

文章编号: 1671-7449(2026)03-0275-07

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(3): 275-281.

动态力校准用 Al_2O_3 脆性材料断裂特性影响因素及测试方法研究

顾廷炜^{1*}, 杨凝^{2,3}, 冯政森¹, 陈文浩¹

(1. 中科芯集成电路有限公司, 江苏 无锡 214072; 2. 中国电子科技集团公司信息科学研究院, 北京 100042;
3. 集成电路与微系统全国重点实验室, 北京 100042)

摘要: 针对动态力校准用脆性材料在三点弯曲试验条件下的断裂特性规律复杂、测量方法欠缺等问题, 对影响脆性材料断裂特性的各个因素进行了深入分析, 并提出一种能够同步测量脆性材料断裂幅值和断裂时间的方法。首先, 基于三点弯曲理论分析了材料材质、外形尺寸、支点跨距等参数对脆性材料断裂特性的影响规律; 然后, 在6组不同的外形尺寸、支点跨距条件下对 Al_2O_3 脆性材料的断裂特性进行了测试; 最后, 基于抗弯强度拟合值对 Al_2O_3 脆性材料断裂幅值进行了预测。试验结果表明, 厚度低于5 mm的 Al_2O_3 脆性材料断裂时产生的阶跃信号有效频带范围不低于5 kHz, 可以满足应变式力值测量系统动态校准频带需求; 通过实测数据可以拟合得到 Al_2O_3 脆性材料的抗弯强度为355.42 MPa, 基于该拟合值得到的断裂幅值预测结果与实测结果的最大误差不超过7.77%。

关键词: 力值计量; 动态校准; 脆性材料; 三点弯曲; 断裂特性

中图分类号: TH701

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026017

引用格式: 顾廷炜, 杨凝, 冯政森, 等. 动态力校准用 Al_2O_3 脆性材料断裂特性影响因素及测试方法研究[J]. 测试技术学报, 2026, 40(3): 275-281.

GU Tingwei, YANG Ning, FENG Zhengsen, et al. Influence factor and test method research on fracture characteristics of Al_2O_3 brittle materials for dynamic force calibration [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(3): 275-281.

Influence Factor and Test Method Research on Fracture Characteristics of Al_2O_3 Brittle Materials for Dynamic Force Calibration

GU Tingwei^{1*}, YANG Ning^{2,3}, FENG Zhengsen¹, CHEN Wenhao¹

(1. China Key System & Integrated Circuit Co., Ltd., Wuxi 214072, China;

2. Information Science Academy of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100042, China;

3. National Key Laboratory of Integrated Circuits and Microsystems, Beijing 100042, China)

Abstract: In response to the complex fracture characteristics and the lack of measurement methods of brittle materials used for dynamic force calibration in three-point bending test, various factors affecting the fracture characteristics of brittle materials were analyzed, and a method for synchronously measuring the fracture amplitude and fracture time of brittle materials was proposed. Firstly, based on the three-point bending theory, the influence of material type, external dimension and support span on the fracture charac-

【收稿日期】2025-04-23

【基金项目】江苏省自然科学基金资助项目(BK20220228)

*【通信作者】顾廷炜(1991—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事微系统力学仿真及测试技术研究。E-mail: realngwei@163.com。

teristics of brittle materials were analyzed. Subsequently, the fracture characteristics of Al_2O_3 brittle materials were tested under 6 different external dimensions and support spans. Finally, the fracture amplitudes of Al_2O_3 brittle materials were predicted based on the fitting bending strength. The test results show that the effective frequency range of the step signal generated by the fracture of Al_2O_3 brittle materials with a thickness less than 5 mm is not less than 5 kHz, which can meet the dynamic calibration frequency band requirements of the strain gauge force measurement system. According to the measured data, the fitting bending strength of the Al_2O_3 brittle material is 355.42 MPa, and the maximum error between the predicted fracture amplitude and the measured result is no more than 7.77%.

