

【工程与技术】

Simdroid 仿真在金属材料扭转实验中的应用

董 雪¹, 李瑞垚², 易佳琦², 周瑜成²

(1. 沈阳航空航天大学 理学院; 2. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 金属材料的扭转实验是材料力学中最经典的实验之一, 在金属材料的扭转实验中建立基于 Simdroid 仿真平台的结构仿真静力学模型用于辅助实验教学, 来弥补传统教学的缺陷和不足。利用 Simdroid 仿真平台建立实验模型, 实现了自主改变相关参数, 并通过模拟真实实验过程, 获得了金属棒位移云图和应力云图, 同时进行了实验误差分析。仿真 App 使金属材料的扭转实验分析过程更简单且便于控制变量。在材料力学实验的教学中恰当地使用 Simdroid 仿真平台, 可以加深学生对实验原理的理解。

关键词: 金属材料; 扭转实验; Simdroid 仿真平台; 辅助教学; 仿真模型

中图分类号: O 411.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.issn.2097-4973.2025.04.007

0 引言

机件加工实质上是应用外力改变物体的形状, 这种改变形状的方式被称为塑性形变。除塑性形变外, 形变还包括弹性形变^[1], 其又可细分为切向形变、扭转形变等^[2]。在众多产品与部件的运行过程中, 扭转力的作用无所不在, 因此, 扭转测试成为生产过程中一个至关重要的环节。以汽车传动系统中所使用的变速器为例, 它是用来改变发动机部件输出速度和扭矩的装置, 在运行过程中承受着复杂的综合负荷, 其中扭转是主要部分。在这种情况下, 扭转测试可以帮助工程师在生产中获得高性能和轻量化的材料。扭转测试的范围不仅涉及工业生产的基础材料, 亦涵盖了航空航天、医学、化学等多个学科领域中所应用的设备, 例如航空发动机涡轮轴、生物医学管道、电子开关以及各类紧固件等, 在使用过程中均可能受到扭转产生的应力作用。通过对这些产品进行扭转实验以模拟真实的使用条件, 便于工程师检查产品质量, 验证设计正确性, 并确保制造技术的适当性。同时, 金属材料扭转实验是材料力学教学中基本实验之一^[3], 可用于鉴定材料在纯剪切应力作用下的力学性能。但由于有些高校扭转实验设备存在老化等问题, 往往实验数据误差较大。并且理论部分和实际操作之间的关联不够紧密, 使学生在开展实验的过程中难以对理论知识加以理解和运用, 因此, 传统的教学方式具有较大的不确定性。将计算机模拟仿真软件引入实验教学, 对教学过程具有极好的辅助性, 能够弥补传统教学的缺陷与不足^[4]。科技创新是生产力发展的巨大动力^[5], 在此背景下, 如何利用 Simdroid 仿真平台探讨应用型人才的培养, 已成为研究的热点^[6]。

1 Simdroid 仿真平台

Simdroid 仿真平台是一个功能强大的仿真分析软件, 具备显式动力学、隐式结构、流体、低频电磁、高

收稿日期: 2024-10-22

基金项目: 辽宁省大学生创新创业训练计划项目(X202410143007)

第一作者简介: 董 雪(1991—), 女, 山东泰安人, 实验师, 硕士, 主要从事物理实验教学研究。

E-mail: 1240314287@qq.com

频电磁、热、多体动力学等多种求解器,支持多物理场耦合仿真,为仿真工作者提供了统一且友好的前处理、求解分析和后处理工具。作为仿真 PaaS 平台,Simdroid 内置的 App 开发器支持用户通过无代码模式封装参数化仿真模型和流程,这种方法适用于多种应用场景,利用紧密集成的建模平台,为开发特定目的的建模使用者提供巨大的附加价值^[7]。Simdroid 在工程领域应用广泛,并在教学中发挥了显著的辅助作用。本文以扭转实验中圆柱形低碳钢试样的应力与位移分析为例,阐述 Simdroid 仿真平台在金属材料的扭转实验中辅助教学应用^[8]。

2 金属材料的扭转实验

2.1 测定低碳钢试样扭转时的性能指标

在外力偶矩作用下,低碳钢试样上任意一点都处于纯剪切应力状态^[9]。随着外力偶矩的增大,试样的应力状态经历了从弹性状态到屈服状态,再到强化状态,最后试样被扭断的显著变化,具体过程如图 1 所示, T 代表外力偶矩, φ 代表扭转角度。由图 1 可知,当外力偶矩超过 T_{el} 后,AB 段的斜率下降,形成一个圆弧状曲线;当外力偶矩超过 T_{eH} 时,斜率降至最小,形成类似一条直线的 BC 段。因此,根据图 1 中曲线的分布情况可认为圆柱形低碳钢横截面上的切应力分布如图 2 所示。根据测定的试样断裂时的外力偶矩 T_m ,可求得抗扭强度 $\tau_m = \frac{3}{4} \frac{T_m}{W}$ 。由图 2 可知,圆柱形试样横截面承受的扭矩为

