

新型预应力弯扭组合实验设计

孙敬坤, 刘嘉桁, 胥 明*

东南大学土木工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年11月13日; 录用日期: 2025年11月25日; 发布日期: 2025年12月15日

摘 要

现有的弯扭组合实验装置只有弯扭剪3种内力的组合, 缺乏轴向内力以及多种内力的组合形式, 为此研制了一种施加轴向内力的预应力弯扭组合实验装置。该装置应用了预应力技术, 为培养学生在预应力条件下的复杂应力测试分析提供了新的实验平台, 并通过模块化设计, 可开发出多种内力组合的新型实验项目。

关键词

预应力, 弯扭组合, 模块化设计, 应力测试

New Design of Prestressed Bending-Torsion Combination Experiment

Jingkun Sun, Jiaheng Liu, Ming Xu*

School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Received: November 13, 2025; accepted: November 25, 2025; published: December 15, 2025

Abstract

The existing bending-torsion combined experimental equipment only has a combination of three internal forces: bending, torsion and shear. They lack the combination of axial internal forces and multiple internal forces. Therefore, a prestressed bending-torsion combined experimental equipment capable of applying axial internal forces has been developed. This equipment applies prestress technology, providing a new experimental platform for cultivating students' ability to test and analyze complex stresses under prestress conditions. Through modular design, new experimental projects with various internal force combinations can be developed.

*通讯作者。

Keywords

Prestressed, Bending-Torsion Combination, Modular Design, Stress Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

弯扭组合主应力实验作为材料力学实验与工程测试课程的核心内容，其装置的性能直接影响力学状态分析的准确性与实验教学的效果。近年来，学术界围绕弯扭组合实验装置的优化改进开展了一系列研究，形成了多维度的技术成果。许多教师在装置功能设计与场景适配方面努力并得到了丰富的成果：伍建伟等指出，弯扭组合实验教学中，学生普遍对单一分量(弯矩、剪力、扭矩)的计算思路及桥路选择方法概念不清晰，容易出错，影响了实验教学的效果[1]。滕家秀等研发的薄壁圆筒实验台通过竖直与倾斜双圆筒结构[2]，实现了内压、压缩、弯曲、扭转等多工况组合变形测试，借助单元体图解与叠加原理完成各内力分量测定；祝江鸿团队设计的超小型化装置控制体积[3]，通过材料选型与结构参数优化简化加载流程，在保证测量精度的同时提升了设备的普及性；赵挺等开发的静定-静不定一体化装置[4]，通过支座调节机制实现了静定、纯扭转及静不定状态的灵活切换，显著扩展了实验工况的覆盖范围；付国祥改进的集成化装置则整合了单弯、单扭及弯扭组合功能[5]，通过结构优化简化了应变片粘贴流程，为叠加原理的实验验证提供了便捷工具。

在上述研究中，技术突破主要聚焦三个维度：一是测量精度的提升，徐育澄通过优化应变片布置与接桥方案降低系统误差[6]，朱飞鹏提出反向应变花与弯曲应变消去法将弯曲切应力测量误差控制在0.215% [7]，李昊采用180°旋转的直角应变花方案将误差从57.9%降至3.5% [8]，并新增附加弯曲正应力测量功能；二是教学功能的强化，刘五祥在传统装置基础上增设惠斯通电桥特性实验模块[9]，李昊等重新设计了弯曲切应力和扭转切应力的测量桥路，新增了附加弯曲正应力测量实验[10]；三是理论验证体系的完善，闵磊通过双方法推导主应力公式[11]，系统验证了应变片粘贴偏移对测量结果的影响机制，为装置校准提供了理论依据在实验技术与测量精度方面。

尽管现有研究已取得显著进展，但装置性能仍存在一些局限：实验功能较为单一，多局限于传统弯扭组合主应力实验，缺乏预应力加载功能；实验内容扩展性不足，因加载方式固化，不易实现多维内力作用下复杂应力状态的测试。本文研发的预应力弯扭组合实验装置，增设预应力工程应用场景，通过模块化设计，拓展实验功能，可以实现多维度内力组合下的复杂应力测试。

