

# 全低温 SHPB 冲击试验技术\*

王楠<sup>1</sup>, 李旭航<sup>1</sup>, 潘若晨<sup>1,2</sup>, 宋广军<sup>1</sup>, 别必雄<sup>3</sup>, 范端<sup>1</sup>, 蔡洋<sup>1</sup>

1. 顶峰多尺度科学研究所, 四川 成都 610031;
2. 西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031;
3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

**摘要:** 为满足极地开发对材料动态性能测试的需求, 研制了一套低温霍普金森压杆 (SHPB) 系统。与传统的局部降温式 SHPB 方案不同, 该系统将所有波导杆和试样均置于低温环境中, 有效消除了因热传导导致的试样温度分布不均以及压杆局部温度梯度对实验结果的影响, 从而降低了数据处理的复杂性。此外, 液氮的气化排出低温箱内的空气, 使波导杆和样品保持干燥, 避免了低温实验中常见的结冰问题, 从而显著提升了实验结果的精度与一致性。与传统的局部降温式 SHPB 方案不同, 该系统将所有波导杆和试样均置于低温环境中, 有效消除了因热传导导致的试样温度分布不均以及压杆局部温度梯度对实验结果的影响, 从而显著提升了实验结果的精度与一致性, 并降低了数据后处理的复杂性。此外, 与机械快速组装式 SHPB 装置相比, 该系统的结构设计更为简化。通过无试样空打实验, 标定了低温条件下波导杆及应变片的相关参数。有限元仿真结果表明, 在传统局部降温式 SHPB 装置中, 由于杆上温度梯度的存在, 测得的应力偏差可达 10%; 而采用全低温 SHPB 系统可有效减小测量误差, 降低数据处理复杂性, 显著提高测量精度。利用 2024Al 合金在低温环境下的动态性能测试, 验证了所研制 SHPB 系统的运行可靠性。实验结果显示, 与传统局部降温式 SHPB 装置相比, 该新型装置在低温实验中展现出显著更高的重复性和可靠性。为满足极地开发对材料动态性能测试的需求, 研制了一套低温霍普金森压杆 (SHPB) 系统。与传统的局部降温式 SHPB 方案相比, 该系统将所有波导杆和样品置于低温环境中, 有效消除了因热传导引起的试件温度分布不均和压杆局部温度梯度对实验结果的影响, 从而显著提升了实验精度并降低了后处理的复杂性。此外, 与机械快速组装式 SHPB 装置相比, 该装置的结构设计更加简便。通过不加试样的空打实验对低温条件下波导杆和应变片的相关参数进行了标定, 结合有限元仿真对 SHPB 装置方案进行分析, 并采用 2024Al 铝合金作为样品对装置在低温环境下的运行可靠性进行了检验。实验结果表明, 与传统局部降温式 SHPB 装置相比, 该新型装置在低温实验中展现出显著更高的重复性和可靠性。

**关键词:** 低温; 分离式霍普金森杆; 实验技术; 2024Al

中图分类号: XXXX.X 文献标识码: A

## 引言

南北两极, 陆海相望扼守地球两极, 不仅承载着独特的地理禀赋与丰富的资源储备, 更是大国博弈的前沿阵地与我国建设海洋强国战略的新高地<sup>[1]</sup>。其中, 北极航道作为“冰上丝绸之路”的核心纽带, 在全球航运格局与地缘政治的战略棋盘上占据着举足轻重的地位<sup>[2]</sup>。然而, 极地探索之路并非坦途。北极地区年平均气温低至-18°C, 极端低温更可达-60°C以下。在此背景下, 低温工程材料在极地长期服役条件下的适应性能尚需系统性评估: 船用钢材在超低温环境中的脆断风险、寒区冻土工程中机械开挖与爆破施工所承受的复杂动态载荷<sup>[3]</sup>、冰基复合材料机场跑道的抗冲击性能等问题<sup>[5]</sup>, 均对材料在极低温条件下的动态力学响应提出了更为严苛的要求, 亟需进一步深入研究<sup>[6]</sup>、<sup>[7]</sup>。

\*收稿日期: xxxx-xx-xx; 修回日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 基金项目全称挑战专题 (NO. TZ2025001 批准号); 国家自然科学基金面上项目基金项目全称 2 (NO. 12572452 批准号)

通讯作者: 潘若晨(1995-), 男, 博士。主要研究领域: 冲击动力学。E-mail: rcpan@pims.ac.cn

低温分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 实验是研究材料低温、高应变率力学行为的一种主要手段, ~~条件下力学行为的主要手段~~, 相关实验技术的开发与优化一直是该领域的重点与难点。早期之前针对高温 SHPB 装置的相关研究较多<sup>[8]-[10]</sup>, 而专门用于低温动态试验的 SHPB 装置很少。目前, 低温 SHPB 实验方案主要有以下两种, 一种方案利用小型低温环境箱对试件及其邻近的局部波导杆共同降温。该方案因装置结构简单、操作便捷而被广泛采用。然而, 这种传统降温方式存在固有缺陷: 由于降温时间较长且波导杆的部分区域被同步降温, 杆上会出现温度梯度。该温度梯度导致部分波导杆的上弹性模量发生改变, 进而引起杆材波阻抗的变化, 致使应力波在传播过程中产生局部反射与幅值畸变<sup>[11], [15]</sup>。该问题使得基于一维应力波理论的数据处理方法无法真实反映材料在低温环境下的力学性能。为消除温度梯度的影响, 研究者通常需要在数据处理阶段采用有限差分等数值方法进行修正<sup>[17]</sup>。然而, 这种后处理方案不仅使实验数据处理流程复杂化, 还显著降低了实验效率, 难以满足极地工程材料高效大规模测试的高效需求。另一种低温动态实验技术则通过单独对试件降温后, 再利用机械装置进行快速组装实现<sup>[18]</sup>。这种实验方法忽略压杆和试件中的温度变化, 数据处理相对简单。然而, 快速组装方案对机械装置的定位精度要求极高, 同步组装有一定难度, 且短时间内压杆和试件端部剧烈的温度变化有可能对压杆和试件的材料性能产生不可忽略的影响<sup>[19], [20]</sup>。

本文针对极地低温环境测试需求, 开发了一套全低温 SHPB 实验装置, 将波导杆及试件整体封装于超低温环境模拟舱内, 成功实现了在低至-100°C环境下的稳定加载。该设计从物理层面消除了传统低温 SHPB 装置中波导杆内部的温度梯度场问题, 避免了常见的低温结冰问题, 提升了实验操作的简便性和实验效率, 为获取低温环境下材料真实的动态力学特性提供了一种高精度、高可靠性、高效率的实验解决方案。同时利用全低温 SHPB 实验装置对 2024Al 合金开展了低温动态性能实验研究, 获得了较好的实验效果, 证实了装置设计的可行性与实用价值。

## 1 实验装置及原理

### 1.1 实验装置

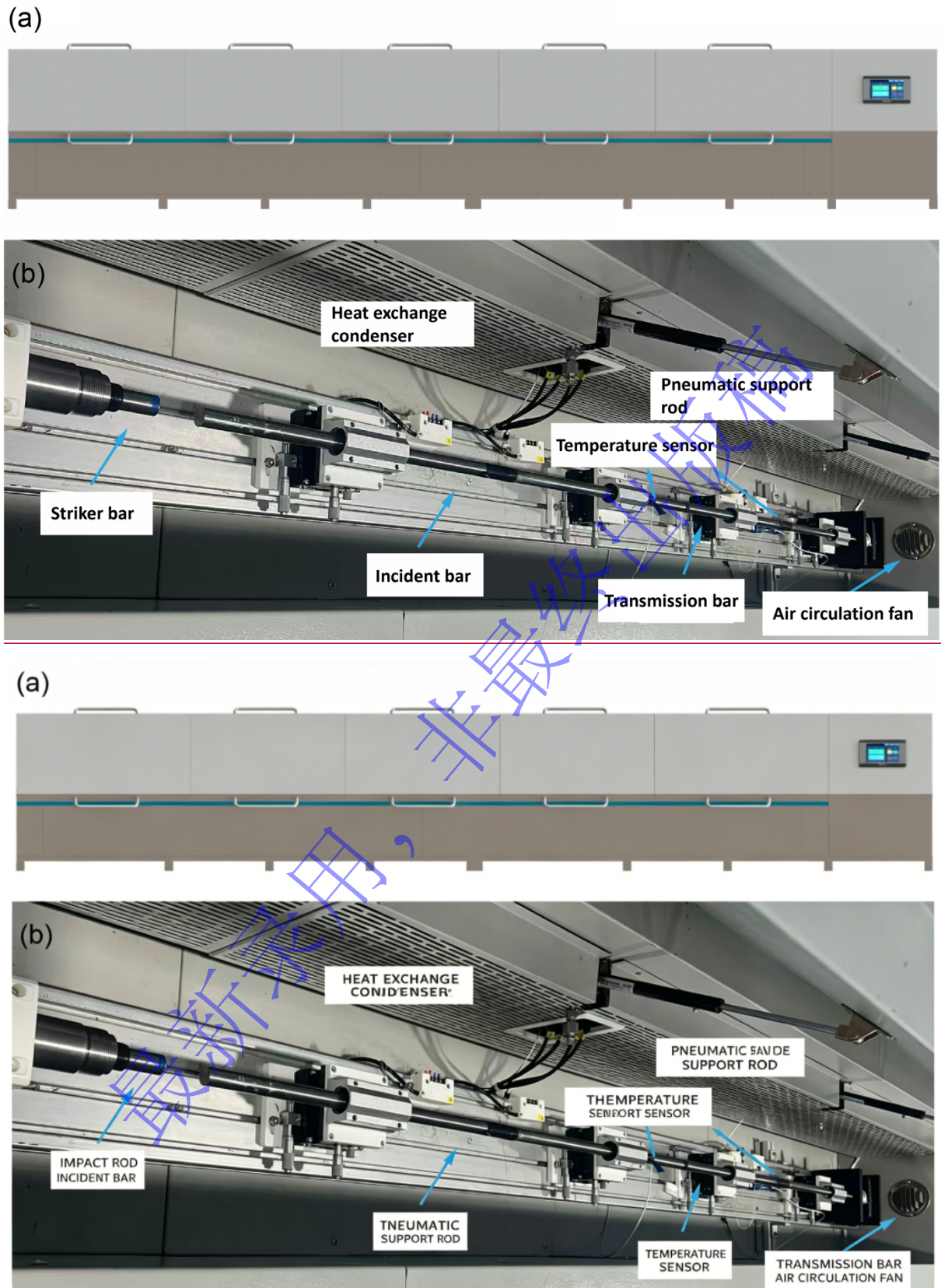


图1 全低温杆实验装置：(a) 示意图；(b) 实物图

Fig.1 SHPB apparatus for cryogenic temperature: (a) schematic diagram; (b) physical figure

为了消除杆上温度梯度引起的实验误差，本文设计了 **SHPB 系统全部处于低温环境的 SHPB 系统全低温杆**，实验装置示意图和实物图见图 1。全低温杆装置主要由 SHPB 系统和低温环境系统组

成：SHPB 系统采用口径为 20 mm 的高强度 P20 钢制成，撞击杆、入射杆、透射杆长度分别为 300 mm、1500 mm 和 1000 mm；低温环境系统包含保温箱体和控温系统，保温箱以硬质聚氨酯泡沫保温材料为绝热芯材，外侧包覆金属蒙皮，上方设计了五块可独立开启的盖板，闭合后具备优秀的绝热性能与气密性，箱体内壁一侧预留 6 组 BNC 接口，可实现与外部数据采集系统的信号传输，另外一侧配备双侧隔热窗口，用于观察仪器状态和满足高速摄影需求。