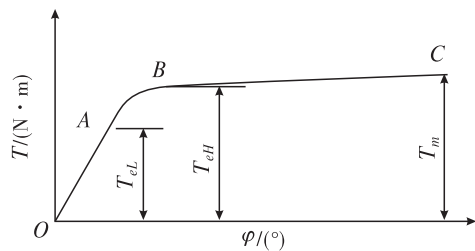


图 1 低碳钢的扭转曲线

由上式可得低碳钢扭转下屈服强度 $\tau_{el} = \frac{3}{4} \frac{T_{el}}{W}$ 。式中: $W = \frac{\pi d^3}{16}$ 为试样在标距内横截面的抗扭截面系数。

$$T_{el} = 2\pi \int_0^{d/2} \rho^2 d\rho = \frac{\pi d^3}{12} \tau_{el} = \frac{4}{3} W \tau_{el}。$$

由上式可得低碳钢扭转下屈服强度 $\tau_{el} = \frac{3}{4} \frac{T_{el}}{W}$ 。式中: $W = \frac{\pi d^3}{16}$ 为试样在标距内横截面的抗扭截面系数。

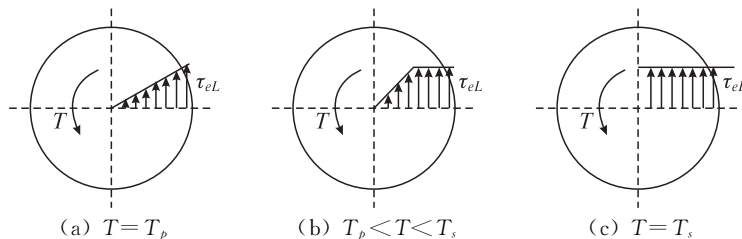


图 2 圆柱形低碳钢试样横截面上切应力的分布情况

2.2 测定灰铸铁试样扭转时的性能指标

灰铸铁含碳量较高,其抗拉强度远低于低碳钢。对于灰铸铁试样而言,其拉伸曲线为单向上升的曲线,不存在屈服行为,因此,只需测量出其承受的最大外力偶矩 T_m 即可,其抗扭强度 $\tau_m = \frac{T_m}{W}$ 。

通过观察扭转实验后被破坏的试样可以发现:低碳钢试样的扭断截面与轴线基本垂直,表明破坏是由切应力引起的;而灰铸铁试样的扭断截面沿螺旋线与轴线方向约成 45° 角,表明破坏是由拉应力引起的^[10]。试样受扭转力时,材料处于纯剪应力状态,如图 3 所示。与试样轴线成 45° 角的螺旋面分别受到主应力 σ_1 和 σ_3 的作用。低碳钢的抗拉性能要强于抗剪性能,因此在横截面处剪断,而灰铸铁的抗拉性能弱于抗剪性能,故沿着与轴线约成 45° 角方向被拉断^[11]。

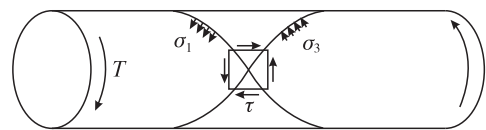


图 3 纯剪应力状态

3 低碳钢试样的应力与位移分析仿真模拟

Q235A 是低碳钢,通过查阅文献[12]可得 Q235A 的密度为 7.85 g/cm^3 ,切变模量 $G=80 \text{ GPa}$,弹性模量 E 一般取 210 GPa ,由切变模量 $G=E/(2 \times (1+\mu))$ 可得泊松比为 0.3 。以 Q235A 为试样的拉伸仿真金属扭转实验,具体过程如下。

3.1 前处理

新建分析。启动 Simdroid 仿真开发环境,在主界面中选择“结构分析”模块,选择分析维度为“三维”,在项目名称输入框中输入新项目的名称,选择项目的存储路径,完成新分析项目的创建。

