DOI:10.11918/202412066

悬索桥主缆缠丝张力损失特征与机理

肖 军[1,2,3],霰建平[1,2],仝朝康[1,2],马建勇[1,2],王培杰[1,2],刘永健[1,3]

(1.陕西省"四主体一联合"桥梁工程智能建造技术校企联合研究中心,西安 710199;
2.中交第二公路工程局有限公司,西安 710065;3.长安大学 公路学院,西安 710064)

摘 要:为研究悬索桥主缆缠丝的防护效果,采用精细化有限元模型结合实桥试验的方法研究了缠丝过程中的缠丝张力变化,并基于验证后的有限元模型分析了缠丝导入力、主缆直径及主缆径向弹性模量对缠丝张力损失的影响,提出了考虑缠丝阶段张力损失的缠丝导入力计算公式并改进了现有缠丝工艺。试验研究结果表明:缠丝阶段的张力损失主要是由后续缠丝张力引起主缆径向变形导致,张力损失呈现先快后慢,然后逐渐趋于稳定的特征,缠丝阶段的张力损失在26.3%~37.3%之间;测试位置处缠丝张力稳定时,缠丝机较测试位置处平均前进距离为25.2 cm。有限元分析结果表明:主缆直径及径向弹性模量对缠丝力损失比例影响显著,且主缆直径及径向弹性模量与缠丝力损失比例均成反比例关系;主缆直径为851.9 mm情况下,主缆直径增大50%,缠丝力损失比例从27.8%减小至13.7%,主缆径向弹性模量从1 052 MPa增加至3 052 MPa,缠丝力损失从27.8%减小至11.3%。在试验及有限元分析结果基础上,提出了考虑缠丝阶段张力损失的导入力计算公式,进一步优化了缠丝导入力的计算;提出了一种基于缠丝张力损失机理的新型缠丝工艺,可有效减小缠丝过程中的张力损失。

关键词:桥梁工程;主缆缠丝;缠丝试验;缠丝张力损失;缠丝有限元仿真;安全系数;主缆预紧
中图分类号:U443 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0166-09

Characteristics and mechanisms of tension loss in the helical wrapping wires of main cables in suspension bridges

Xiao Jun[1,2,3], Xian Jianping[1,2], Tong Chaokang[1,2], Ma Jianyong[1,2], Wang Peijie[1,2], Liu Yongjian[1,3]

(1. Shaanxi Union Research Center of University and Enterprise for Bridge Intelligent Construction, Xi'an 710199, China;
2. CCCC Second Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an 710065, China;
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To investigate the protective effectiveness of strand wrapping wire in suspension bridge main cables, a method combining refined finite element models with full-scale bridge testing was adopted to study the variations in wrapping wire tension throughout the process. Based on the validated finite element models, the impacts of the wrapping wire insertion force, main cable diameter, and main cable radial elastic modulus on tension loss were analyzed. A formula for calculating the wrapping wire insertion force, which takes into account tension loss during the wrapping wire stage, was proposed, and the existing wrapping wire process was improved. Experimental results indicate that tension loss during the wrapping wire stage is primarily caused by radial deformation of the main cable due to subsequent wrapping wire tensions. The tension loss exhibits an initial rapid decrease, followed by a slower rate, and gradually stabilizes, ranging between 26.3% and 37.3%. When the wrapping wire tension stabilizes at the test location, the wrapping wire machine advances an average distance of 25.2 cm relative to the test position. Finite element analysis results reveal that the main cable diameter and radial elastic modulus have significant effects on the proportion of wrapping wire force loss, with both factors showing an inverse proportional relationship with the force loss ratio. In the case of a main cable with a diameter of 851.9 mm, an increase in the main cable diameter by 50% reduces the wrapping wire force loss ratio from 27.8% to 13.7%, and an increase in the main cable radial elastic modulus from 1 052 MPa to 3 052 MPa reduces the force loss from 27.8% to 11.3%. Based on the experimental and finite element analysis results, a formula for calculating the insertion force that considers tension loss during the wrapping wire stage was further refined. Additionally, a novel wrapping wire process based on Mechanism of wrapping wire tension loss was introduced, which can effectively reduce tension loss during the wrapping wire process.

Keywords: bridge engineering; main cable wrapping wire; wrapping wire test; wrapping wire tension loss; finite element simulation of wrapping wire; safety factor; main cable pre-tightening

收稿日期:2024-12-23;**录用日期**:2025-01-16;**网络首发日期**:2025-03-27
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250327.1516.002
作者简介:肖 军(1987—),男,工学博士,高级工程师
通信作者:霰建平,xianjianping@vip.163.com

主缆作为悬索桥的主要承重构件，其耐久性直接关系到桥梁的使用寿命和安全性[1]。缠丝作为主缆防护的关键环节，通过密匝缠绕一层镀锌钢丝，不仅能有效阻挡雨水和雾气凝结水的侵入，还能减缓介质对主缆的腐蚀，从而延长主缆的使用寿命[2-6]。此外，缠丝还能与表层涂装配合，形成主缆外气密防护层，为主缆除湿系统提供基础保障，同时保证主缆内部微环境的稳定，显著提升主缆的防腐性能。因此，主缆缠丝是悬索桥建设与维护中不可或缺的重要步骤。