为保障低温环境下实验系统的可靠性，对核心器件与线路进行了针对性耐低温适配设计：

(1) 应变片选型采用来自共和工业的低温专用型号 BAB120-250，使用温度范围为-196℃至 120℃，并配套适配低温工况的专用胶 CC-33A（使用温度-196℃至 120℃）进行粘贴，确保应变测量在低温下稳定有效；应变片选型采用低温专用型号 BAB120-250，并配套适配低温工况的专用胶进行粘贴，确保应变测量在低温下稳定有效；实验中采用超低温脂 LB-001 对样品和杆端面进行润滑，该润滑脂可在-100℃环境下保持流动性。 (2) 保温箱内部所有信号/供电线路均采用耐低温线缆并做绝缘防护处理。— (3) 发射撞击杆配套的气动阀增设外置加热装置和绝热护套（图 2b），避免因低温导致阀门密封失效、动作卡顿，保障发射系统在低温环境下稳定运行。进行低温实验时，将样品提前放入保温箱，与 SHPB 装置一同降温，保证样品内部温度均匀性。—达到预设温度后，继续保温 10-15-20 分钟后再进行动态加载实验。此外，在完成初始降温后，由于低温环境系统具有良好的保温性能，且样品已在低温下进行了预冷却，因此能够在短时间内重复实验，这在针对工程材料的批量实验中具有显著优势。

## 1.2 控温原理

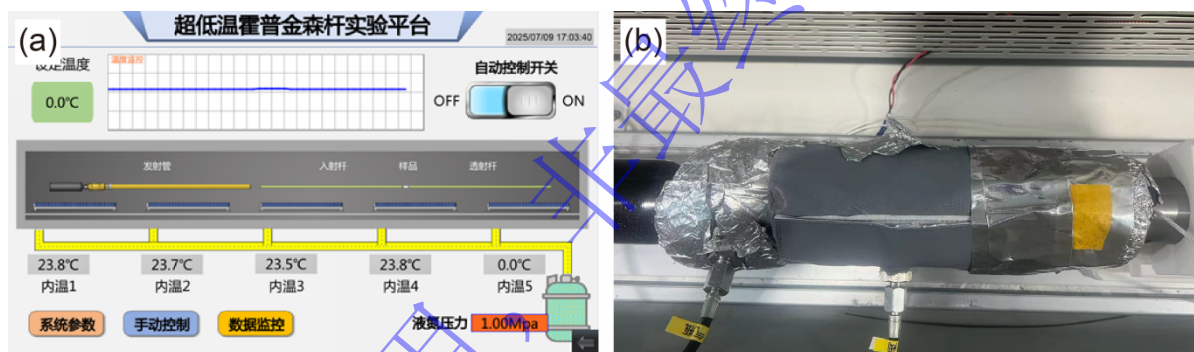


图 2 (a) 温度控制程序主界面；(b) 发射气动阀门配套的加热保护装置

Fig.2 (a) Temperature control program interface; (b) heating protection for launch valve

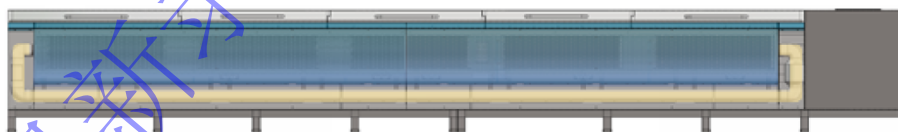


图 3 回型风道示意图

Fig.3 Configuration of recirculating air duct

本实验装置专为极地低温环境模拟研发，设计控温范围覆盖室温至-100℃，软件控制界面如图 2a。系统使用液氮作为制冷源，实现精准低温调控。箱内集成两种降温模式：其一为间接换热模式，通过大面积纯铜换热冷凝器与箱内空气进行热量交换，配合箱内布置的空气循环扇，加速气体流通与热量传递效率，实现平稳降温；其二为直接喷淋模式，借助特制扇形喷嘴喷射雾化液氮，可在短时间内完成快速降温。为保障控温精度，箱内各区域均配置独立温控单元，可根据预设参数自动调控对应区域液氮阀门的启闭状态，实现多区域独立精准控温，控温精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。汽化后的氮气用于排空箱内带有水蒸气的空气，以确保箱内保持干燥环境，防止波导杆和样品表面结冰。同时，过量的氮气通过排气管被排出，从而维持箱体内部的压力稳定。汽化后的氮气通过排气管排出，保证箱体内部的压力稳定。在箱体内设计有回型风道（图 3），由大功率轴流风机驱动，将经

过换热冷凝器冷却后的氮空气从一端吸回，再从另一端均匀的吹入箱内，形成气流内循环，大幅极大地促进子箱内气体空气均匀的混合，快速平衡温度波动，确保温度场的均一性。

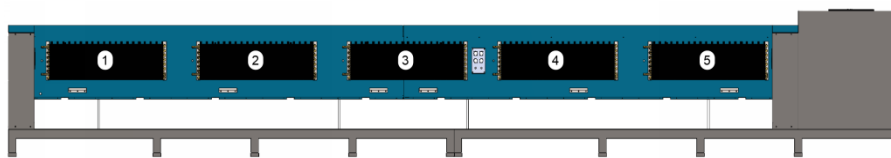
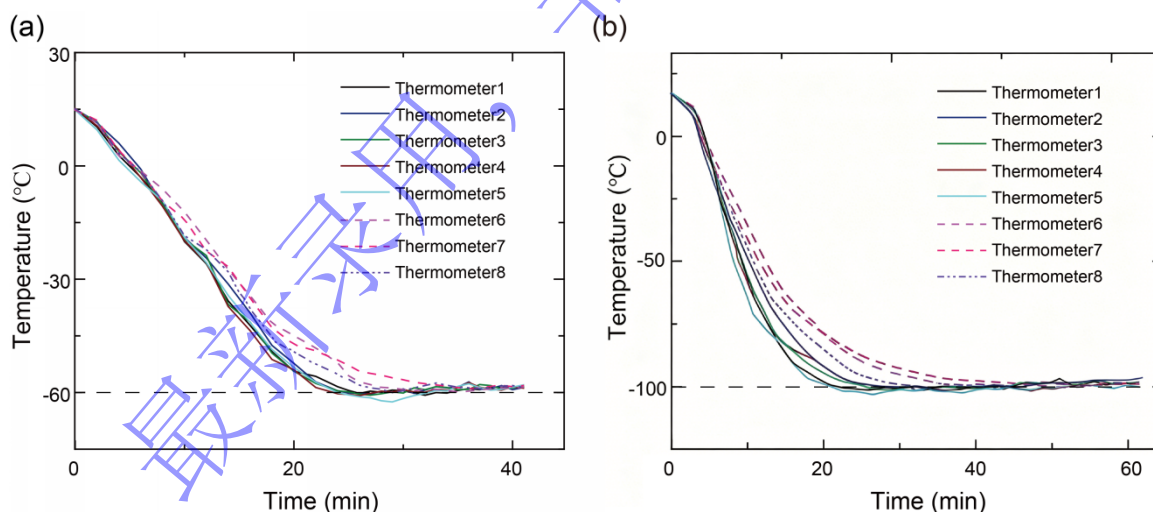


图4 冷凝换热器分布示意图

Fig.4 Configuration of condensing heat exchanger

如图4所示，为了实现高均匀性，高稳定性的低温实验环境，不同于传统的单点或双点注入液氮的方式，箱内均匀分布5个纯铜换热冷凝器，构成一个高效的换热矩阵，与传统的双点或单点注入的液氮有本质区别。液氮通过精密电磁阀控制，被同步、均匀的输送到5个独立的换热冷凝器中，每个冷凝器作为一个独立的“冷源”，在其所在区域进行高效、均匀的热交换，该设计将一个大大空间的冷却任务，分解为5个协同工作的小区域冷却任务，从源头上避免了单一冷源带来的温度梯度和冷却死角问题。低温环境系统共设置8个测温点位，采用高精度温度传感器（PT100A级）实时、持续的监测箱体内部不同区域的温度：其中1-5号点位用于监测箱体内不同区域的空气温度，6-8号点位则分别对应入射杆、透射杆样品和样品及透射杆的温度监测，PLC控制器会根据这8个测温点的反馈数据，独立且精准地调节通往对应区域换热冷凝器的液氮流量。

在-60℃和-100℃条件下进行的低温 SHPB 实验中，8个测温点的温度变化情况如图5所示。对于-60℃的实验，如图5a所示，经过约20分钟，箱内环境温度（测温点1-5）已达到预设值，但样品及应变片位置尚未达到目标温度。经过10分钟的保温后，样品（测温点8）和应变片位置（测温点6和7）成功降至-60℃，并继续保温5分钟，8个测温点的温度均稳定在-60℃附近，最大偏差不超过0.5℃，此时可以开展实验。对于-100℃的实验（图5b），环境温度（测温点1-5）在约30分钟内降至-100℃，经过13分钟的保温后，样品（测温点8）和应变片位置（测温点6和7）也达到-100℃，随后再保温5分钟，温度保持稳定，无明显波动，可以进行动态加载实验。



在-40℃和-80℃低温 SHPB 实验中8个测点的温度变化列举图5 低温 SHPB 实验温度变化：(a) -60℃；(b) -100℃

Fig.5 Temperature-time curve for SHPB experiments at low temperatures: (a) -60℃; (b) -100℃

## 2 低温参数标定

全低温杆实验将 SHPB 杆件和应变片均置于低温环境中，杆的力学物理参数和应变片灵敏系数相较于常温会发生相应变化。为了保证实验数据的准确，必须对不同温度下的对应参数进行标定。

考虑基于一维应力波理论，通过双波法计算样品上的工程应力( $\sigma$ )、工程应变( $\varepsilon$ )和工程应变率( $\dot{\varepsilon}$ )的公式分别为<sup>[21], [22]</sup>:

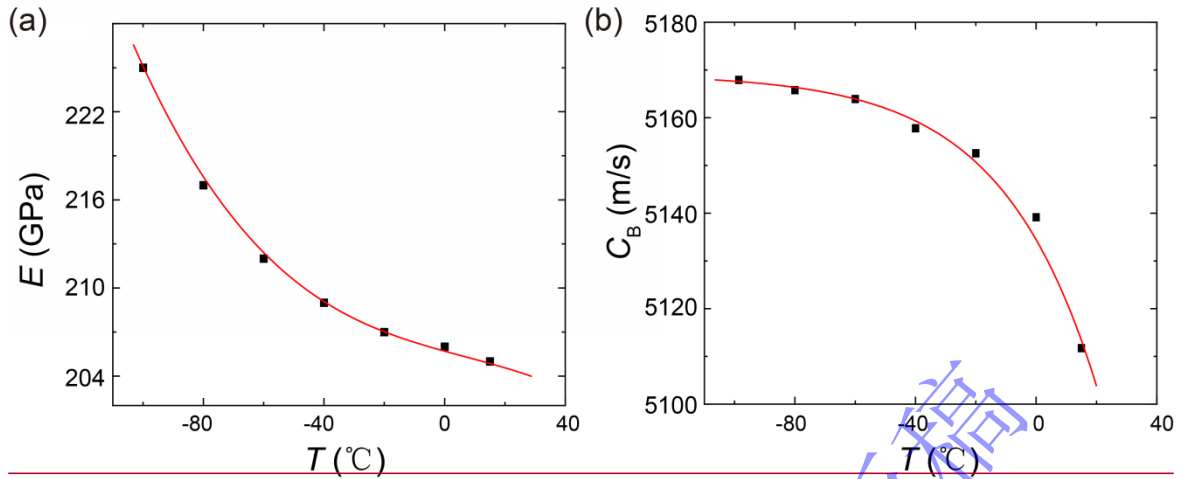


图 5 波导杆低温参数标定: (a) 弹性模量; (b) 声速

Fig.5 Parameter calibration at low temperature for the pressure bar: (a) elastic modulus; (b) sound velocity

$$\sigma = -E\varepsilon_T \frac{A}{A_s} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_B(\varepsilon_I - \varepsilon_T)}{l_s} \quad (2)$$

$$\varepsilon = -\int_0^{t_w} \frac{2C_B(\varepsilon_I - \varepsilon_T)}{l_s} dt \quad (3)$$

