



高温环境下材料泊松比测试方法研究

余建新, 王晓鹏, 崔喜平*

(哈尔滨工业大学 分析测试与计算中心, 哈尔滨 150080)

摘要: 对高温环境下材料泊松比测试的共振法进行了研究, 提出一种矩形样品的陶瓷杆三点支撑方法, 结合弯曲模态振型节点和剪切模态振型节点确定样品支撑位置, 采用脉冲激励技术同步测量弹性模量、剪切模量、泊松比、阻尼因子等材料参数, 给出了高温下泊松比测试流程, 讨论了试验相关注意事项。以碳化硅颗粒增强铝合金为例, 获得了泊松比随温度变化曲线。结果表明, 随着温度升高, 泊松比微小幅度增加。该方法可用于金属、陶瓷、钛合金等其他固体材料在高温环境下的泊松比测试。

关键词: 弹性模量; 剪切模量; 泊松比; 脉冲激励技术; 高温环境

中图分类号: TP302.1

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20200474](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20200474)

Material Poisson's Ratio Measurement Method at Elevated Temperatures

YU Jianxin, WANG Xiaopeng, CUI Xiping*

(Center of Analysis, Measurement and Computing, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Resonance method of the material Poisson's ratio measurement at elevated temperature is investigated. A method for supporting rectangular sample based on three ceramic rods is proposed, the supporting positions are determined based on the modal nodes of both bending and shearing mode shapes, material parameters such as elastic modulus, shear modulus, Poisson's ratio and damping factor are tested by impulse excitation technology, the flowchart for Poisson's ratio measurement at elevated temperature is illustrated, and related issues are discussed. A SiC grain reinforced Aluminum alloy is taken as an example, the relationship between Poisson's ratio and temperature is obtained. Results show that Poisson's ratio slightly increased as temperature increased. The discussed Poisson's ratio measurement method is feasible for the measurement of other solid materials, such as metals, ceramics and titanium, at elevated temperatures.

Key words: elastic modulus; shear modulus; Poisson's ratio; impulse excitation technology; elevated temperature

泊松比是材料在单向受拉或受压时, 横向正应变与轴向正应变的绝对值比值, 也叫横向变形系数, 它是反映材料横向变形的弹性常数。常温下泊松比测试方法有静态法、超声法和共振法等, 其中静态法采用电子万能试验机施加轴向载荷, 采用两个引伸计或应变片测量拉伸或压缩过程中纵向和横向变形, 通过横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值进行计算。超声法通过测量超声纵波和超声横波, 计算材料的泊松比。共振法则是测量弯曲共振频率和剪切共振频率, 获得对应的弹性模量和剪切模量, 从而计算泊松比。文献 [1-6] 讨论了室温环境下弹性模量测量方法,

但局限于实验教学角度, 其可重复性和测量精度不满足科研测试需求。高温环境下泊松比测试相对困难, 如静态法中由于受加热腔体体积的限制, 无法同时安装纵向和横向引伸计, 应变片的使用温度较低, 限制了高温环境下使用。超声法的使用范围受到材料居里温度影响, 当温度超过居里温度时超声法失效。随着材料服役温度升高, 迫切需要在服役温度下测量材料的弹性模量、剪切模量、泊松比、阻尼因子等参数。其中弹性模量和阻尼因子的测量方法相对成熟, 基于弹性模量随温度变化, 可进一步研究材料的高温服役环境下材料特性^[7]。如文献 [8] 讨论金属材料

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2021-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51771064, 51971074)。

作者简介: 余建新(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事材料力学测试方法研究。

通信作者: 崔喜平(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事组织结构分析方法研究。E-mail: cuiyiping@hit.edu.cn

的弹性模量随温度升高存在软化现象。文献 [9] 讨论高温下低活化铁素体-马氏体钢的弹性特性。文献 [10] 研究部分烧结氧化铝陶瓷在加热、烧结、冷却过程中弹性模量的变化。文献 [11] 研究凝胶注模的过程中弹性模量变化等。相对而言, 高温环境下的剪切模量和泊松比测试相对较难, 因为一阶弯曲模态振型和一阶剪切模态振型的节点位置不同, 导致弯曲频率和剪切频率测试时的样品支撑方法不同。高温环境下样品处于封闭炉体内, 无法在测试过程中调整支撑方式。高温炉无法保证两次单独测试获得弹性模量和剪切模量处于同一温度, 迫切需要一次试验获得弹性模量和剪切模量的测试方法。