设计合适的缠丝导入力是主缆防护的关键，若缠丝力过小，缠丝施工后主缆受温度、荷载等作用所引起的缆径变化可能会导致缠丝无法与主缆密贴[7]，难以起到防护效果。缠丝力过大则使用软钢丝强度得不到保证，高强钢丝又很难加工成异形钢丝，而且对缠丝机的性能要求也更高[8]。缠丝设计导入力大小主要与缠丝张力损失有关，缠丝张力损失主要由以下 3 个部分造成[9]：1）荷载作用下主缆拉力变化后的泊松效应；2）体系温差导致缠丝内力变化；3）缠丝后的松弛效应。对于前两部分的物理含义和计算过程较为明确，已有不少学者通过理论计算阐明[10]。张波等[11]基于已经考虑主缆与缠丝之间温差、主缆孔隙率和后期运营过程中索力变化 3 个因素的原设计缠丝导入力，考虑桥面铺装后主缆的二次收缩引起索力变化造成的缠丝力损失，对原设计值进行修正，得到铺装前的缠丝导入力。周汉国等[12]针对坝陵河大桥施工特点，在借鉴已有研究成果的基础上，对主缆拉力增量因素、温度影响因素等进行考虑研究，对缠丝导入力的计算方法进行完善。巫书郁等[13]基于结构的变形协调条件分析主缆拉力变化对缠丝张力的影响，并计算了缠丝所需的最低张紧力。

关于缠丝后的松弛效应，目前仍未研究清楚，计算主要靠经验确定。导入力计算主要采取将前两部分损失相加后乘以安全系数（储备系数）的方法来考虑缠丝松弛效应。根据日本的缠丝导入力损失测试验[14]，最终缠丝张力仅为初始张力的 1/4 ~ 1/3，综合考虑主缆断面弹簧常数和钢丝的泊松效应及缠丝温度变化引起的拉力下降，考虑安全系数为 3 ~ 4。唐茂林等[15]通过试验发现缠丝过程中，后期缠丝会减小前期缠丝的张力，根据试验结果并综合考虑各种因素确定西堠门大桥的安全系数为 3.0。姚琨等[16]计算了活载和温度引起的缠丝力损失后考虑安全储备系数为 2.5 ~ 3.0 计算了马鞍山长江公路大桥最终所需的缠丝力。田越[17]通过试验研究了缠丝力的损失情况，研究结果表明：所有测试断面的缠丝拉力损失都集中在测试断面之后约 40 cm 处，最大的缠丝拉力损失率达到 76.6%，普遍情况下，缠丝拉力的损失率都在 30% 以上。Zhang 等[18]通过试验研究发现缠丝张力越大，其损失越大，张力损失最终可达到约 2/3。

综上所述，厘清缠丝后尤其是缠丝阶段的张力损失机理，既是设计导入力计算的需要，也是保证缠丝力有效存续的关键。因此本文对某大跨度悬索桥主缆缠丝进行了精细化有限元仿真及实桥试验，研究了缠丝阶段张力的损失特征及损失机理，探讨了不同参数对缠丝阶段张力损失的影响，对导入力计算公式进行了优化，并提出了缠丝施工的工艺改进方法。

1　缠丝导入力计算

缠丝导入力在设计时需要考虑缠丝所有阶段的损失，从而保证缠丝圈对主缆表面压力不为 0。缠丝张力损失主要由 3 个因素引起：主缆受载后的直径变化 ΔT_r、系统温差效应 ΔT_w 以及缠丝后的松弛效应（以安全系数 n 来考虑）。导入力计算公式为

$$T = n(\Delta T_r + \Delta T_w) \tag{1}$$

对于主缆受载后的直径变化及系统温差效应两个因素的计算理论目前已较为完善，而对于缠丝松弛影响，由于其损失较大且机理不明确，所有学者均采用了将前两个因素造成损失相加后乘以安全系数的方法来计算导入力。不同学者采用的系数也不尽相同，如文献[12]中取安全系数 n 为 2.5 ~ 3.0，文献[13]中取安全系数 n 为 2.5（圆形钢丝）和 3.0（S 形钢丝），文献[14]中取安全系数 n 为 3.0 ~ 4.0，文献[16]中取安全系数 n 为 3.0。根据日本对 8 座大桥缠丝施工后的检测（表 1），悬索桥主缆缠丝施工完成后，由于缠丝松弛导致主缆缠丝内部张力减小为初始导入张力的 1/4 ~ 1/3 左右。因此本文将深入探讨缠丝阶段的张力损失机理，为后续导入力计算提供依据。

如图 1 所示，缠丝过程中，具有一定张力的缠丝会导致主缆发生径向变形，后续缠丝引起主缆径向变形后可能会造成前期缠丝松弛，这也许是缠丝阶段张力损失的关键因素。下面将通过精细化有限元模拟结合实桥试验对这一问题进行研究。

表 1 悬索桥主缆缠丝张力检测

Tab. 1 Tension measurement of main cable wrapping wire in suspension bridges

桥名	主缆直径/mm	缠绕钢丝断面	缠丝施加张/N	残余张力/N	张力残留率/%
平户大桥	365	圆形	750	240	32
大鸣门大桥	840	圆形	2 300	660	29
南备赞濑户大桥	1 062	圆形	2 960	750	25
Rainbow Bridge	771	圆形	2 000	560	28
明石海峡大桥	1 122	圆形	2 650	560	21
白鸟大桥	472	S 形	2 100,2 700	840,800	40,30
来岛第一大桥	431	S 形	2 000 ~ 2 800		38
来岛第三大桥	636	S 形	2 020 ~ 2 800		42