其中,  $E$  表示杆杨氏模量,  $C_B$  表示杆的波速,  $A$  表示横截面积,  $l$  表示样品长度。下标 I、T 和 S 分别对应入射、透射和样品。 $t_w$  表示压缩脉冲宽度。由公式(1)-(3)可知, 未为了得到精确的结果, 因此需要对杆材在低温下的模量  $E$  和波声速  $C_B$  进行标定。

表 1 波速测试结果

Table 1 Wave velocity test results

T (°C)	第一次测试	第二次测试	第三次测试	均值
15	5104.0	5118.5	5108.2	5110.2
0	5127.3	5119.2	5120.8	5122.4
-20	5128.1	5130.4	5145.9	5134.8
-40	5147.8	5164.3	5161.3	5157.8
-60	5171.2	5180.7	5176.8	5176.2
-80	5189.2	5184.9	5176.2	5183.4
-100	5189.7	5192.2	5209.1	5197.0

其中,  $E$  表示杆杨氏模量,  $C_B$  表示杆的波速,  $A$  表示横截面积,  $l$  表示样品长度。下标 i、t 和 s 分别对应入射、透射和样品。 $t_w$  表示压缩脉冲宽度。因此需要对杆材在低温下的模量  $E$  和声

速  $C_B$  进

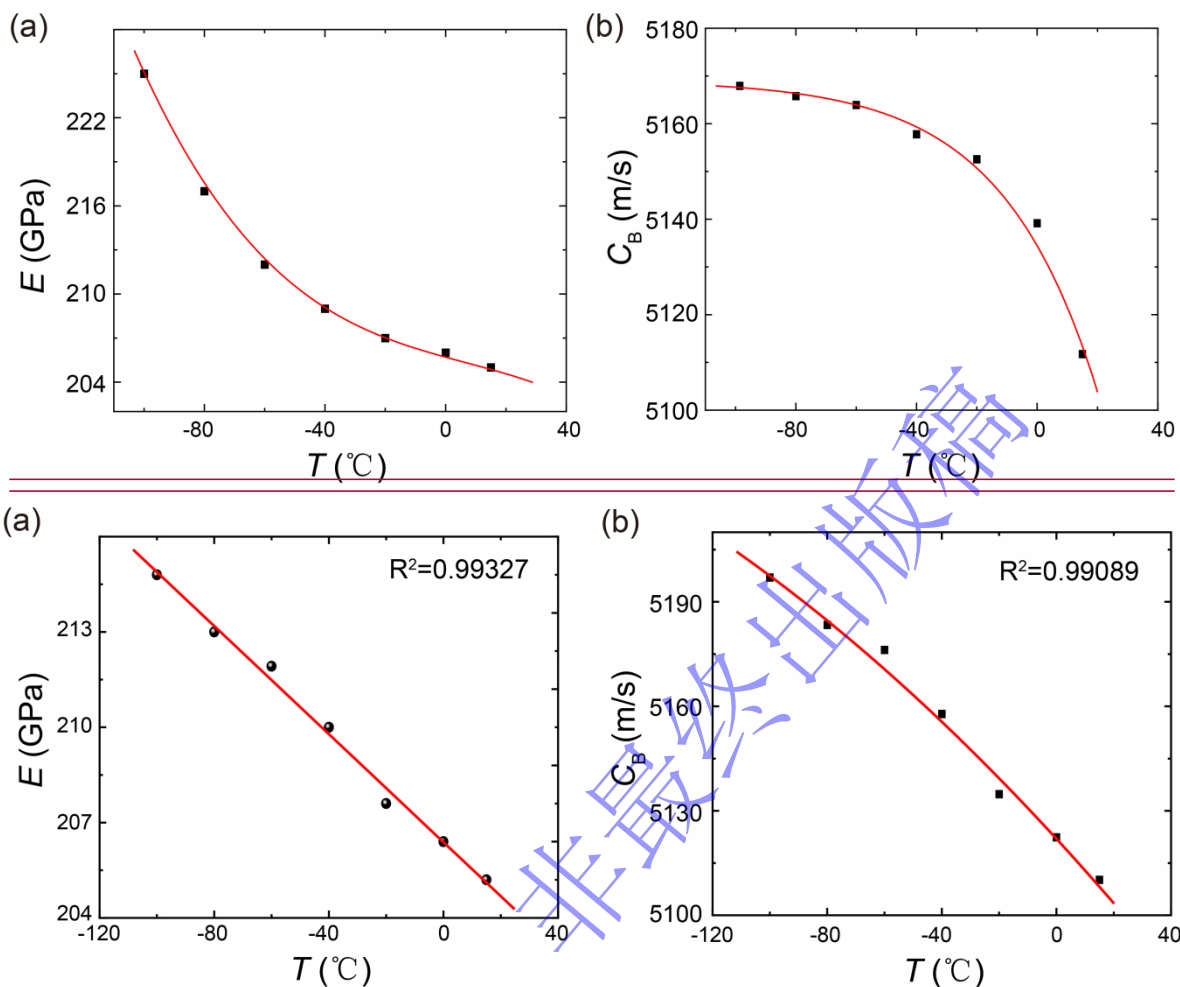


图 56 波导杆低温参数标定: (a) 杨氏弹性模量; (b) 波声速

Fig.56 Parameter calibration at low temperature for the pressure bar: (a) elastic modulus; (b) sound velocity

通过准静态压缩试验对杆材在低温下的杨氏模量弹性模量进行测试, 测试结果见表 42。如图 56a 所示, 低温下杆材杨氏模量弹性模量和温度关系可进行拟合为三次多项式线性拟合:

$$E=206-0.071T, R^2=0.99327$$

$$E(T) = 206 - 0.071T, R^2 = 0.99327 \quad (4)$$

如图 6, 在低温条件下, 通过在同一根波导杆上的两组应变片对弹性杆上的应力波波速进行标定<sup>0</sup>:

$$C_B(T) = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

式中:  $C_B(T)$  为温度为  $T$  时杆的弹性波速;  $L$  为空打状态下入射杆上应变片到透射杆上应变片的距离;  $\Delta t$  为撞击杆碰撞后入射波和透射波间的时间间隔。

为减少应变片距离测试中的误差, 在粘贴应变片之前, 我们在同一根波导杆上标记了 1000 mm 的距离位置, 并严格按照该标记进行应变片的粘贴, 以消除因波导杆同轴度及压杆界面引起的误差, 且使应变片距离测试误差小于 0.5 mm, 相对误差小于 0.05%。典型的测试波形如图 7xxxxx 所示。入射波 2 由于应变片位置靠近波导杆端面, 在入射波完全通过之前, 反射波已提前到达, 导致波形发生改变, 但这一变化并未影响波形起点, 因此不影响杆上波速的测量。波形起跳点的读取采用了基于 MATLAB 编写的弹性波起点自动定位程序。该程序通过基于均方误差分析、高斯卷积滤波及自定义算子的自动识别方法, 缩小搜索范围、进行归一化处理及特征提取, 从而定位波形实现

起跳点的精准定位，详细算法信息请参见文献[xxxxxxx23]。在每个温度下进行三次重复测试，测试结果（见表1）显示波声速的相对波动小于0.2%，满足实验的精度要求。

弹性杆上的应力波速通过不加样品的空打实验进行标定<sup>[19]</sup>：

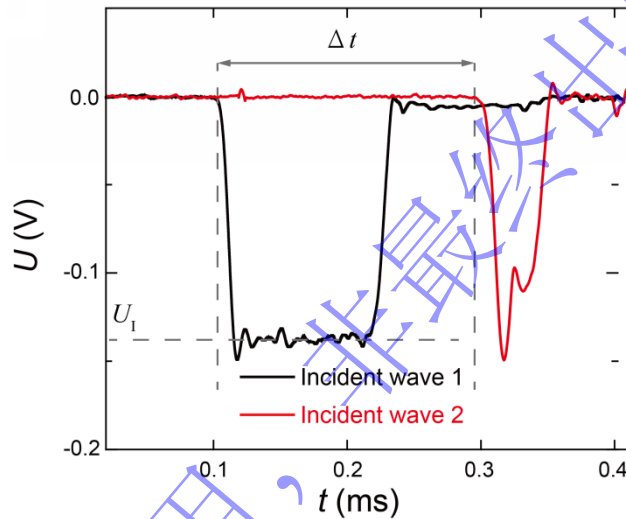
$$C_B(T) = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

式中： $C_B(T)$ 为温度为 $T$ 时杆的弹性波速； $L$ 为空打状态下入射杆上应变片到透射杆上应变片的距离； $\Delta t$ 为撞击杆碰撞后入射波和透射波间的时间间隔。

应变片压电转换系数通过撞击杆撞击速度计算对应的应变幅值进行标定。撞击速度 $v$ 通过炮口光电测速系统进行测量，根据下列公式得到入射波的理论应变幅值 $\varepsilon_1$ <sup>[23]</sup>：

$$\varepsilon_1 = \frac{v}{2C_B} \quad (6)$$

示波器得到对应入射波电压幅值 $U_1$ ，则应变片压电转换系数 $G_F = \varepsilon_1 / U_1$ 。



行标定。

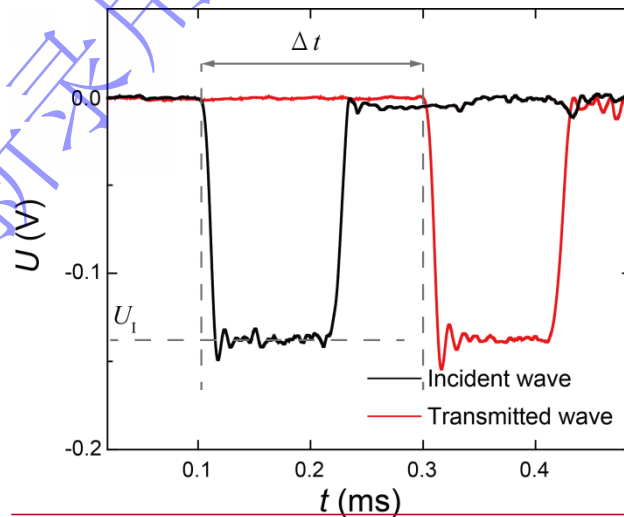


图 67 空打标定低温参数波形图

Fig.67 Waveform for parameter calibration at low temperatures

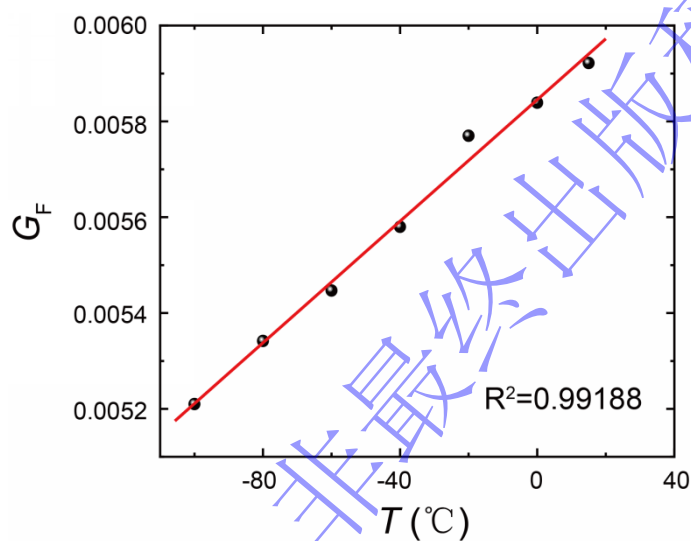
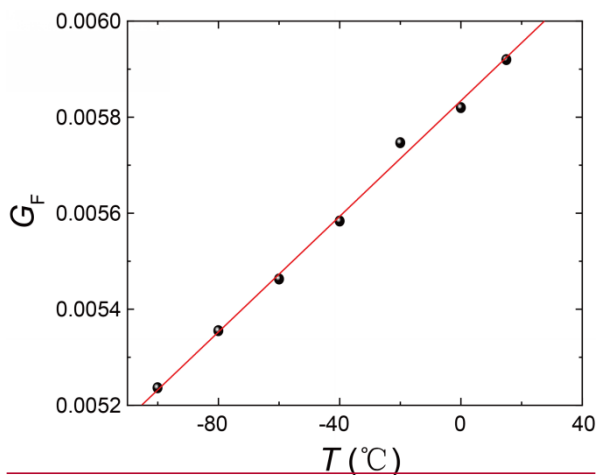