本文讨论高温环境下材料泊松比测试方法, 通过优化样品支撑位置, 用脉冲激励技术同步测量弹性模量和剪切模量。以碳化硅颗粒增强铝为例, 获得泊松比随温度变化规律, 并讨论了高温环境下泊松比测试的注意事项。

1 理论依据

矩形梁弯曲共振基频和弹性模量关系为:

$$E = 0.9464 \frac{ml^3}{bt^3} f_1^2 \times 10^{-9} \times T_1 \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量(GPa), m 为质量(g), f_1 为弯曲共振基频(Hz), l 为长度(mm), b 为宽度(mm), t 为厚度(mm), ν 为泊松比, T_1 为形状修正系数。国家标准 GBT 22315—2008 中形状修正系数采用表格形式给出, 文献 [12] 依据国标中数据, 用曲线拟合法获得形状修正系数的近似表达式。文献 [13] 中形状修正系数表达式为:

$$T_1 = 1 + 6.858(1 + 0.0752\nu + 0.8109\nu^2)\left(\frac{t}{l}\right)^2 - 0.868\left(\frac{t}{l}\right)^4 - \left(\frac{8.340(1 + 0.2023\nu + 2.173)(t/l)^4}{1 + 6.338(1 + 0.1408\nu + 1.536\nu^2)(t/l)^2}\right)$$

当 $l/t > 20$, 简化成 $T_1 = 1 + 6.858(t/l)^2$ 。

矩形梁扭转基频和剪切模量的关系为:

$$G = \frac{4lmf_2^2}{bt} \left[\frac{B}{1+A} \right] \times 10^{-9} \quad (2)$$

$$A = \left[\frac{0.5062 - 0.8776(b/t) + 0.3504(b/t)^2 - 0.0078(b/t)^3}{12.03(b/t) + 9.892(b/t)^2} \right]$$

$$B = \left[\frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^6} \right]$$

式中, G 为剪切模量(GPa), m 为质量(g), f_2 为扭转

共振基频(Hz), l 为长度(mm), b 为宽度(mm), t 为厚度(mm), 当 $1 < b/t < 2$ 时, A 可忽略。

泊松比公式为:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3)$$

式中, E 和 G 分别为弹性模量和剪切模量。

考虑到矩形梁在脉冲激励下的响应包含多个频率, 采用傅里叶变换将时域信号进行频域分解, 用半功率带宽法计算共振频率下的阻尼因子:

$$\zeta_n = \frac{f_n^a - f_n^b}{2f_n} = \frac{\Delta f_n}{2f_n}, n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

式中, f_n 是共振频率, f_n^b 和 f_n^a 分别是 f_n 两侧振幅 $1/\sqrt{2}$ 的倍频。

2 室温试验方法

2.1 室温下样品支撑方法

对于细长型矩形样品, 共振法测量时支撑位置如图 1 所示, 一阶弯曲共振频率测试时的支撑位置如图 1(a)所示, 支座与端部的距离为总长的 0.224 倍。扭转共振频率测试时支撑位置如图 1(b)所示, 一阶剪切模态振型节点呈十字交叉, 支撑位置在样品中轴线上。

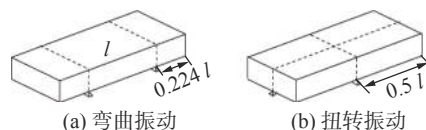


图1 室温下样品支撑位置

2.2 室温下泊松比测试流程

室温下泊松比测试流程图如图 2 所示, 用弯曲共振测试时, 激励和响应位置在中间位置, 因为中心位置为一阶弯曲模态振型的位移最大值。在脉冲激励下得到弯曲共振基频, 采用式(1)计算弹性模量。扭转共振时激励和响应位置在对角位置, 由一阶模态振型可知对角位置的位移最大。在脉冲激励下得到扭转共振基频, 采用式(2)计算剪切模量。最后将弹性模量和剪切模量代入式(3)得到泊松比。

