18-20.)
- [3] 王玉婷, 王启明, 朱明, 等. 光纤光栅传感器在 500m 口径球面射电望远镜工程索网施工阶段的应用[J]. 中国机械工程, 2016, 20: 2759-2764.  
(WANG Yuting, WANG Qiming, ZHU Ming, et al. Applications of fiber grating sensor in construction stage of cable net for fast[J]. China mechanical engineering, 2016, 20: 2759-2764.)
- [4] KIM J M, KIM H W, PARK Y H, et al. FBG sensors encapsulated into 7-wire steel strand for tension monitoring of a prestressing tendon [J]. Advances in structural engineering, 2012, 15(6): 907-918.
- [5] 孙丽, 孙茜茜, 陈晨. 基于光纤光栅的钢筋腐蚀监测方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013(5): 919-924.  
(SUN Li, SUN Qianqian, CHEN Chen. The preliminary study of steel corrosion monitoring based on fiber bragg grating [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013(5): 919-924.)
- [6] HUANG J, ZHOU Z D, ZHANG D S, et al. Online monitoring of wire breaks in prestressed concrete cylinder pipe utilising fibre bragg grating sensors [J]. Measurement, 2016, 79: 112-118.
- [7] 郝庆多, 王言磊, 欧进萍. GFRP/钢绞线复合筋黏结性能的试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(2): 177-182.  
(HAO Qingduo, WANG Yanlei, OU Jinping. Bond behavior of GFRP/steel wire composite rebars experimental study [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2008, 24(2): 177-182.)
- [8] 邓年春, 岑晓鹏, 孙利民, 等. 基于 GFRP-OFBG 筋的桥梁缆索力测量技术研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2010(2): 81-87.  
(DENG Nianchun, CEN Xiaopeng, SUN Limin, et al. Study on cable force measurement

- based on smart GFRP-OFBG bar [J]. Journal of Shijiazhuang tiedao university (natural science), 2010(2):81-87.)
- [9] CERONI F, CUZZILLA R, PECCE M. Assessment of performance of steel and GFRP bars as injected anchors in masonry walls [J]. Construction and building materials, 2016, 123: 78-98.
- [10] KESAVAN K, RAVISANKAR K, SENTHIL R, et al. FBG sensor technology to interfacial strain measurement in CFRP-strengthened concrete beam [J]. Experimental techniques, 2012, 39(5):21-29.
- [11] FERNANDEZ R, GUTIERREZ N, JIMENEZ H, et al. On the structural testing monitoring of CFRP cockpit and concrete /CFRP pillar by FBG sensors [J]. Advanced engineering materials, 2016, 18(7):1289-1298.
- [12] JIANG S C, WANG J, SUI Q M, YE Q L. Measurement of CFRP elastic modulus based on FBG reflectance spectrum analysis [J]. Measurement, 2016, 7(7):240-245.
- [13] BASU M, GHORAI S K. Strain sensing in fiber-reinforced polymer laminates using embedded fiber bragg grating sensor [J]. Fiber and integrated optics, 2014, 33(4):279-298.
- [14] LOU T J, LOPES M R, LOPES A V. Time-dependent behavior of concrete beams prestressed with bonded AFRP tendons [J]. Composites part B, 2016, 97:1-8.
- [15] 吴小军, 金广谦, 赵亚军, 等. 预应力碳/玻混杂纤维筋混凝土梁受弯性能研究 [J]. 建筑结构, 2011(8):120-123.  
(WU Xiaojun, JIN Guangqian, ZHAO Yajun, et al. Research on flexural behaviors of prestressed concreted beams reinforced with C/G HFRP bar [J]. Building structure, 2011(8):120-123.)
- [16] 吴小军, 金广谦, 朱国平, 等. 碳/玻混杂纤维筋预应力混凝土梁抗弯性能的有限元分析 [J]. 纤维复合材料, 2010(1):3-7.  
(WU Xiaojun, JIN Guangqian, ZHU Guoping, et al. Finite element analysis bending characteristic of prestressed concrete beams reinforced with C/G HFRP bar [J]. Fiber composites, 2010(1):3-7.)
- [17] 周辉. 复合 FRP-OFBG 的索式智能结构研究和工程应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
(ZHOU Hui. Research and practical application of smart cable structure based on FRP-OFBG [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.)
- [18] 杜彦良, 邵琳, 李剑芝, 等. 适用于斜拉索的智能混杂纤维复合材料的研究 [J]. 功能材料, 2008, 39(2):282-285.  
(DU Yanliang, SHAO Lin, LI Jianzhi, et al. Study on the intelligent hybrid composites suitable for stayed cable [J]. Journal of functional materials, 2008, 39(2):282-285.)
- [19] 张洪才. ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
(ZHANG Hongcai. ANSYS 14.0 theoretical analysis and engineering application examples [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.)
- [20] 王新荣. ANSYS 有限元基础教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.  
(WANG Xinrong. ANSYS finite element foundation tutorial [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2015.)
- [21] 北京兆迪科技有限公司. Solidworks 2012 宝典 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
(Beijing Zalldy Technology Corporation. Solidworks 2012 collection [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.)
- [22] 王在伟, 焦青. SolidWorks 与 ANSYS 之间的数据交换方法研究 [J]. 煤矿机械, 2011(9):248-250.  
(WANG Zaiwei, JIAO Qing. Methods of data exchange between solidworks and ANSYS [J]. Coal mine machinery, 2011(9):248-250.)