图 78 低温应变片系数参数标定

Fig.78 Calibration of the strain gauge coefficient at low temperatures

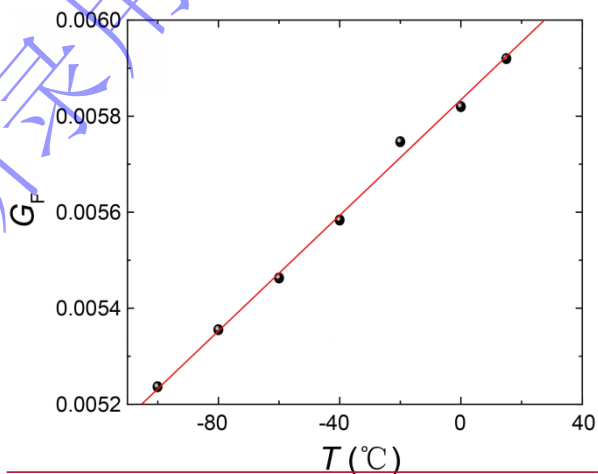


图 6 低温应变片系数参数标定

Fig.6 Calibration of the strain gauge coefficient at low temperatures

通过准静态压缩试验对杆材在低温下的弹性模量进行测试，测试结果见表 1。如图 5a 所示，低温下杆材弹性模量和温度关系可拟合为三次多项式：

$$E(T) = 206 - 0.0567T - 1.872 \times 10^{-4}T^2 - 1.522 \times 10^{-5}T^3 \quad (4)$$

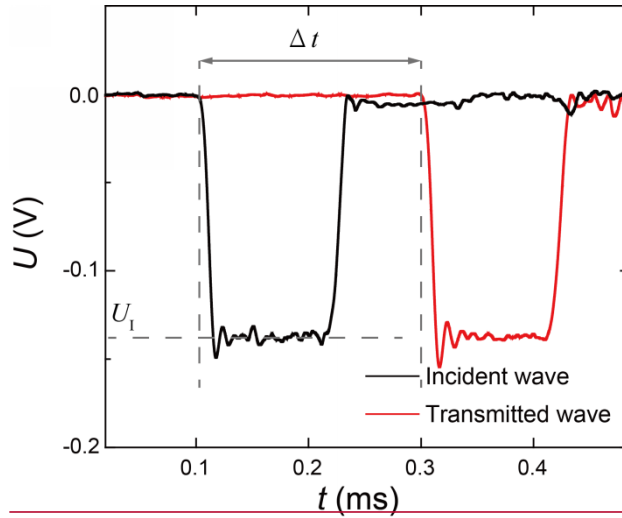


图 7 空打标定低温参数波形图

Fig.7 Waveform for parameter calibration at low temperatures

如图 7, 在低温条件下, 弹性杆上的应力波速通过不加样品的空打实验进行标定<sup>[9]</sup>。

$$C_B(T) = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

式中:  $C_B(T)$  为温度为  $T$  时杆的弹性波速;  $L$  为入射杆上应变片到透射杆上应变片的距离;  $\Delta t$  为撞击杆碰撞后入射波和透射波间的时间间隔。

应变片压电转换数通过撞击杆撞击速度计算应变幅值进行标定。撞击速度  $v$  通过炮口光电测速系统进行测量, 根据下列公式得到入射波的理论应变幅值  $\varepsilon_1$ <sup>[20]</sup>。

$$\varepsilon_1 = \frac{v}{2C_B} \quad (6)$$

示波器得到对应入射波电压幅值  $U_1$ , 则应变片压电转换系数  $G_F = \varepsilon_1 / U_1$ 。

表 1-2 低温参数标定

Table 1-2 Calibration at low temperatures

$T$ (°C)	$C_B$ (m/s)	$E$ (GPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$G_F$ (V <sup>-1</sup> )
15	5110.25144.8	205	7.85	0.00592
0	5122.45139.2	206	7.85	0.00582
-20	5134.85152.6	207	7.85	0.00575
-40	5157.85157.8	209	7.86	0.00558
-60	5176.25163.9	211	7.86	0.00546
-80	5183.45165.8	210212	7.87	0.00536
-100	5197.05167.4	214213	7.89	0.00524

常温到-100°C下对杆的波速  $C_B$  和应变片压电转换系数  $G_F$  标定结果见表 1-2, 其数值为多组重复试验的有效数据取平均值所得, 其中密度  $\rho$  通过公式  $\rho = E/C_B^2$  计算得到。在实验测试低温范围内,  $C_B$  与  $T$  采用二次多项式指数拟合:

$$C = 5122.5 - 0.915T - 0.00164T^2, R^2 = 0.99089$$

$$C_B(T) = 5122.5 - 0.915T - 0.00164T^2, R^2 = 0.99089 \quad (7)$$

$G_F$  与  $T$  采用线性拟合:

$$G=0.00585+6.343 \times 10^{-6} T, R^2=0.99188$$

$$G_F(T) = 0.00585 + 6.343 \times 10^{-6} T, R^2 = 0.99188 \quad (8)$$

拟合结果如图 56b 和图 678 所示, 随着温度降低, 波导杆的波声速逐渐减小增大, 而应变片系数逐渐减小增大, 与理论预测结果一致<sup>[25]</sup>。

### 3 波导杆上温度梯度的影响

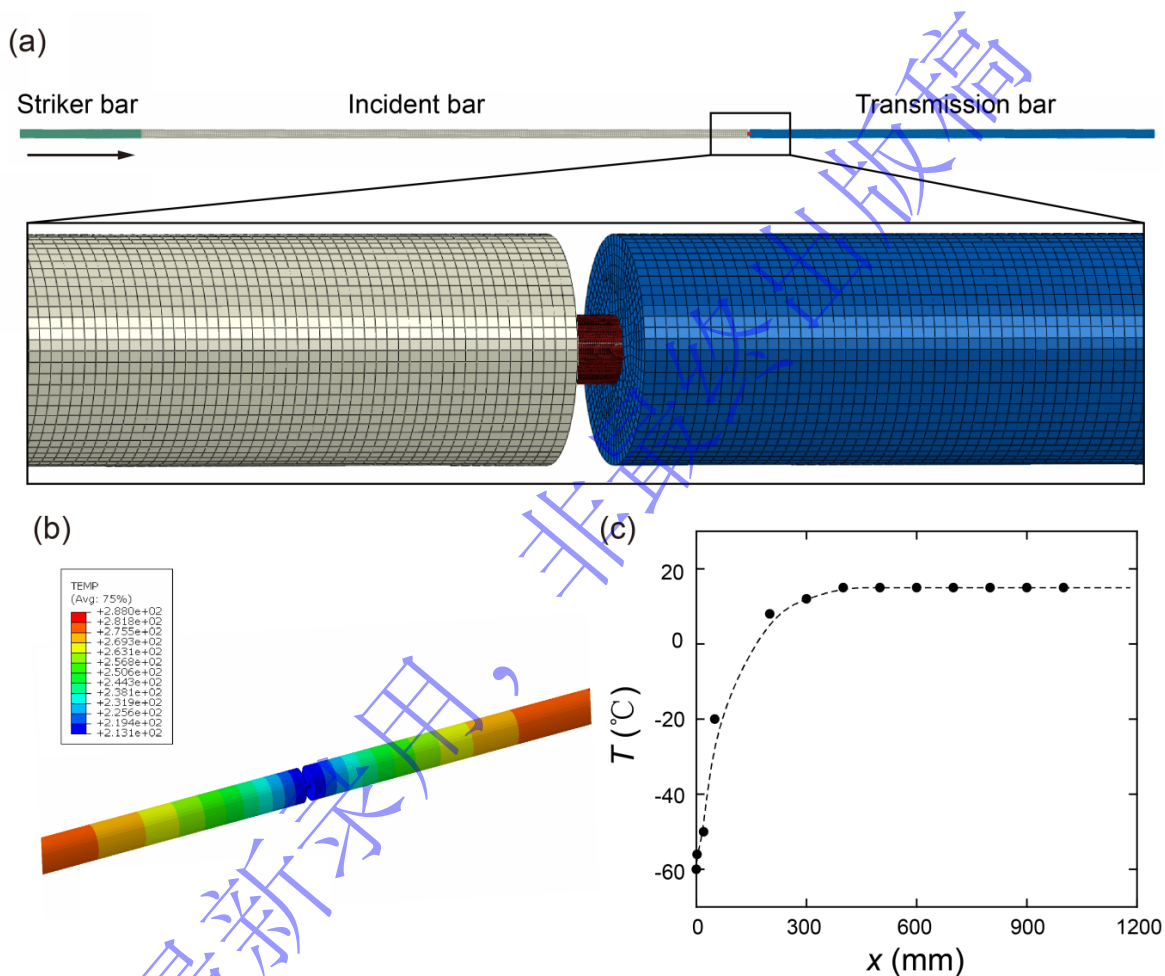


图 9 SHPB 实验的有限元模型: (a) 网格模型 (b) 模型一的温度云图; (c) 模型一中波导杆上温度梯度分布  
Fig.9 FEM model of SHPB testing: (a) mesh partitioning; (b) contour plot for temperature of Model-1; (c) temperature distribution on the pressure bars of Model-1

SHPB 测试技术基于一维应力波理论, 加载杆上的温度梯度将会引起霍普金森加载杆材料的杨氏模量弹性模量和波声速的变化, 进而由于  $C_B = \sqrt{E/\rho}$ , 弹性模量的变化直接引起应力波波速以及弹性杆波阻抗的改变, 从而引起最终导致应力和应变的测试误差。我们利用有限元方法, 通过 ABAQUS/Explicit 有限元软件讨论传统的局部降温 SHPB 方案中波导杆上温度梯度对测试结果的影响, 并和全低温 SHPB 装置进行比较。

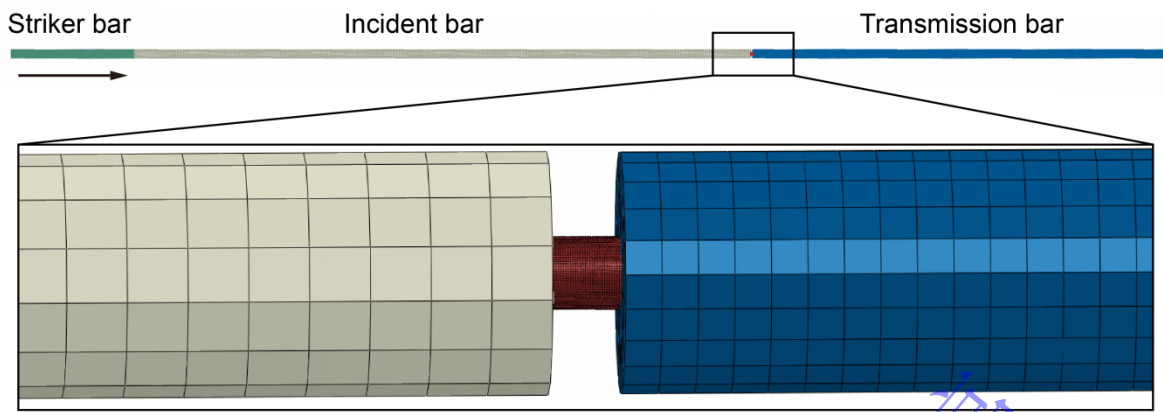
霍普金森杆的有限元模型如图 8a 所示, 入射杆、透射杆、撞击杆均按照实验条件以 1:1 的比

