

变温环境下镍基合金力学参数的 激光超声检测

李俊蓉, 呼咏, 孟佳鉴, 朱志远, 张建海, 赵宏伟

(吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022)

摘 要:为解决 GH600 镍基合金在变温环境下关键力学参数难以测量的问题, 基于表面波和纵波的能量分布特点设计了同侧检测法和异侧对心检测法, 通过将激光超声检测系统与实验室自制的高、低温装置耦合, 获得了表面波和纵波的波速, 并理论反演出 $-90\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下合金的力学参数。试验结果显示: 随着温度升高, GH600 镍基合金弹性模量、剪切模量减小, 泊松比增大, 且测量值与参考值相差较小, 这证明激光超声方法能够对苛刻条件下的构件进行有效的性能表征。

关键词: 激光超声; 变温; 力学参数; 镍基合金

中图分类号: TB511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2172-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231108

Laser ultrasonic detection of mechanical parameters of nickel-based alloy under variable temperature environment

LI Jun-rong, HU Yong, MENG Jia-jian, ZHU Zhi-yuan, ZHANG Jian-hai, ZHAO Hong-wei

(School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to measure the key mechanical parameters of GH600 nickel-based alloy in variable temperature environment, an ipsilateral detection method and opposite-side centering detection method based on the energy distribution characteristics of surface wave and longitudinal wave is proposed. By coupling the laser ultrasonic detection system with the high and low temperature devices made in the laboratory, the velocities of the surface wave and longitudinal wave are obtained, and the mechanical parameters of the alloy at $-90\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ are theoretically deduced. The experimental results show that the elastic modulus and shear modulus decrease and the Poisson ratio increases with the increase of temperature, and the difference between the measured values and the reference values is small. The experiments validate that the laser ultrasonic system can effectively gauge the performance of components within challenging environments.

Key words: laser ultrasonic; variable temperature; mechanical properties; nickel-base alloy

收稿日期: 2023-12-26.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA1601102); 吉林省重点研发计划项目(20220201022GX).

作者简介: 李俊蓉(2001-), 女, 博士研究生. 研究方向: 无损检测技术. E-mail: jrli22@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 张建海(1986-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 超声无损检测. E-mail: jianhaizhang@jlu.edu.cn

0 引言

为满足机械装备在航空航天、深地工程、海洋开发和核电工程等关键领域的服役需求,极端工况下的机械部件需要具备高可靠性和长寿命特性^[1]。GH600镍基合金是一种广泛应用于耐腐蚀和耐热条件下的工程材料^[2-4],在 $-253\sim 704\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内具有优异的机械性能^[5]。与常温环境相比,在高低温环境下服役的GH600更易发生性能退化甚至失效问题,因此,对其开展变温环境下的力学性能研究是十分重要的。

材料的主要力学特性,如弹性模量^[6]、剪切模量^[7]和泊松比^[8]等,是评估材料在受载作用下的性能表现的重要指标。尽管传统的测试方法,包括拉伸试验^[9,10]、疲劳试验^[11]以及弯曲试验^[12]等在获取力学参数时发挥了重要作用,但它们通常具备破坏性且无法通过非接触的方式进行性能评估,特别是在恶劣环境更是如此。相较而言,激光超声技术就展现出在变温条件下测试材料性能的巨大潜力。

激光超声技术在科学研究领域已经成为推断各类材料在不同温度环境下的力学性质的重要工具。例如,Zou等^[13]利用该技术对激光熔覆涂层的弹性模量进行了测定,并在此过程中,为了简化计算,假设材料表面波速和泊松比等参数已知;Shukla^[14]和Lee等^[15]都是利用横波和纵波波速测定材料的弹性常数;Nadal等^[16]基于表面波速和横波波速测得了铝在 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的剪切模量;Reese等^[17]利用纵波和横波测量了室温到 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下709和617合金的弹性模量、剪切模量和泊松比。

尽管激光超声技术的应用带来了诸多便利,但在实践中,研究人员通常会简化模型,将某些未知参数预设为已知以便解决问题。这样的方法虽然降低了求解难度,但难以准确捕捉温度变化对材料力学性能的全面影响,尤其在泊松比变动较大的变温条件下。同时,大幅度的温度波动也加大了横波信号检测的难度,因此,通过测量横波和纵波波速求解力学参数的常规方法并不适用于变温环境。