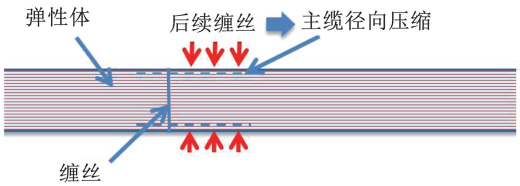


图 1 缠丝张力损失机理

Fig. 1 Mechanism of wrapping wire force loss

2 主缆缠丝精细化仿真

2.1 有限元模型

采用有限元分析软件对主缆缠丝过程进行精细化建模,图 2 为主缆及缠丝的有限元模型。其中,主缆采用八节点六面体实体单元,材料本构采用弹性材料模拟,缠丝则采用梁单元来模拟,材料本构采用双线性弹塑性随动强化模型,弹性模量为 150 GPa,泊松比为 0.3。采用库仑摩擦模型和罚函数法描述主缆与缠丝间的接触,摩擦系数设置为 0.15,由于缠丝对主缆作用为局部效应,不影响结构整体受力,故主缆两侧均采用固定端约束。

为准确模拟主缆的变形行为,需要选取合理的主缆径向弹性模量。根据文献[14]的研究,主缆的径向弹性模量与孔隙率相关,本次模拟按主缆 19% 的孔隙率取主缆径向弹性模量为 1 052 MPa。通过降温法对缠丝施加预紧力来模拟缠丝导入力,根据实际施工数据对单圈缠丝施加的初始导入力为 2.3 kN。如图 2 所示,为精确模拟缠丝的作用效应,将主缆缠丝部位单元网格进行细化处理。通过分析单圈缠丝作用下距缠丝断面不同位置处主缆截面的径向变形,来研究后续缠丝对前期缠丝张力的影响。

2.2 数值模拟结果

图 3 为距离缠丝断面不同位置处的主缆径向变形,可以看到,距离测试断面越远,主缆的径向变形越小,其变形呈现出刚开始快速减小,然后逐步趋于稳定的非线性变化特征。在距离测试断面 30 cm 左右时趋于 0。这充分说明缠丝过程不仅影响其所在主缆截面径向变形,而且对其余主缆截面也有着显著的影响。

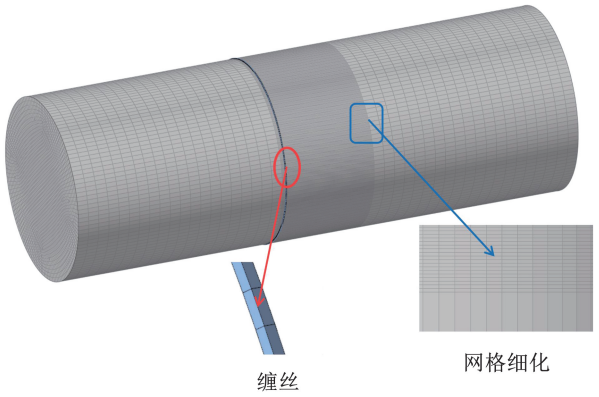


图 2 缠丝有限元模型

Fig. 2 Wrapping wire finite element model

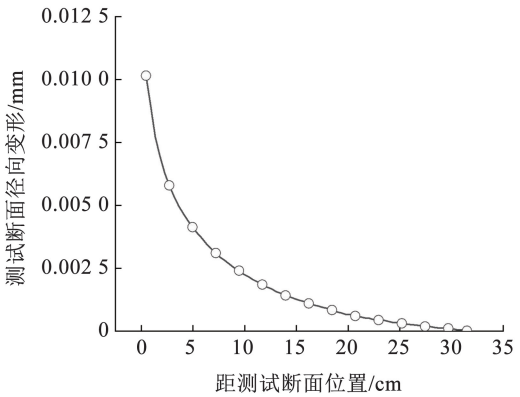


图 3 主缆径向位移

Fig. 3 Radial displacement of the main cable

根据模拟结果,可以得出测试断面缠丝张力影响线,如图 4 所示,x 为缠丝张力最大纵向影响距离,距离测试断面越近,后续缠丝所引起测试断面缠丝张力损失效应越显著,缠丝距离测试断面越远,则引起测试断面的缠丝张力变化越小。

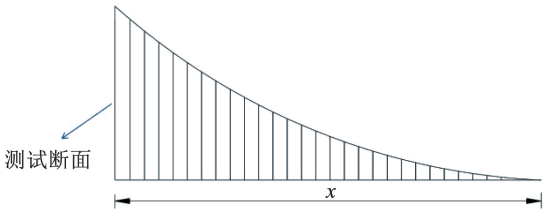


图 4　测试断面缠丝张力影响线

Fig. 4　Impact line of wrapping wire tension in the test section

将图 3 中主缆所有截面径向变形累计，可以得到后续缠丝造成主缆测试断面的总位移，如图 5 所示。主缆径向位移可以通过式(2)转换为缠丝张力损失值。

$$\Delta F = \frac{\Delta d}{d} ES \tag{2}$$

式中：ΔF 为缠丝力损失值，Δd 为主缆径向位移，d 为主缆直径，E 为缠丝弹性模量，S 为缠丝公称断面积。

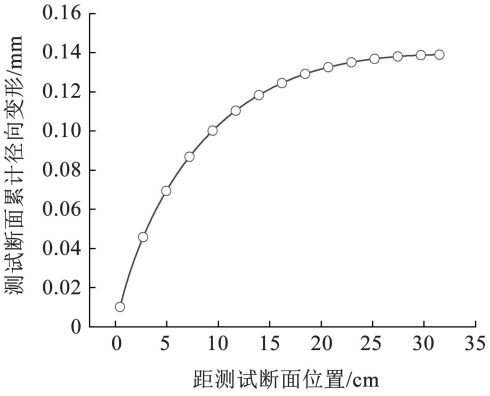


图 5　主缆径向累计位移

Fig. 5　Accumulated radial displacement of the main cable

图 6 为计算得到的缠丝力损失比例，有限元模拟中缠丝张力损失比例为 27.8%，缠丝张力损失比例较大，这也充分说明了后续缠丝所引起的主缆径向变形是导致缠丝张力损失的重要原因。