2.3 室温下泊松比测试结果

碳化硅颗粒增强铝基复合材料由碳化硅粉体和颗粒状的铝复合而成, 是一种综合性能优异的轻质金属基复合材料, 密度仅为钢的 1/3, 强度高于纯铝和中碳钢。选用体积分数 45% 碳化硅颗粒增强 2024 铝, 试样尺寸为 79.98mm×35.01mm×9.08mm, 质量为 74.622 g。弯曲共振频率为 10 262 Hz, 代入厚长比计算形状修正系数 T_1 为 1.09, 对应的弹

性模量为 158.1 GPa。扭转共振频率为 13 409 Hz，对应的剪切模量为 63.4 GPa，最后泊松比为 0.249。

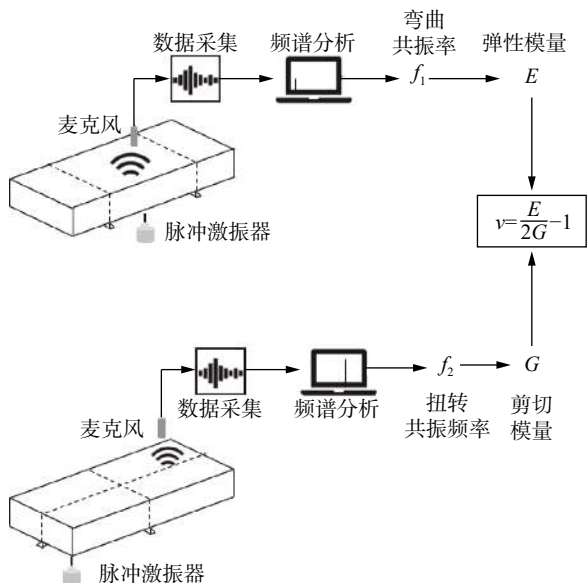


图2 室温下泊松比测试流程图

3 高温试验方法

3.1 高温下样品支撑方法

高温环境下样品支撑图如图3所示。采用有限元法对矩形样品进行模态分析，图3(a)和图3(b)表示矩形样品的一阶弯曲共振模态振型和一阶扭转共振模态振型，红色部分表示位移极大值，蓝色部分表示位移极小值。图3(c)给出模态振型节点分布示意图，理想情况下节点位置在共振时位移为零，点1和点2为弯曲共振和扭转共振的节点的交点。为了支撑样品，在弯曲模态振型节点距离宽度1/4位置设置点3。测试结果表明，采用三点支撑可同时获得弯曲共振频率和扭转共振频率，从而可测量高温弹性模量和剪切模量。图3(d)给出了高温下样品支撑实物图，采用直径3 mm氧化铝陶瓷杆支撑矩形样品。

3.2 高温下泊松比测试流程

高温下泊松比测试流程图如图4所示，高温加热内部装置图如图5所示，如脉冲激励装置和位置调节装置等。采用金属环对炉体隔振，最大限度地减小外部振动的干扰。共振频谱图如图6所示，室温方法中第1次脉冲激励只获得弯曲共振频率，第2次脉冲激励只获得扭转共振频率。经支撑位置调整，本文方法同时获得弯曲共振频率和扭转共振频率，从而获得对应的弹性模量和剪切模量，计算材料的泊松比。