例建立，试样的尺寸为 $\phi 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ ，并采用 8 节点的六面体单元进行网格划分。杆系统的各组件的平均单元尺寸为 1 mm，而试样的单元尺寸则为 0.1 mm。在有限元模拟中，施加了自由边界条件，并采用基于罚函数的接触条件<sup>[26]</sup>，摩擦系数设定为零。杆选用纯弹性模型，样品材料选取 2024Al 合金，采用文献<sup>[27]</sup>中的 Johnson-Cook 弹塑性本构模型进行描述。

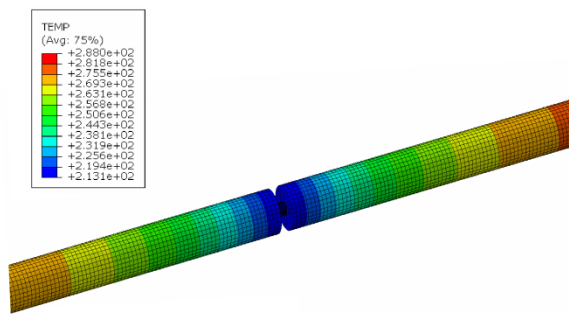
选取 -60°C 工况进行动态加载模拟，建立两种模型。模型一：模拟传统局部降温模式，在波导杆上设置了温度梯度，温度设置采用实验记录温度数据结合文献<sup>[26]</sup>中温度分布关系设置，波导杆上的温度设置如图 8b 和 c 所示，模量和密度则根据上一节的标定结果随温度变化进行调整。模型二：模拟全低温 SHPB 装置，波导杆和试样的温度均设定为 -60°C。数值模拟结果中采用两种方式计算应力-应变曲线：第一种直接从样品试样单元中提取应力和应变历史得到应力-应变曲线；第二种模拟实际实验中的数据过程，采用入射杆和透射杆中点位置处固定单元的应变历史，依据公式(1)-(3)计算得到。

模型一的模拟结果如图 9 所示，受波导杆上温度梯度的影响，波形出现了更强的震荡现象。通过杆上面元应变历史得到的应力-应变曲线与从试样中提取的应力-应变曲线相比，前者的应力值相对后者偏低约 10%，这与文献<sup>[26]</sup>中的结果一致。这表明如果在传统低温 SHPB 实验中不考虑杆上温度梯度并对数据进行修正，则测得的材料动态力学性能将会失真。模型二的模拟结果如图 10 所示，采用两种方法获得的应力-应变曲线表现出高度一致性，最大偏差不超过 1%，验证了全低温 SHPB 装置及其方法在低温动态实验中的准确性。

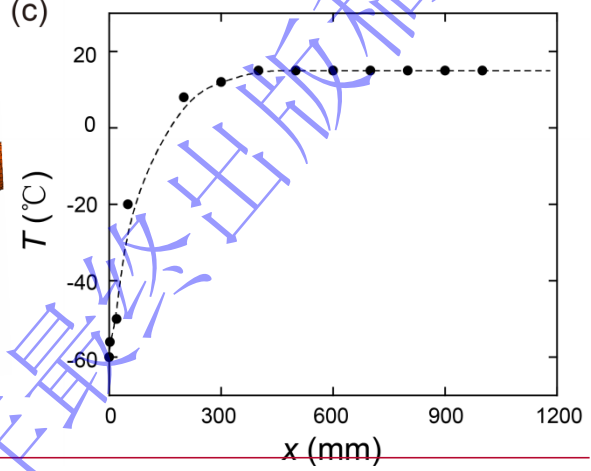
(a)



(b)



(c)



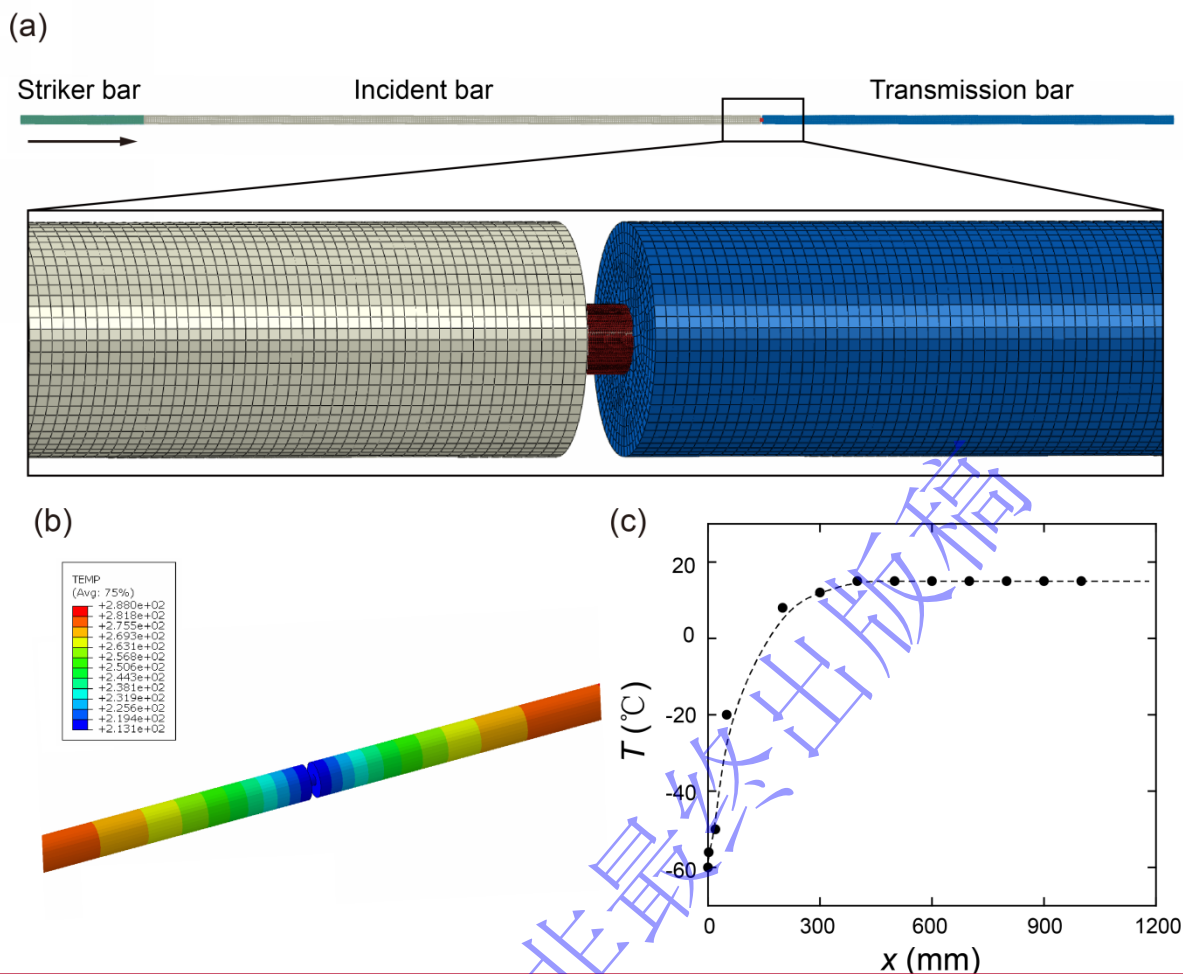


图 8.9 SHPB 实验的有限元模型: (a) 网格模型 (b) 模型一的温度云图; (c) 模型一中波导杆上温度梯度分布  
Fig.8.9 FEM model of SHPB testing: (a) mesh partitioning; (b) contour plot for temperature of Model-1; (c) temperature distribution on the pressure bars of Model-1

霍普金森杆的有限元模型如图 8a 所示, 入射杆、透射杆、撞击杆及试样的尺寸均按照实验条件以 1:1 的比例建立, 试样的尺寸为  $\phi 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ , 并采用 8 节点的六面体单元进行网格划分。杆系统的各组件的平均单元尺寸为 0.51 mm, 而试样的单元尺寸则为 0.05 mm。在有限元模拟中, 施加了自由边界条件, 并采用基于罚函数的接触条件<sup>[22]</sup>, 摩擦系数设定为零。杆选用纯弹性模型, 样品材料选取 2024A1 铝合金, 采用文献<sup>[23]</sup>中的 Johnson-Cook 弹塑性本构模型进行描述。

选取 -60°C 工况进行动态加载模拟, 建立两种模型。模型一: 模拟传统局部降温模式, 在波导杆上设置了温度梯度, 温度设置采用实验记录温度数据结合文献<sup>[10]</sup>中温度分布关系设置, 波导杆上的温度设置如图 8b 和 c 所示, 模量和密度则根据上一节的标定结果随温度变化进行调整, 波导杆上的温度设置如图 8b 和 c 所示。模型二: 模拟全低温 SHPB 装置, 波导杆和试样的温度均设定为 -60°C。数值模拟结果中采用两种方式计算应力-应变曲线: 第一种直接从样品从试样单元中提取应力和应变历史得到应力-应变曲线; 第二种模拟实际实验中的数据处理过程, 采用通过入射杆和透射杆中点位置处固定单元的应变历史, 依据公式(1)-(3)进行计算得到。

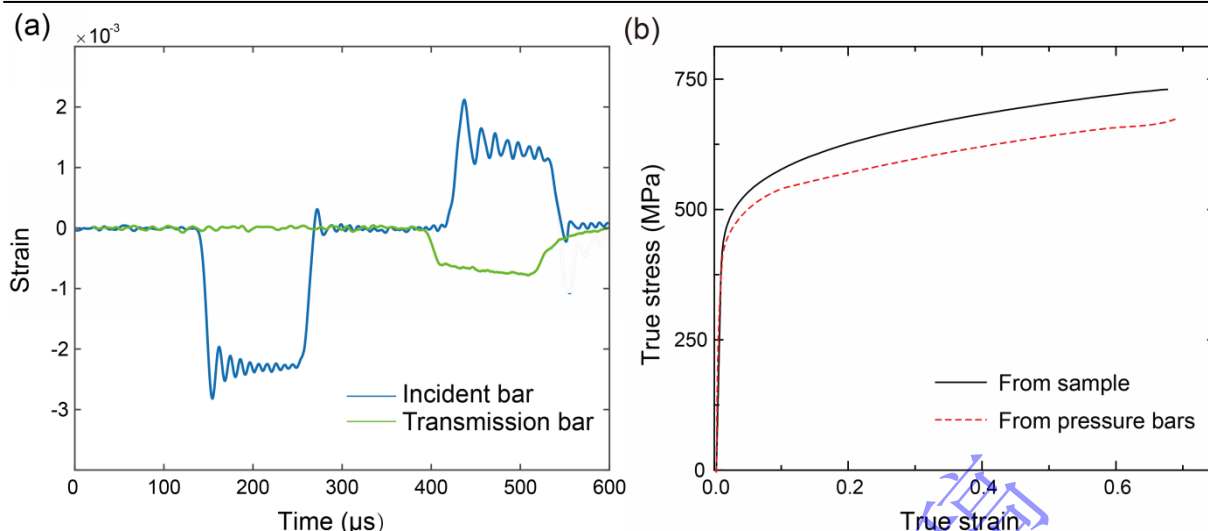


图 9-10 传统低温 SHPB 装置数值模拟结果: (a) 杆上的应变波形; (b) 应力-应变曲线

Fig. 9-10 Numerical simulation results of the traditional SHPB system at cryogenic temperatures: (a) strain histories in the pressure bars; (b) true stress--strain curves.