Key words: force metrology; dynamic calibration; brittle material; three-point bending; fracture characteristic

0 引言

在工程力学领域,根据所测量力值时变特性的不同,可分为静态力和动态力两大范畴。对于静态力测量,力传感器的校准方法已经十分成熟,能够实现很高的测试精度^[1]。然而,很多力传感器被广泛应用于动态测量场景,例如汽车碰撞试验、火箭发动机推力测试等^[2-3]。值得注意的是,力传感器在静态和动态输入条件下的输出特性存在显著差异,其静态和动态特性呈现非一致性特征^[4]。工程实践经验表明,即使静态校准精度很高的力传感器,在动态测量场景下仍不可避免地会产生一定的测试误差,动态校准是解决该问题的有效途径^[5]。

动态校准的目的是获取力传感器的动态特性,即传感器对于时变输入量的响应特性,动态特性指标包括上升时间、超调量、固有频率、有效工作频带等^[6]。进行力传感器动态校准的前提是需要具备能够产生激励信号的标准力源,而标准力源是由动态力校准装置提供的。因此,校准装置产生的激励信号对传感器动态校准结果的准确性具有直接影响。

根据所产生的激励信号波形进行划分,当前普遍使用的动态力校准装置包括正弦式、脉冲式、阶跃式三种不同类型^[7-9]。其中,正弦式动态力校准装置产生的激励信号频带和幅值范围较小,一般只适用于周期性环境下的小量程动态力校准。脉冲式动态力校准方法能够校准的频带范围有限,通常只适用于力值测量系统灵敏度的校准;此外,该方法存在着严重的加速度分布不均匀性问题,后续还需进行修正补偿。阶跃式动态力校准通常是基于脆性材料断裂产生的负阶跃信

号来对力值测量系统的动态特性进行校准,常用的脆性材料有陶瓷、高速钢等。相较而言,阶跃式动态力校准具有校准幅值高、校准频带宽、方法简单易行等优点,可以有效弥补正弦式、脉冲式校准方法的不足。在阶跃式校准方法中,阶跃力幅值大小取决于所选用脆性材料的承载能力上限,而阶跃力下降沿时间则与材料的断裂过程紧密相关。因此,在设计脆性材料参数时,必须全面考虑阶跃力幅值和下降沿时间两项关键指标。

脆性材料的断裂特性主要包括断裂幅值和断裂时间。当前,脆性材料断裂幅值大多是基于三点或四点弯曲原理进行测量,其测试方法较为成熟^[10];而脆性材料断裂时间的测试方法则相对欠缺,目前主要有高速摄像^[11-12]、声发射技术^[13-14]等方法。其中,高速摄像法可以直观表征脆性材料的动态断裂破坏过程和断裂形貌特征,但是存在设备成本高昂、数据处理复杂、实时性不足、高分辨率下帧率受限等问题;声发射技术能够有效检测材料内部微小裂纹的扩展、损伤和破坏过程,但是存在设备成本高昂、噪声干扰大、信号处理复杂、传感器布置要求高等不足。此外,鉴于脆性材料的断裂特性会受到材料种类、外形尺寸、支点跨距等诸多参数的影响,因此,为了保证激励信号能够满足力值测量系统动态校准幅值和校准频带要求,需对脆性材料断裂特性的测试方法和影响因素进行深入研究。

本文拟以应变式力值测量系统为研究对象,开展脆性材料断裂幅值和断裂时间的同步测量方法研究,分析外形尺寸、支点跨距等因素对脆性材料断裂幅值的影响,评估脆性材料断裂时间能够覆盖的校准频带范围,为力值测量系统阶跃式动态校准脆性材料的设计和选取提供指导思路。

1 断裂特性规律及影响因素

阶跃式动态力校准可校准的幅值和频率范围主要取决于阶跃力信号的幅值和下降沿时间,而幅值和下降沿时间则取决于脆性材料的断裂幅值、断裂时间等特性,因此,准确把握脆性材料的断裂特性规律是实现阶跃式动态力校准的关键。

基于三点弯曲原理进行阶跃式动态力校准时,脆性材料通常采用如图 1 所示的支撑结构。图中, F 为在材料上表面中心截面处的作用力, l 为材料下表面两个支撑点间的跨距, b 和 h 分别为材料横截面的宽度和厚度。