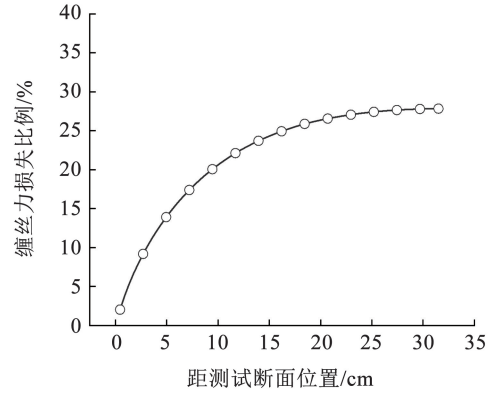


图 6　缠丝张力损失比例

Fig. 6　Loss rule of wrapping wire tension

2.3　模型验证

2.3.1　主缆缠丝试验

本文以南京龙潭长江大桥为研究对象，其为主跨 1 560 m 的钢箱梁悬索桥，索夹内主缆直径为 841.5 mm，索夹外为 851.9 mm(图 7)。主缆采用腻子 + 钢丝缠绕 + 缠包带进行防护，主缆缠丝采用 3 mm高 S 形镀锌铝合金钢丝(图 8)。

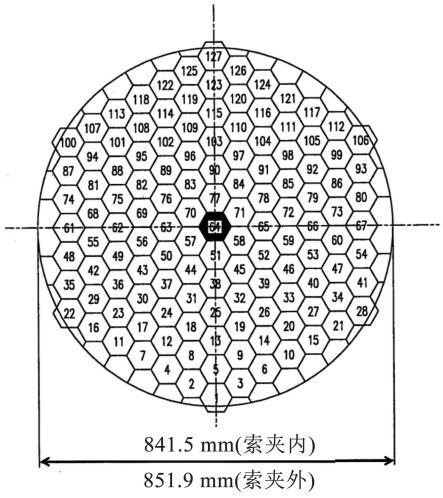


图 7　主缆截面

Fig. 7　Section of the main cable

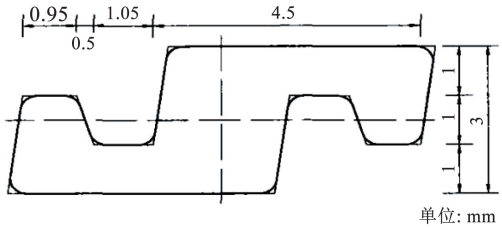


图 8　S 形钢丝断面

Fig. 8　Section of S-shaped steel wire

2.3.2　试验测点布置

主缆缠丝过程中缠丝机采用的是双头缠丝，图 9为缠丝施工过程，在测试时，测点布置在其中一头钢丝的最外圈中。如图 10 所示，在缠丝上粘贴应变片测试缠丝过程中的应变时程曲线，从而得到缠丝张力变化，由于缠丝尺寸较小，本次测试采用规格 2 mm × 1 mm，电阻为 120 Ω 的电阻应变片进行测试。如图 11 所示，本次试验共设置 6 个测点，通过测量缠丝实时应变来获取缠丝张力变化，单圈缠丝的张力损失为所有测点平均值。结合现场施工条件，选择两索夹中间缠丝段进行缠丝张力测试，为保证试验结果的可靠性和稳定性，本次选取 5 组相同工况进行试验。



图 9 缠丝机

Fig. 9 Wrapping wire machine



图 10 粘贴应变片

Fig. 10 Paste the strain gauge

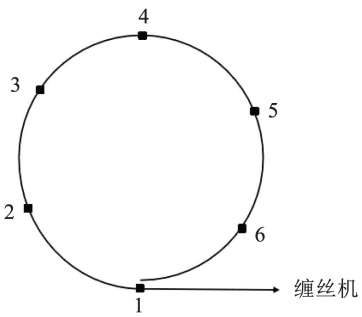


图 11 测点布置

Fig. 11 Arrangement of measuring points

2.3.3 试验与有限元结果对比

图 12 为缠丝力损失变化规律,由图 12 可以看到,试验所有工况缠丝力损失规律相同,缠丝机启动后,缠丝张力在初始的一段时间内快速衰减,然后逐渐趋于稳定,而且图中可以看到有限元模拟结果与试验结果基本一致,缠丝力损失都呈现出先快速衰减,然后逐渐趋于稳定的特征,充分说明了本文建立的有限元模型可以准确反映缠丝阶段中缠丝张力的变化。

