

引用格式:付帅,牛胜麒,王震亚,等.丁腈橡胶冲击动力学特性的温度敏感性分析[J].材料工程,2026,54(2):302-311.
FU Shuai, NIU Shengqi, WANG Zhenya, et al. Temperature sensitivity analysis of impact dynamic characteristics of nitrile butadiene rubber[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(2): 302-311.

丁腈橡胶冲击动力学特性的温度敏感性分析

付帅^{1*}, 牛胜麒¹, 王震亚², 杨海峰¹, 佘庆民¹, 郭昕曜¹

(1 郑州航空工业管理学院 民航学院, 郑州 450046; 2 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要:为揭示丁腈橡胶(NBR)材料冲击动力学特性的温度敏感性,通过改变加载温度、应变率等参数,设计了不同组合条件下的SHPB冲击测试实验。研究表明:随着温度和应变率的升高,试样受冲击后呈现“圆饼状-圆盘状-圆盘开裂状”的变形特征;温度小于70℃时,不同应变率下试样应力-应变曲线差异较小,温度敏感性较弱,高于70℃时,差异较大,温度敏感性增强;同一应变率下,屈服强度与温度近似呈线性负相关关系,不同应变率下,应变率越大,直线斜率越小即温度对屈服强度影响越显著;温度大于55℃时,动态模量与温度呈负相关关系,表现出较强的温度敏感性,小于55℃时两者关系不显著。研究结果进一步丰富了丁腈橡胶动力学特性的相关研究,对复杂温度环境下丁腈橡胶材料的选用具有一定的指导意义。

关键词:丁腈橡胶;冲击;动力学特性;温度敏感性

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000762 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000762

中图分类号: TQ330.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)02-0302-10

Temperature sensitivity analysis of impact dynamic characteristics of nitrile butadiene rubber

FU Shuai^{1*}, NIU Shengqi¹, WANG Zhenya², YANG Haifeng¹, SHI Qingmin¹, GUO Xinyao¹

(1 School of Civil Aviation, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to reveal the temperature sensitivity of the impact dynamics of nitrile butadiene rubber (NBR) materials, SHPB impact test experiments under different combinations of conditions are designed by changing the loading strain rate, temperature and other parameters. The results show that: with the increase of temperature and strain rate, the specimen shows the deformation characteristics of “round cake-disc-disc crack” after impact; when the temperature is less than 70 °C, the difference between the stress-strain curves of specimens with different strain rates is small, and the temperature sensitivity is weak, and higher than 70 °C, the difference is larger, and the temperature sensitivity is enhanced; under the same strain rate, the yield strength is related to the temperature sensitivity of the specimen. Under the same strain rate, the yield strength is approximately linearly and negatively correlated with temperature, and under different strain rates, the larger the strain rate is, the smaller the slope of the straight line is, *i.e.*, the more significant the effect of temperature on the yield strength is; when the temperature is greater than 55 °C, the dynamic modulus is negatively correlated with the temperature and shows strong temperature sensitivity, and the relationship between the two is insignificant when the temperature is less than 55 °C. The results of the study further enrich the related research on the dynamic properties of NBR, which is of great significance for the selection of NBR materials under the complex temperature environment.

Key words: nitrile butadiene rubber; impact; dynamic characteristics; temperature sensitivity

橡胶作为一种典型的高分子材料,是一个国家重要的工业原料,因其优异的阻尼特性,被广泛应用于

建筑、交通运输、机械设备、医疗、航空航天等各个领域^[1]。因使用环境的复杂多变性,橡胶制品工作时多

伴随有动态冲击载荷的非均匀撞击,其动力学特性经受着考验。前人研究证实,随着环境温度和应变率的变化,橡胶材料可呈现出 3 种不同的力学形态:黏流态、橡胶态和玻璃态,一旦力学状态发生改变,其良好的力学性能将较难体现,工程和经济价值也会大打折扣^[2]。基于此,国内外研究学者对橡胶材料动力学特性的研究在不断加深。

有关橡胶材料动力学特性的研究由来已久,目前国内外在此领域的研究主要集中于橡胶材料的动力学理论模型、动力学性能以及动力学的影响因素等方面。在动力学理论模型研究方面,国内外学者构建了大应变率下弹性体材料如橡胶材料本构模型^[3-5],同时,文献[6-7]在构建理论模型时考虑到外部因素如外形、温度、载荷频率等因素的影响,并将其融入理论模型,进一步完善了橡胶材料动力学理论。在动力学性能研究方面,一些学者通过理论与实验相结合的手段深入探究了特定橡胶材料的动力学性能,分析了不同类型橡胶压缩性能随应变率的变化规律^[8-9]。考虑到橡胶成分对其力学性能的影响,部分学者通过加入不同的填充物或设计不同比例材料混合方式优化其力学性能,以探寻橡胶材料更优越的功能特性^[10-13]。在橡胶动力学影响因素方面,多数学者开展了不同温度条件下橡胶材料的霍普金森压杆(split Hopkinson

pressure bar, SHPB)冲击实验,发现多种橡胶材料动力学特性温度敏感性较强,不同温度下显现出了不同的力学行为^[14-15]。

综上分析,当前国内外已经借助 SHPB 冲击实验等方式深入探讨了多种橡胶的动态力学特性。然而,对于丁腈橡胶(nitrile butadiene rubber, NBR)材料的相关研究仍显不足,尽管 Lee 等^[16]通过 SHPB 实验探究了高应变率下 NBR 材料的动态变形行为,但其没有指出 NBR 动态力学参数随应变率的变化规律,且实验过程中未考虑温度因素的影响。鉴于此,本工作采用 SHPB 实验装置,深入探究 NBR 动力学特性的温度敏感性,研究结果进一步丰富了 NBR 材料力学性能相关研究,对于复杂多变温度环境下 NBR 制品的选用具有一定的指导意义。

1 实验系统及设计

1.1 实验系统

霍普金森压杆^[17]是一种基于霍普金森压杆原理设计的实验装置,常被用来研究材料的动态力学性能。图 1 为本次实验采用的 SHPB 装置,其主要包括发射及控制系统、组合基准主体平台导轨系统、温控系统、应变采集系统以及数据分析系统。