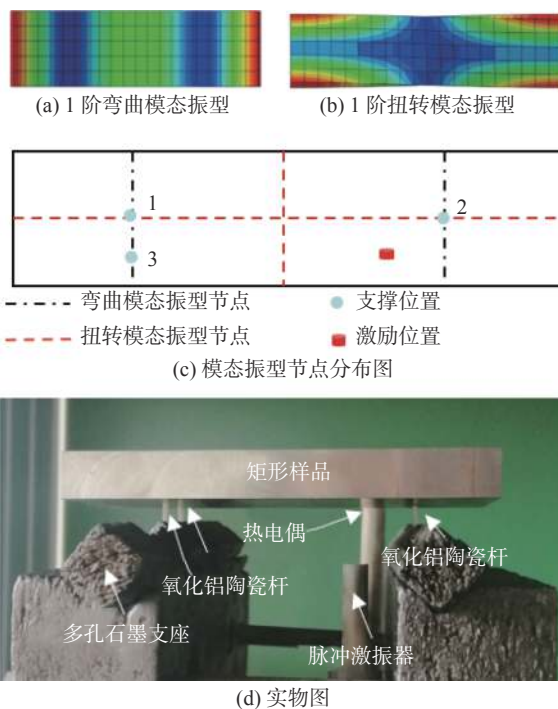


图3 高温下样品支撑图

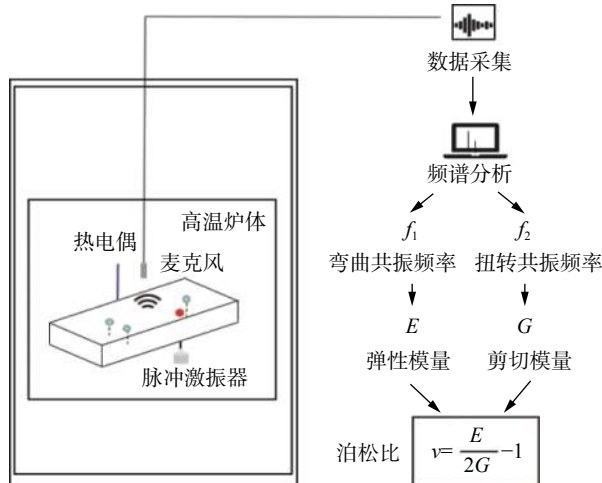


图4 高温下泊松比测试流程图

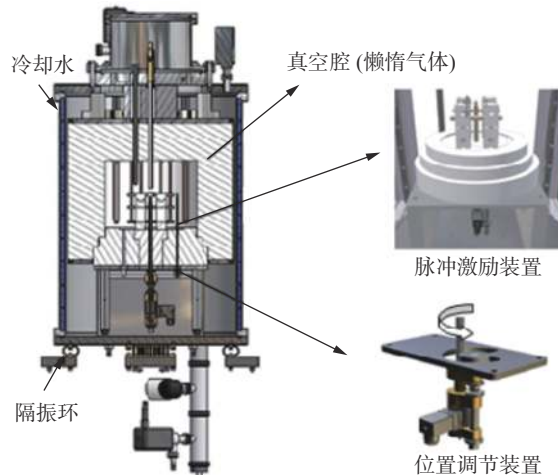


图5 高温加热内部装置

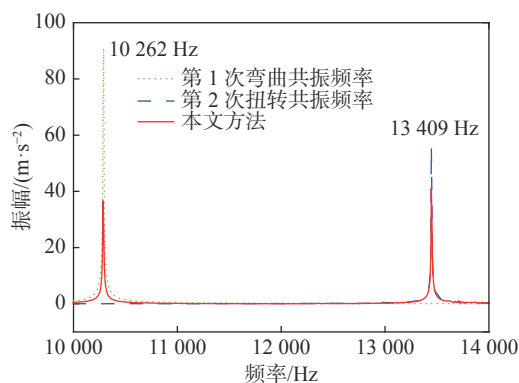


图6 共振频谱图

3.3 高温下泊松比测试结果

碳化硅颗粒增强铝基复合材料在 300 ℃~350 ℃ 稳定工作,以碳化硅颗粒增强铝为例进行泊松比测试,其中升温速率 3 ℃/min,目标温度 300 ℃,保温 5 min 后停止加热。图 7 是温度-时间曲线,含升温、保温和降温 3 个过程。其中升温过程近似线性,保温过程温度上下偏差 1 ℃,降温过程温度随时间呈指数衰减。