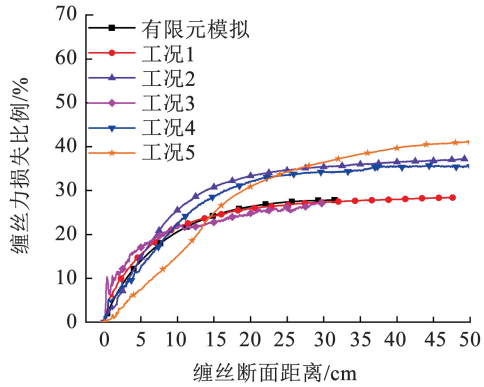


图 12 缠丝力变化规律

Fig. 12 Variation rule of the wrapping wire force

图 13 为所有工况下测试断面缠丝力稳定时的缠丝机前进距离,即缠丝张力纵向影响距离,所有试验工况下,其值在 23 ~ 30 cm 之间,平均值为 25.2 cm,也就是说,缠丝机在距离先期缠丝圈 30 cm 后缠丝时,先期缠丝圈力就基本不受后续缠丝的影响,从试验与有限元结果对比可以看出,在缠丝张力纵向影响距离上有限元与试验结果基本吻合,这说明本文的有限元模型可以较为准确的反映后续缠丝对测试断面缠丝张力的影响。图 14 中可以看到,所有试验工况缠丝损失比例在 26.3% ~ 37.3% 之间,整体损失较大,说明缠丝阶段中的损失是缠丝张力所有损失的重要组成部分,从试验与有限元结果对比发现,试验平均值为 31.1%,有限元模拟缠丝损失比例为 27.8%,仅相差 3.3%,这也充分说明后续缠丝引起的主缆径向变形是导致的缠丝张力损失的主要原因,同时也验证了本文建立的有限元模型可以较好的反应缠丝张力损失状况。

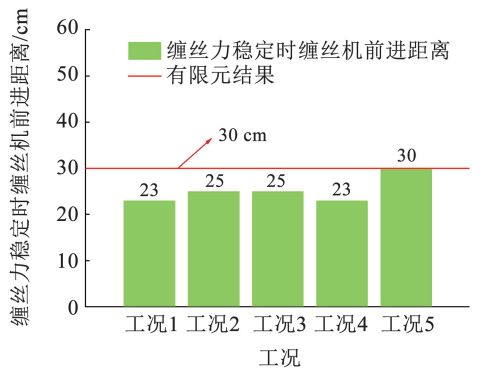


图 13 缠丝力稳定时缠丝机前进距离

Fig. 13 Forward distance of the wrapping wire machine when the winding force is stable

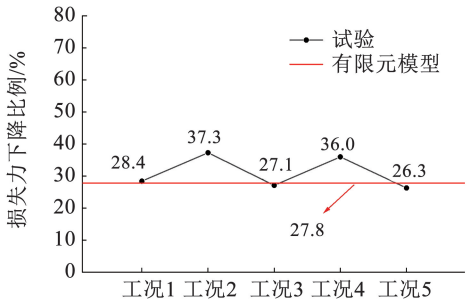


图 14　有限元模拟与试验对比

Fig. 14　Finite element simulation and test comparison

3　参数分析

为了探讨更多因素对缠丝张力损失的影响，以 2.1 节中建立并经过验证的有限元模型为基准进行不同缠丝导入力、主缆直径、主缆径向弹性模量下的参数分析。

3.1　初始导入力

以上述模型为基准工况，保持其余参数不变，研究导入力分别为 1.8、2.3、2.8 kN 作用下的缠丝张力损失规律，图 15、16 为不同导入力下的缠丝张力损失规律及损失比例，随着缠丝导入力的增加，缠丝张力的损失规律及损失比例不变，说明导入力不影响缠丝力的损失比例。

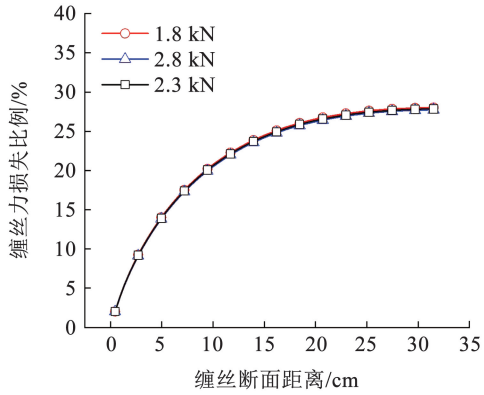


图 15　不同导入力下的缠丝力损失规律

Fig. 15　The law of force loss for wrapping force under different initial tension forces

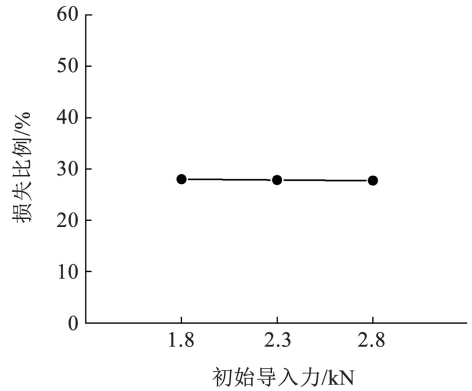


图 16　不同导入力下的缠丝力损失比例

Fig. 16　The ratio of force loss for wrapping force under different initial tension forces

3.2　主缆直径

为分析主缆直径对缠丝力损失的影响，分别计算了 1.0d ~ 1.5d 直径下的缠丝张力变化，其中 d = 851.9 mm。如图 17、18 所示，主缆直径变化对缠丝力损失的影响较为显著，随着主缆直径由 1.0d 增大至 1.5d(1 278 mm)时，缠丝张力损失从 27.8% 减小至 13.7%。图 17 中可以看到，不同直径工况下，缠丝纵向影响距离不变，这也说明缠丝对主缆钢丝的影响范围与主缆直径无关。图 18 可以看到，随着主缆直径增大，缠丝力损失比例呈现出非线性减小趋势。这可能是由于主缆直径的增加使得其单圈缠丝长度同步增大，而导入力不变时，缠丝的应变会相应的减小，进而导致缠丝力损失减小。