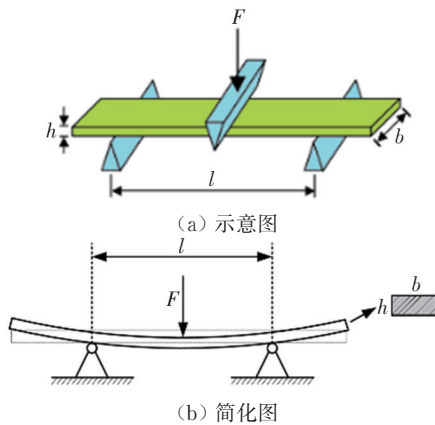


图 1 三点弯曲梁式支撑结构

Fig. 1 Three-point bending beam support structure

将力传感器竖直放于脆性材料的顶部中心截面处,脆性材料则借助于底部的两个支撑块来支承,力传感器通过传力块持续地施加一个作用力直到脆性材料断裂,此时会产生一个瞬态的负阶跃力,用于力传感器动态特性校准。

当脆性材料不存在裂纹时,其最大应力集中于中心截面处,对应的最大弯矩 $M_{\max} = Fl/4$ 。根据材料力学和纯弯曲理论可知^[15],矩形梁的抗弯截面系数 $W = bh^2/6$,由此可推算出脆性材料所能承受的极限载荷 $F_{\max}$ 为

$$F_{\max} = \frac{2[\sigma]bh^2}{3l}, \quad (1)$$

式中: $[\sigma]$ 为抗弯强度,主要由脆性材料自身特性决定,也与材料状态、微观组织等因素相关。

此外,根据断裂力学理论可知^[16],脆性材料的裂纹扩展速度 V 为

$$V = Bc_0 \sqrt{1 - \frac{\gamma}{\omega_e}}, \quad (2)$$

式中: B 为常量; c_0 为脆性材料声速,与材料材质

有关; γ 为单位长裂纹的表面能; ω_e 为单位长裂纹的弹性储能。

根据上述分析可知,脆性材料的断裂幅值、断裂时间均与材料材质、外形尺寸、支点跨距等参数存在很强的关联性。通过调节上述参数,即可产生幅值和下降沿时间满足力值测量系统阶跃式动态校准需求的激励信号。

2 断裂特性测试及结果分析

2.1 断裂特性测试系统组建

根据三点弯曲原理,构建如图 2 所示的脆性材料断裂幅值测量系统,包括力值加载装置、用于断裂幅值测量的应变式力传感器、用于调节支点跨距的支撑块、不同外形尺寸和材质的脆性材料。通过力值加载装置不断地对脆性材料中心截面处施加一个逐渐增大的作用力,直到脆性材料断裂为止,力传感器测得的最大力值点即为脆性材料的断裂幅值。

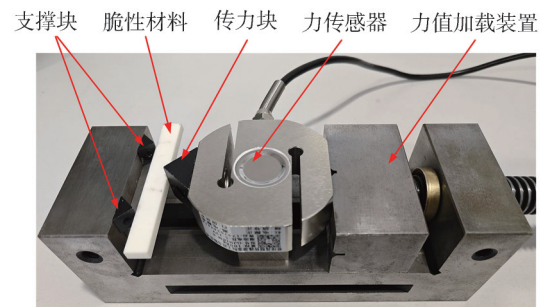


图 2 脆性材料断裂幅值测量系统

Fig. 2 Measurement system for fracture amplitude of brittle materials

由于动态特性的限制,力传感器测得的阶跃响应曲线的上升时间会高于阶跃激励信号的下降沿时间,无法直接通过力传感器对脆性材料的断裂时间进行准确测量。因此,采用如图 3 所示的专用检测电路对脆性材料断裂时间进行测量,图中, R 为电阻, V_{in} 和 V_{out} 分别为输入电压和输出电压。断裂时间的测量原理是:通过氰基丙烯酸酯胶粘剂在脆性材料与传力块、支撑块相接触的上下两个表面各粘贴一根细导线,当脆性材料在力值加载装置作用下发生断裂时,上下两个表面的细导线先后断路,导致检测电路的输出电压值产生瞬态变化,根据电压值发生变化的时刻 $t_{\text{上}}$ 和 $t_{\text{下}}$ 即可得到脆性材料的断裂时间。本文所采用的断裂时间测量方法相对于高速摄像法和声发射技术,具有测试成本低、数据处理便捷、实