鉴于以上挑战,本研究提出一种使用表面波来替代横波的新测量方法,并构建了一个模拟材料实际工作环境的高低温激光超声波速检测系统。在此基础上,推导了弹性模量、剪切模量和泊松比反演理论,并成功实施了对GH600镍基合金

力学参数的精确激光超声检测,满足了在变温环境下进行精确材料力学性质评估的需求。

1 激光超声检测原理

在变温工况下,GH600镍基合金的物理性质和传播特性可能会发生改变,从而对超声波信号的传播造成干扰。为了最小化这种信号扰动,选择合适的激励机制显得尤为关键。此外,根据材料力学参数激光超声检测理论能反演出材料的弹性模量、剪切模量和泊松比,这些参数对材料性能的评估和工程设计具有重要的参考价值,因此,了解激光超声的激励机制和材料力学参数理论对开展GH600镍基合金的波速测量实验具有重要意义。

1.1 激光超声激励机制理论

激光超声激励机制包括热弹激励机制^[18]和烧蚀激励机制^[19],两种机制均采用单束聚焦脉冲激励光源进行激光激励以激发被检试样中的应力脉冲,两种机制的原理分别如图1(a)和(b)所示。在热弹激励机制下,入射脉冲激光的能量较低且

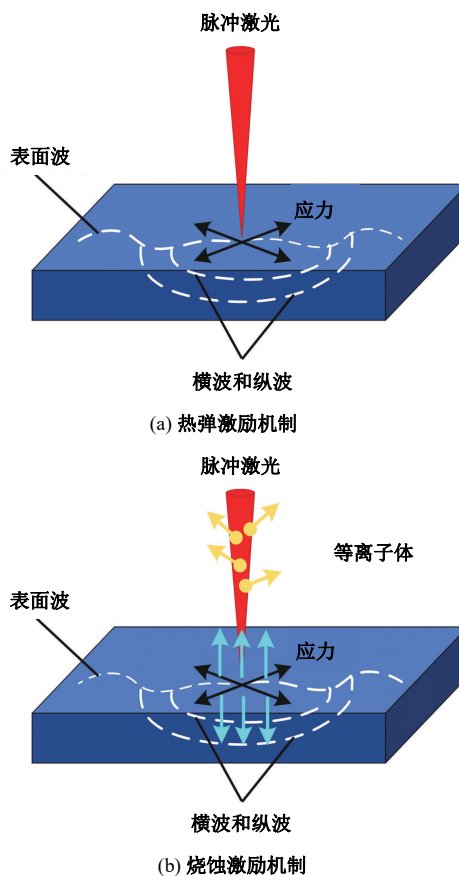


图1 激光超声激励机制

Fig. 1 Laser ultrasonic excitation mechanism

未达到材料的损伤阈值,材料吸收的激光能量会导致材料产生急剧热膨胀,从而使材料表面产生切向应力并可同时在工件表面产生横波、纵波和表面波。在烧蚀激励机制下,入射脉冲激光的能量较大,此时材料表面温度因吸收的激光能量急剧升高导致表面薄层材料气化,抛射出等离子体,并在材料表面产生垂直于表面的反冲压力,同时在激光照射表面产生了压缩脉冲。需要注意的是,在烧蚀机制下激光虽然会对被测材料造成破坏,但在激励激光功率不是特别大或临界烧蚀的情况下,造成的材料损伤有限,仅仅使试件表面有限的薄层材料熔融气化,属于可接受的损伤范围。

不同激励机制下超声波指向性使用极坐标表示,用于表示各个角度超声波场的能量分布特征。其中,0°代表激励激光主轴线方向。如图2(a)(b)所示,纵波和横波信号的能量分布不均匀且呈现出一定的方向性,其中,纵波以单瓣的形式向外传播,在60°附近信号能量最强,而横波以双瓣形式向外传播,主瓣在30°方向信号能量最强,45°时完全消失,副瓣能量较小,与主瓣能量相比可忽略不计。如图2(c)和(d)所示,烧蚀激励机制下纵波沿0°方向的信号能量最强,随着角度增大,信号能量不断减弱,当角度大于60°后纵波信号迅速减弱,而横波的主瓣在35°附近振幅最大。