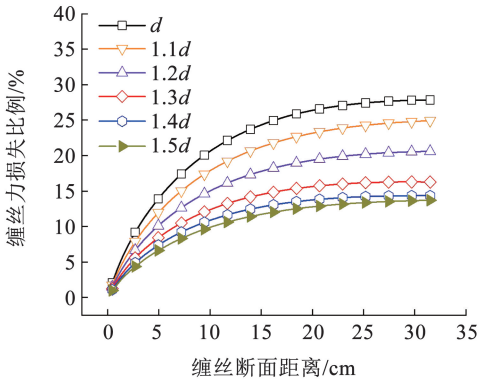


图 17　不同主缆直径的缠丝力损失规律

Fig. 17　The law of force loss for wrapping force under different diameters in main cable

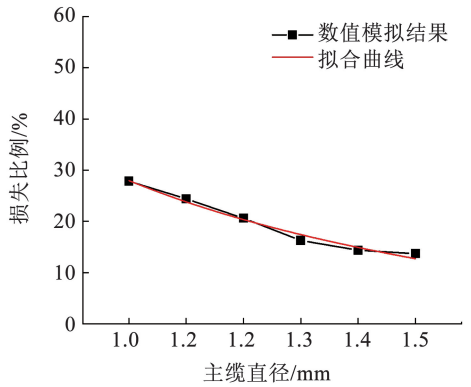


图 18　不同主缆直径的缠丝力损失比例

Fig. 18　The ratio of force loss forwrapping force under different diameters in main cable

3.3　主缆径向弹性模量

保持主缆直径及导入力不变，分别取主缆径向弹性模量为 1 052、1 552、2 052、2 552、3 052 MPa，分析径向弹性模量对缠丝力的影响。图 19、20 为不同主缆径向弹性模量下的缠丝张力损失结果，随着径向弹性模量的增加，缠丝张力损失比例同样呈现出

非线性减小趋势，当径向弹性模量由 1 052 MPa 增加至 3 052 MPa 时，缠丝力损失从 27.8% 减小为 11.3%。这是因为主缆径向弹性模量的增加抑制了主缆的径向变形从而明显减小了缠丝的张力损失，这说明如果在缠丝过程中通过预紧等方式增加前方未缠丝段主缆的径向弹性模量可以有效减小缠丝过程中的缠丝力损失。

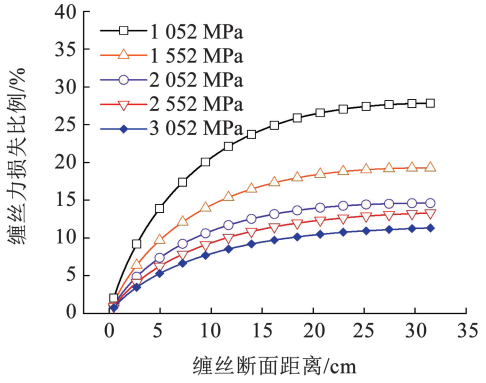


图 19 不同主缆径向弹性模量的缠丝力损失规律

Fig. 19 The law of force loss for wrapping force under the different radial elastic modulus in main cables

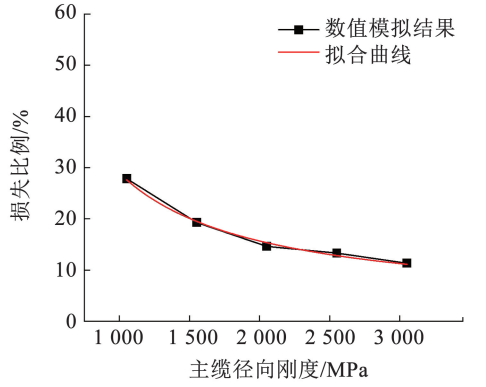


图 20 不同主缆径向弹性模量的缠丝力损失规律

Fig. 20 The ratio of force loss for wrapping force under the different radial elastic modulus in main cables

3.4 参数理论分析

缠丝的受力状况如图 21 所示，在缠丝张力的作用下，主缆受到均匀压应力 P。对缠丝受力进行积分可得缠丝张力为

$$2T = \int_0^{\pi} P \cdot C \cdot \sin\varphi \cdot \frac{D}{2} \mathrm{d}\varphi \tag{3}$$

由式(3)可得

$$T = \frac{1}{2} P \cdot C \cdot D \tag{4}$$

式中：C 为缠丝直径或边长，D 为主缆直径。

因为实际主缆为具有一定孔隙率的钢丝集群，缠丝作用下，主缆直径会发生变化，由 D_1 减小为 D_2，假定主缆弹性模量为 E，缠丝初始导入力为 T_0，根据式(4)可得主缆的径向应变为

$$\varepsilon_z = \frac{2T_0}{ECD_1} \tag{5}$$

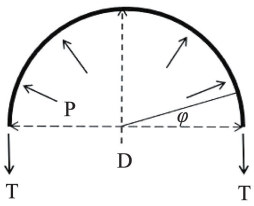


图 21 主缆缠丝受力平衡状态

Fig. 21 Force balance state of the main cable wrapping wires

缠丝应变为

$$\varepsilon_c = \frac{\pi D_2 - \pi D_1}{\pi D_1} = \varepsilon_z \tag{6}$$

缠丝张力损失比例 a 为

$$a = \frac{\varepsilon_c E_C}{T_0} \tag{7}$$

式中 E_c 为缠丝弹性模量。

联立式(5)～(7)，可得

$$a = \frac{2E_C}{ECD_1} \tag{8}$$

由式(8)可以看到，除缠丝本身性质以外，缠丝张力损失比例主要与主缆直径、主缆径向弹性模量有关，且均成反比例关系，而与导入力大小无关。这与 3.1～3.3 节数值模拟分析结果基本一致。