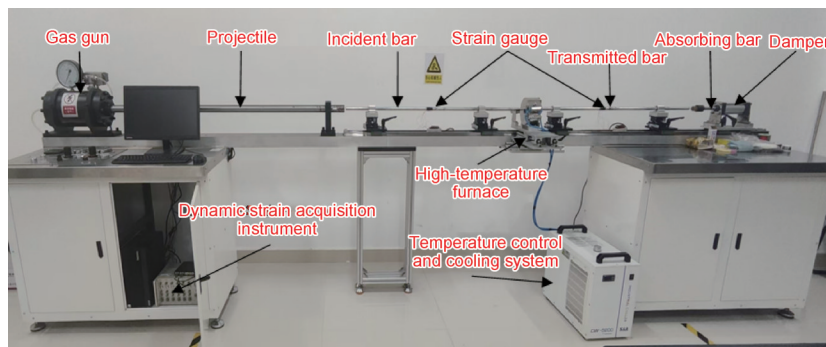


图 1 SHPB 装置

Fig.1 SHPB experimental system

1.2 实验试样

本实验以丁腈橡胶(NBR)为研究对象,NBR 是丙烯腈和丁二烯的无规共聚物,其制作过程主要包括材

料准备、聚合反应、脱气及后处理等环节^[18],本次所选择试样委托上海邦豪橡塑制品有限公司制造生产,主要成分及用量组成见表 1。

表 1 试样主要成分(用量/phr)

Table 1 Main components of sample(dosage/phr)

| NBR | Stearic acid | Antioxidant RD | Antioxidant MB | Plasticizer | Microcrystalline wax | Accelerator DM | Accelerator TMTD |
|-----|--------------|----------------|----------------|-------------|----------------------|----------------|------------------|
| 100 | 5 | 2 | 1 | 20 | 1 | 1.8 | 1.7 |

1.3 试样设计

在 SHPB 实验中进行加载时,冲击波传播到样品

处会在样品中产生应力波。根据一维应力波假设,理想状态下应力波会沿着子弹、杆件、试样一维传播。

然而,在实际情况下,应力波不仅会沿着轴向传播,还会沿着杆件的径向传播,使得应力波发生弥散,不再满足一维弹性应力波假设,此现象被认为是 SHPB 实验中的弥散效应;此外,在 SHPB 实验中,脉冲的宽度远大于试件厚度,应力脉冲在试件里大部分时间会处于均匀状态,但在加载的初始阶段,试件内部的状态却是不均匀的,这将不再满足应力均匀的条件,此现象被认为是 SHPB 实验中的应力不均匀效应。有研究显示合适的试样尺寸可有效削弱弥散效应与应力不均匀效应的影响^[19],经调研国内外研究发现,对于丁腈橡胶尚未有明确规定 SHPB 实验试样尺寸,为使得实验结果更加可靠,可通过实验确定试样尺寸。

实验试样设计为圆柱形,所采用的冲击杆直径为 19 mm,冲击压强为 0.14、0.16 MPa。初步设计长径比

为 0.6,直径为杆直径的 50%、65%、80%,即试样直径分别为 10、13、16 mm,厚度依次为 3、8、10 mm。具体实验设计及条件参数如表 2 所示,每种试样实验重复 3 次,并将同种条件下所得实验数据进行平均化处理,整理所得应力-应变曲线如图 2 所示。

表 2 实验设计及条件参数

Table 2 Experimental design and condition parameters

| Code | Diameter/mm | Length/mm | Impact gas pressure/MPa |
|----------|-------------|-----------|-------------------------|
| D10L6-1 | 10 | 6 | 0.14 |
| D10L6-2 | 10 | 6 | 0.16 |
| D13L8-1 | 13 | 8 | 0.14 |
| D13L8-2 | 13 | 8 | 0.16 |
| D16L10-1 | 16 | 10 | 0.14 |
| D16L10-2 | 16 | 10 | 0.16 |

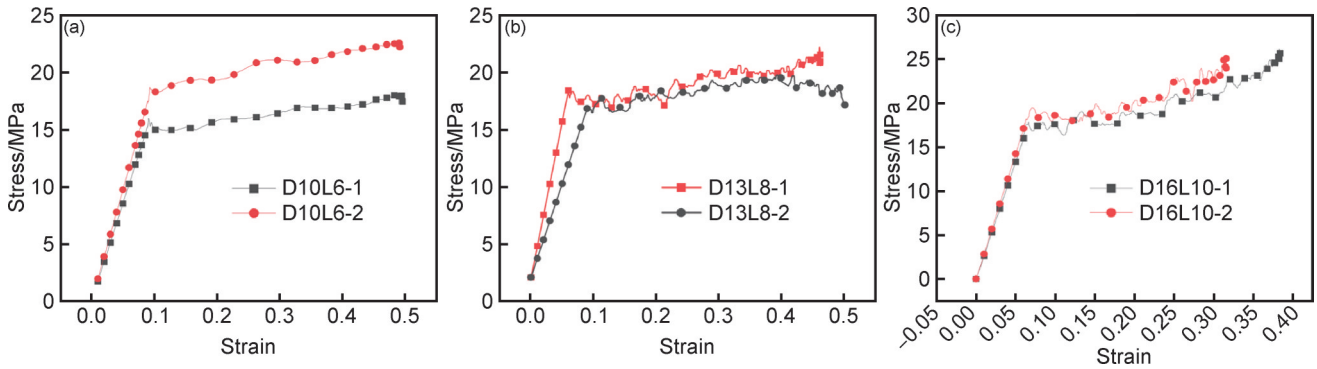


图 2 不同试样的预实验应力-应变曲线 (a)D10L6;(b)D13L8;(c)D16L10

Fig.2 Pre-experimental stress-strain curves of different samples (a)D10L6;(b)D13L8;(c)D16L10

对比分析所得应力-应变曲线,发现 13 mm×8 mm 与 16 mm×10 mm 两种尺寸试样实验所得的应力-应变曲线变化规律一致,均有较强的波动性(图 2(b),(c));而 10 mm×6 mm(图 2(a))尺寸试样的应力-应变曲线更加直观,且波形较为稳定。

为降低纵向和横向惯性引起的误差对实验结果的影响,将 3 种试样尺寸代入应力修正公式(1)进行检验,控制的 $\left| \frac{1}{8} \mu^2 D^2 - \frac{1}{6} l^2 \right|$ 数值越小则认为误差越小^[20]。检验结果如表 3 所示。

$$\sigma = \sigma_0 - \rho \left(\frac{1}{8} \mu^2 D^2 - \frac{1}{6} l^2 \right) \ddot{\epsilon} \quad (1)$$