时性高、采样率高等优点,且能够基于同一套数据采集和测试系统实现脆性材料断裂幅值和断裂时间的同步测量。

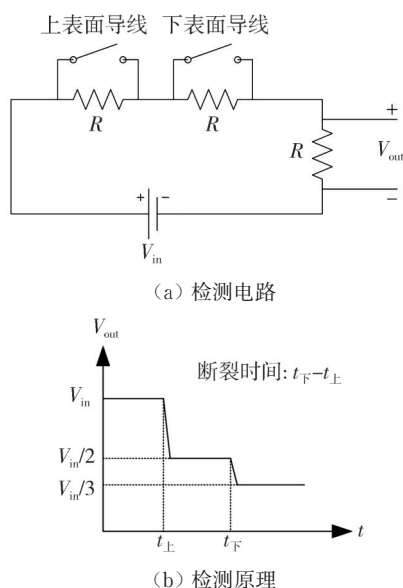


图3 脆性材料断裂时间检测电路及原理

Fig. 3 Circuit and principle for detecting fracture time of brittle materials

2.2 断裂特性测试结果分析

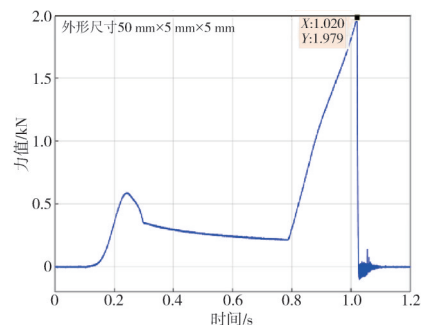
基于前文所构建的断裂特性测试系统,可实现不同外形尺寸、支点跨距的脆性材料断裂幅值和时间的准确测量。本次断裂特性测试选用的脆性材料为 Al_2O_3 陶瓷材料,是专业的陶瓷生产机构基于注浆成型和高温烧结工艺加工的同一批次材料,工艺波动性相对较小,材料状态和微观组织等特性趋于一致,具有强度高、硬度高、价格低等优点。该材料的具体性能指标参数如表1所示。

表1 Al_2O_3 陶瓷材料的性能指标参数

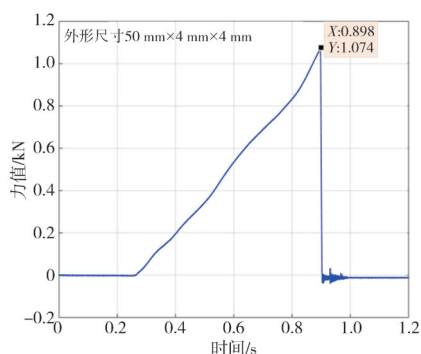
Tab. 1 Performance index parameters of Al_2O_3 ceramic material

参数	数值
Al_2O_3 质量含量/%	≥ 99
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3.89
弹性模量/GPa	≥ 317
抗弯强度/MPa	≥ 350
断裂韧性/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	≥ 5

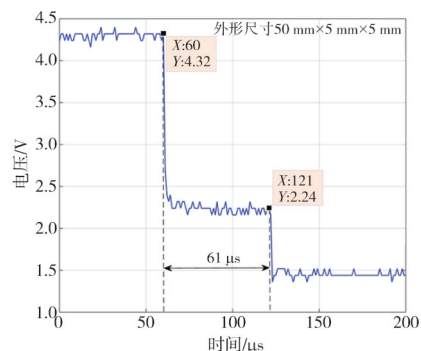
两组典型的断裂幅值和时间测量曲线如图4所示,图中对应的 Al_2O_3 陶瓷材料的外形尺寸分别为 $50\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 和 $50\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,支撑点之间的跨距为 14 mm ,断裂幅值分别为 1.979 kN 和 1.074 kN ,断裂时间分别为 $61\text{ }\mu\text{s}$ 和 $46\text{ }\mu\text{s}$ 。