3.5 导入力计算公式优化

根据第 1 节缠丝导入力计算的相关研究，导入力计算主要由三部分构成，分别为主缆受载后直径变化、系统温差效应及缠丝松弛效应引起的张力损失，本文研究表明，缠丝阶段中缠丝张力的损失较大，为进一步完善计算公式，在导入力计算中考虑缠丝阶段损失 T_c，并引入新的安全系数 n_1，此时设计导入力计算公式为

$$T = n_1(\Delta T_r + \Delta T_w + \Delta T_c) \tag{9}$$

联立式(1)和式(9)，可得

$$n_1 = \frac{n}{n\Delta T_c + 1} \tag{10}$$

由于缠丝后松弛损失可达到 2/3[14]，因此多数学者取安全系数 n 为 3，根据本文研究结果，缠丝过程中缠丝受主缆径向变形产生的损失可达 30% 左右，若取 ΔT_c 为 1/3，则此时计算得到 $n_1 = 1.5$，安全系数 n_1 取为 1.5 即可。式(9)的提出更加精细化了设计导入力的计算，同时也为导入力的优化设计提供了理论依据。

4　基于缠丝张力损失机理的缠丝工艺改进

基于前面结果分析可知，缠丝阶段的缠丝张力损失主要由后续缠丝引起主缆径向变形产生，为减小此部分损失，提出一种预紧缆缠丝施工工艺，如图 22所示，设计了一种带预紧装置的缠丝机，在已有缠丝机的基础上增加一个预夹紧装置（图 23），放置于缠丝装置前方，当缠丝机进行缠丝工作时，首先通过预夹紧装置中的钢丝绳对前方主缆进行预紧，然后再通过缠丝机对预紧后的主缆进行正常缠丝。其基本原理为：在缠丝过程中，通过对预缠丝段主缆的预紧提前使主缆产生径向变形，从而在后续缠丝过程中降低因主缆径向变形导致的缠丝张力损失。根据本文研究结果，缠丝张力最大纵向影响距离为 30 cm 左右，因此夹紧装置宽度 D 应大于 30 cm，预紧装置钢丝绳张力应大于缠丝机导入力，此时可以保证预缠丝段主缆径向变形充分，从而降低缠丝阶段的张力损失。

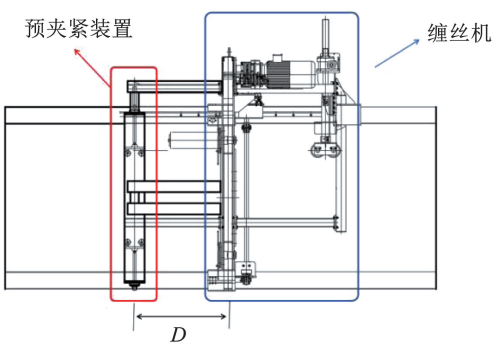


图 22　新型缠丝机

Fig. 22　A new type of wrapping wires machine

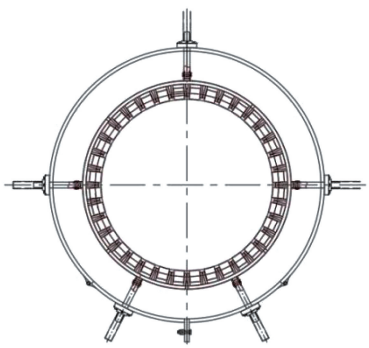


图 23　预夹紧装置

Fig. 23　Pre-clamping mechanism

5　结　论

本文利用精细化有限元模型结合实桥测试，研究了主缆缠丝张力的损失特征及损失机理，分析了不同缠丝导入力、主缆直径及主缆径向弹性模量对缠丝张力损失的影响，优化了缠丝导入力计算公式，提出了基于缠丝张力损失机理的缠丝工艺改进方法，得到以下结论：

1）缠丝阶段的张力损失主要是后续缠丝使主缆发生径向变形产生，缠丝过程中缠丝张力损失呈现出先快速衰减，然后逐渐趋于稳定的特征。

2）实桥测试中，测试断面缠丝力稳定时，缠丝机平均前进距离为 25.2 cm，平均损失比例为 31.1%。

3）有限元分析结果表明，导入力大小对缠丝张力损失比例几乎没有影响；主缆直径和径向弹性模量的增加可以显著减小缠丝力损失比例，且与缠丝张力损失比例呈现出反比例关系。

4）提出了考虑缠丝阶段张力损失的导入力计算公式，进一步优化了缠丝导入力的计算，同时为导入力的优化设计提供了理论依据。

5）根据本文的分析结果，提出了一种基于缠丝张力损失机理的新型缠丝工艺，通过对预缠丝段主缆进行预紧，可以有效减小缠丝过程中的缠丝张力损失。

参考文献

[1]陈焕勇，徐军，李鹏，等. 深中通道伶仃洋大桥主缆除湿防腐性能优化[J]. 桥梁建设，2023，53(4)：1
Chen Huanyong，Xu Jun，Li Peng，et al. Optimization of main cable dehumidification and corrosion resistance of Lingdingyang Bridge of Shenzhen-Zhongshan Link[J]. Bridge Construction，2023，53(4)：1