式中: σ_0 为测量所得应力; ρ 为试样密度; μ 为试样泊松比; D 为试样直径; l 为试样长度; $\ddot{\epsilon}$ 为应变的二次导数。

检验结果说明直径为 10 mm、长度为 6 mm 的试样引起误差最小,符合实验标准,故本次试样尺寸选择 10 mm×6 mm。部分试样如图 3 所示。

表 3 不同试样的检验结果

Table 3 Inspection results of different samples

| Code | Diameter/mm | Length/mm | $\left \frac{1}{8} \mu^2 D^2 - \frac{1}{6} l^2 \right $ |
|---------|-------------|-----------|--|
| D10 L6 | 10 | 6 | 2.887 |
| D13 L8 | 13 | 8 | 5.407 |
| D16 L10 | 16 | 10 | 8.699 |



图 3 丁腈橡胶试样

Fig.3 NBR samples

1.4 预实验设计

1.4.1 整形片的设计

为保证实验结果准确性,实验开始前在室温 25 °C、冲击压强 0.14 MPa 实验条件下开展丁腈橡胶 SHPB 冲击测试预实验。结果如图 4(a)所示,可见入射波形上

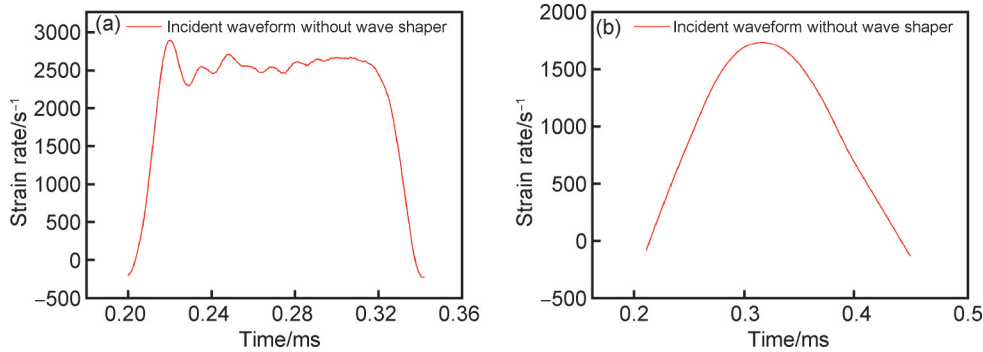


图 4 试样整形效果 (a)无整形;(b)有整形

Fig.4 Shaping effect of samples (a)unshaped;(b)shaped

预实验初步设计 10 种不同尺寸的整形片,开展冲击实验,实验参数如表 4 所示。经对比分析发现采用尺寸为 10 mm×3 mm 的整形片时所得结果更为理想,其表面光滑,上升、下降幅度较缓,波形基本无振荡(图 4(b)),同时借助实验验证了该尺寸可实现常应变率加载,符合 SHPB 实验要求。

表 4 整形片实验参数

Table 4 Experimental parameters of plastic slices

| Code | Diameter/mm | Length/mm | Impact gas pressure/MPa |
|-------|-------------|-----------|-------------------------|
| D6L1 | 6 | 1 | 0.14 |
| D6L2 | 6 | 2 | 0.14 |
| D8L2 | 8 | 2 | 0.14 |
| D8L3 | 8 | 3 | 0.14 |
| D10L3 | 10 | 3 | 0.14 |
| D10L4 | 10 | 4 | 0.14 |
| D12L3 | 12 | 3 | 0.14 |
| D12L4 | 12 | 4 | 0.14 |
| D14L4 | 14 | 4 | 0.14 |
| D14L5 | 14 | 5 | 0.14 |

1.4.2 温度设计

丁腈橡胶作为热塑性软材料,随着温度升高,其力学形态会从玻璃态向高弹态再向黏流态转变,变形程度明显增大^[22]。在高温条件下试样变形程度可能会过大甚至出现碎裂情况,使实验不满足应力均匀假设,进而影响实验结果准确性。因此,需通过实验确定温度阈值,该阈值下试样不会发生明显破裂,以确

保实验测量结果更具实际意义。升下降趋势较为陡峭且中间部分存在剧烈振荡,由此推断出测试结果产生了明显弥散效应与应力不均匀效应,不满足 SHPB 实验要求。Lee 等^[21]的相关研究表明,整形片对于弥散效应与应力不均匀效应具有明显抑制作用。鉴于此,本实验预加入整形片以提高实验准确性。

保实验测量结果更具实际意义。

本实验温控系统包括加热与恒温装置,其示意图如图 5 所示。加热系统采用双层不锈钢焊接,中空处使用铁铬铝炉丝加热,最高可达 800 °C。恒温系统包括恒温冷水装置与隔热炉,冷水装置最高控温 40 °C,通过水循环在双层不锈钢间流通保持外表面恒温,微调炉温。隔热炉使用多晶莫来石陶瓷纤维,隔热效果较好。相关研究表明^[23],丁腈橡胶导热性能较差,故实验前应使试样在对应温度至少保温 60 min。

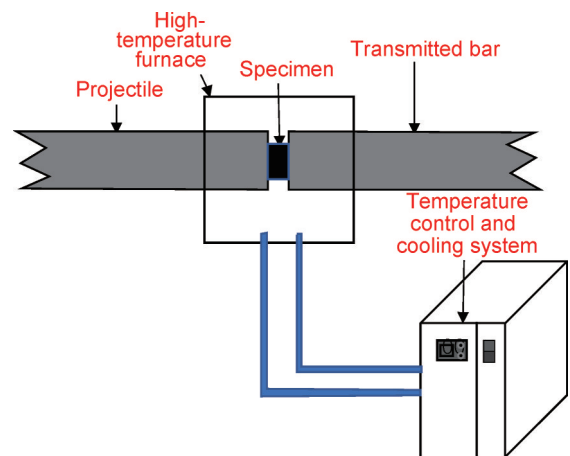


图 5 温控系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of temperature control system

丁腈橡胶适用温度环境在 -40~120 °C 范围之内^[24],本实验选取 100 °C 和 120 °C 两种高温阈值。此外,基于整形片设计实验的成功,以 0.02 MPa 为梯度,将冲击气压设为 0.12、0.14、0.16 MPa,试样直径