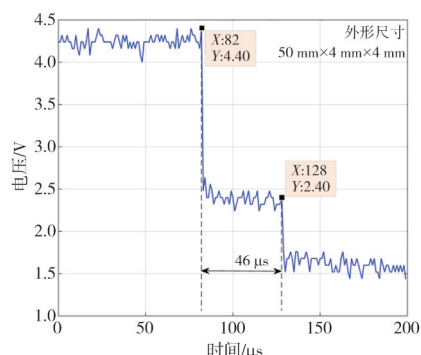
(a) Al_2O_3 尺寸为 $50\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的断裂幅值曲线



(b) Al_2O_3 尺寸为 $50\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的断裂幅值曲线



(c) Al_2O_3 尺寸为 $50\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的断裂时间曲线



(d) Al_2O_3 尺寸为 $50\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的断裂时间曲线

图4 两组典型的断裂幅值和断裂时间测量曲线

Fig. 4 Two typical measurement curves of fracture amplitude and fracture time

由图4可知,厚度为 5 mm 的 Al_2O_3 脆性材料的断裂时间不超过 $70\text{ }\mu\text{s}$,对于厚度更小的 Al_2O_3

脆性材料而言,其断裂时间会更短。有效频带 BW 和上升时间 RT (10%~90% 的断裂时间) 的经验公式为^[17]

$$BW = \frac{0.35}{RT}. \quad (3)$$

厚度不超过 5 mm 的 Al_2O_3 脆性材料可校准的频带范围不低于 5 kHz, 能够满足绝大多数应变式力值测量系统的动态校准频带需求。6 组不同外形尺寸、支点跨距的脆性材料的断裂幅值测试结果如表 2 所示。

由表 2 可知, Al_2O_3 脆性材料的断裂幅值与宽度、厚度成正比, 与支点跨距成反比, 该测试结果与脆性材料断裂幅值的理论式(1)一致。对于 Al_2O_3 材料而言, 文献[18]虽然给出了该材料抗弯强度的参考值, 但受到材料参数测试方法和测试精度差异、不同加工批次工艺波动、材料状态和微观组织特性不同等多种因素影响, 使得该值的波动范围较大, 通常在 300~400 MPa 之间, 因而难以对断裂幅值进行精准预测。为此, 本文基于表 2 中的实测数据, 对实际使用的 Al_2O_3 材料的抗

弯强度 σ_R 进行最小二乘拟合, 拟合结果为 355.42 MPa。基于拟合抗弯强度 σ_R 和式(1)对脆性材料的断裂幅值进行预测, 预测结果与实测结果的对比情况如表 3 所示。

表 2 Al_2O_3 脆性材料的断裂幅值测试结果

Tab. 2 Test results of fracture amplitudes of Al_2O_3 brittle materials

组数	宽度/ mm	厚度/ mm	跨距/ mm	断裂幅 值/kN	平均断裂幅 值/kN
1	3	3	40	0.174	0.172
	3	3	40	0.175	
	3	3	40	0.166	
2	3	3	14	0.490	0.494
	3	3	14	0.489	
	3	3	14	0.503	
3	4	4	40	0.398	0.391
	4	4	40	0.393	
	4	4	40	0.381	
4	4	4	14	1.064	1.065
	4	4	14	1.074	
	4	4	14	1.058	
5	5	5	40	0.703	0.699
	5	5	40	0.685	
	5	5	40	0.709	
6	5	5	14	1.928	1.963
	5	5	14	1.979	
	5	5	14	1.983	

表 3 Al_2O_3 脆性材料断裂幅值预测与实测结果对比

Tab. 3 Comparison of prediction and measurement results of Al_2O_3 fracture amplitudes