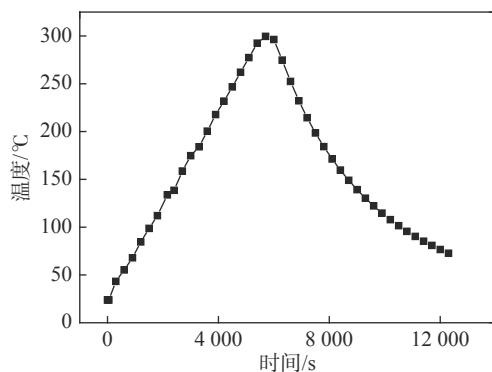


图7 温度-时间曲线

弹性模量是表征晶体中原子间结合力强弱的物理量,用于度量材料刚度,表征物体变形难易程度。室温下 2024 纯铝的弹性模量为 70 GPa,碳化硅颗粒增强铝的弹性模量为 158.1 GPa,提高 125.5%。图 8 是弹性模量和阻尼因子随温度变化曲线,图中黑色部分表示升温过程,弹性模量随着温度升高逐渐下降,温度为 300 ℃ 时弹性模量为 145.1 GPa,减少 8%。表明高温环境下,材料内部晶体中原子间结合力减弱。红色部分表示降温过程,弹性模量随着温度降低逐渐增大,但降温过程的弹性模量低于升温过程,经历一个温度循环后,材料内部结构发生变化。

阻尼因子表征材料的能量耗散性能,阻尼越大,变形过程耗散的能量越多。在室温到 300 ℃

的温度范围内,整体上铝基复合材料的阻尼因子较小,随温度升高,阻尼因子有微小幅度的增加,高温环境下消耗更多脉冲激励能量。

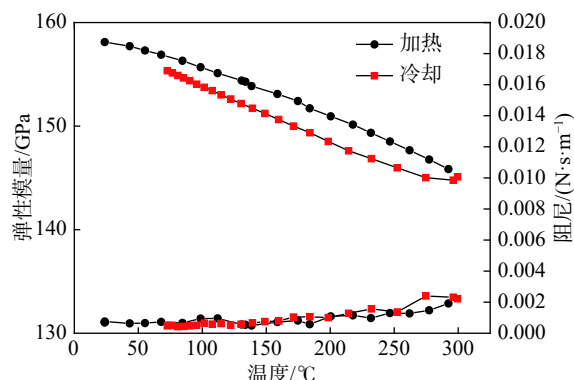


图8 弹性模量和阻尼因子-温度曲线

剪切模量是指剪切应力与剪切应变之比,室温下 2024 纯铝的剪切模量为 26.5 GPa,采用碳化硅颗粒增强后,剪切模量为 63.4 GPa,提高 139.2%,碳化硅颗粒大幅度提高了基体抗剪切变形能力。图 9 是剪切模量和阻尼因子随温度变化曲线,剪切模量随温度变化规律与弹性模量随温度变化规律大致相同,图中黑色曲线表示升温过程,剪切模量随着温度升高逐渐下降,当温度为 300 ℃ 时对应的弹性模量为 57.9 GPa,下降 10%,表明高温环境下材料抵抗剪切变形的能力减弱。红色曲线表示降温过程,剪切模量随着温度降低逐渐增大,但降温过程的剪切模量低于升温过程,可见温度对剪切模量也有显著影响。剪切频率对应的阻尼因子较小,随温度升高,阻尼因子存在微小幅度的增加。

