



金属材料高温力学性能分析综合 实验设计与实践

伍 灿¹, 李东风², 王开发², 王秋生²

(1. 哈尔滨工业大学(深圳) 实验与创新实践教育中心, 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学(深圳) 理学院, 深圳 518055)

摘要: 采用高温材料力学试验机结合三维全场应变测量系统, 将先进科研技术手段融入实验教学, 构建了教学型高温静态拉伸实验方法, 新建了金属材料高温力学性能分析综合实验。该实验以激光引伸计法、三维非接触式全场应变测量法(3D-DIC 法)测量高温变形, 实现高温拉伸变形从单一数值输出到全场变形可视化。实验还设立了独立考核与团队合作考核相结合的考核模式, 以前沿技术促进教学质量提升, 加强了学生创新能力及科研能力的培养。该实验已进入本科生创新实验及研究生力学实验课程体系中, 取得了良好效果。

关键词: 高温拉伸; 激光引伸计法; 3D-DIC 法; 本科教学

中图分类号: G642.3

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220661

Design and Practice of Comprehensive Experiments for High-temperature Mechanical Analysis of Metallic Materials

WU Can¹, LI Dongfeng², WANG Kaifa², WANG Qiusheng²

(1. Experiment and Innovation Practice Education Center, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;
2. School of Science, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

Abstract: By using high-temperature material mechanics testing machine and three-dimensional full field strain measurement system, and integrating advanced scientific research technology into experimental teaching, a teaching type high-temperature static tensile test method was constructed, and a comprehensive experiment of high-temperature mechanical property analysis of metal materials was newly built. In this experiment, laser extensometer method and three-dimensional non-contact full field strain measurement method (3D-DIC method) were used to measure the high-temperature deformation, and the high-temperature tensile deformation was visualized from a single numerical output to the full field deformation. The experiment also set up an assessment mode combining independent assessment and team cooperation assessment, promoting the improvement of teaching quality with cutting-edge technology, and strengthening the cultivation of students' innovation ability and scientific research ability. The experiment has entered the undergraduate innovative experiment and graduate mechanical experiment curriculum system, and has achieved good results.

Key words: high temperature tensile; laser extensometer method; 3D-DIC method; undergraduate teaching

航空发动机部件、核电管道、高压蒸汽锅炉、燃气轮机设备上的一些机械构件长期处在高温条件下工作, 这种服役环境对结构件提出了高温力学性能要求。因此, 研究与评价一些特定材料的高温力学性能使其满足服役要求显得尤为重要^[1-2]。

高温测试条件下材料形变值的变化是导致材

料失效的重要因素之一, 评价及测量高温变形值至关重要。在传统材料力学实验中运用的材料变形测量方法多为手持式夹持引伸计及横梁位移, 这在实际测量中存在弊端, 如手持式引伸计无法跟踪到断裂且只适用于常温环境, 而横梁位移描述变形误差极大。基于这些问题, 近年来, 由于具有较好的环境适应性, 非接触式光测力学方法

收稿日期: 2022-11-23; 修回日期: 2022-12-08

基金项目: 哈尔滨工业大学(深圳)校级创新课程思政项目(HITSZIP20028)。

作者简介: 伍灿(1989-), 女, 硕士, 实验师, 主要从事高温力学等方面的研究。E-mail: wucan0123@163.com

在科学研究和工程测量中获得广泛应用^[3-4]。作为新型非接触式光测方法，激光引伸计法及三维非接触式全场应变测量法(3D-DIC法^[5-6])均为基于特征点光学反射计算变形值的非接触式光学测量技术，具有环境适应性强、非接触式、高分辨率等突出优点。因此，在金属材料高温静态拉伸研究中引入两种测量手段，实现变形单一数值输出到全场变形可视化，探讨高温下材料性能演变规律，可为工程及新型高温材料研究提供重要保障。

根据高校创新模式^[7-9]培养方向，响应国家“强基”计划^[10-11]要求，建立了实践培养效果较佳的金属材料高温力学性能综合实验。对于选拔对力学感兴趣的本科生，培养其掌握高温力学原理、高温测试设备使用、高温力学实验研究方法，提升学生创新能力及动手能力都具有重要意义。