为 10 mm、长度为 6 mm 进行实验, 每组实验重复 3 次。

试样变形情况如图 6, 7 所示, 结果表明: 100 °C 时, 3 种冲击气压加载下的试样均发生变形, 但未出现明显破裂。120 °C 时, 0.12、0.14 MPa 两种压强下试样变形与 100 °C 时保持一致, 但在 0.16 MPa 的冲击加载

下, 试样发生明显破损(图 6(c), 7(c)), 说明此情况下试件内部的应力波可能没有反复 2~3 个来回, 试件便已经发生破坏, 实验结果将有可能不符合应力均匀性假设, 故本实验将保留 100 °C 温度阈值设计, 舍弃 120 °C 温度设计。实验设计温度为 25、40、55、70、85、100 °C。

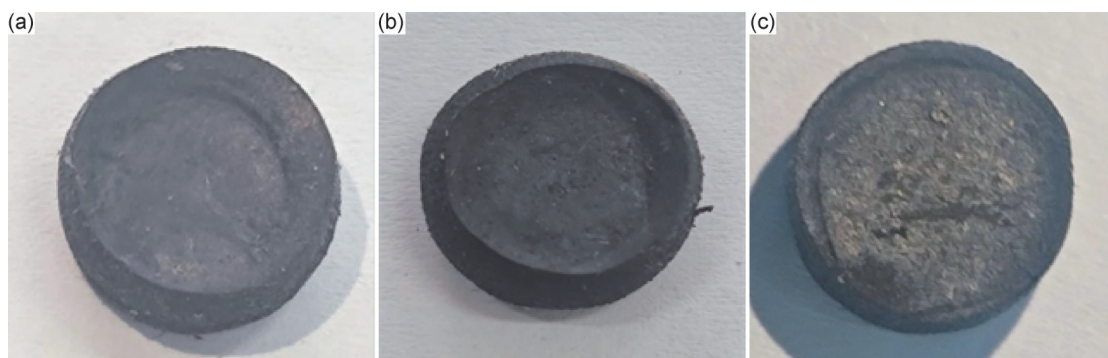


图6 温度为 100 °C 三种不同冲击压强下实验后的试件变形情况

(a)0.12 MPa; (b)0.14 MPa; (c)0.16 MPa

Fig.6 Deformation of specimens under three different impact pressures at a temperature of 100 °C

(a)0.12 MPa; (b)0.14 MPa; (c)0.16 MPa

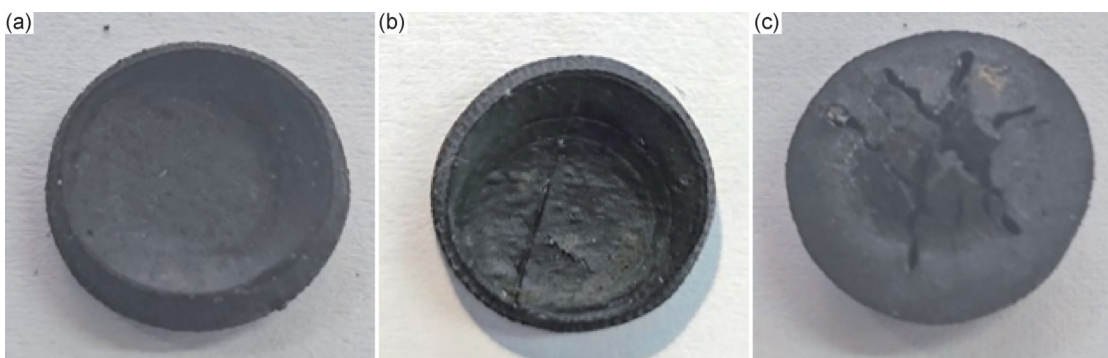


图7 温度为 120 °C 三种不同冲击压强下实验后的试件变形情况

(a)0.12 MPa; (b)0.14 MPa; (c)0.16 MPa

Fig.7 Deformation of specimens under three different impact pressures at a temperature of 120 °C

(a)0.12 MPa; (b)0.14 MPa; (c)0.16 MPa

1.4.3 应变率设计

为研究丁腈橡胶多种应变条件下力学性能的变化情况, 本实验以 0.02 MPa 为梯度, 采用直径 10 mm、长度 6 mm 的试样, 控制室温 25 °C, 设计 0.10、0.12、0.14、0.16、0.18、0.20 MPa 6 组冲击压强进行应变率预实验, 并根据试样压缩变形及破损情况, 判断其是否满足应力均匀性假设以及入射波形是否满足避免弥散效应和应力不均匀效应要求, 进而确定适用的实验应变率。

实验结果显示, 冲击压力 0.10 MPa 下试样表面几乎无变化; 0.20 MPa 冲击压强下的试样发生了明显破

损, 变形过大。这两种情况无法确定在冲击过程中, 应力波是否在试样中来回 2~3 次后才发生破坏, 无法确定是否满足应力均匀假设, 故舍去。而在 0.12、0.14、0.16、0.18 MPa 冲击压强下的试样均发生了变形, 表面有着不同程度的损坏, 且入射波形基本满足避免弥散效应和应力不均匀效应的要求, 符合 SHPB 实验要求。故实验设计应变率为 2330.3、2800.4、3410.8、3800.6 s^{-1} 。

1.5 SHPB 实验设计

根据上述预实验结果, 实验设置 4 种应变率和 6 种温度梯度进行组合实验, 实验共计 24 组, 每组 3 次。

2 实验结果

2.1 试样变形情况

对试样破坏形态统计分析可知,其具有一定相似性,均未出现宏观可见的断裂破坏痕迹,仅为形态变形,大致变形趋势体现为截面变宽、长度缩短。此外,对比分析不同条件下试样破坏形态特征,发现随着温度与应变率的增加,试样形态变化趋势近似一致,呈“圆饼状-圆盘状-圆盘开裂状”。图 8 为实验所得到的 3 种典型试样变形形态。

图 8(a)为温度 25 °C、应变率 2330.1 s⁻¹下试样变形情况,呈“圆饼状”,截面与长度变化并不明显。此时温度相对较低,试样处于高弹态,抵抗变形的能力较强,且加载应变率较低,故其纵横向变形较小。同时,实验也是在低应变率下进行加载,试样受到应力卸载阶段的摩擦力影响较小,故其横向变形也不明显。图 8(b)为温度 70 °C、应变率 3410 s⁻¹下试样变形