[2]程建新，沈良成，金仓，等. 润扬大桥悬索桥 S 形钢丝缠丝技术[J]. 桥梁建设，2004(4)：47
Cheng Jianxin，Shen Liangcheng，Jin Cang，et al. S-shape wire wrapping techniques for suspension bridge of Runyang Bridge[J]. Bridge Construction，2004(4)：47

[3]陈华青，王林烽. 悬索桥主缆缠绕用 S 形热镀锌钢丝的研制[J]. 金属制品，2013，39(6)：17
Chen Qinghua，Wang Linfeng. Development of S-shape hot dipping galvanizing steel wire for suspension bridge main cable winding[J]. Metal Products，2013，39(6)：17

[4]王海洋，王巍，王林烽. 主缆缠绕用精密热镀锌异形钢丝研制[J]. 金属制品，2023，49(4)：7
Wang Haiyang，Wang Wei，Wang Linfeng. Research and development of precision hot-dip galvanized shaped steel wire for main cable winding[J]. Metal Products，2023，49(4)：7

[5]马文田, 石国彬, 韩大建. 悬索桥主缆缠绕钢丝的设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1999, 27(11): 88
Ma Wentian, Shi Guobin, Han Dajian. Design of the wrapping wire of the main cables in suspension bridges[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 1999, 27(11): 88

[6]刘磊, 李鹏, 常志军. 悬索桥主缆缠丝作用的研究及替代[J]. 公路, 2015, 60(3): 63
Liu Lei, Li Peng, Chang Zhijun. Research on the function of wrapping for suspension bridge main cables and potential alternatives [J]. Highway, 2015, 60(3): 63

[7]李向阳, 党彦锋. 大跨径悬索桥主缆缠丝关键技术[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2013 年全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2013
Li Xiangyang, Dang Yanfeng. Key technologies for wrapping the main cable of long-span suspension bridges[C]//Proceedings of the 2013 National Bridge Academic Conference of the Bridge and Structural Engineering Branch of China Highway and Transportation Society. Beijing: People's Communications Press, 2013

[8]吕伟伟. 基于螺母旋转型滚珠丝杠传动的悬索桥主缆缠丝机设计[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(4): 87
Lü Weiwei. Design of a main cable wrapping machine for suspension bridges based on nut-rotating ball screw transmission[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2020, 43(4): 87. DOI:10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2020.04.051

[9]方明山. 厦门海沧大桥悬索桥主缆缠丝拉力计算[J]. 华东公路, 1999(4): 8
Fang Mingshan. Caculation of wrapping wires tension of main cable on Xiamen Haicang Suspension Bridge[J]. East China Highway, 1999(4): 8

[10]张培君, 马骉. 悬索桥主缆缠丝力分析[J]. 中国市政工程, 2017(4): 21
Zhang Peijun, Ma Biao. Analysis of wrapping force for the main cable of suspension bridges[J]. China Municipal Engineering, 2017(4): 21

[11]张波, 张由, 黄夏雨. 青草背长江大桥主缆缠丝初拉力的修正分析[J]. 西部交通科技, 2013(4): 40
Zhang Bo, Zhang You, Huang Xiayu. Correction analysis of main cable winding initial tension of Qingcaobei Yangtze River Bridge [J]. Western China Communications Science & Technology, 2013(4): 40

[12]周汉国, 陶路, 漆亮. 坝陵河大桥主缆缠丝导入力计算[J]. 公路交通技术, 2010(2): 60
Zhou Hanguo, Tao Lu, Qi Liang. Calculation for lead-in force of main cable wrapping in Baling River Bridge[J]. Technology of Highway and Transport, 2010(2): 60

[13]巫书郁. 悬索桥主缆缠丝的张紧力与张紧机构[J]. 桥梁建设, 2007(增刊2): 122
Wu Shuyu. Tensioning force and tensioning mechanism for wire wrapping of main cables of suspension bridge [J]. Bridge Construction, 2007(S2): 122

[14]万国朝. 白鸟大桥主缆防护工程[J]. 国外公路, 1999(4): 14
Wan Guochao. White bird bridge main cable protection project[J]. Journal of Foreign Highway, 1999(4): 14

[15]唐茂林, 宋晖, 卢伟, 等. 西堠门大桥主缆缠丝导入力计算[J]. 桥梁建设, 2009(5): 44
Tang Maolin, Song Hui, Lu Wei, et al. Calculation of pretensioning force of wrapping wires for main cables of Xihoumen Bridge[J]. Bridge Construction, 2009(5): 44

[16]姚琨, 徐开磊. 马鞍山长江公路大桥缠丝力计算[J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(4): 25
Yao Kun, Xu Kailei. Calculation for lead in force of main cable wrapping in Maanshan Yangtze River Highway Bridge[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2016, 30(4): 25. DOI: 10.19352/j.cnki.issn1671-4679.2016.04.005

[17]田越. 大跨度悬索桥主缆缠丝拉力损失的试验研究[J]. 铁道建筑, 2009(6): 12
Tian Yue. Experimental research on tensile loss of main cable wrapping wire in long-span suspension bridge [J]. Railway Engineering, 2009(6): 12

[18]Zhang S, Sun S Q. Study on pretensioning force of wrapping wires for suspension bridge cables[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1615(446/447/448/449): 1283