2. 装置设计与研制

2.1. 装置设计

预应力弯扭组合实验装置的设计以解决现有装置“实验功能单一、实验内容扩展性不足”的核心问题为出发点，通过引入“预应力工程应用、模块化集成”，开发多维度内力组合的复杂应力测试的实验。预应力工程应用是模拟实际工程中预应力技术，在弯扭组合装置增加了预应力加载的设计。模块化集成即打破“功能单一”局限，在装置上实现灵活多变的加载方式。预应力弯扭组合实验装置由三个模块组成，分别是基础模块，预应力模块和扩展模块。其设计模型图见图1。

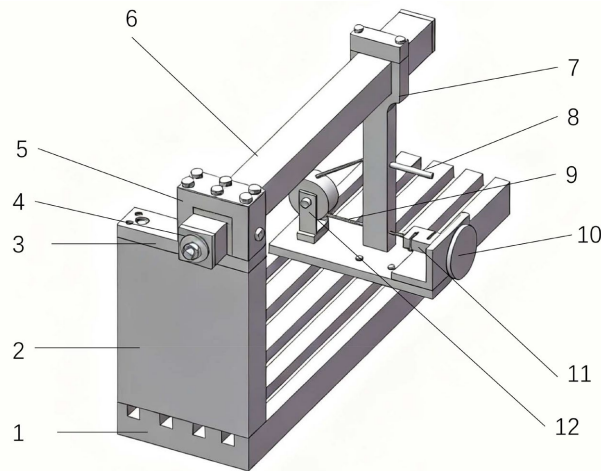


Figure 1. Design model diagram of experimental equipment for prestressed bending-torsion combinations device. 1-Base, 2-Column, 3-Connection plate, 4-Prestressed loading device, 5-Fixing device, 6-Test specimen, 7-Loading arm, 8-Limit stop, 9-Steel cable, 10-Loading handwheel, 11-Force sensor, 12-Fixed pulley

图 1. 预应力弯扭组合实验装置设计模型图。1-底座, 2-立柱, 3-连接板, 4-预应力加载装置, 5-固定装置, 6-被测试件, 7-加载臂, 8-限位器, 9-钢丝绳, 10-加载手轮, 11-力传感器, 12-定滑轮

2.1.1. 基础模块

该模块主要包括：底座、立柱、连接板、固定装置、被测试件。

底座通过螺母旋调，解决地面不平导致的装置倾斜问题，保证加载方向与试件轴线垂直；下端与底座螺栓紧固，避免加载过程中装置晃动。固定装置采用螺栓预紧结构配合垫板设计，将试件端部约束在“零滑移”状态，消除夹持间隙对弯扭应力测试的干扰；模拟工程中构件的“固支端”约束，为应力分析提供稳定边界条件。被测试件采用薄壁铝合金方管。

2.1.2. 预应力模块

该模块主要包括：螺杆、锚固板。

预应力模块采用 1 根不锈钢螺杆和 2 个 45 号钢锚固板，通过对称旋紧螺帽使锚固板对被测构件施加可控预应力。

2.1.3. 扩展模块

该模块主要包括：加载臂、力传感器、加载手轮、钢丝绳、定滑轮。

加载臂为分段式结构，支持水平、斜方向等加载方式。加载前分别将手轮与力传感器，力传感器与钢丝绳相连，钢丝绳穿过加载臂最下方小孔并固定，旋转手轮即可实现水平加载，图 2 为水平加载示意图。解除钢丝绳的约束，绕过滑轮并穿过加载臂上方小孔固定后，旋转手轮即可实现斜方向加载，图 3 为斜加载示意图。

2.2. 装置研制

在预应力弯扭组合实验装置的研制过程中，设计多种核心构件的同时，也解决了不少困难，装置研制过程分为设计构思，参数调整和构件设计三大部分，研制流程见图 4。其中，加载臂设计经过理论计算、细节调整、绘制设计图等阶段；根据加载臂与手轮间预留长度选取合适力传感器。滑轮位置的设计是先通过理论分析，选取内外径大小合适的滑轮，然后根据设计的斜加载角度，计算滑轮中心到加载臂