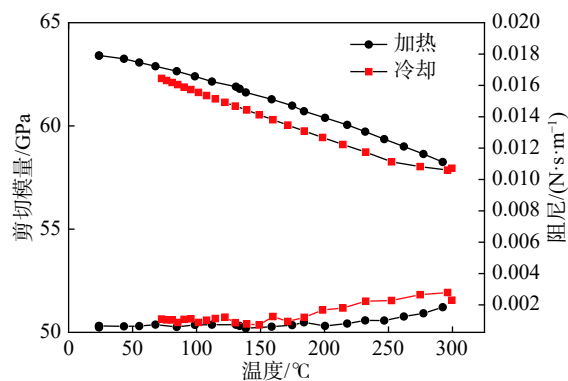


图9 剪切模量和阻尼因子-温度曲线

图 10 是泊松比随温度变化曲线,室温下 2024 纯铝泊松比为 0.32,由于碳化硅颗粒的泊松比约 0.07,导致碳化硅颗粒增强铝合金的复合泊

松比为 0.249, 相对纯铝减小 21.87%。随着温度从室温升高到 300 °C, 泊松比数值微小幅度增加, 从 0.249 增加到 0.252。

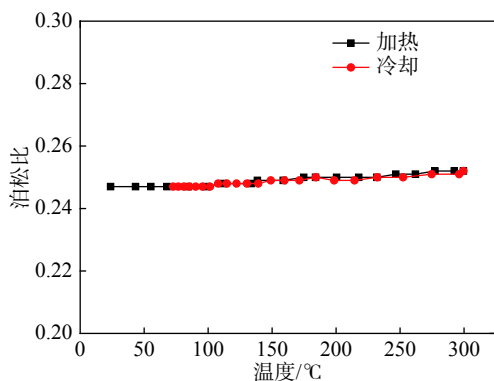


图 10 泊松比-温度曲线

3.4 高温下泊松比测试注意事项

3.4.1 样品安装

试样安装是高温环境下泊松比测试的关键, 确定三点支撑位置后, 采用脉冲激励进行试测, 先观察响应信号, 并对样品的支撑位置进行微调, 直到清晰识别弯曲共振频率和扭转共振频率为止。

3.4.2 洗气

对于采用石墨加热方式的高温弹性模量仪, 为了防止高温下石墨发生氧化反应, 需要在测试之前对封闭炉体内部进行洗气, 一般采用高纯氮气或者高纯氩气等惰性气体, 完成两个以上真空-充气过程。抽真空时先采用机械泵, 然后用分子泵继续抽到真空压力小于 1×10^{-7} GPa, 再充入惰性气体, 对于多孔材料需要增加洗气循环, 排除空隙内气体的影响。

3.4.3 测温

温度测量精度直接影响测试结果的准确性, 根据测量温度范围, 选用 K 型、S 型、B 型 3 种不同量程的热电偶, 从而提高测温准确性。同时调整样品和热电偶的距离, 注意测试温度低于样品熔点, 尤其是一定温度下样品中化学元素和夹具之间可能发生化学反应形成共晶。升温速率 $1 \sim 5$ °C/min, 对于尺寸较大的样品, 建议降低升温速率, 温度有特殊要求的测试建议保温 15 min, 提高测试过程中样品内部温度均匀性。

3.4.4 滤波

在室温环境下进行预实验, 确定弯曲共振基频和扭转共振基频的范围, 设置数字信号处理的

带通滤波器。金属在高温环境下软化, 导致响应信号十分微弱。采用增加脉冲激励幅值的方法, 增大响应信号强度, 但过大的脉冲激励可能导致样品位置变化。采用滤波器对响应信号进行处理, 降低干扰信号的影响, 对温度接近材料相变点时尤为重要。

4 静态法对比测试

采用电子万能试验机进行室温下泊松比测试, 试验机型号 Instron5569, 轴向加载速率 1 mm/min。采用中航工业电测仪器股份有限公司的 BE120-1AA 应变片, 电阻值 120 Ω。采用东华 DH3816N 静态应力应变测试分析系统采集加载过程中横向和纵向应变, 静态法测量泊松比为 0.25, 表明室温环境下共振法和静态法测量结果基本一致。

5 TC4 钛合金的高温泊松比测试

TC4 钛合金用于制造飞机机身、机翼中各种梁、接头、隔框和航空发动机风扇及压气机的盘片、叶片等。用 TC4 钛合金替代 30 CrMnSiA 等结构钢, 可以减轻零件重量约 30%。其中航空发动机风扇和压气机在高温环境下工作, 因此准确测量 TC4 在高温下的力学性能, 有利于保证结构安全。选用退火态 TC4 钛合金棒材, 加工成 $80.02 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3.02 \text{ mm}$ 板状, 重量 26.566 g。温度范围为室温到 600 °C, 升温速率 5 °C/min, 试验结果与《中国航空材料手册》第 4 卷钛合金铜合金^[13]进行对比, 具体关系曲线如图 11 和图 12 所示。

从图 11 可以看出, TC4 钛合金的弹性模量和剪切模量随温度升高近似线性降低, 室温弹性模量 114 GPa, 600 °C 时 83 GPa, 减小了 27.2%。室温剪切模量为 44.6 GPa, 600 °C 时 31.3 GPa, 下降了 29.8%。测试值和手册参考值基本吻合。

从图 12 可以看出, TC4 钛合金的泊松比随温度升高近似线性增加, 室温下泊松比为 0.28, 600 °C 时 0.30, 增加了 7.1%。泊松比的参考值为依据手册中不同温度下的弹性模量和剪切模量, 然后根据式 (3) 计算得到。从图中结果可知, 采用本文方法可连续测量不同温度下样品泊松比的变化, 并且数据稳定性好。