1 非接触式应变测量原理及高温拉伸实验系统组成

在非接触式激光引伸计测量方法中，激光照射到光感粗糙表面，不同方向发散光线并发生漫反射，其中一部分光线返回到激光接收器中，形成了颗粒状的散斑图。随着试样表面结构发生变形，照射到试样表面形成的激光散斑也慢慢发生变形。此时，视频处理器定位所存储的散斑图案并计算出散斑图案在图像之间的移动位移，从而达到测量变形值的目的。激光引伸计测量无需进行表面散斑制作，通过光源照射自动识别试样表面特征点，输出值为变形数据。

3D-DIC 技术测量方法原理为使用标定板图像标定完成确立初始像素点坐标，并以像素灰度作为信息载体，分析前一时刻被测物体表面和下一时刻被测物体表面的散斑图像来获取相同形状散斑点位置作为被测物体表面位移矢量。因而，3D-DIC 技术不仅可获得高温下试样任意段的变形数值，而且可实现全场变形云图可视化测量。

高温拉伸实验系统由配备高温炉的 zwick z100 材料力学试验机、CS 三维全场应变测量系统等先进科研设备组成。其中 CS 三维全场应变测量系统由相机、光源、NI 采集卡及计算机组成。软件部分则由 Vic-Snap 采集软件和 Vic-3D 分析软件组成。高温系统相机采用两个相机同时进行采集，

可消除表面位移对应变影响，高温拉伸实验系统如图 1 所示。由于高温炉系统炉膛关闭后炉口极小(宽×长：10 mm×90 mm)，并且在高温条件下，金属试样会存在红外反光现象，普通白光光源无法满足实验条件，因此实验选择 2 个蓝光光源进行光照补偿。为避免反光，将光源安放在试验机高温炉口两侧通过自上而下照射，降低并避免反光，并且蓝光波长(425~475 nm)不受相机红外滤镜的影响。实验证明此光源组合在高温下试样表面补光效果良好。

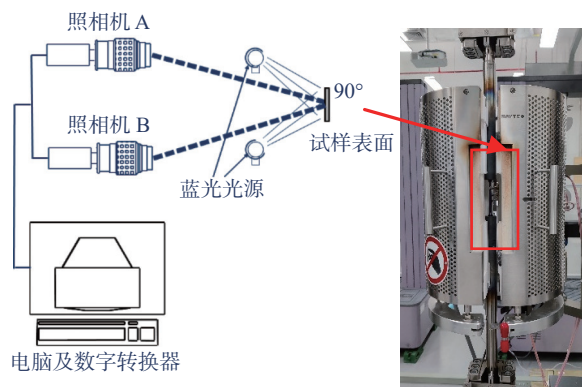


图 1 高温拉伸实验系统组成图

2 实验总体设计思路

金属材料高温力学综合实验从常温拉伸引入高温拉伸概念，依托高温拉伸测量系统，以激光引伸计法、3D-DIC 法逐层深入研究，实现高温瞬态拉伸单一变形输出到全场变形可视化。整体教学思路如图 2 所示。

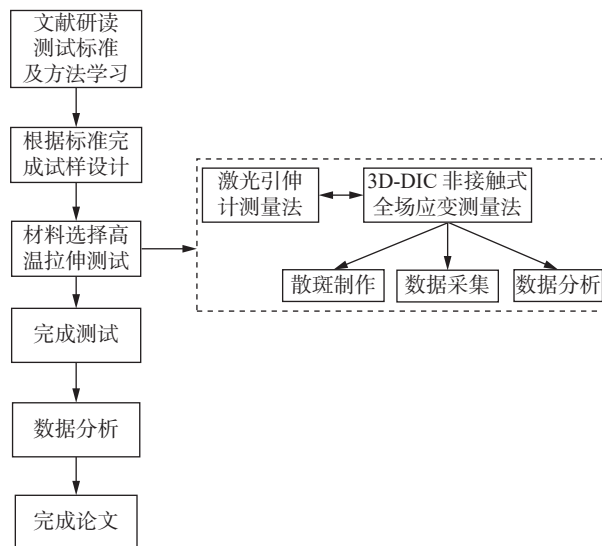


图 2 实验总体设计思路图

1) 实验以力学基础实验——常温拉伸理论为引, 源于基础高于基础, 逐层深入。在课程中引入高温力学概念, 再逐步使学生掌握用激光引伸计进行高温拉伸力学性能测试的原理及方法, 并熟练使用材料力学试验机。