的距离，再结合滑轮其他参数计算设计底板，最后完成扩展模块的设计图，组装的实物见图 5。

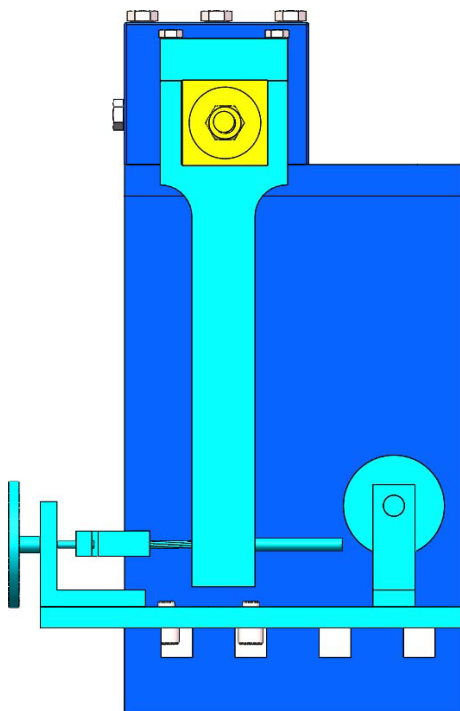


Figure 2. Schematic diagram of horizontal loading
图 2. 水平加载示意图

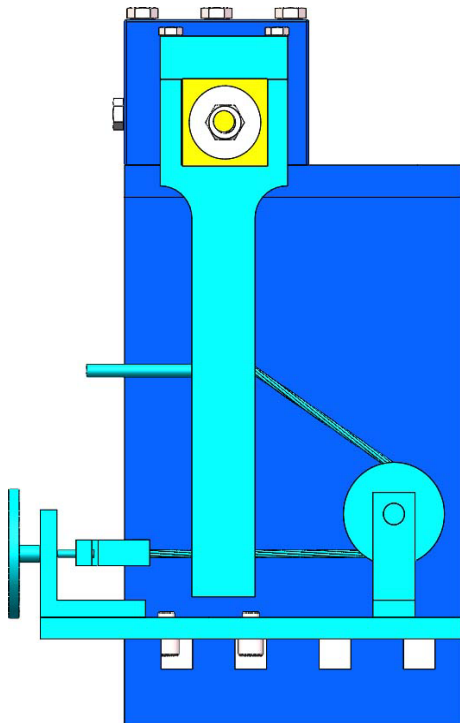


Figure 3. Schematic diagram of oblique loading
图 3. 斜加载示意图

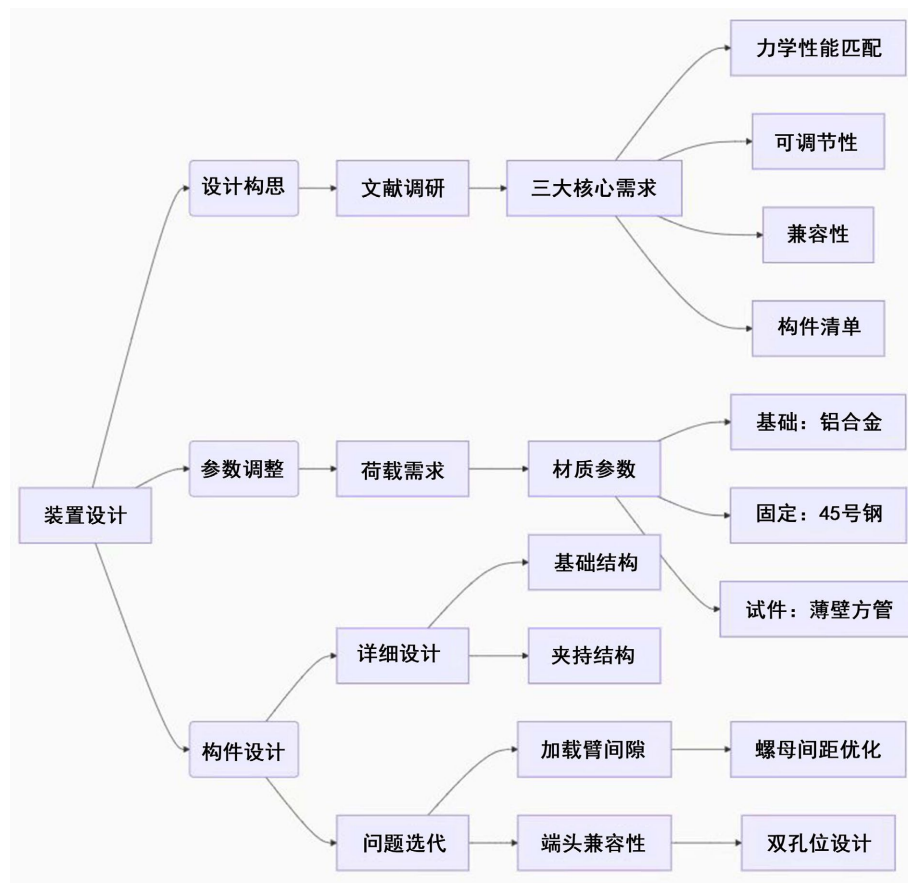


Figure 4. Development process
图 4. 研制流程

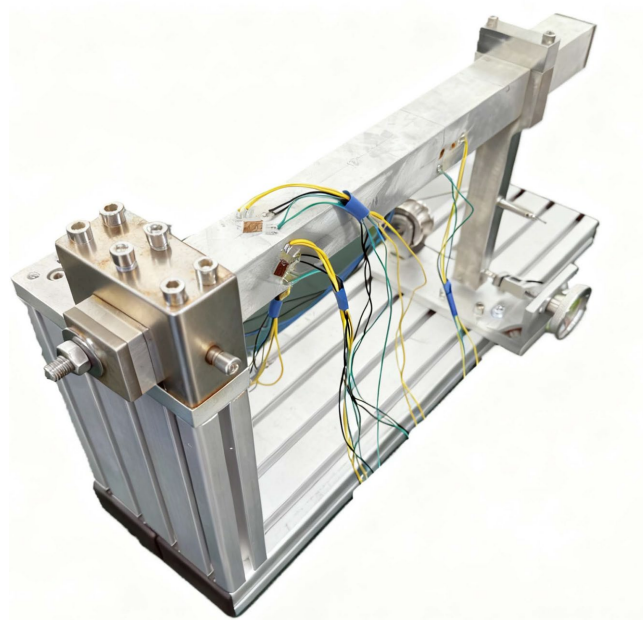


Figure 5. Physical photo of the device
图 5. 装置实物图

3. 开发的实验项目

铝合金薄壁方管试样的弹性模量 $E = 72 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.33$ ，截面尺寸为外径 $D = 40 \text{ mm}$ ，内径 $d = 34 \text{ mm}$ ，壁厚 3 mm 。在方管距离固定端 50 mm 的 A-A 截面上，布置测点①~④，在方管距离固定端 150 mm 的 B-B 截面上，布置测点⑤和⑥。其中，测点①~④粘贴三轴应变计，测试 4 个测点的主应力。测点⑤和⑥粘贴单轴应变计，监控预应力的大小，如图 6 所示。采用浙江黄岩测试仪器厂的应变计，应变计阻值 120Ω ，灵敏系数 2.08。力传感器采用苏州爱科莱特电子科技 FA303，量程 500 N 。应变仪采用日本东京测器 TML TDS-540。

外部荷载由标定后的力传感器接入应变仪监控，预应力通过全桥接线法，在应变仪某通道的 AB、BC、CD、DA 间，依次接入测点⑤ 90° 、测点⑤ 0° 、测点⑥ 90° 、测点⑥ 0° 应变片监控。