情况,呈“圆盘状”,截面变化与长度变化较为明显。随着温度升高,试样内部分子间作用逐渐变弱,分子活动性增强,结构刚度下降,其抵抗变形的能力有所减弱,发生纵向变形。同时由于实验在中等强度的应变率下加载,随应变率的提高其应力卸载阶段的摩擦力对试样横向变形的影响也逐渐显现,一定程度上限制试样横向变形,最终使试样呈现“圆盘状”。图 8(c)为温度 100 °C、应变率 3800.6 s⁻¹下试样变形情况,呈“圆盘开裂状”,截面变化与长度变化十分明显,但未发生明显碎裂。表明相比环境温度 25、70 °C 条件下,环境温度升高至 100 °C 时,试样分子间作用变得更弱,分子活动性明显增强,结构刚度明显下降,其抵抗变形的能力明显减弱,且实验所加载的应变率较大,故使得试样发生明显的纵向变形。同时由于应变率较大,其应力卸载阶段的摩擦力对试样横向变形的阻碍作用增强,导致试样出现纵向拉伸破坏,最终使试样呈现出“圆盘开裂状”。

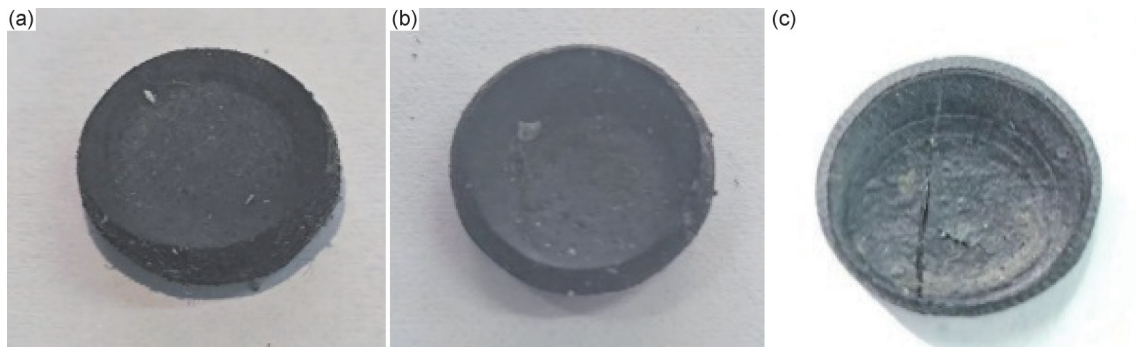


图 8 典型试样变形形态

(a)圆饼状;(b)圆盘状;(c)圆盘开裂状

Fig.8 Deformation morphology of typical samples

(a)cake-like shape;(b)disk-shaped;(c)disk-shaped with cracks

2.2 应力、应变曲线

对试样应力-应变曲线进行分析,发现曲线形态基本保持一致,大致分为线性形变、屈服、应力卸载 3 个阶段,如图 9 所示,与前人对于橡胶材料的研究结果一致^[25],证实了实验结果的可靠性。

线性形变阶段中,随着应变的增加,丁腈橡胶的应力大体上呈现出线性趋势快速增加,在此阶段中丁腈橡胶试样的刚度受温度影响较小,材料的刚性强度变化不显著,试样满足胡克定律,整体呈现为弹性形变。

屈服变形阶段中,随着应变的继续增加,丁腈橡胶的应力却不再增加,仅有微小的波动,失去了抵抗变形的能力,截面开始逐渐变宽、长度缩短,从而产生显著的塑性变形现象。

应力卸载阶段中,应力开始卸载,试样两端的横

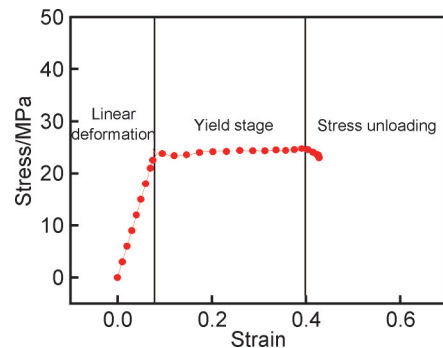


图 9 25 °C、2330.3 s⁻¹条件下试样的应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curve of the specimen under conditions of 25 °C and 2330.3 s⁻¹

向变形受到阻碍,对应的应变在小范围内发生变化。试样经过此阶段时,中心继续压缩,周围向外伸长,截

面变宽,长度缩短,最后试样显现为“圆盘状”。

3 温度敏感性分析

3.1 试样变形温度敏感性

选用截面伸展率 ψ 作为试样横向变形的数量指标,其值为冲击后试件横截面积的增加面积与原横截面积的百分比,如式(2)~(4)所示。

$$A_0 = \frac{1}{4} \pi D_0^2 \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{1}{4} \pi D_1^2 \quad (3)$$

$$\psi = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: D_0 表示试件冲击前的直径; D_1 表示试样冲击后的直径; A_0 表示试样冲击前的横截面积; A_1 表示试样冲击后的横截面积。

选用长度收缩率 δ 作为试样纵向变形的数量指

标,其值为试样冲击后试件长度所缩短的长度与原试件长度的比值,如式(5)所示。

$$\delta = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: l_0 表示试样冲击前的长度; l_1 表示试样冲击后的长度。

采用游标卡尺对实验前后试样的长度、截面直径等外形参数进行测量,并计算试样截面伸展率 ψ 与长度收缩率 δ ,整理绘制其随温度的变化趋势如图10所示。结果表明:随着温度的不断增加,试样的长度收缩率 δ 以及截面伸展率 ψ 均有明显增加,即弹性减缩塑性变强,呈现出较强的温度敏感性。此外,从图6仍可得,橡胶变形在不同温度区间内的差异性显著。25~70℃的范围内,4种应变率下试样的收缩率 δ 、伸展率 ψ 增量较平缓;而在70~100℃范围内,两参数增量明显提升。由此可见,高温条件下,试样变形温度敏感性更强。