定义参数。设置圆截面半径、圆柱体长度以及弹性模量和泊松比,如表 1 所示。

表 1 $x_{(t)}$ 参数

名称	物理量	值	描述	名称	物理量	值	描述
L1	l_1/mm	70	平行部分长度	E1	E/Pa	2.1×10^{11}	弹性模量
R1	r_1/mm	5	平行部分半径	po	μ	0.3	泊松比
L2	l_2/mm	25	试件夹持长度	rou	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	低碳钢密度
R2	r_2/mm	7.5	试件夹持半径	torque	$T/(\text{N} \cdot \text{m})$	1 000	施加力矩
R3	r_3/mm	10	圆弧部分半径				

建模。按照所定义的材料尺寸进行建模,主要操作是绘制圆形截面,半径为之前设定的参数值,并使用“旋转”工具将圆截面旋转成圆柱体,使用“拉伸”工具将圆柱体沿纵向拉伸至设定的长度,生成试样标准结构,如图 4 所示。

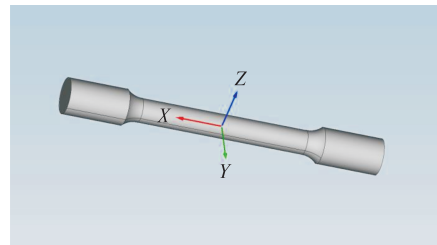


图 4 低碳钢试样结构图

定义材料属性。定义材料固体属性为各向同性,调用之前设置的弹性模量和泊松比参数,应用到材料属性中,保存材料属性设置。

网格剖分。对所建模型选择进行整体剖分,Simdroid 会自动对模型中的复杂部分进行优化和加密处理,有利于后续分析的进行^[13]。

3.2 加载和求解

受力分析选择通用静力分析,对材料进行常规约束,在 X 轴正方向加 $1\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的扭矩进行计算。

3.3 后处理

进行绘图设置,在结果展现对话框中,选择绘制位移及应力的云图(图 5、图 6)。对于低碳钢试样,当对它施加 X 轴正方向的一个力矩时,离金属丝固定端越远,位移量越大。通过仿真过程,学生可以清晰地看出力矩作用下试样各部位的位移变化(图 5)。

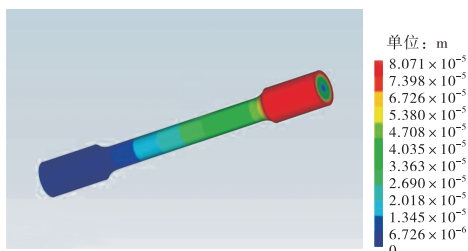


图 5 力矩作用下试样各部位的位移变化

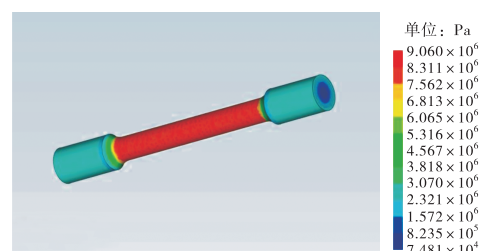


图 6 力矩作用下试样各部位的应力变化

如图 6 所示,沿着 X 轴正方向,试件圆截面上的应力呈现出向心减小的趋势。这种应力分布特征表

明,离心越近,应力值越小,而随着与中心距离的增加,应力也逐渐增大。这一现象与经典的材料力学理论相一致,尤其是与扭转实验中的应力分布规律高度符合。

在标准扭转试样中,试件表面上的应力与试件的半径成反比关系,即试件表面的应力随着半径的增大而减小。这意味着在相同扭矩条件下,离试样中心越远的点,受到的切应力越小。实验数据也很好验证了这一理论推导的正确性。因此,试件沿 X 轴方向的应力分布不仅与理论模型相吻合,而且进一步说明了该实验中应力与半径的反比关系符合材料力学的基本定律。