组数	宽度/mm	厚度/mm	跨距/mm	实测断裂幅值/kN	拟合断裂幅值/kN	实测值与拟合值误差/%
1	3	3	40	0.172	0.160	-7.01
2	3	3	14	0.494	0.457	-7.50
3	4	4	40	0.391	0.379	-3.04
4	4	4	14	1.065	1.083	1.71
5	5	5	40	0.699	0.740	5.93
6	5	5	14	1.963	2.116	7.77

由表 3 可知, Al_2O_3 脆性材料断裂幅值预测结果与实测结果的最大误差不超过 7.77%, 预测精度较高。脆性材料断裂幅值实测和预测结果均可能存在误差, 其中实测结果的误差来源主要包括材料表面加工损伤、材料固有裂纹和缺陷的随机分布、材料尺寸加工误差、加载装置支撑点的非对称性、力值测量系统的测量精度误差等; 预测结果的误差来源主要包括拟合抗弯强度与真实值间的偏差(材料体积效应导致的断裂强度非线性)、断裂幅值理论公式与实际情况的差异性等。在实际基于三点弯曲原理和 Al_2O_3 脆性材料进行阶跃式动态力校准时, 只需合理选取宽度、厚度和支点跨度等参数, 即可产生满足力值测量系统动态校准所需的断裂幅值。

3 结 论

脆性材料的断裂幅值、断裂时间等特性, 受

外形尺寸、支点跨距等诸多参数制约, 采用常规的材料力学或断裂力学理论难以对其进行准确描述。目前, 缺乏能够同时测量脆性材料断裂幅值和断裂时间的有效途径, 致使难以准确产生满足力值测量系统动态校准幅值和校准频带需求的阶跃力信号。针对上述问题, 本文研究了脆性材料的断裂特性规律及其影响因素, 对脆性材料的断裂特性进行了实测和分析, 主要得到以下结论:

1) 基于三点弯曲原理建立了脆性材料断裂幅值测量系统, 基于细导线断裂方法建立了脆性材料断裂时间测量系统, 实现了脆性材料断裂幅值(kN 量级)和断裂时间(μs 量级)的同步测量;

2) 厚度低于 5 mm 的 Al_2O_3 脆性材料的实测断裂时间不超过 70 μs , 根据有效频带和断裂时间经验公式, 其有效频带范围不低于 5 kHz, 能够满足应变式力值测量系统动态校准频带需求;