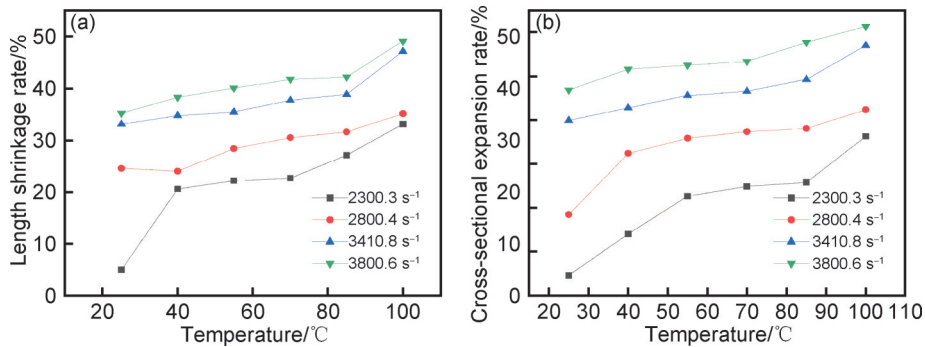


图10 试样变形情况 (a)长度收缩率;(b)截面伸展率

Fig.10 Deformation of samples (a)length shrinkage;(b)cross-sectional elongation

3.2 应力-应变曲线温度敏感性

对同种加载情况下的应力-应变曲线进行平均化,得到了各加载环境下的应力-应变曲线,如图11所示。

由图11可知,所有应力-应变曲线变化趋势大致相同。均出现“线性变形-屈服-应力卸载”三阶段特征。同一应变率下,不同温度对应的应力-应变曲线差异性越大则温度敏感性越强,鉴于此,本工作引入曲线差异值这一概念,其计算过程如下。

同一应变率下,以25℃下的应力-应变曲线为参考,计算其余温度与25℃应力-应变曲线的差异值 G ,计算公式如下:

$$G_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{mi} - \sigma_{0i})^2}{n}} \quad (6)$$

式中, G_m 表示 m ℃对应的应力-应变曲线与25℃所对

应的应力-应变曲线(对照组)的差异值; σ_{mi} 表示 m ℃对应应力-应变曲线中第 i 个点所对应的应力值; σ_{0i} 则表示对照组应力-应变曲线中第 i 个点所对应的应力值。经计算,各应变率下应力-应变曲线差异值结果如图12所示。

由图12可得,随着温度的升高,不同应变率下应力应变曲线差异值的变化规律近乎一致,呈逐渐增加趋势,且当温度小于70℃时,差异值随温度变化的幅度较小,温度敏感性相对较弱;大于70℃时,随温度变化的幅度较大,温度敏感性较强。

3.3 屈服强度温度敏感性

图13为4种应变率下屈服强度随温度变化情况。由图可得,在相同应变率下,屈服强度值随温度的升高而减小,表明丁腈橡胶材料的屈服强度具有较强的温度敏感性。该现象是因为环境温度升高导致分子链整体及局部的运动加剧,分子间作用变弱,引起交

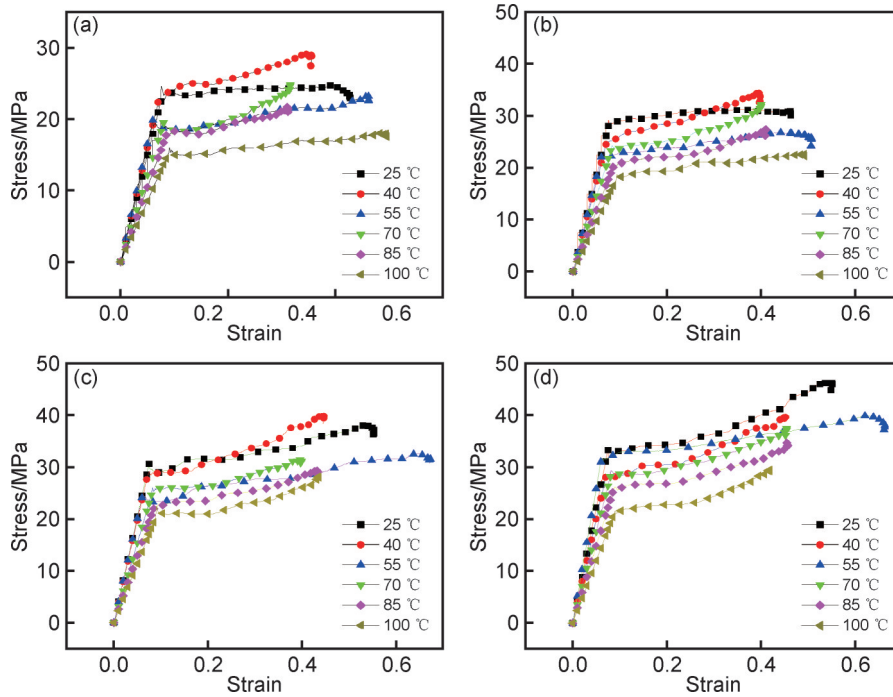


图 11 不同温度下丁腈橡胶的应力-应变曲线

(a)应变率为 2330.3 s⁻¹; (b)应变率为 2800.4 s⁻¹; (c)应变率为 3410.8 s⁻¹; (d)应变率为 3800.6 s⁻¹

Fig.11 Stress-strain curves of NBR at different temperatures

(a)strain rate of 2330.3 s⁻¹; (b)strain rate of 2800.4 s⁻¹; (c)strain rate of 3410.8 s⁻¹; (d)strain rate of 3800.6 s⁻¹

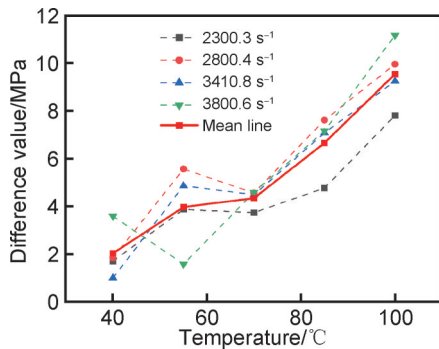


图 12 各组应力应变曲线与对照组差异值汇总

Fig.12 Summary of differences between stress-strain curves of each group and the control group