将两种激励机制下的纵波和横波信号进行对比,可以看出烧蚀激励下超声波信号比热弹激励

下的信号强很多,因此,基于烧蚀机制开展试验更易于检测波形信号,这一点在变温测试条件下尤为重要。

1.2 材料力学参数激光超声检测理论

在固体介质中,超声波的传播速度本质上揭示了材料的内在力学特性,测量超声波在介质中的传播时长和距离能够计算出材料的波速,利用固体力学理论模型,可根据波速进一步推导出弹性模量、剪切模量和泊松比等参数。材料的各模式声速和各参数间有如下关系^[20]:

$$C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中: C_L 为纵波波速; C_T 为横波波速; ρ 为材料密度; λ 和 μ 分别为材料的一阶和二阶拉梅常数,二阶拉梅常数 μ 与材料的剪切模量相当。

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

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比。

将式(3)和(4)代入式(1),式(4)代入式(2),可求得:

$$\lambda = \rho C_L^2 - 2\rho C_T^2 \quad (5)$$

$$\mu = \rho C_T^2 \quad (6)$$

联立式(3)(4)(5)和(6)求解方程组,可得到:

$$E = \rho C_T^2 \frac{4C_L^2 - 3C_T^2}{C_T^2 - C_L^2} \quad (7)$$

$$\nu = \frac{C_L^2 - 2C_T^2}{2(C_L^2 - C_T^2)} \quad (8)$$

分析式(6)(7)(8)可知,通过测出被检试样中纵波和横波的波速,即可计算出力学参数。

若 C_R 为材料的表面波速,则表面波的波速方程为:

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8\eta^2(3 - 2\xi^2) + 16(\xi^2 - 1) = 0 \quad (9)$$

$$\text{式中: } \eta = \frac{C_R}{C_T}, \xi = \frac{C_T}{C_L} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}}.$$

由式(8)和(9)可知, η 只是泊松比 ν 的函数。当 $\nu > 0.263$ 时,式(8)存在2个共轭复根与一个实根;当 $\nu < 0.263$ 时,存在3个实根,但只有一个根有效。本文根据Viktorov^[20]提出了一个近似求解公式,建立以下模型:

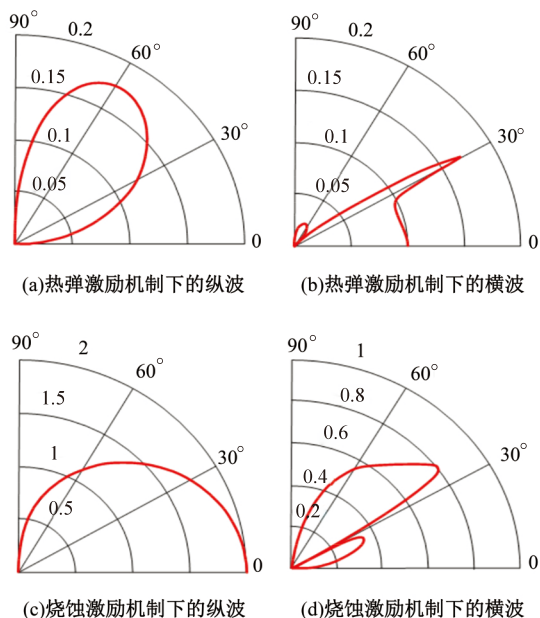


图2 不同激励机制下超声波信号的方向性

Fig. 2 Directionality of ultrasonic signals under different excitation mechanisms

$$\eta = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (10)$$

计算可得:

$$C_R = \eta C_T = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} C_T \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)得:

$$A\nu^3 + B\nu^2 + C\nu + D = 0 \quad (12)$$

其中每个系数为:

$$A = 2.5538 \left(\frac{C_L^2}{C_R^2} \right) - 2$$

$$B = 2.6555 \left(\frac{C_L^2}{C_R^2} \right) - 2$$

$$C = -0.4524 \left(\frac{C_L^2}{C_R^2} \right) + 2$$

$$D = -0.7569 \left(\frac{C_L^2}{C_R^2} \right) + 2$$

2 试验参数设置及试验过程

由 1.1 节的讨论可知,横波在材料中传播时其传播的主方向均与待测表面法线方向呈一定角度,即横波波速不易检测,而表面波传播路径较短,衰减较小,其信号相对横波信号而言更容易被检测到,因此,通过检测表面波和纵波波速更易测量材料的力学参数。同时,为了检测到更强的纵波及表面波信号,本文选择烧蚀激励机制来激发超声波。