3) 通过实测断裂幅值数据可拟合得到 Al_2O_3

脆性材料的抗弯强度为 355.42 MPa, 基于拟合抗弯强度对脆性材料的断裂幅值进行预测, 预测结果与实测结果的最大误差不超过 7.77%, 可为力值测量系统阶跃式动态校准脆性材料的设计和选取提供依据。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 梁伟, 谢智杰, 黎兴强, 等. 多维力传感器静态标定装置的研究进展[J]. 自动化仪表, 2024, 45(9): 1-13.
LIANG Wei, XIE Zhijie, LI Xingqiang, et al. Research progress of multi-dimensional force sensor static calibration device [J]. Process Automation Instrumentation, 2024, 45(9): 1-13. (in Chinese)
- [2] 廉玉波, 衣本钢, 田洪生, 等. 基于车身电池一体化的车身正面碰撞研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(2): 309-314.
LIAN Yubo, YI Bengang, TIAN Hongsheng, et al. Research on frontal crashworthiness of cell to body integrated vehicle structure [J]. Automotive Engineering, 2025, 47(2): 309-314. (in Chinese)
- [3] 赵恒, 朱子环. 液体火箭发动机推力自动校准系统仿真[J]. 宇航计测技术, 2023, 43(2): 20-26.
ZHAO Heng, ZHU Zihuan. Simulation of automatic calibration process for thrust of liquid rocket engines [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2023, 43(2): 20-26. (in Chinese)
- [4] PEREIRA J D. Pressure sensors: working principles of static and dynamic calibration [J]. Sensors, 2024, 24(2): 629.
- [5] GU T, YUAN S, GU L, et al. Research on dynamic calibration and compensation method of strain-gauge type force sensor [J]. Sensor Review, 2024, 44(1): 68-80.
- [6] 刘晶晶, 江文松, 罗哉, 等. 力传感器动态灵敏系数的辨识方法研究[J]. 计量学报, 2024, 45(11): 1702-1708.
LIU Jingjing, JIANG Wensong, LUO Zai, et al. Research on identification method of dynamic sensitivity coefficient of force transducer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(11): 1702-1708. (in Chinese)
- [7] 王振, 范海艇, 王军, 等. 基于正弦法的力传感器动态灵敏度校准的研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 319-326.
WANG Zhen, FAN Haiting, WANG Jun, et al. Study on dynamic sensitivity calibration of force sensor based on sine method [J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(1): 319-326. (in Chinese)
- [8] LI H, CHEN W, HAO H. Factors influencing impact force profile and measurement accuracy in drop weight impact tests [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 145: 103688.
- [9] VLAJIC N, CHIJOKE A. Traceable calibration and demonstration of a portable dynamic force transfer standard [J]. Metrologia, 2017, 54(4): S83.
- [10] DOITRAND A, HENRY R, MEILLE S. Brittle material strength and fracture toughness estimation from four-point bending test [J]. Journal of Theoretical, Computational and Applied Mechanics, 2021, 3: 6753.
- [11] 彭麟智, 宋耀, 乔亚旭, 等. 不同厚度三点弯曲梁的裂纹扩展动态焦散实验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6594-6598.
PENG Linzhi, SONG Yao, QIAO Yaxu, et al. Dynamic caustics experiments on crack propagation of three-point bending beams with different thickness [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(16): 6594-6598. (in Chinese)
- [12] 王浩, 宗琦, 汪海波, 等. 冲击荷载下饱水凝灰岩断裂韧性及裂纹扩展分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1709-1719.
WANG Hao, ZONG Qi, WANG Haibo, et al. Fractal characteristics of fracture toughness and crack propagation of saturated tuff under impact loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1709-1719. (in Chinese)
- [13] 王宁, 石丹丹. 不同缝高比混凝土梁试件三点弯曲断裂声发射特性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(11): 6-11.
WANG Ning, SHI Dandan. Acoustic emission characteristics of three-point bending fracture of concrete beam specimen with different Notch-to-depth ratio [J]. China Concrete and Cement Products, 2021(11): 6-11. (in Chinese)
- [14] 冯璐, 陈徐东, 张锦华, 等. 基于声发射技术的非标准自密实混凝土三点弯曲梁动态断裂特性[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2): 630-640.
FENG Lu, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Dynamic fracture characteristics of non-standard three-point bending self-compacting concrete beams based on acoustic emission [J]. Acta Materiae Compositae

- Sinica, 2021, 38(2): 630-640. (in Chinese)
- [15] HOU C, JIN X, ZHAO L, et al. Analysis of tensile strength and fracture toughness of $\text{ZrB}_2 - \text{SiC}$ ceramic from three-point bending samples with edge cracks [J]. Ceramics International, 2022, 48(20): 30078-30085.
- [16] 王笑然, 王恩元, 刘晓斐, 等. 煤样三点弯曲裂纹扩展及断裂力学参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 690-702.
- WANG Xiaoran, WANG Enyuan, LIU Xiaofei, et al. Three-point-bending test of crack propagation and fracture parameters of coal specimens [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 690-702. (in Chinese)
- [17] 姚北国, 余岚. 脉冲上升时间与传输系统带宽关系的仿真分析[J]. 火控雷达技术, 2010, 39(1): 49-52.
- YAO Beiguo, YU Lan. Simulation and analysis of relation between pulse rise time and bandwidth of transmission system [J]. Fire Control Radar Technology, 2010, 39(1): 49-52. (in Chinese)
- [18] 陈金华, 葛彦鑫, 陈敏, 等. 结构防护材料 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ 陶瓷的动态拉伸力学性能[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(7): 280-284.
- CHEN Jinhua, GE Yanxin, CHEN Min, et al. Dynamic tensile mechanical properties for structure protection material of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ composite [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(7): 280-284. (in Chinese)