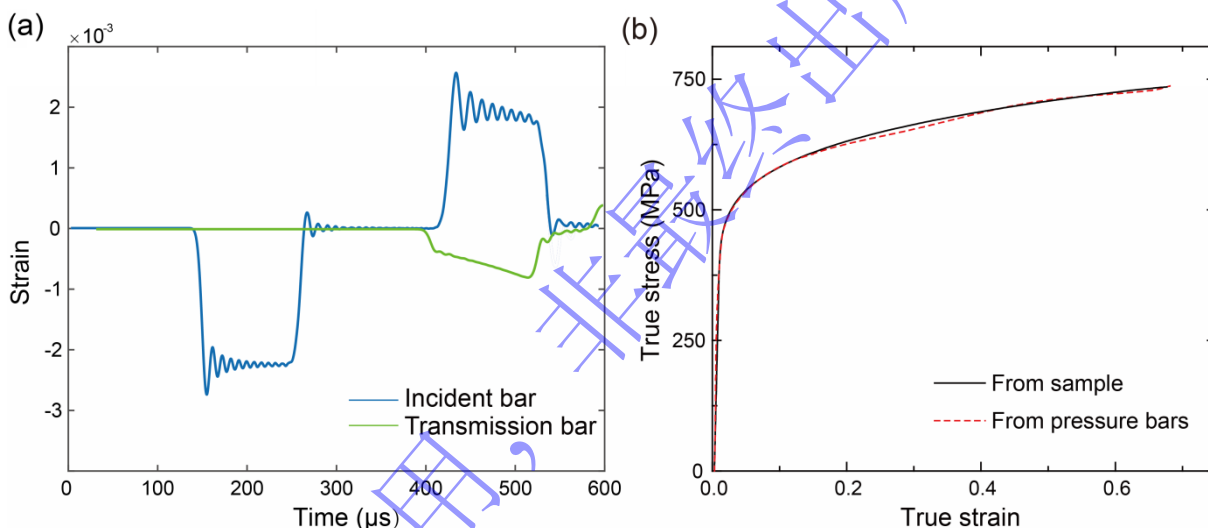
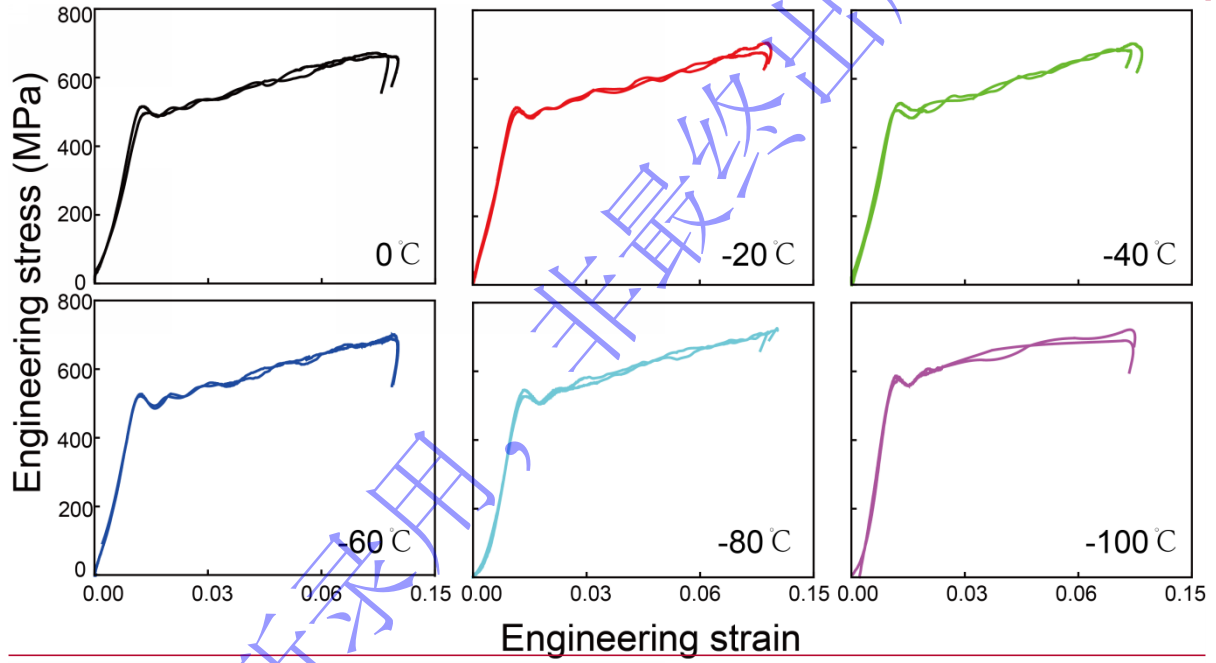
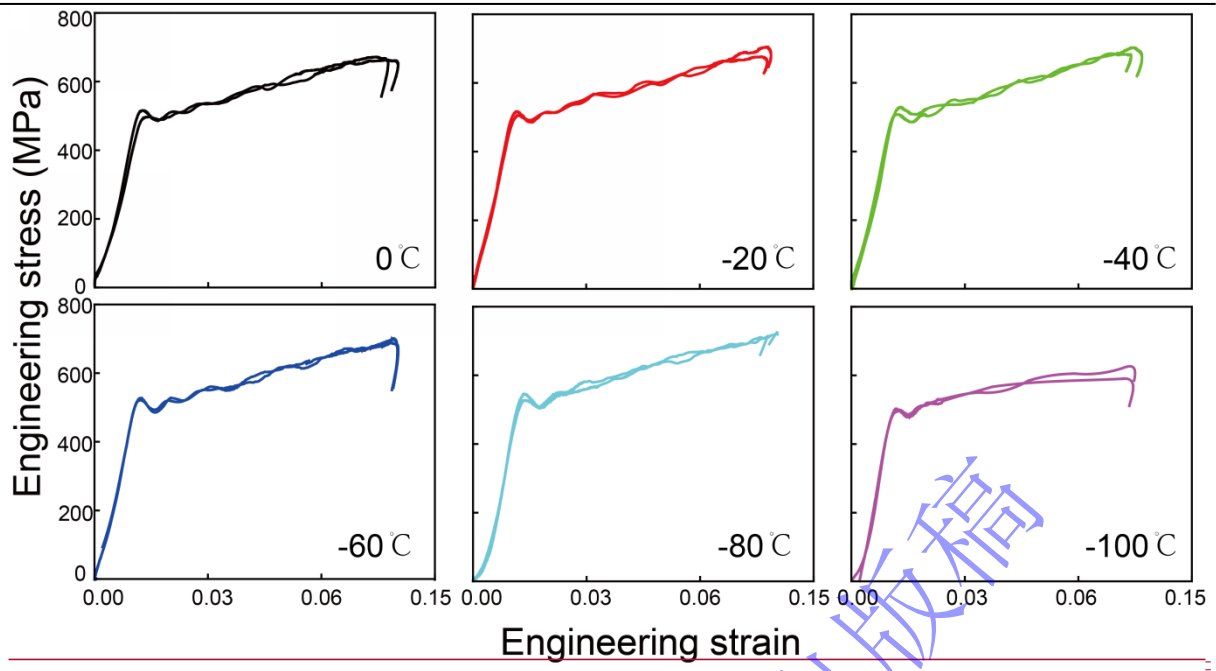


图 10-11 全低温 SHPB 装置数值模拟结果: (a) 杆上的应变波形; (b) 应力-应变曲线

Fig. 10-11 Numerical simulation results of the new SHPB system at cryogenic temperatures: (a) strain histories in the pressure bars; (b) true stress--strain curves

模型一的模拟结果如图 9 所示,受波导杆上温度梯度的影响,波形出现了更强的震荡现象,并且幅值发生了变化,这与文献<sup>[8]</sup>文中的结果相一致。通过杆上面元应变历史得到的应力-应变曲线与从试样中提取的应力-应变曲线相比,前者的应力值相对后者明显偏低约 10%,这与文献<sup>[8]</sup>中的结果一致。这表明如果在传统低温 SHPB 实验中不考虑杆上温度梯度并对数据进行修正,则测得的材料动态力学性能将会失真。模型二的模拟结果如图 10 所示,采用两种方法获得的应力-应变曲线表现出高度一致性,最大偏差不超过 1%,验证了全低温 SHPB 装置及其方法在低温动态实验中的准确性。