2.1 试验参数设置

试验采用的激励装置为 Dawa-200 调 Q 型 Nd:YAG 纳秒脉冲固体激光器,激励激光的激励电压为 635 V,激励频率为 10 Hz,激励激光通过

聚焦镜形成直径小于 0.5 mm 的点源。激光测振仪^[21]采用 $1 \text{ mm} \cdot (\text{s} \cdot \text{V})^{-1}$ 测试挡位,示波器通过对信号进行 256 次平均计算减小随机误差,待波形稳定后再进行数据保存。

2.2 试验过程

针对表面波和纵波的能量分布特点,本文分别设计了同侧检测法和异侧对心检测法。根据两种检测方法搭建的检测系统如图 3 所示,检测系统通过计算机控制扫描振镜的偏转角度,通过位移台调整脉冲激励激光和待测试件的相对位置,通过三脚架调整检测激光与待测试件的光路,通过聚焦透镜将经过扫描振镜的脉冲激光光斑直径缩小至微米级以实现烧蚀机制,通过测振仪控制器设置测振仪参数,通过将示波器的两个通道分别与脉冲激光器和测振仪控制器连接,实现激励信号与检测信号的同步接收。

如图 3(a)所示,当测量试件的表面波波速时,控制扫描振镜角度可使激光在二维平面一定范围内的扫描以实现在近场和远场分别激励超声信号,且通过分析近场和远场表面波波峰(或波谷)之间的时间间隔 ΔT_s 及近场、远场表面波的检测距离 ΔL_s ,可求解出不同温度下的表面波速 C_s ^[22],如式(13)所示:

$$C_s = \frac{\Delta L_s}{\Delta T_s} \quad (13)$$

如图 3(b)所示,在测量试件的纵波波速时,需要保证激励点与检测点在试件厚度方向上互为投影点,以保证脉冲激励激光和检测激光的光路同轴,最后将待测试件放入光路中间进行测试,其