2) 学会寻求新方法解决问题的能力。由于高温条件下材料氧化变黑等问题导致激光引伸计在测试过程中存在跟踪丢失无法实验问题。引入 3D-DIC 法不仅可解决高温下变形无法跟踪问题, 而且可实现试样在高温拉伸条件下单一变形数值输出到全场变形可视化。最后进行两种变形测试方法精度对比分析, 验证一致性及准确性。

3) 扩充学生知识领域, 提高数据处理能力及科研能力。在实验加温过程中, 给学生讲解原理及高温拉伸相关文献, 引导学生完成方案设计。课程考核分独立考核及团队考核两种形式, 学生独立完成实验报告, 但实验过程以 4~5 人为一团队进行, 并推选出组长, 共同完成课程论文。

3 实验内容及实施方案

3.1 实验试样制备

3.1.1 高温拉伸试样材料选择及制备

高温拉伸实验选材: P91 钢。P91 钢为低碳马氏体钢^[12], 被应用于各类电站锅炉以及管道系统, 在高温条件下具有散热慢、弯曲加工能力强、高温抗氧化性能好^[13]等特点。

高温拉伸实验试样制备按照高温静态拉伸参考标准“GBT 228.2—2015 金属材料拉伸试验第 2 部分: 高温试验方法”。为满足高温炉 3 根探针精准测温尺寸要求及减小应力集中影响, 高温拉伸试样如图 3 所示。

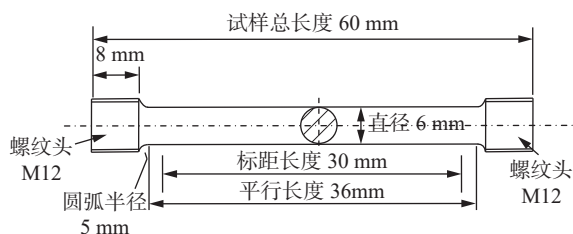


图 3 高温拉伸试样图

3.1.2 高温散斑样品制备

运用 3D-DIC 法进行测试前, 需完成样品高温散斑制作。常温下散斑制备方法在高温下易发生脱落、融化等现象, 不能满足实验要求。经过多

次样品散斑测试, 最终发现以下方式高温散斑呈现效果最好。

1) 底层制作: 底层目的为尽可能地增加对比度, 并结合考虑高温实验温度高、炉口小等因素, 散斑图案制作选择黑底白点, 形成对比度。底层制作选择“VHT 耐高温防锈漆”, 此款高温油漆耐热温度高达 1200 °C, 均匀喷洒在试样表面(不可太厚, 轻薄喷洒即可), 静置片刻, 待黑色底漆完全干后再进行白色散点喷涂。

2) 白色散斑制作: 为了在试样表面建立特征点, 白色散斑制作原则为密集、细小的特征点。采用的颜料为烤干陶瓷颜料, 可承受温度为 1200 °C 以上, 为避免反光, 用白色和哑光色颜料进行 1:1 混合后, 使用牙刷蘸取少量颜料并在试样上轻轻喷洒让散落点附着在试样表面形成白色散斑。制备好散斑的试件常温自然干燥 1 h 才可开始实验。