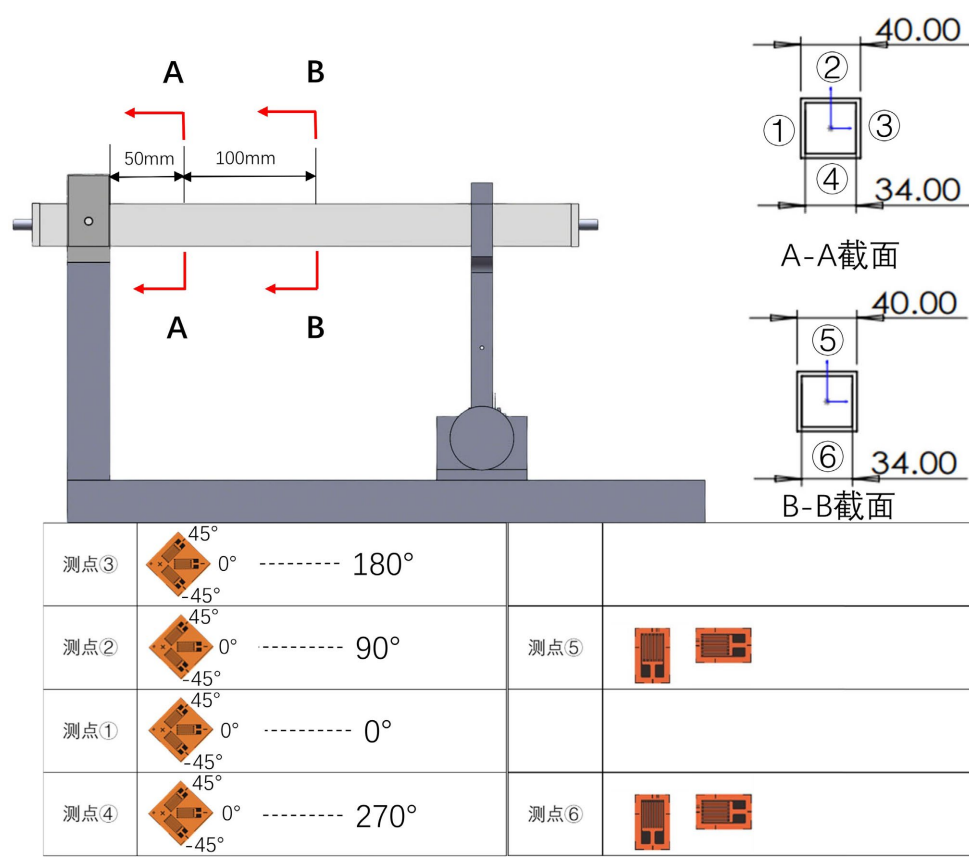


Figure 6. Schematic diagram of patch location
图 6. 贴片位置示意图

此装置根据不同模块的使用以及加载方式的调整，可以完成实验为弯扭组合实验、轴向预应力下的弯扭组合实验、偏心预应力下的弯扭组合实验，以及斜弯曲与弯扭组合实验。

3.1. 常规的弯扭组合实验

若采用如图 2 所示的扩展模块，直接旋转手轮对加载臂下端施加 100 N 水平力，不施加预应力，将形成弯曲与扭转的组合变形。内力包括：弯矩(M)，扭矩(T)，剪力(F_s)。选用该设置可进行常规的弯扭组合实验。

3.2. 轴向预应力下的弯扭组合实验

若采用如图 2 所示的扩展模块, 施加 2 kN 轴向预应力, 预应力大小由测点⑤和⑥的应变计读数监控, 再通过旋转手轮施加 100 N 水平力。内力包括: 弯矩(M), 扭矩(T), 轴向轴心压力(F_x), 剪力(F_s)。选用这样设置可进行新型的轴向预应力下的弯扭组合实验。

3.3. 偏心预应力下的弯扭组合实验

若采用如图 2 所示的扩展模块, 施加 2 kN 偏心的预应力, 预应力大小由测点⑤和⑥的应变计读数监控, 再通过旋转手轮施加 100 N 水平力。内力可能包括: 弯矩(M, M_e), 扭矩(T), 轴向压力(F_N), 剪力(F_s)。选取这种设置可进行新型的偏心预应力下的弯扭组合实验。

3.4. 斜弯曲与弯扭组合实验

若采用如图 3 所示的扩展模块, 改变接头锁紧套管固定钢丝绳的位置, 直接旋转手轮对加载臂施加斜向力 141.4N。不施加预应力。内力包括: 弯矩(M_y, M_z), 扭矩(T), 剪力(F_{sy}, F_{sz})。选取该设置可进行新型的斜弯曲与弯扭组合实验。

3.5. 实验结果

常规的弯扭组合实验的理论、实验数据对比见表 1。实验的平均相对误差为 4.42%。
轴向预应力下的弯扭组合实验的理论、实验数据对比见表 2。实验的平均相对误差为 3.85%。
偏心预应力下的弯扭组合实验的理论、实验数据对比见表 3。实验的平均相对误差为 4.41%。
斜弯曲与弯扭组合实验的理论、实验数据对比见表 4。实验的平均相对误差为 5.76%。
实验结果的整体误差水平处于较低范围, 验证了我们所开发实验装置的测量准确性与可靠性, 这表明我们研制的实验装置能够应用于更为复杂的力学实验场景中。

Table 1. Comparison of theoretical and experimental data for the bending-torsion combination experiment
表 1. 弯扭组合实验的理论、实验数据对比