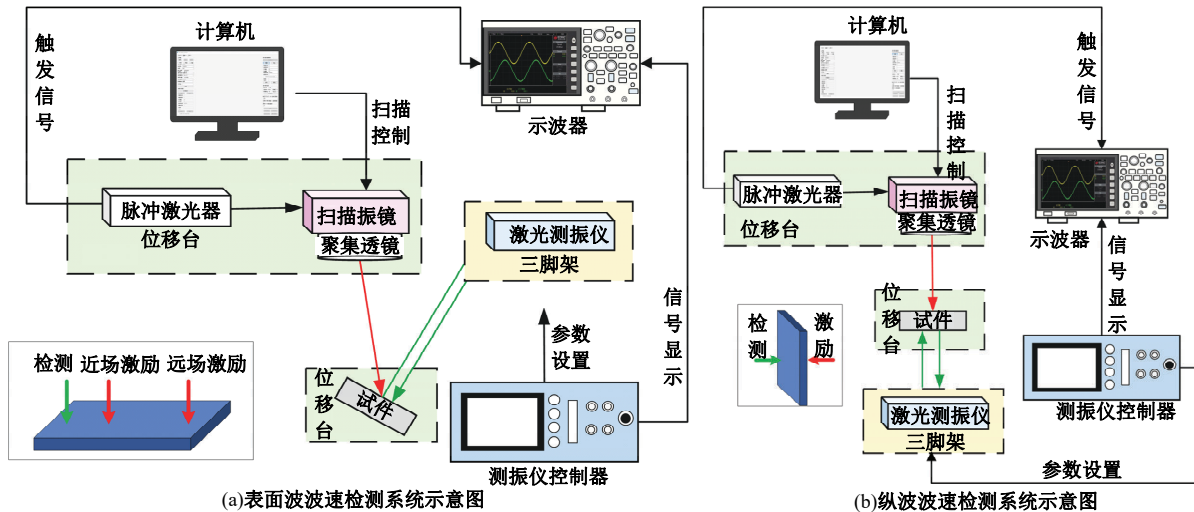


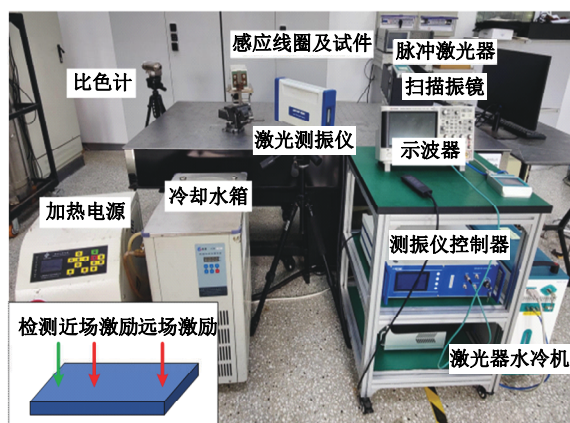
图 3 激光超声波速检测系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser ultrasonic velocity detection system

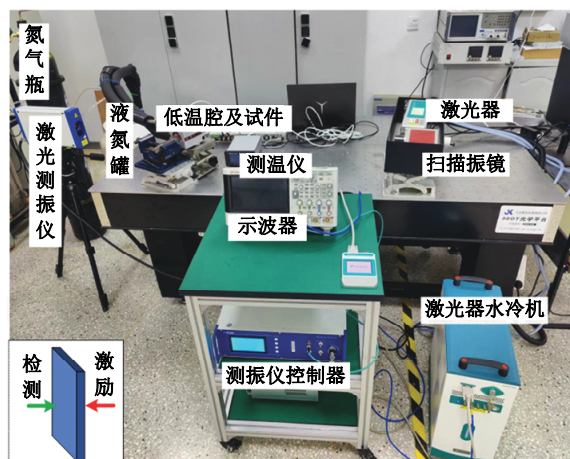
余设置与表面波波速检测方案一致。在单次检测完成后,通过示波器显示被检位置的超声检测波形,观察沿试件厚度方向传播的直达纵波和二次纵波。其中,直达纵波是指从激励点直接传播至检测点时,检测点接收到的纵波;二次纵波是指在直达纵波反射后传播至激励点,再由激励点反射检测点的纵波。直达纵波和二次纵波之间的距离为两个试件的厚度。通过将两波传播距离 ΔL_L 与两波波峰之间的时间间隔 ΔT_L 相除,可获取出不同温度下的纵波波速 C_L ,如式(14)所示:

$$C_L = \frac{\Delta L_L}{\Delta T_L} \quad (14)$$

根据不同的应用环境搭建的表面波及纵波波速检测系统如图4所示,该系统能够精确模拟室温至1 000℃的高温条件,这是通过将GH600镍基合金试样放置于高频感应线圈内实现的。利用感应加热的原理,试样被环绕在线圈中均匀加热,



(a) 高温激光超声检测试验图



(b) 低温激光超声检测试验图

图4 变温环境下的激光超声检测系统

Fig. 4 Laser ultrasonic detection system in variable temperature environment.

确保了其在整体上获得均等的温度分布,有效避免了材料因受热不均对超声检测造成的影响。与此同时,系统也能创造-90℃至室温的低温环境。操作时,高压氮气从氮气瓶中释出,并经过减压阀,以稳定的压力注入液氮罐中,迫使液氮蒸发形成气体并溢出到设定的管道系统中,最后流入低温腔,实现对试样的均匀制冷,在低温腔内均布的电丝则负责维持温度的稳定,为试样提供恒定的制冷环境。

在开展变温试验的过程中,选取-90、-60、-30、0、22、100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000℃共15个温度节点开展超声检测,并通过示波器记录下各个温度节点下的波形数据。

3 材料力学参数检测结果

利用高低温激光超声检测系统可测得不同温度下GH600的表面波和纵波波速,进而求出泊松比,通过泊松比可以测得横波速度,结果如图5所示。从图5中可以看出,低温和高温环境下超声波波速随温度变化的规律类似,即波速大小与被检试样的温度呈现出显著的负相关关系,纵波速度最大,其次是横波,而表面波速度最低,但是表面波和横波的速度非常相近。

为深入研究温度变化条件下波形的演变特性,本文选取了-90~0℃的低温范围,对图6展示的波形数据进行了分析。分析发现,随着温度的逐步升高,波形图中峰值到达的时间点延后。由式(13)和(14)可知,材料中表面波与纵波的传播速度随着温度升高而降低。波速与温度的关系

