

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.01.005

# 被动围压下浇注 PBX 炸药的动态力学性能研究\*

胡雪焱 沈飞 肖玮 屈可朋  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

**[摘要]** 为获取一种浇注 PBX 炸药在被动围压加载下的动态力学性能,采用基于分离式霍普金森杆系统的被动围压试验装置开展了不同应变率(200、600 s<sup>-1</sup>)下该浇注 PBX 炸药的力学性能测试,并通过改变围压管壁厚(4、10 mm)分析了围压应力对试样轴向应力的影响。结果表明:随着应变率和围压管壁厚的增加,被动围压下浇注 PBX 炸药的轴向应力(给定轴向应变)和围压应力(给定轴向应力)均呈增大趋势;且轴向应力随围压应力的增加呈指数增加。拟合得到被动围压下屈服点轴向应力与约束比之间的函数关系,与试验结果吻合良好。

**[关键词]** 浇注 PBX 炸药;被动围压;应变率;围压应力

**[分类号]** TQ564

## Dynamic Mechanical Properties of a Cast PBX Explosive under Passive Confinement

HU Xueyao, SHEN Fei, XIAO Wei, QU Kepeng  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

**[ABSTRACT]** To obtain the dynamic mechanical properties of a cast PBX explosive under passive confinement, mechanical property tests at different strain rates (200, 600 s<sup>-1</sup>) were conducted by using passive confining device based on split Hopkinson pressure bar system. The influence of confining stress on the axial stress of specimen was analyzed by changing the wall thickness (4, 10 mm) of confining tube. Results show that the axial stress (at given axial strain) and confining stress (at given axial stress) of the cast PBX explosive increase with the increasing strain rate and wall thickness of confining tube. The axial stress increases exponentially with the increase of confining stress. The functional relationship between axial yield stress and confinement ratio under passive confinement can be obtained by fitting, which is in good agreement with the experimental results.

**[KEYWORDS]** cast PBX explosive; passive confinement; strain rate; confining stress

## 引言

PBX 炸药 (polymer bonded explosive) 通常是由主体炸药和黏结剂组成的高能低感炸药。浇注 PBX 炸药因安全性高、抗过载能力强以及便于加工等优点被广泛应用<sup>[1]</sup>。在使用过程中, PBX 炸药常装填于金属弹体内,当弹体承受力、热等外界载荷作用时,炸药常处于被动围压状态,在发射、侵彻过程中还需承受瞬时强冲击作用,该状态下炸药的动态力学响应特性将直接影响其使用安全性<sup>[2]</sup>。而准确获取炸药材料的动态力学性能,是研究瞬时强冲击作用下 PBX 炸药动态响应的基础。

材料在被动围压加载下的力学行为与损伤演化会更加复杂。Xiao 等<sup>[3]</sup>研究了低速冲击载荷下 PBX 炸药的损伤机理和断裂模式,发现:围压冲击作用下,试样的主要破坏模式为脱黏和解理;而非围压冲击载荷下,主要破坏模式为穿晶断裂。Dong 等<sup>[4]</sup>建立了围压条件下混凝土材料的横向应变预测模型,发现横向应变主要取决于轴向应变、围压应力以及混凝土强度,而与围压应力的加载历程无关。根据围压加载装置的不同,一般可分为主动围压测试和被动围压测试。通常情况下,主动围压压力低且恒定,适用于材料的装配、热膨胀等条件;而被动围压压力高且不恒定,与实际发射、侵彻过载等加载条件更为接近。Wiegand 等<sup>[2]</sup>研究了 0.1~138.0 MPa

\* 收稿日期:2021-05-24

第一作者:胡雪焱(1989-),女,博士,助理研究员,主要从事弹药动态力学响应及安全性研究。E-mail:595002695@qq.com

通信作者:屈可朋(1983-),男,硕士,研究员,主要从事弹药动态力学响应及安全性研究。E-mail:155301498@qq.com

主动围压条件下一种 PBX 炸药的准静态力学性能,发现:在低围压应力下,裂纹的慢速扩展起主导作用;而在高围压条件下,塑性流动起主导作用。Bailly 等<sup>[5]</sup>设计了一种基于分离式霍普金森杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)系统的被动围压试验方法,分析了压力和应变率对材料变形与损伤特性的影响,发现动态围压条件下剪切应力明显增大。

本文中,针对一种浇注 PBX 炸药,采用 SHPB 加载系统开展不同应变率下的被动围压加载试验,通过设计不同壁厚的围压装置来改变围压应力的大小,获取应变率和围压应力对浇注 PBX 炸药动态力学性能的影响规律,并进一步揭示围压应力与轴向应力之间的关系。