高温试样散斑 600 °C 实验前及颈缩断裂时散斑图如图 4 所示。从图中可看出, 在样品大变形至颈缩断裂过程中散斑依然十分清晰, 不存在脱落现象。

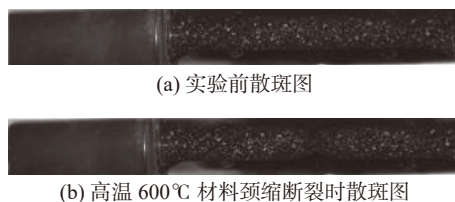


图 4 高温散斑图样

3.2 激光引伸计法进行高温拉伸测试

此部分实验通过激光引伸计测高温变形值, 探讨在高温条件下, 改变应变率及温度对 P91 钢拉伸性能的影响, 实验所用设备及学生实验现场如图 5 所示。

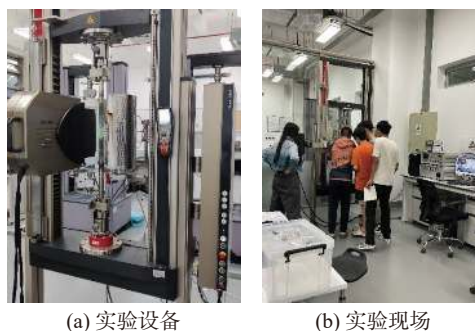


图 5 激光引伸计法实验设备及学生实验现场

具体实验要求如下。

1) 学生根据已提供材料, 自查材料性能, 制定实验工况。

2) 让学生养成边实验边思考的思维方式。在实验过程中根据出现的问题灵活调整工况参数, 如 P91 钢在 600~800 °C 表现出极强塑性, 此时可探讨出现异常变化的温度区间, 适时修改实验工况, 引导学生进行思考。

3) 根据测得实验数据并结合相关论文进行数据分析及处理, 并及时进行归纳总结, 分析温度及应变率在高温下对材料性能的影响。

3.3 结合 3D-DIC 法进行高温拉伸实验

在高温测试环境下, 常存在试样反光、氧化变黑等问题导致激光引伸计无法测量变形值。因此, 引入三维非接触式全场应变测量方法(3D-DIC 法), 不仅可解决上述问题, 还可实现全场变形可视化。具体课程开展及学生实验过程如图 6 所示。

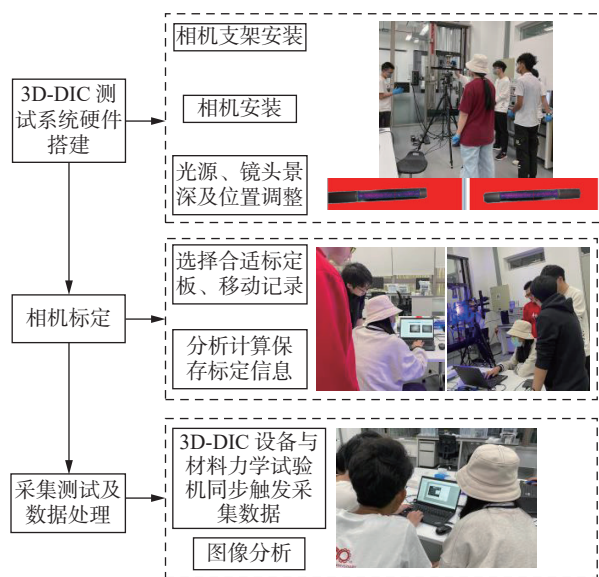


图 6 高温拉伸与三维非接触式全场应变测量方法开展实验过程图

此部分实验目的如下。

1) 使学生了解 3D-DIC 法的实验原理及精度控制要素方法。

2) 使学生掌握 3D-DIC 测试法硬件搭建、相机调整、标定、散斑评估、数据采集、分析数据提取合理实验结果的方法。由于高温 3D-DIC 法实验高温炉口极小, 造成相机位置调整、样品标定困难极大。一方面蓝光光源能量极强导致标定时

标定板发烫, 另一方面小炉口限制了标定板位置, 导致实验过程复杂多变。因此, 在实验过程中可充分磨炼学生实验意志力、培养认真仔细的科研态度。

3) 学生对比分析激光引伸计法、3D-DIC 法所测数据, 并比较两种测试方法的优劣: 激光引伸计法只能获取任一指定标距段变形数据, 但 3D-DIC 法可获取任意段变形数据及云图; 3D-DIC 法需完成散斑制作, 高温下散斑质量直接影响实验结果, 但激光引伸计法无需进行散斑制作, 更直观方便。

4 实验结果与讨论

4.1 激光引伸计法测量不同应变率、不同温度对 P91 钢性能的影响

在材料力学拉伸实验中, 研究常温下材料应力-应变曲线采用的是名义应力、名义应变, 但实际实验中, 任一瞬时的真实应力、真实应变与名义应力、名义应变存在着差异, 进入塑性后差异逐渐增大。因而, 在高温实验条件下, 采用变形体积不变假设求取真实应力-真实应变曲线^[14]。