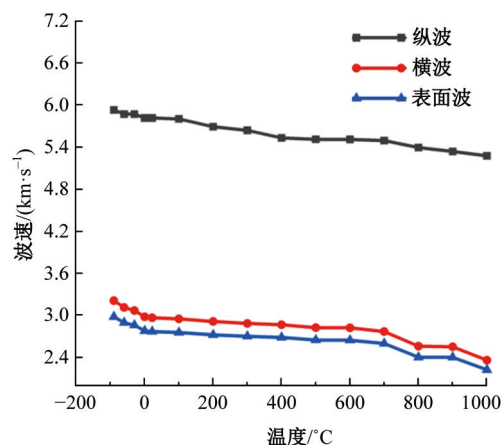


图5 波速及泊松比随温度的变化

Fig. 5 Variation of wave velocity with temperature

可通过微观机制进行阐释:温度上升导致样品中原子的平均热能增加,使原子间平均距离扩大,以及金属内部孔隙度提高,进而影响波速,导致其减缓。

根据所测数据及 1.2 节所列公式,可求出 GH600 的弹性模量、剪切模量和泊松比,具体值如表 1 所示,参数随温度的变化曲线如图 7 所示,其参考值由文献[23]获取,可以得出弹性模量误

差不超过 5.13%,剪切模量误差不超过 4.27%,泊松比误差不超过 4.58%。进一步地,在图 7(a)所示的结果中,可以明显看到随着温度的升高,材料的弹性模量出现降低的现象。此外,测得的弹性模量在较低温度区间低于预设的参考值,在高温区间则逐渐超越参考值。另一方面,剪切模量

表 1 不同温度节点 GH600 的弹性模量、剪切模量和泊松比

Table 1 Elastic modulus, shear modulus and Poisson's ratio of Gh600 nodes at different temperatures			
温度/℃	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比
−90	208	80	0.304
−60	204	78	0.310
−30	203	77	0.318
0	198	75	0.323
22	198	74	0.331
100	197	74	0.338
200	193	72	0.341
300	185	69	0.344
400	180	67	0.347
500	180	67	0.350
600	175	65	0.353
700	171	63	0.358
800	155	57	0.361
900	147	53	0.375
1 000	128	46	0.394