## 1 材料及试验

### 1.1 试样设计

选用一种 HMX 基浇注 PBX 炸药作为研究对象,其主要组成(质量分数)为:55% HMX、35% 铝粉和 10% 黏结钝感剂,平均密度约为 1.80 g/cm<sup>3</sup>,所有样品均由西安近代化学研究所提供。分析被动围压加载下围压应力对浇注 PBX 炸药轴向力学响应的影响,同时开展非围压试验进行对比,用于非围压和被动围压试验的试样尺寸分别为∅10 mm × 6 mm 和∅16 mm × 10 mm。

### 1.2 试验原理

非围压和被动围压试验均采用 SHPB 系统进行。其中,被动围压试验通过金属围压管实现。被动围压试验的原理是在试样外表面增加一个内径与试样外径接近的金属套管,实现对试样的横向加载。采用施绍裘等<sup>[6]</sup>提出的一种改进的 SHPB 被动围压试验方法,用油膜作为传递压力的介质。

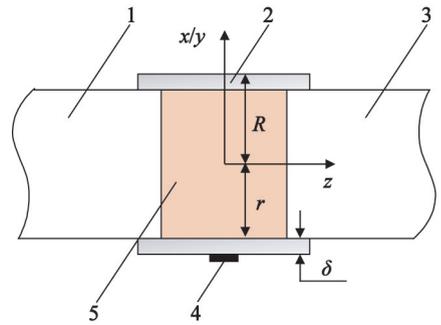
图 1 为被动围压装置示意图。围压管长度为 20 mm,内径 2r 为 16 mm,并根据常用战斗部工况设计了两种围压管外径 2R 的尺寸,分别为 24 mm 和 36 mm。由此,两种围压管的壁厚 δ 分别为 4 mm 和 10 mm。试验时,在试样表面均匀涂抹润滑油:一方面,形成油膜,起到传递载荷的作用;另一方面,可以减小试样表面与围压管内壁之间的摩擦<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 被动围压下的动态压缩力学性能

图 2 对比了应变率为 200 s<sup>-1</sup> 时非围压和被动

围压(壁厚 10 mm)加载下的轴向应力-应变曲线。以此分析浇注 PBX 炸药在非围压和被动围压条件下的动态压缩力学性能。可以看出,浇注 PBX 炸药试样的非围压和被动围压测试的轴向应力-应变曲线均可分为弹性段、过渡段和黏塑性段 3 个部分,具体如图 3 所示。在小变形范围内,轴向应力随应变呈线性增长趋势;随后,应力-应变曲线斜率减小,出现一个台阶形过渡区;随着轴向应变的继续增大,轴



1 - 入射杆;2 - 围压管;3 - 透射杆;4 - 应变片;5 - 试样。

图 1 被动围压试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of passive confinement test device

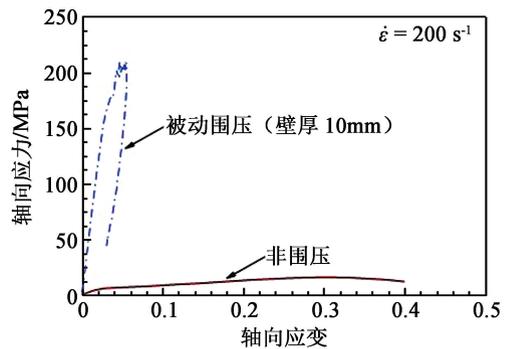


图 2 非围压和被动围压条件下的轴向应力-应变曲线

Fig. 2 Axial stress-strain curves of samples under unconfined pressure and passively confined pressure

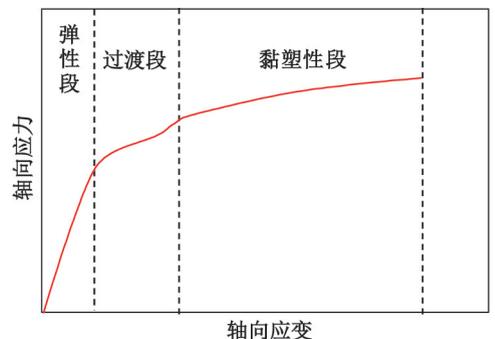


图 3 浇注 PBX 炸药典型轴向应力与应变的关系

Fig. 3 Relationship between typical axial stress and strain of cast PBX explosive