#### 4 2024A1 低温动态力学性能测试



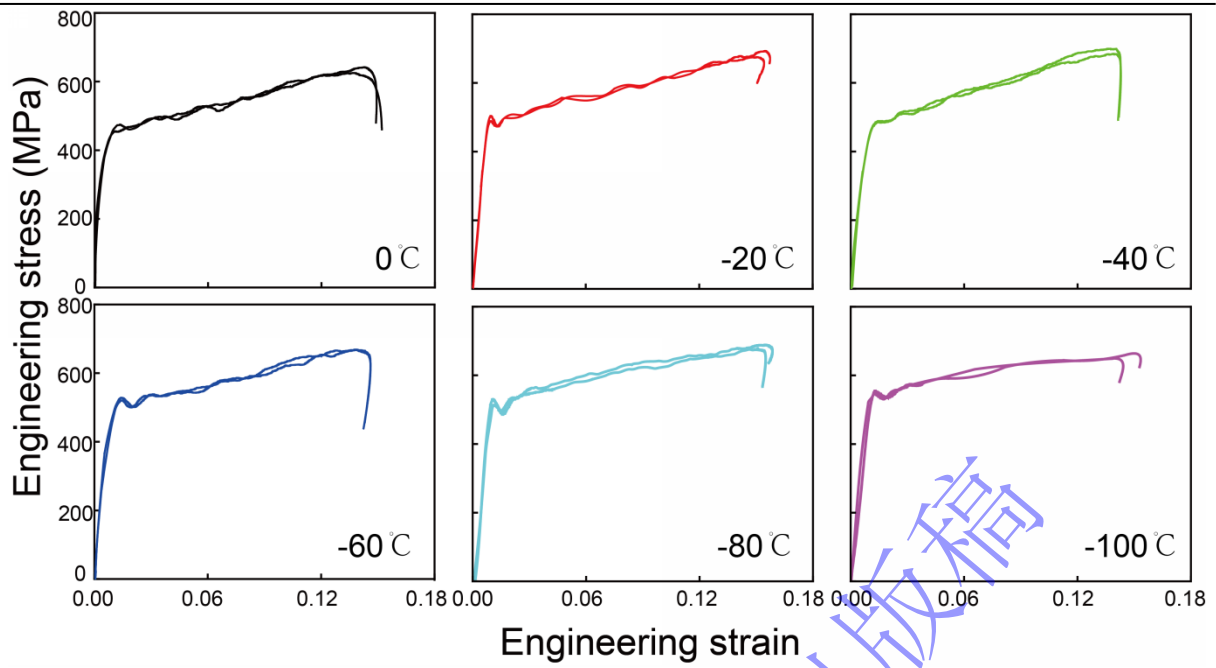
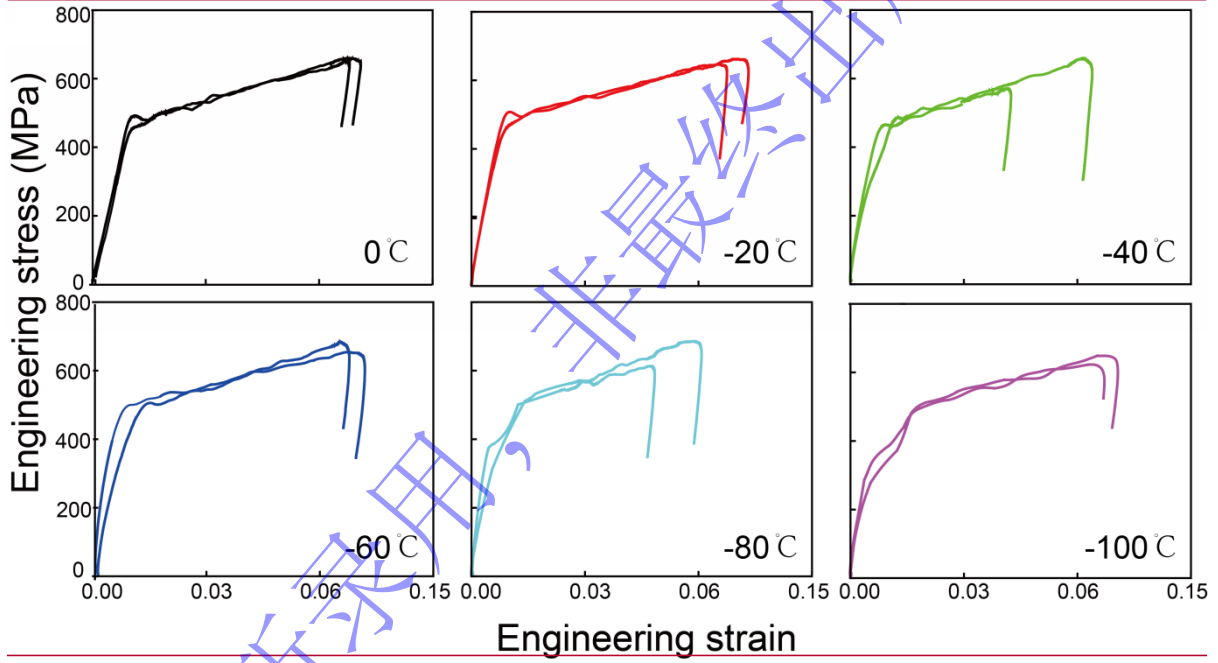
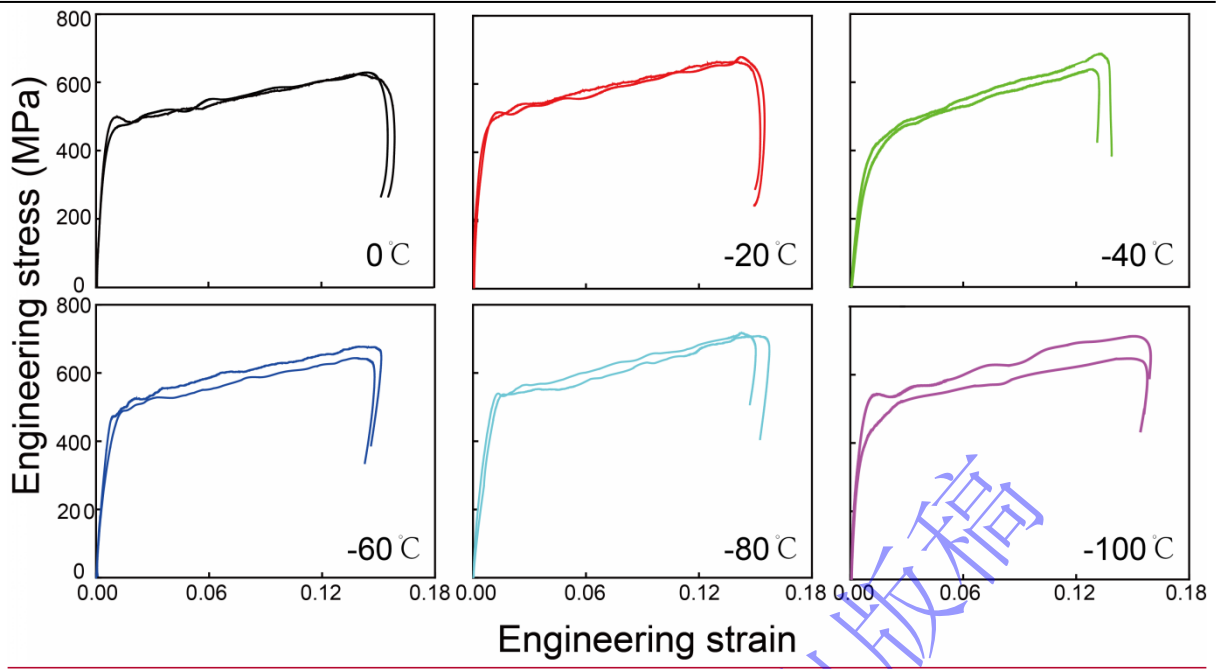


图 11 低温下通过全低温 SHPB 得到 2024Al 的压缩应力-应变曲线

Fig.11-12 Dynamic compression stress-strain curves of 2024 aluminum at cryogenic temperatures obtained from the new SHPB system



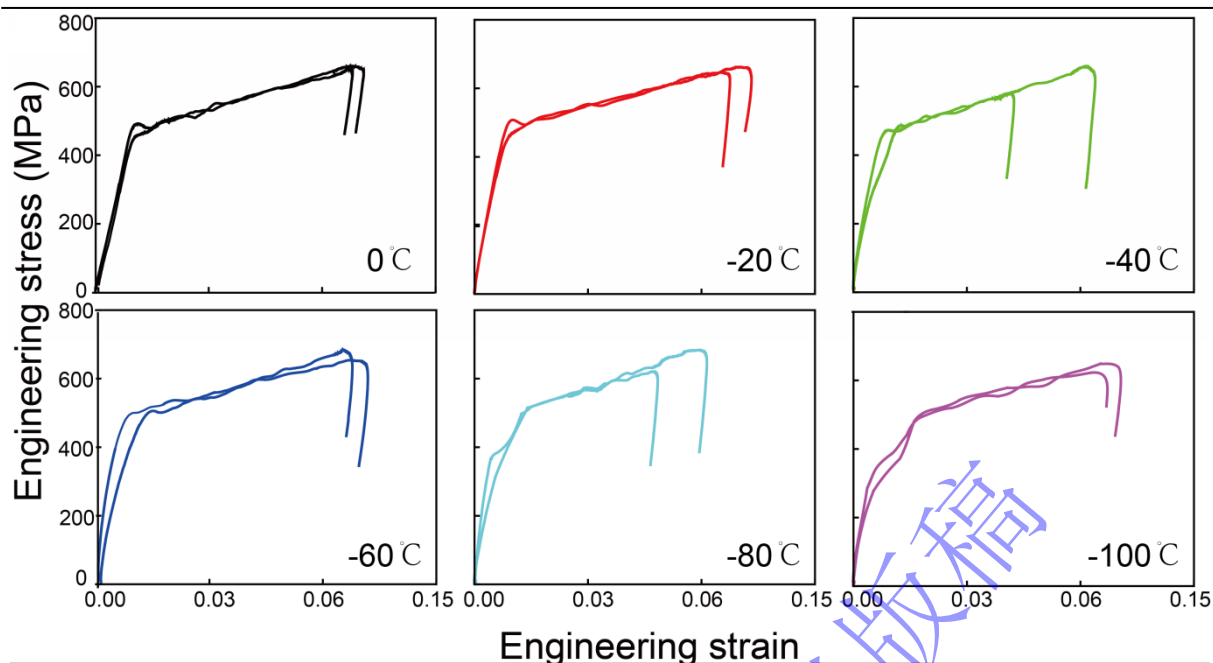


图 12 低温下通过传统局部降温式 SHPB 得到 2024Al 的压缩实验应力-应变曲线

Fig.12-13 Dynamic compression stress-strain curves of 2024 aluminum at cryogenic temperatures obtained from the traditional SHPB system

基于应用建立的全低温 SHPB 实验装置，在  $2000\text{ s}^{-1}$  应变率下，对 2024Al 合金进行了  $0^\circ\text{C}$ 、 $-20^\circ\text{C}$ 、 $-40^\circ\text{C}$ 、 $-60^\circ\text{C}$ 、 $-80^\circ\text{C}$ 、 $-100^\circ\text{C}$  六个温度的低温动态压缩实验，采用的试样尺寸为  $\phi 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。实验结果与传统的局部导杆和与试件共同降温的 SHPB 装置所得到的结果进行了比较，具体结果如图 11 和 12 所示。在接近常温的条件下，两种 SHPB 装置所获得的实验结果基本一致，且均表现出良好的重复性。然而，随着温度降低至  $-40^\circ\text{C}$ （见图 12），波导杆上的温度梯度显著增大。此外，由于传统降温装置内部与外界空气环境的流通，波导杆局部处于低温环境中的部分易发生结冰现象。这导致传统局部降温方法所获得的应力-应变曲线的重复性明显下降。然而，随着温度降低至  $-40^\circ\text{C}$ （图 12），由于波导杆上温度梯度增大的变化，传统的局部降温方法所得到的应力-应变曲线的重复性明显下降。相对而言，本研究所采用的全低温 SHPB 装置所获得的应力-应变曲线则保持了良好的重复性（图 11）。此外，传统 SHPB 装置在  $-40^\circ\text{C}$  以下测得的应力-应变曲线幅值相较于全低温 SHPB 实验装置显著偏低，与有限元仿真结果一致，且这种偏差随着温度的降低而逐渐增大。这一结果表明，全低温 SHPB 实验装置在低温条件下的实验重复性和测试精度和装置可靠性均显著优于传统的局部降温式 SHPB 实验装置。此外，传统 SHPB 装置在  $-40^\circ\text{C}$  以下测得的应力-应变曲线幅值相较于全低温 SHPB 实验装置显著偏低，与有限元仿真结果一致，且这种偏差随着温度的降低而逐渐增大，与有限元仿真结果一致。这进一步说明，全低温 SHPB 装置在低温环境下的测量精度优于传统的局部降温方法。

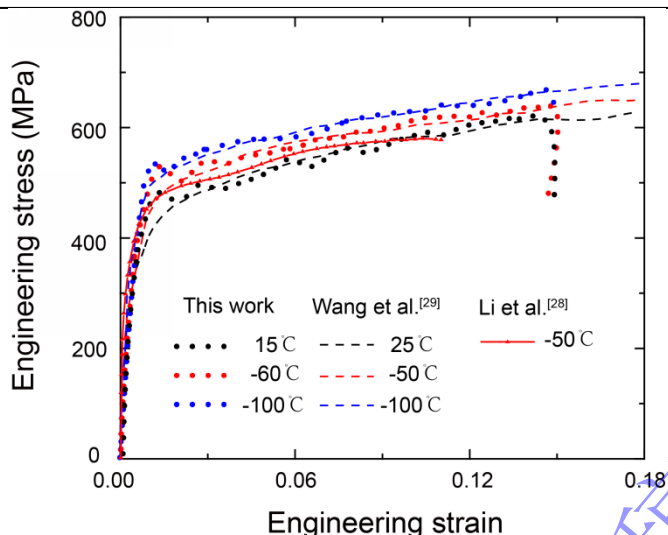


图 14 低温下通过全低温 SHPB 得到 2024Al 的压缩应力-应变曲线和文献<sup>[26]</sup>比较

Fig.14 Comparison of dynamic compression stress-strain curves for 2024 aluminum at cryogenic temperatures obtained from the new SHPB system and the references<sup>[26]</sup>

图 14 展示了通过全低温 SHPB 测试获得的 2024Al 的低温动态压缩应力-应变曲线，并与李娜<sup>[28]</sup>及 Wang 等人<sup>[29]</sup>的测试结果进行了比较。本研究所得结果与文献<sup>[29]</sup>中的实验数据较为一致，而文献<sup>[28]</sup>中所报告的 2024 铝合金强度明显偏低，这可能受到材料热处理工艺的影响。研究结果与 Wang 等人测试本构曲线的良好吻合进一步验证了本装置的可靠性。