利用 Simdroid 选点曲线功能,可以输出一组低碳钢试样外力偶矩与 Z 轴坐标的对应值(图 7)、扭转改变量 ΔL 与 X 轴坐标的对应值(图 8)。

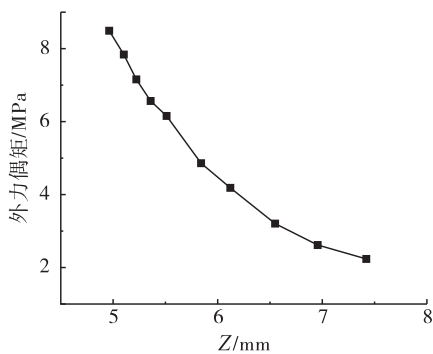


图 7 外力偶矩与 Z 轴坐标的对应图

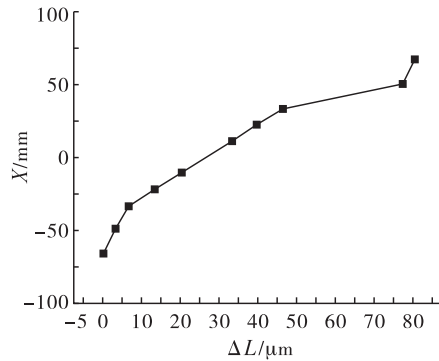


图 8 ΔL 与 X 轴坐标的对应图

实验误差分析。如图 9 所示,单元体所受应力根据第四强度分析(最大畸变能密度理论)^[14]可得

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1)$$

按照主应力的记号规则 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 单元体的主应力分别是 $\sigma_1 = \tau_0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\tau_0$ 。式中: $\tau_0 = \frac{T}{W}$, $W = \pi d^3 / 16$ 。当 $T = 1\ 000\ \text{N}$, $d = 10\ \text{mm}$ 时,可得 $\tau_0 = 5.09\ \text{Mpa}$ 。将 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 代入式(1)可得 $\sigma_r = 8.82\ \text{Mpa}$ 。利用 Simdroid 选点曲线功能,当 $Z = 5\ \text{mm}$ 时,低碳钢试样应力为 $\sigma_0 = 8.37\ \text{Mpa}$ 。实验误差为

$$\varepsilon_r = \frac{|\sigma_r - \sigma_0|}{\sigma_r} \times 100\% = \frac{|8.82 - 8.37|}{8.82} \times 100\% \approx 5.10\%$$

这一结果在材料力学实验中属于可以接受的误差范围,因此模拟仿真的结果符合实验要求。

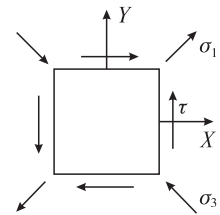


图 9 纯剪切应力图

4 低碳钢试样仿真 App 设计

Simdroid 仿真模拟的结果转变为可更改参数的 App,不需要连接网络。在专业的 Simdroid 平台的统一管理之下,确保了 App 运行的稳定性与可靠性。利用仿真 App,用户可以对材料的泊松比、弹性模量以及低碳钢试样的荷载进行精准调节,合理地设定取值范围,从而为仿真结果的准确性与可靠性奠定基础。按钮操作部分涵盖了导入参数、生成几何、生成网格以及计算等重要功能。值得注意的是,每次在调整好参数后,按钮的操作必须严格按照生成几何、生成网格、计算这样的先后顺序依次进行,以确保仿真过程的顺利开展。画面展示部分主要用于展示模型的几何图形、网格图形以及由分析结果生成的各类云图。通过这些直观的展示,用户能够更加深入地了解仿真结果,App 为进一步的学术研究和工程决策提供有力的支持^[15]。

4.1 App 封装过程

Simdroid 仿真 App 的封装过程包括“新建表单”、“集合表单”和“添加按钮”三个部分。在低碳钢试样

仿真 App 设计中,首先进入“App 开发器”,新建一个总表单,添加总表单中的参数控件,然后创建图形结果表单,用于展示模型的几何状态和网格状态。在总表单中,将参数控件与图形结果表单集合到同一界面,最后点击“添加”按钮,确保布局整齐、美观,界面简洁清晰。设置完成 App 界面如图 10 所示。

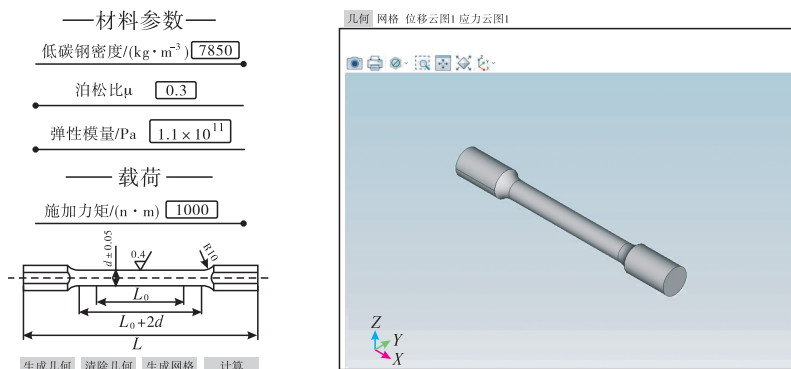


图 10 App 界面

4.2 App 测试和发布

在完成必要的系统配置之后,可以进行应用程序的在线测试,以验证其是否能够正确执行几何生成、网格生成以及计算云图的功能。一旦测试流程无误,便可将该应用程序进行导出。此过程通过 Simdroid 软件的应用程序开发工具实现,该工具允许将工程项目封装为“低碳钢试样仿真分析”的仿真应用程序。