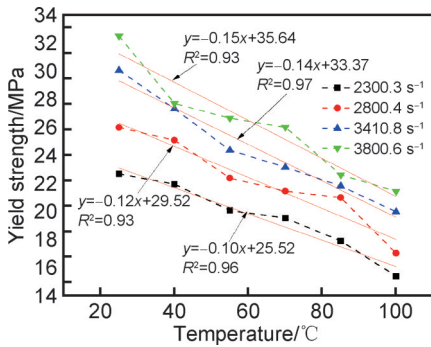


图 13 屈服强度变化情况

Fig.13 Changes in yield strength

胶至相同形态所需的力减小,最终导致屈服强度随温度升高而呈现下降趋势。

为便于详细分析,对 4 种应变率下屈服强度随温度变化趋势图进行回归分析,结果显示温度与屈服强度呈现出较好的线性负相关关系,即随着温度升高屈服强度线性减小。此外,在不同的应变率下试样的屈服强度的温度敏感性不尽相同,具体体现为:随着加载应变率的提高,试样的屈服强度随着温度升高而下降的趋势逐渐增加。由此推断随着应变率的不断提高,屈服强度的温度敏感性也在不断增强。经上述分析可知,在橡胶材料实际加工时,可选择在较高温度下进行,此时其抵抗外力的能力差,易发生塑性变形;但作为减振、密封等制品时,温度过高容易使其变形,会对安全性与使用寿命产生不利影响,因此,应通过实际使用情况来合理调节温度,以保证材料温度在合理范围内。

3.4 动态模量温度敏感性

依据实验所得应力-应变曲线,选取线性形变阶段应力-应变数据,通过线性回归方程分别计算 4 种应变率下橡胶试样的动态模量。

以应变率 2330.3 s⁻¹、温度 25 °C 下试样的应力-应变数据为例,设线性回归方程为

$$y = bx + a \quad (7)$$

其中 b 即为求得的动态模量 E 的值。

联密度降低,进而使得结构刚度下降。因此,在外力作用下,材料更易发生变形,相较于室温状态,压缩橡

通过最小二乘法求得 b 的计算公式为

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (8)$$

代入该条件下试样线性变形阶段应力-应变数据求得该条件下动态模量 E 的值为 2.8897×10^2 MPa,同理可求得其余条件下的动态模量 E ,以温度为横轴,动态模量为纵轴,绘制4种应变率下的动态模量变化图,如图14所示。

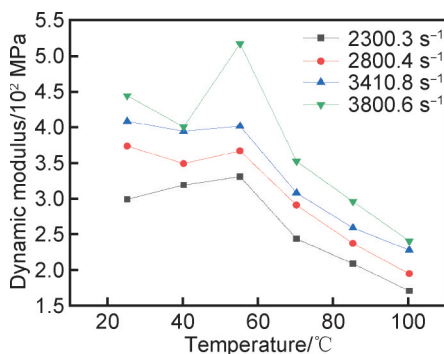


图14 动态模量变化

Fig.14 Changes in elastic modulus

由图14可知,不同应变率下试样的动态模量差异显著,具体表现为:随着应变率的提高,试样的动态模量也在不断升高。此外,当温度为25~55℃时,随着温度的升高,动态模量随温度变化情况不明显,而温度为55~100℃时,试样的动态模量随着温度升高整体呈现线性下降趋势。由此推断,当温度小于55℃时,温度变化对丁腈橡胶材料动态模量影响较小,即动态模量对温度不敏感,而当温度高于55℃时,温度对材料的动态模量影响较大,即动态模量对温度较为敏感。

4 结论

(1)丁腈橡胶材料的变形特征随温度和应变率提高而显著变化,体现了其温度敏感性。在不同条件下,丁腈橡胶试样的冲击变形特征呈现出明显的变化,具体表现为随着温度和应变率的提升,试样变形从“圆饼状”逐渐转变为“圆盘状”,并最终呈现为“圆盘开裂状”。

(2)丁腈橡胶的冲击应力-应变曲线在不同温度阶段表现出不同的温度敏感性。丁腈橡胶的冲击应力-应变曲线大致可划分为3个阶段:线性形变阶段、屈服阶段和应力卸载阶段。当温度低于70℃时,应力-应变曲线的差异值随温度升高而变化的幅度较小,表明其

温度敏感性相对较弱;当温度高于70℃时,差异值随温度升高的变化幅度显著增大,表现出较强的温度敏感性。

(3)丁腈橡胶试样的屈服强度具有较强的温度敏感性,且温度与屈服强度之间呈负线性相关关系。此外,随着加载应变率的提高,屈服强度随着温度升高而减小的幅度不断增大,即应变率越高,屈服强度的温度敏感性越强。

(4)丁腈橡胶的动态模量随应变率提高而上升,且在高温环境下具有较强的温度敏感性。随着加载应变率的提高,丁腈橡胶试样的动态模量不断上升。在温度低于55℃时,温度变化对动态模量的影响较小,表明动态模量在此温度范围内对温度不敏感;当温度高于55℃时,温度变化对丁腈橡胶材料的动态模量产生显著影响,显示出较强的温度敏感性。

参考文献

- [1] 张浩, 胡道庆, 程峥明, 等. 钢渣基盾粉/橡胶复合材料的性能及机理[J]. 材料工程, 2024, 52(5): 188-194.
ZHANG H, HU D Q, CHENG Z M, et al. Properties and mechanism of steel slag based shield powder/rubber composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(5): 188-194.
- [2] 李刚卿, 沈鹤飞, 韩晓辉, 等. 热空气老化对橡胶地板焊接接头性能的影响[J]. 橡胶工业, 2022, 69(11): 856-861.
LI G Q, SHEN H F, HAN X H, et al. Effects of hot air aging on properties of welded joint of rubber floor covering[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(11): 856-861.
- [3] 陈凯杰, 邱中辉, 陈蔚芳, 等. 丁腈橡胶大应变率范围本构模型建立[J]. 热能动力工程, 2024, 39(8): 183-192.
CHEN K J, QIU Z H, CHEN W F, et al. Establishment of constitutive model of nitrile butadiene rubber over a wide strain rate range[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8): 183-192.
- [4] 王逸凡, 徐豫新, 张浩宇, 等. 硅橡胶压缩力学性能及率相关本构模型[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(3): 231-238.
WANG Y F, XU Y X, ZHANG H Y, et al. Compressive mechanical properties and constitutive model of rubber material[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(3): 231-238.
- [5] WISMANS M, VAN DOMMELEN J A W, ENGELS T A P, et al. A macroscopic viscoelastic viscoplastic constitutive model for porous polymers under multiaxial loading conditions[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2024, 183: 105499.
- [6] 李锋, 彭天波. 包含Mullins效应的HDR热-超-黏弹性本构模型[J]. 力学学报, 2024, 56(12): 3498-3506.
LI F, PENG T B. An HDR thermal-hyper-viscoelastic constitutive model with mullins effect[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(12): 3498-3506.
- [7] 段成红, 王福军, 罗翔鹏, 等. 基于温度和频率的橡胶本构模型及减振器振动性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(16): 256-262.