P91 钢在应变率 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, 不同温度下的真应力-真应变曲线如图 7 所示。随着温度升高, 材料流变应力^[15]降低, 可得出在 400~500 °C 时, 材料强度极限达到 1000 MPa 以上, 但到 600 °C 时, 强度极限降低至 879 MPa, 且随着温度升高, 强化阶段平台缩短, 材料以较快速度进入颈缩阶段。这主要因为随着温度升高, 材料内部原子活动能力增强, 有利于位错滑移, 阻力减小, 动态回复更易进行, 从而材料高温流变应力降低。

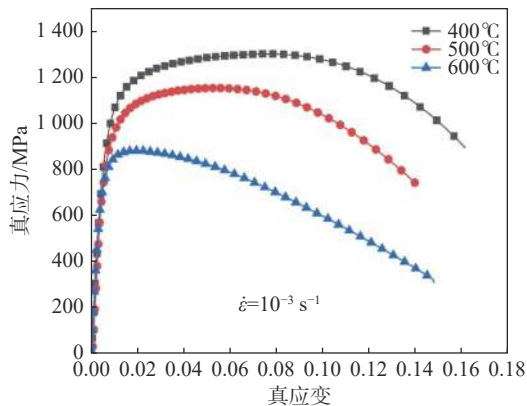


图 7 不同温度下真应力-真应变曲线图

P91 钢在温度 $T=600 \text{ °C}$ 时, 不同应变率下的真应力-真应变曲线如图 8 所示。随着应变率增

大, 材料流变应力随之增加, 在 $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 时, 材料强度极限达到 985 MPa。这主要因为随着应变率增加, 材料内部变形速度增快, 位错滑移速度增大, 材料内部堆积, 导致位错滑移难度增大, 位错运动无法充分进行, 从而导致材料内部流变应力增大。

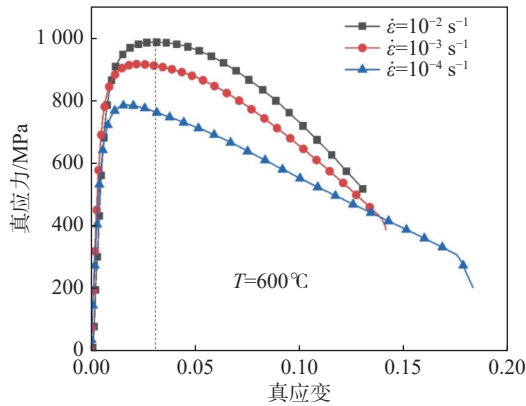


图 8 不同应变率下真应力-真应变曲线图

4.2 3D-DIC 法测量高温下 P91 钢拉伸性能分析

P91 钢在高温 600 °C、应变率 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 下表面变形场云图如图 9 所示, 图中 X 轴形变值为材料在竖向拉伸载荷作用下相对于试样中间位置点 0 所产生的竖向变形。云图显示变形值由中间原点位置向两侧阶梯增大, 变形场均匀变化, 与预期结果相符。