这一结果表明，全低温 SHPB 实验装置在低温条件下的实验重复性和装置可靠性显著优于传统的局部降温式 SHPB 实验装置。

## 5 结论

本研究针对极地低温动态试验的测试需求，本研究建立了一套全低温 SHPB 实验装置，得到以下结论：（1）相较于传统局部降温 SHPB 方案，该装置无需考虑波导杆上的温度梯度影响，数据处理更为简便，且在针对工程材料的批量实验上具有优势，同时避免了低温实验中的结冰问题，显著提升了实验精度；（2）与快速机械组装方案相比，实验装置及其操作流程亦更为简化。（2）在完成低温环境下波导杆与应变片的标定后，结合有限元仿真分析了杆上温度梯度对测试结果的影响。结果表明，局部的温度梯度不仅会加剧波导杆上的波形震荡，还会导致实测应力值偏低，最大相对偏差超过 10%；而采用全低温 SHPB 装置则可有效消除该偏差。进一步地，（3）通过对 2024Al 合金在低温条件下的力学性能测试，并和文献中的实验结果进行比较，验证了全低温 SHPB 实验装置在低温环境下具有良好的可靠性与重复性，其表现显著优于传统局部降温 SHPB 装置针对极地低温动态试验的测试需求，本研究建立了一套全低温 SHPB 实验装置。与传统的局部降温 SHPB 方案相比，该低温实验装置无需考虑波导杆上温度梯度的影响，在数据处理上更为简便，且提升了实验的精度；与快速机械组装方案相比，实验装置及操作流程显得更加简易。在对低温下的波导杆和应变片进行标定后，结合有限元仿真分析了杆上温度梯度的影响，并对全低温 SHPB 装置原理进行了验证。针对 2024Al 铝合金的低温性能进行了测试。实验结果表明，全低温 SHPB 实验装置在低温条件下的可靠性和重复性显著优于传统的局部降温 SHPB 装置。

新提出并建立的全低温 SHPB 装置仍处于测试阶段，在低温参数的标定精度及降温速率等方面尚需深入研究。目前，该装置主要针对韧性金属材料，而对于脆性材料或软材料的动态加载，其细节问题需要进一步完善。

## 参考文献

- [1] 古洪能,冉金澜.—人类命运共同体语境下北极公域治理转型的中国方案[J].决策与信息,2024,(02):5-13.  
GU H N, RAN J L. China's Proposal for the Transformation of arctic commons governance in the context of a community with a shared future for mankind[J]. Decision & Information, 2024, (02): 5-13.
- [2] 谢晓光,程新波,李沛坤.—“冰上丝绸之路”建设中北极国际合作机制的重塑[J].—中国海洋大学学报(社会科学版),-2019,-(02):13-25.  
XIE X G, CHENG X B, LI P S. Rebuilding the arctic international cooperative mechanism in the construction of "Silk Road on Ice"[J]. Journal of Ocean University of China (Social Sciences), 2019, (02): 13-25.
- [3] 路保平,侯绪田,柯珂.—中国石化极地冷海钻井技术研究进展与发展建议[J].—石油钻探技术, 2021, 49-(03):1-10.  
LU B P, HOU X T, KE K. Achievements and developing suggestions of sinopec's drilling technologies in arctic sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 1-10.
- [4] LIU W, WANG X, CHEN C, et al. Cryogenic freezing effects on static/dynamic mechanical behavior of concrete with development of thermo-mechanically coupled constitutive model[J]. Construction and Building Materials, 2025, 491: 142638.
- [5] 孙波,唐学远,肖恩照.—南极机场冰雪跑道工程技术发展现状与展望[J].—中国工程科学,—2021, 23(02):161-168.  
SUN B, TANG X Y, XIAO E Z. Ice and snow runway engineering in the antarctica: current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 161-168.
- [6] SU H, ZHU Z, LI T, et al. Experimental studies and numerical analysis of the dynamic mechanical properties of concrete at low temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2023, 404:133221.
- [7] 薛敏,夏晨曦,权红英.—极地海洋环境下复合材料的失效机制研究进展[J].—失效分析与预防,—2023, 18(6):-417-424.  
XUE M, XIA C X, QUAN H Y. Research progress on failure mechanism of composite materials in polar marine environment[J]. Failure Analysis and Prevention, 2023, 18(6): 417-424.
- [8] 夏开文,程经毅,胡时胜.—SHPB 装置应用于测量高温动态力学性能的研究[J].—实验力学,—1998, 13(3):307-313.  
XIA K W, CHENG J Y, HU S S. Application of shpb apparatus to the measurement of high temperature dynamical mechanical behavior of materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(3): 307-313.
- [9] 张方举,谢若泽,田常津,等.—SHPB 系统高温实验自动组装技术[J].—实验力学,—2005,—20(2):281284.  
ZHANG F J, XIE R Z, TIAN C J, et al. Auto-Assembling technique used in high temperature experiment of SHPB[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 281-284.
- [10] 尚兵,王彤彤,庄茁.—高温 SHPB 实验温度修正的差分方法[J].—高压物理学报,—2010, 24(3):219-224  
SHANG B, WANG T T, ZHUANG Z. Difference scheme for modifying the experimental temperature in high-temperature shpb test[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(3): 219-224.
- [TRAUTMANN A, SIVIOUR C, WALLEY S, et al. Lubrication of polycarbonate at cryogenic temperatures in the split Hopkinson pressure bar\[J\]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31\(5\) : 523 – 544.](#)
- [12] [WU X, PRAKASH V. Dynamic compressive behavior of ice at cryogenic temperatures\[J\]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 118 : 1 – 13.](#)
- [13] 肖俊孝,庞宝君,唐钧跃,等.—月壤水冰模拟样本 SHPB 试验及反射波特性的分析[J].深空探测学报(中英文),2022,9(02):150-156.

- [XIAO J X, PANG B J, TANG J Y, et al. SHPB test and reflected wave characteristics analysis of lunar regolith-water ice simulant\[J\]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9\(02\): 150-156.](#)
- [14] 许金余,刘健,范飞林,等.—高温 SHPB 冲击实验技术及其应用—[J].—高压物理学报,—2013, 27(1):57-62.  
XU J Y, LIU J, FAN F L, et al. A high temperature shpb impact experimental technique and its application[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 57-62.
- [15] DOU Q B, WU K R, SUO T, et al. Experimental methods for determination of mechanical behaviors of materials at high temperatures via the split hopkinson bars[J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(6):1275-1293.
- [WALLEY S M. The effect of temperature gradients on elastic wave propagation in split Hopkinson pressure bars\[J\]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2020, 6\(3\) : 278 –286.](#)
- [17] LI Y, WEI P. Reflection and transmission of thermo-elastic waves without energy dissipation at the interface of two dipolar gradient elastic solids[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(1):550-562.
- [18] 安瑞,程焕武,王扬卫,等.—————SHPB 模块化高低温测试系统设计[J].实验技术与管理, 2023,40(08):58-62.  
AN R, CHENG H W, WANG Y W, et al. Design of modular high-low temperature testing system for SHPB[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(08): 58-62.
- [19] 张方举,谢若泽,胡文军,等.————一种改进的金属材料的高温动态拉伸实验技术[J].实验力学, 2011,26(06):750-754.  
ZHANG F J, XIE R Z, HU W J, et al. An improved high-temperature dynamic tensile testing technique for metallic materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(06): 750-754.
- [20] 李玉龙,索涛,郭伟国,等.—et al.—确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统[J].—爆炸与冲击,—2005,—25(6):487-492.  
LI Y L, SU T, GUO W G, et al. Hopkinson bar system for determining dynamic properties of materials at high temperatures and high strain rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 487-492.
- [21] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proc. Phys. Soc. B, 1949, 62(11): 676.
- [22] LOPATNIKOV L S ,GAMA A B ,KRAUTHOUSER K , et al. Applicability of the classical analysis of experiments with split hopkins pressure bar[J].\_Technical physics letters: Letters to the Russian journal of applied physics,2004,30(2):102-105.
- [肖俊孝,庞宝君,唐钧跃,等.—月壤水冰模拟样本 SHPB 试验及反射波特性分析\[J\].深空探测学报\(中英文\),2022,9\(02\):150-156.](#)
- [XIAO J X, PANG B J, TANG J Y, et al. SHPB test and reflected wave characteristics analysis of lunar regolith-water ice simulant\[J\]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9\(02\): 150-156.](#)
- [GERSHANIK T, LEVIN I, RITTEL D. 2BarG—A program to process split Hopkinson \(Kolsky\) bar test results\[J\]. SoftwareX, 2022, 18 : 101093.](#)
- [24] CHEN W W, SONG B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications[M]. America: Springer Science & Business Media, 2010.
- [25] 陈世涛,徐志东.—金属材料中声速随温度变化规律的探讨[C]//中国数学力学物理学高新技术交叉研究学会第 11 届学术年会.—杭州:—浙江理工大学,—2006.  
CHEN S T, XU Z D. Discussion on the variation law of sound velocity in metallic materials with temperature[C]—//Proceedings of the 11th Annual Conference of the Chinese Society for Interdisciplinary Research of Mathematics, Mechanics, Physics and High-New Technology.

- Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2006.
- [26] MUHANNA R L, MULLEN R L, ZHANG H. Penalty-based solution for the interval finite-element methods[J]. J. Eng. Mech., 2005, 131(10): 1102-1111.
- [27] 张正礼. 2024 铝合金动态力学本构模型构建[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014, 31(2):47-50.  
ZHANG Z L. Construction of dynamic mechanical constitutive model for 2024 aluminum alloy[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2014, 31(2): 47-50.
- [28] 李娜, 李玉龙, 郭伟国. 3种铝合金材料动态性能及其温度相关性对比研究[J]. 航空学报, 2008, 29(4):903-908.  
Li Na, Li Yulong, Guo Weiguo. Comparison of Mechanical Properties and Their Temperature Dependencies for Three Aluminium Alloys Under Dynamic Load[J]. ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA, 2008, 29(4): 903-908.
- [29] WANG Y, JIANG Z. Dynamic compressive behavior of selected aluminum alloy at low temperature[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 553 : 176 – 180.

### Specialized SHPB device for cryogenic temperature

WANG Nan<sup>1</sup>, LI Xuhang<sup>1</sup>, PAN Ruochen<sup>1,2</sup>, SONG Guangjun<sup>1</sup>, BIE Bixiong<sup>3</sup>, FAN Duan<sup>1</sup>,  
CAI Yang<sup>1</sup>

(1. The Peace Institute of Multiscale Sciences, Chengdu, 610031, China;

2. Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, and School of Materials Science and Engineering, and Dynamic Materials Data Science Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China;

3. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, CAS, Ningbo, 315201, China)

**Abstract:** To obtain dynamic performance of materials at cryogenic temperature for development of polar science and engineering technology, a low-temperature Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system is developed. Compared to traditional low-temperature SHPB system, this system places pressure bars and samples in the cryogenic environment, effectively mitigating temperature variance in the sample and local temperature gradient changes in the pressure bar due to heat conduction. This design reduces the complexity of data processing. Additionally, the vaporization of liquid nitrogen expels air from the low-temperature chamber, keeping the pressure bars and samples dry and preventing common freezing issues encountered in low-temperature SHPB experiments. As a result, this significantly enhances the accuracy and consistency of the experimental results. Consequently, the accuracy and consistency of experimental results are significantly improved, while the complexity of post-processing is reduced, thereby enhancing experimental accuracy and simplifying post-processing. Moreover, compared to auto-assembling low-temperature SHPB devices, the new system is simpler and more convenient. The relevant parameters of the pressure bar and strain gauge under cryogenic conditions at low temperatures are calibrated. Finite element simulation indicate that the temperature gradient along the bars introduces a measurement deviation of up to 10% in stress in traditional SHPB system; in contrast, the specialized cryogenic SHPB system effectively reduces measurement errors and substantially enhances measurement accuracy. The dynamic performance of 2024Al alloy under cryogenic conditions was tested to validate the operational reliability of the developed SHPB system. Experimental results demonstrate that, compared with traditional SHPB devices, the novel system exhibits significantly higher repeatability and reliability in cryogenic experiments.  
and 2024 aluminum alloy is employed to assess the operational reliability of the device in low-temperature environments. The results indicate that the new system demonstrates significantly higher repeatability and

reliability compared to traditional low-temperature SHPB system.

**Keywords:** cryogenic temperature; SHPB device; experimental techniques; 2024A1

最新录用，非最终出版稿