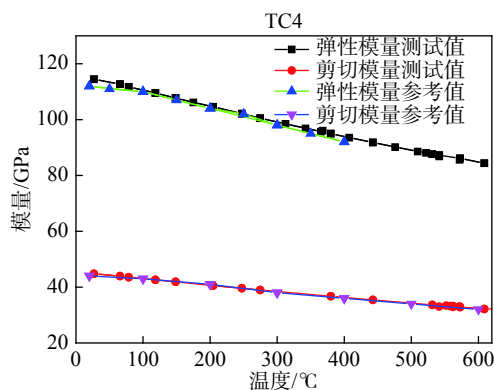


图 11 TC4 弹性模量和剪切模量随温度变化曲线

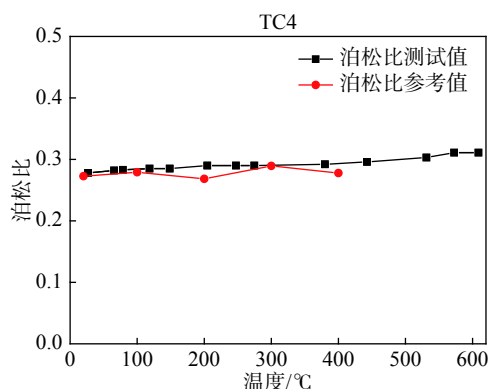


图 12 TC4 泊松比随温度变化曲线

6 结束语

本文提出了一种高温环境下材料泊松比的测试方法, 即采用陶瓷杆三点支撑矩形样品的弯曲模态振型节点和剪切模态振型节点位置, 在一次脉冲激励下成功获得弯曲共振频率和扭转共振频率, 从而同步测量弹性模量、剪切模量、泊松比、阻尼因子等材料参数。以碳化硅增强铝合金为例, 获得材料参数随温度变化关系, 验证了该方法的有效性。

测试结果表明, 碳化硅增强铝和 TC4 钛合金的弹性模量和剪切模量参数随温度升高逐渐减小, 泊松比和阻尼因子参数随温度升高而微小幅度增加。

参考文献

- [1] 唐纯青. 弹性体杨氏模量测定方法综述——兼谈对实验教学改革启示[J]. 实验室研究与探索, 2002, S(1): 59-61.
- [2] 刘吉森, 张进治. 杨氏模量的动态法测量研究[J]. 北方工业大学学报, 2006, 18(1): 48-52.
- [3] 刘燕, 周岚. 对动力学法测定材料弹性模量实验的研究[J]. 物理实验, 2007, 27(1): 45-48.
- [4] 樊聪聪, 刘华扬, 程敏熙. 动态法测杨氏模量实验的探索与改进[J]. 大学物理实验, 2016, 29(1): 51-59.
- [5] 孙维瑾, 赵莉丽, 张民, 等. 动态杨氏模量实验有关测量方法的探讨[J]. 物理与工程, 2007, 17(3): 41-42.
- [6] 李艳琴, 赵红艳, 李学慧, 等. 动力学共振法测量固体杨氏模量[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(10): 17-18.
- [7] 蒋首超, 彭航. 弯曲共振法测量金属材料高温弹性模量探讨[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(4): 36-38.
- [8] TRIPATHY H, RAJU S, HAJRA R, et al. High temperature elastic properties of reduced activation ferritic-martensitic(RAFM) steel using impulse excitation technique[J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2018, 49(1): 979-986.
- [9] GREGOROVA E, PABST W, NECINA V, et al. Young's modulus evolution during heating, resintering and cooling of partially sintered alumina ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(5): 1893-1899.
- [10] PSIUK B, WIENCINSKA P, LIPOWSKA B, et al. Impulse excitation technique IET as a non-destructive method for determining changes during the gelcasting process[J]. Ceramics International, 2016, 42(3): 3989-3996.
- [11] 王志, 杨飞, 王朝雅, 等. 材料弹性模量动态测试的修正系数表征研究[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(9): 34-37.
- [12] Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [13] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册第4卷: 钛合金 铜合金[M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

编辑 张莉