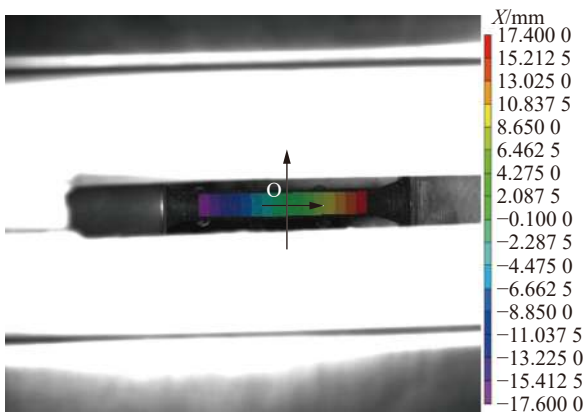


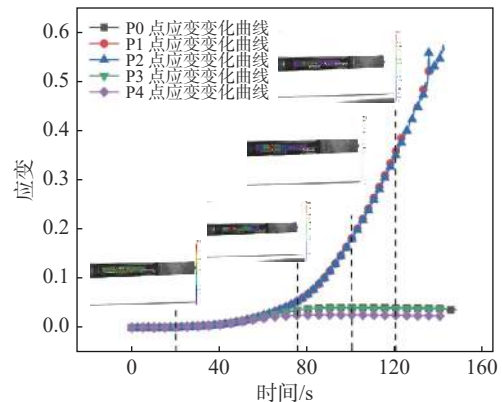
图 9 3D-DIC 法高温下试样变形云图

由拉伸方向的位移场, 进行数据转换求解试件表面竖向应变场。由图 10 可看出, 应变场均匀变化, 试样在拉伸至颈缩阶段时可以看出试样上表面未存在散斑脱落。依次选取试样上各点 P0/P1/P2/P3/P4, P1/P2 两点位于颈缩处两侧, 并进行各点应变值变化分析, 颈缩处两侧 P1/P2 点应变值变化具有一致性, 除 P2 点存在一个突变位

置, 这主要是由于 P2 点处散斑质量相对较差, 在颈缩变形较大时出现飞跃点。P0 和 P3 点位于试样中间点 0 拉伸对称位置上, 两者的应变变化重合。依次选取 20 s、75 s、100 s、120 s 时试样应变云图变化, 可看出全场变形在整个拉伸过程中的变化曲线, 红色最大变形区域由一开始的大范围逐渐缩小, 到颈缩阶段为小区域大变形演变。



(a) 3D-DIC 法高温下试样应变云图



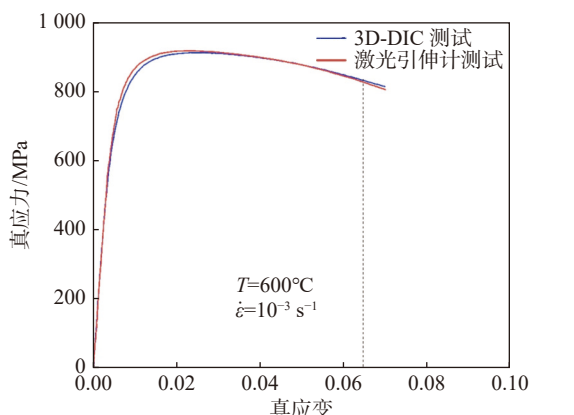
(b) 3D-DIC 法高温下试样应变演变规律图

图 10 3D-DIC 法高温下 P91 钢拉伸应变图

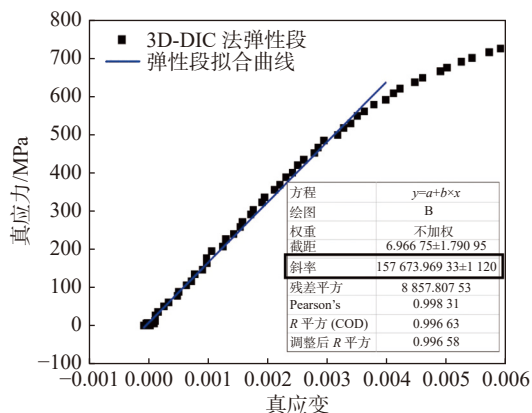
4.3 两种测试方法对比分析

实验中, 3D-DIC 法通过数字信号转换器将电压值精准转换力值进行测量, 最终实现力值与变形值同步触发采集, 减少了手动触发时间差所引起的误差。由 3D-DIC 法及激光引伸计法测量数据, 得到 P91 钢在温度 $T=600 \text{ °C}$, 应变率 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 下的真应力-真应变曲线图。由图 11 可看出, 两种方法所测得的曲线几乎重合, 所测高温下强度极限值为: 激光引伸计法 915 MPa, 3D-DIC 法 910.7 MPa。