用户登录 Simdroid 平台后,可以进入应用程序管理界面,上传已经开发完成的低碳钢试样仿真应用程序。根据系统提示,用户需要逐步填写并完善仿真应用程序的相关信息,随后提交至平台进行审核。审核通过之后,仿真应用程序便正式发布成功。

5 结论

材料力学是大学工科专业的必修课之一。本文在传统实验的基础上,利用 Simdroid 仿真平台进行金属材料的力学性能测试,减少了实验过程中金属材料的消耗,降低了成本,提高了实验的设计效率。基于 Simdroid 仿真 App 的使用有助于进一步加快知识经验的传播与技术的分享,更好地培养出创新能力较强、全面发展的工程技术人才。

参考文献:

[1] 吴振利. 稀土金属掺杂氮化铜的第一性原理研究[D]. 南京:南京邮电大学,2015.
 [2] 毛佳欣,李盼,余海森,等. 利用 Tracker 软件改进拉伸法测金属丝的杨氏模量实验[J]. 物理通报, 2022(7):125-128.
 [3] 梁志远,马明辉. 低碳钢圆轴扭转实验研究[J]. 洛阳大学学报,1996(2):51-55.
 [5] 蒋逢春,吴杰,王海燕,等. 大学物理实验及仿真翻转课堂的实践[J]. 物理通报,2019(3):80-82.
 [5] 詹成付. 因地制宜加快发展新质生产力[N]. 中国社会报,2024-03-13(A03).
 [6] 张俊青,李慧亮. 新工科背景下基于 Simdroid 平台的应用型人才培养模式探讨[J]. 数字化用户, 2024(3):235-236.
 [7] 王永超,李小颜,何浩明. 基于 Simdroid 的 V 带轮无代码静力学仿真模型开发[J]. 广东技术师范大学学报,2023,44(3):29-35.
 [8] 董雪,孙景超,李健,等. Simdroid 软件在杨氏模量测量实验中的应用研究[J]. 创新教育研究,2023 (7):2022-2027.
 [9] 钮嘉颖. 碳纤维机床传动轴的弯扭性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.

- [10] 王炎松. 以学生创新能力培养为中心的扭转试验机改造研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [11] 魏义敏,乐忠萍,周迅. 材料力学实验(双语版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2020.
- [12] 李娟,赵广辉,黄庆学,等. Q235A 特厚板轧制复合的实验分析[J]. 热加工工艺,2017,46(23):115-117.
- [13] 董雪,王珩,孙景超,等. 静电场测绘实验的 Simdroid 软件辅助教学[J]. 教育进展,2023(5):3058-3063.
- [14] 张朝霞,苟晓凡. 注重培养创新思维的力学教材改革初探[J]. 科教文汇(上旬刊),2020(34):119-122.
- [15] 何浩明,王永超,李小颜. 一种基于 Simdroid 的家用轿车通风盖板静力学分析与仿真 APP 设计[J]. 广东农工商职业技术学院学报,2023,39(3):33-38.

Application of Simdroid simulation in torsion test for metallic materials

DONG Xue¹, LI Ruiyao², YI Jiaqi², ZHOU Yucheng²

(1. College of Science, Shenyang Aerospace University;

2. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The torsion testing for metallic materials is one of the most classic experiments in materials mechanics. In the torsion testing of metal materials, a structural simulation statics model based on the Simdroid simulation platform is established to assist experimental teaching and make up for the shortcomings and deficiencies of traditional teaching. An experimental model was established by means of the Simdroid simulation platform, enabling autonomous modification of relevant parameters. By simulating the real experimental process, displacement and stress cloud maps of the metal rod were obtained, and experimental errors were analyzed. The simulation app simplifies the analytic process of torsion experiments on metal materials and facilitates variable control. Proper use of the Simdroid simulation platform in the teaching of material mechanics experiments can deepen students' understanding of the principles of real experiments.

Keywords: metallic materials; torsion testing; Simdroid simulation platform; assisted teaching; simulation model

(责任编辑:王新亮)

引用格式 董雪,李瑞垚,易佳琦,等. Simdroid 仿真在金属材料扭转实验中的应用[J]. 山东航空学院学报,2025,42(4):52-57.
DONG X, LI R Y, YI J Q, et al. Application of Simdroid simulation in torsion test for metallic materials[J].
Journal of Shandong University of Aeronautics, 2025, 42(4): 52-57.