- DUAN C H, WANG F J, LUO X P, et al. A study on a temperature and frequency dependent rubber constitutive model and vibration performance of a shock absorber[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(16): 256-262.
- [8] 李昕龙, 原霞, 王玉帅, 等. 高速冲击下金属橡胶动态力学特性研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(3): 265-273.
- LI X L, YUAN X, WANG Y S, et al. Research on dynamic mechanical properties of metal rubber under high-speed impact[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(3): 265-273.
- [9] 赵习金, 卢芳云, 林玉亮. 硅橡胶的动态压缩实验和力学性能研究[J]. *高压物理学报*, 2004, 18(4): 328-332.
- ZHAO X J, LU F Y, LIN Y L. Research on dynamic compressive testing and mechanical properties of silicon rubber[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004, 18(4): 328-332.
- [10] 刘旺冠, 蒋兴华, 郭建华. 氮化铝/氮化硼/碳纳米管/硅橡胶复合材料的力致填料取向对导热性能的影响[J]. *材料工程*, 2022, 50(2): 127-134.
- LIU W G, JIANG X H, GUO J H. Effect of filler orientation induced by force on thermal conductivity of AlN/BN/CNTs/SR composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(2): 127-134.
- [11] 牟晓娟, 高聿, 范广坤, 等. 氯化丁基橡胶/溴化丁基橡胶共混胶的硫化特性及动态力学性能[J]. *弹性体*, 2023, 33(1): 45-49.
- MOU X J, GAO S, FAN G K, et al. Vulcanization characteristics and dynamic mechanical properties of CIIR/BIIR blends[J]. *China Elastomerics*, 2023, 33(1): 45-49.
- [12] 董慧民, 牟维琦, 史海燕, 等. 石墨烯填充丁腈橡胶纳米复合材料研究进展[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(5): 36-46.
- DONG H M, MU W Q, SHI H Y, et al. Research progress of acrylonitrile-butadiene rubber nanocomposites filled with graphene[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(5): 36-46.
- [13] 何凡, 季欣, 袁天元, 等. 液体天然橡胶对湿法混炼制备天然橡胶/白炭黑复合材料性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(5): 55-62.
- HE F, JI X, YUAN T Y, et al. Effect of liquid natural rubber on properties of natural rubber/silica composite prepared by wet compounding[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(5): 55-62.
- [14] 石伟, 张凯林, 谭智学, 等. 变温环境对橡胶力学性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(11): 110-116, 124.
- SHI W, ZHANG K L, TAN Z X, et al. Influence of variable temperature environment on mechanical properties of rubber[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(11): 110-116, 124.
- [15] LEE O S, HAN Y H, KIM D H. Influence of temperature and heat-aged condition on the deformation behavior of rubber material using SHPB technique with a pulse shaper[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 353/358: 619-626.
- [16] LEE O S, LEE J W, KIM S H. Dynamic deformation behavior of rubber (NR/NBR) under high strain rate compressive loading[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 297/300: 172-177.
- [17] 王文斌, 吕平, 鞠家辉, 等. 喷涂聚脲弹性体及复合结构抗爆抗冲击性能研究进展[J]. *涂料工业*, 2024, 54(1): 81-88.
- WANG W B, LÜ P, JU J H, et al. Research progress in the blast resistance and impact resistance of sprayed polyurea elastomers and composite structures[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2024, 54(1): 81-88.
- [18] 董玉芳. 合成橡胶行业三废特点及环保措施可行性分析[J]. *山东化工*, 2022, 51(17): 226-227.
- DONG Y F. Characteristics of contamination and feasibility analysis of environmental protection measures in synthetic rubber industry[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(17): 226-227.
- [19] 李艳萍, 郭辉, 张阳, 等. 基于 SHPB 技术测试典型金属动态压缩性能的尺寸效应分析[J]. *中国测试*, 2024, 50(10): 142-149.
- LI Y P, GUO H, ZHANG Y, et al. Study on size effect analysis of dynamic compression properties of typical metals based on SHPB technique[J]. *China Measurement & Test*, 2024, 50(10): 142-149.
- [20] DAVIES E D H, HUNTER S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11(3): 155-179.
- [21] LEE O S, KIM S H, LEE J W. Thickness effect of pulse shaper on dynamic stress equilibrium in the NBR rubber specimen[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 306/308: 1007-1012.
- [22] 苏明龙. 氯化丁腈橡胶结构和性能分子动力学模拟研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- SU M L. Molecular dynamics simulation of structure and properties of hydrogenated nitrile butadiene rubber[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2023.
- [23] ZHU X, ZHANG X, YAO W, et al. Split-Hopkinson pressure bar test of silicone rubber: considering effects of strain rate and temperature[J]. *Polymers*, 2022, 14(18): 3892.
- [24] 曹元礼. 温度对丁腈橡胶压缩永久变形性能的影响[C]//2008 橡胶(密封)新技术交流暨信息发布会论文集. 咸阳: 特种橡胶制品编辑部, 2008: 242-243.
- CAO Y L. Effect of temperature on compression permanent deformation properties of nitrile rubber[C]// Proceedings of the 2008 Rubber (Seal) New Technology Exchange and Information Conference. Xianyang: Journal of Special Purpose Rubber Products 2008: 242-243.
- [25] 李宏达. 基于分离式霍普金森压杆的硅橡胶率相关力学性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- LI H D. Research on rate-dependent mechanical properties of silicone rubber through split Hopkinson pressure bar[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2024.

基金项目:国家自然科学基金(72304253);河南省高等学校重点科研项目(24A620005);河南省科技攻关计划(232102240016);河南省自然科学基金(232300420331)

收稿日期:2024-11-12; **录用日期:**2025-02-09

通讯作者:付帅(1988—),男,副教授,博士,研究方向为安全检测与监控、风险评估、安全评价及应急管理,联系地址:河南郑州郑东新区文苑西路15号郑州航空工业管理学院民航学院(450046),E-mail:fs1988@zua.edu.cn

(本文责编:解宏)