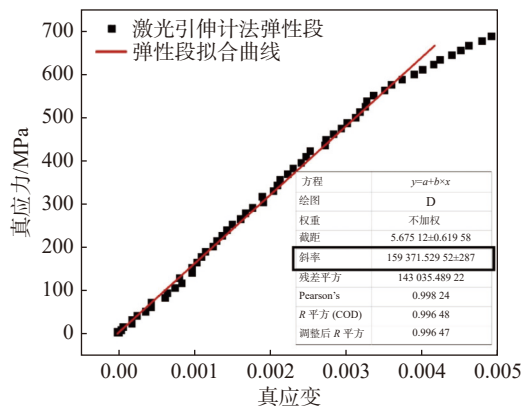
分别选取两种测试方法在温度 $T=600 \text{ °C}$, 应变率 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 工况下真应力-真应变弹性段曲线进行线性拟合, 结果如图 11 所示。由拟合曲线斜率值可得两种方法材料弹性模量值分别为: 3D-DIC 法 157 GPa, 激光引伸计法 159 GPa。由此可得出, 两种方法所测数据具有高度一致性。



(a) 3D-DIC 测试与激光引伸计测试下真应力-真应变曲线图



(b) 3D-DIC 法弹性模量拟合曲线图



(c) 激光引伸计法弹性模量拟合曲线图

图 11 3D-DIC 测试与激光引伸计测试数据对比及弹性段拟合曲线图

5 结束语

金属材料高温力学性能实验通过引导学生文献阅读, 引入激光引伸计及 3D-DIC 等多种科研测量手段, 进行 P91 耐热钢材料高温性能研究, 实现高温拉伸从单一数值输出到全场变形可视化。有效证明了两种测试手段的一致性。该实验测试手段及方法与前沿科技应用相结合, 既为工程及新型材料研发提供有力支撑依据, 也提升了学生

实验操作能力、创新思维及科研意识。课程在连续两年的教学实践过程中, 学生反映课程效果良好。在后续实验中, 为提升学生实验兴趣, 也将结合工程应用背景与科研课题转换, 采用不同材料进行对比研究, 进一步丰富实验项目内容。

参考文献

- [1] 王吉会, 郑俊萍, 刘家臣, 等. 材料力学性能原理与实验教程[M]. 天津: 天津大学出版社, 2018.
- [2] 王妮, 刘新宝, 朱麟, 等. P91钢的瞬态蠕变行为分析[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 20-25.
- [3] 邵新星, 陈捷, 马沁魏, 等. 实时三维数字图像相关方法在材料力学教学中的应用[J]. 力学与实践, 2021, 43(5): 776-782.
- [4] 段洪元, 宫文然, 郭保桥, 等. 高温数字图像相关方法中的制斑和图像处理技术[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2019, 59(6): 425-431.
- [5] 秦强, 张翔宇, 郭翔, 等. 基于数字图像的高温光学变形测量方法研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(10): 1-11.
- [6] 潘兵, 吴大方, 高镇同, 等. 1200 °C高温热环境下全场变形的非接触光学测量方法研究[J]. 强度与环境, 2011, 38(1): 52-59.
- [7] 黄敏, 陈炎辉. 我国研究型大学拔尖创新人才培养模式研究——基于“985工程”大学《2020年度本科教学质量报告》的文本分析[J]. 国家教育行政学院学报, 2012(10): 51-56.
- [8] 新华网. “拔尖计划”实施10周年专家学者探讨如何提升拔尖创新人才培养能力[EB/OL]. [2021-06-19]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1620092807009667990&wfr=spider&for=pc>.
- [9] 邹晓东, 李铭霞, 陆国栋, 等. 从混合班到竺可桢学院——浙江大学培养拔尖人才的探索之路[J]. 高等教育教育研究, 2010(1): 64-74.
- [10] 教育部. 教育部关于在部分高校开展基础学科招生改革试点工作的意见(教学〔2010〕1号)[EB/OL]. [2021-06-19]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/15/content_5469328.htm.
- [11] 潘懋元. 应用型人才培养的理论与实践[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011.
- [12] 郭元蓉, 吴红. P91无缝钢管国产化研究进展[J]. 钢管, 2008, 37(1): 22-27.
- [13] 周梵, 王学, 孙松涛, 等. 升温速率对P91钢管道局部焊后热处理温度场的影响及参数优化[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 29-34.
- [14] 李建光, 施琪, 曹结东. Johnson-Cook本构方程的参数标定[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(2): 164-167.
- [15] 张延泽, 秦健, 孟祥尧, 等. 高温高应变率下ZL101A铝合金的流变应力特征与本构模型[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3): 86-89.