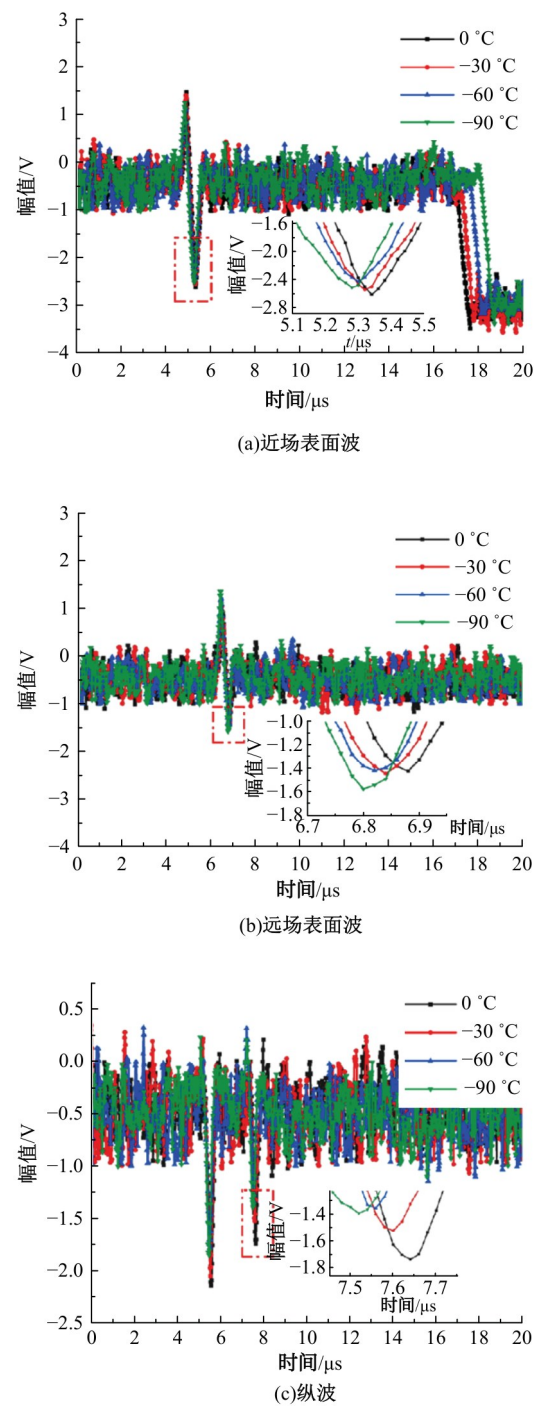


图 6 低温下的波形

Fig. 6 Waveforms at Low Temperature

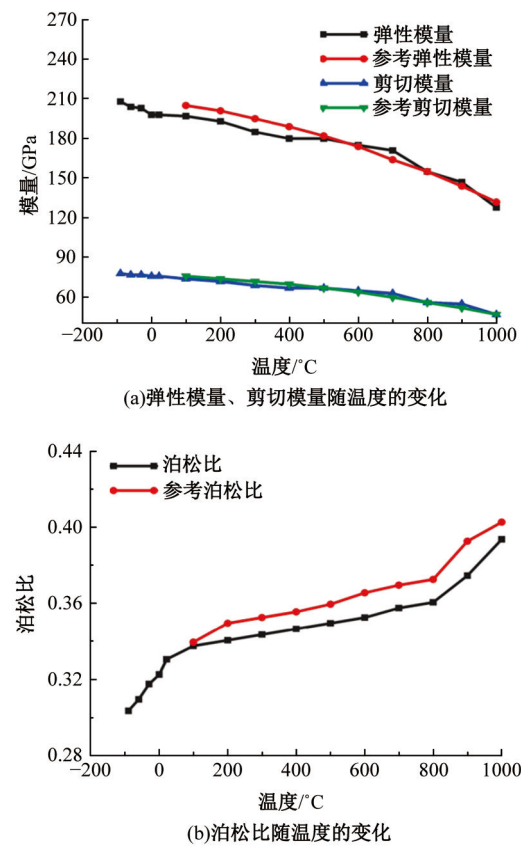


图 7 力学参数随温度的变化

Fig. 7 Mechanical parameters at different temperatures

随着温度的上升也呈现下降趋势,不过其降幅相较于弹性模量而言比较小。再转向图7(b)中的数据,泊松比与温度的关系呈整体上升趋势,其中在 $-90\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $800\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度区间,泊松比的增加趋势更为显著。

4 结束语

提出了一种利用激光超声技术在变化温度环境中测定材料力学参数的新颖方法。首先,探讨了激光超声技术中的热弹激励机制与烧蚀激励机制的共性与差异。继而,基于固体力学的理论框架推导出了描述超声波波速与材料力学特性间关联的定量关系式。进一步地,本文将同侧检测法和异侧对心检测法与温度可控的变温激光超声检测系统相结合,对GH600镍基合金在 $-90\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的力学性能进行了系统化的试验研究。试验结果表明:随着温度的升高,材料的弹性模量和剪切模量逐渐降低,而泊松比则有所升高。此外,本研究通过将试验得出的力学参数测量值与标准参考值进行比较,发现二者具有高度的一致性。这一发现不仅证明了本文提出的测量方法在实际应用中的有效性,还确证了其测量精度的高准确度,为激光超声测量技术在变温条件下的应用提供了新的可能性。

参考文献:

- [1] 常可可,王立平,薛群基. 极端工况下机械表面界面损伤与防护研究进展[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 206-220.
Chang Ke-ke, Wang Li-ping, Xue Qun-ji. Research progress on damage and protection of mechanical surface and interface under extreme operating condition[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2):206-220.
- [2] Li J, Lu Y. Effects of displacement amplitude on fretting wear behaviors and mechanism of Inconel 600 alloy[J]. Wear, 2013, 304(1-2):223-230.
- [3] Zhang P, Li J, Yu H. An experimental study on the fretting wear behavior of Inconel 600 and 690 in pure water[J]. Wear, 2021, 486:No. 203995.
- [4] Wei C, Wang Z, Chen J. Sulfuration corrosion failure analysis of Inconel 600 alloy heater sleeve in high-temperature flue gas[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135:No. 106111.
- [5] Baig A, Jaffery S, Ali Khan M. Statistical analysis of surface roughness, burr formation and tool wear in high speed micro milling of inconel 600 alloy under cryogenic, wet and dry conditions[J]. Micromachines, 2022, 14(1):No. 13.
- [6] Liu Z, Bao Y W, Wan D T, et al. A novel method to evaluate Young's modulus of ceramics at high temperature up to $2\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Ceramics International, 2015, 41(10): 12835-12840.
- [7] Nadal M H, Hubert C, Ravel-Chapuis G. Shear modulus determination versus temperature up to the melting point using a laser-ultrasonic device[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 444: 265-267.
- [8] Mckee C, Culshaw B, Leach R. Laser ultrasound measurement of diaphragm thickness, Young's modulus and Poisson's ratio in an MEMS device[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2):37-44.
- [9] 张赛飞,雷龙宇,杜明科,等. 基于小冲杆试验的CB2耐热钢拉伸性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(24): 28-31.
Zhang Sai-fei, Lei Long-yu, Du Ming-ke, et al. Research on tensile properties of CB2 heat-resistant steel based on small punch test[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(24):28-31.
- [10] Mukherjee S, Kundu A, De P, et al. In situ investigation of tensile deformation behaviour of cold-rolled interstitial-free high-strength steel in scanning electron microscope[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 776: No. 139209.
- [11] 赵宏伟,董晓龙,张霖,等. 块体材料弹性模量的四点弯曲自动测试[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 46(1): 140-145.
Zhao Hong-wei, Dong Xiao-long, Zhang Lin, et al. Determination of the elastic moduli of bulk materials by four-point bending automatic test[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1):140-145.
- [12] 安宗文,马军霞,马强,等. 风电叶片全尺寸疲劳试验加载方法研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 250-257.
An Zong-wen, Ma Jun-xia, Ma Qiang, et al. Study on loading scheme for full-scale fatigue test of wind turbine blades[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 250-257.
- [13] Zou Y, Chai Y, Wang D, et al. Measurement of elastic modulus of laser cladding coatings by laser ultrasonic method[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 146: No. 107567.
- [14] Shukla A. Determination of elastic constants of Inc-

- onel-625 superalloy, using laser-based ultrasonic [J]. Journal of Theoretical & Applied Physics, 2019, 13(1): 49-54.
- [15] Lee H, Ando S, Coenen J, et al. Micro- and macro-elastic properties of tungsten fiber-reinforced tungsten composites probed by nano-indentation and laser ultrasonic[J]. Nuclear Materials and Energy, 2018, 19: 262-266.
- [16] Nadal M H, Hubert C, Oltra R. High temperature shear modulus determination using a laser-ultrasonic surface acoustic-wave device[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106: No. 024906.
- [17] Reese S, Smith D, Rupp R, et al. Elevated-temperature elastic properties of alloys 709 and 617 measured by laser ultrasound[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(2):1513-1520.
- [18] 曹建树, 曹振, 赵龙飞, 等. 激光超声管道表面裂纹检测技术[J]. 光电工程, 2016, 43(3): 1-6.
Cao Jian-shu, Cao Zhen, Zhao Long-fei, et al. Detecting techniques of surface crack of pipeline based on laser ultrasonic[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(3):1-6.
- [19] 郑德根. 基于激光超声的铝合金搅拌摩擦焊缺陷评价[D]. 上海: 上海交通大学材料科学与工程学院, 2014.
- Zheng De-gen. Fraction stir welding flaw evaluation of aluminum alloy by laser ultrasonic[D]. Shanghai: School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [20] Zhan Y, Liu C S, Zhang F P, et al. Experimental study and finite element analysis based on equivalent load method for laser ultrasonic measurement of elastic constants[J]. Ultrasonics, 2016, 69: 243-247.
- [21] 董慧娟, 于震, 樊继壮. 基于激光测振仪的非轴对称超声驻波声场的识别[J]. 吉大工学报: 工学版, 2018, 48(4): 1191-1198.
Dong Hui-juan, Yu Zhen, Fan Ji-zhuang. Identification of non-axisymmetric ultrasonic standing wave field using laser Doppler vibrometer[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018, 48(4): 1191-1198.
- [22] Zhang S Z, Li X B, Chen C, et al. Characterization of aging treated 6061 aluminum alloy using nonlinear rayleigh wave[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38: No. 88.
- [23] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.