	测点① σ_1	测点① σ_3	测点② σ_1	测点② σ_3	测点③ σ_1	测点③ σ_3	测点④ σ_1	测点④ σ_3
实验值 (MPa)	0.773	-7.23	1.98	-2.08	6.61	-1.17	2.90	-3.11
理论值 (MPa)	0.877	-6.76	1.93	-1.93	6.76	-0.877	2.94	-2.94

Table 2. Comparison of theoretical and experimental data for the bending-torsion combination experiment under axial prestress
表 2. 轴向预应力下的弯扭组合实验的理论、实验数据对比

	测点① σ_1	测点① σ_3	测点② σ_1	测点② σ_3	测点③ σ_1	测点③ σ_3	测点④ σ_1	测点④ σ_3
实验值 (MPa)	0.149	-10.8	0.978	-5.50	3.36	-1.68	1.54	-5.83
理论值 (MPa)	0.542	-10.9	0.714	-5.22	3.22	-1.84	1.45	-5.96

Table 3. Comparison of theoretical and experimental data for the bending-torsion combination experiment under eccentric prestress

表 3. 偏心预应力下的弯扭组合实验的理论、实验数据对比

	测点① σ_1	测点① σ_3	测点② σ_1	测点② σ_3	测点③ σ_1	测点③ σ_3	测点④ σ_1	测点④ σ_3
实验值 (MPa)	0.796	-7.67	0.831	-5.53	1.39	-4.21	1.47	-5.86
理论值 (MPa)	0.814	-7.28	0.714	-5.22	1.48	-4.02	1.45	-5.96

Table 4. Comparison of theoretical and experimental data for oblique bending and bending-torsion combination experiments

表 4. 斜弯曲与弯扭组合实验的理论、实验数据对比

	测点① σ_1	测点① σ_3	测点② σ_1	测点② σ_3	测点③ σ_1	测点③ σ_3	测点④ σ_1	测点④ σ_3
实验值 (MPa)	7.06	-0.594	4.51	-0.222	0.486	-6.65	0.807	-5.09
理论值 (MPa)	7.27	-0.455	4.91	-0.139	0.144	-6.96	0.724	-5.50

4. 结语

本研究为力学实验教学提供了一套功能集成化、场景多样化的新型装置。本研究研制的预应力弯扭组合实验装置，通过集成预应力模块，实现了可控轴向预应力加载。采用模块化设计，应用底座、立柱、加载臂、滑轮等部件灵活组合，实现了多维度内力组合下的复杂应力测试实验。

利用该装置可开展多项创新实验项目，新增轴向预应力下的弯扭组合实验，开发偏心预应力下的弯扭组合实验，设计斜弯曲与弯扭组合实验，拓展复杂应力场的实验内容。实验结果表明该实验装置具有较高的测量精度和良好的可靠性。

参考文献

- [1] 伍建伟, 杨孟杰, 赵亮亮, 等. 力学实验中的弯扭组合实验教学[J]. 中国冶金教育, 2019(6): 65-68.
- [2] 滕家秀, 徐育澄. 薄壁圆筒实验台[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(7): 45-47, 115.
- [3] 祝江鸿, 蔡增伸, 王斌. 超小型化弯扭组合实验装置的设计[J]. 机械, 2003(4): 68-71.
- [4] 赵挺, 侯德门. 静定与静不定弯扭组合实验装置研制及应用[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(11): 87-89.
- [5] 付国祥, 张艳成. 主应力与内力素实验装置的研究与改进[J]. 武汉城市建设学院学报, 2000(3): 27-30.
- [6] 徐育澄. 薄壁圆筒弯扭组合实验装置的改进[J]. 实验技术与管理, 1993(3): 41-44, 40.
- [7] 朱飞鹏, 白鹏翔, 雷冬, 等. 弯扭组合实验中弯曲切应力测量方案探讨[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4): 138-141, 157.
- [8] 李昊, 刘一华, 王美芹, 等. 圆筒弯扭组合实验中弯曲切应力的测量[J]. 力学与实践, 2008, 30(2): 98-100.
- [9] 刘五祥. 弯扭组合实验项目的研发[J]. 实验室科学, 2018, 21(6): 38-40.
- [10] 李昊, 刘一华, 王美芹, 等. 圆筒弯扭组合实验的改进[J]. 实验技术与管理, 2007, 24(11): 43-45, 55.
- [11] 闵磊. 弯扭组合实验的理论分析与验证[J]. 湖北理工学院学报, 2020, 36(1): 1-4, 32.