向应力缓慢增大,材料进入黏塑性区。

在非围压加载下,浇注PBX炸药的弹性模量和屈服应力为0.25 GPa和5.57 MPa;而在被动围压加载下,其弹性模量和屈服应力可达5.56 GPa和171.45 MPa,分别是非围压加载时的22.24倍和30.78倍,表明围压应力对浇注PBX炸药的轴向力学性能有明显的增强效应。这是由于在被动围压条件下,围压管的约束作用不仅会限制试样的横向变形,还会减缓材料内部微裂纹的萌生和扩展,从而使得材料的轴向抗压缩性能显著提高;而在非围压条件下,浇注PBX炸药的非线性力学性能主要取决于微裂纹的形成和演化,且随着应变率的增大,裂纹扩展速率增大,破坏应变呈递减规律<sup>[7]</sup>。需要说明的是,被动围压时轴向应力-应变曲线的峰值并不代表材料所能承受的最大压缩应力,只是由于加载结束导致的。

图4对比了两种围压管壁厚时浇注PBX炸药分别在两种应变率下的被动围压轴向应力-应变曲线。可以看出,在给定围压管壁厚下,随着应变率的增大,材料强度表现出一定程度的增强效应。这一方面,是由于黏结剂等组分材料的黏弹性行为;另一方面,在动态载荷下,脆性材料会产生更多的微小裂纹,由于应力反应时间很短,且积累的能量不足以使材料破坏,往往需要较高的应力才能使裂纹扩展,最终表现为压缩强度随应变率的增大而增大<sup>[8-9]</sup>。且当轴向应力逐渐卸载,试样均发生了不可逆的轴向变形,与文献[10]报道的结果一致。这可能是由塑性变形、局部压实以及孔洞塌陷共同导致的。此外,在相同应变率下,随着围压管壁厚的增加,浇注PBX炸药的被动围压轴向应力-应变曲线也呈现强化趋势。因此,围压应力对材料的轴向应力-应变响应也起着重要作用。

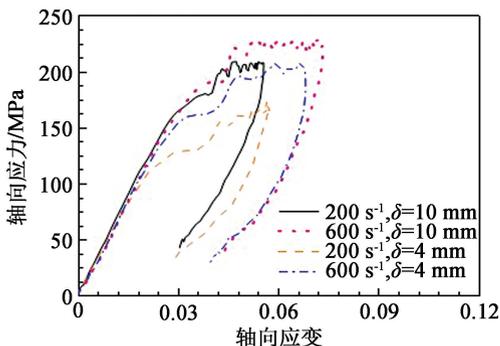


图4 被动围压下轴向应力-应变曲线

Fig. 4 Axial stress-strain curves under passive confinement

## 2.2 围压应力对轴向应力-应变曲线的影响

如上所述,被动围压条件下,材料的轴向应力-

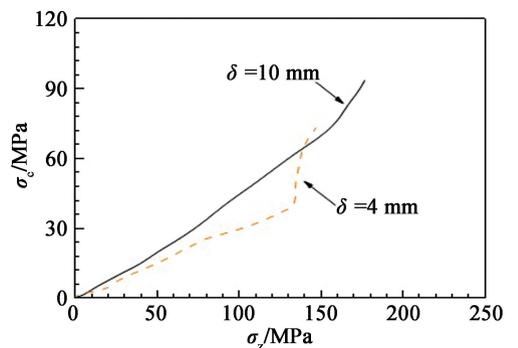
应变曲线不仅取决于加载应变率,还与围压应力的大小密切相关。由于围压管一直处于弹性变形状态,基于线弹性理论(厚壁圆筒弹性理论)和界面平衡条件,被动围压下试样外表面所受围压应力 $\sigma_c$ 和围压应变 $\varepsilon_c$ 可表示为围压管外壁环向应变 $\varepsilon_\theta$ 的函数<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_c = \frac{R^2 - r^2}{2r^2} E \varepsilon_\theta; \quad (1)$$

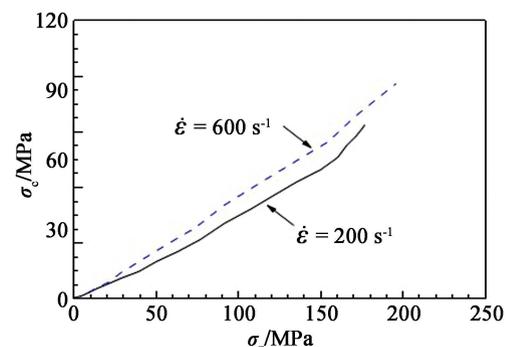
$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_\theta}{2} \left[ (1 - \nu) + (1 + \nu) \frac{R^2}{r^2} \right]. \quad (2)$$

式中: $r$ 和 $R$ 分别为围压管的内半径和外半径; $E$ 为围压管的弹性模量; $\nu$ 为围压管的泊松比。

图5分别对比了 $200 \text{ s}^{-1}$ 应变率[图5(a)]和 $10 \text{ mm}$ 厚围压管[图5(b)]加载条件下浇注PBX炸药的围压应力 $\sigma_c$ 与轴向应力 $\sigma_z$ 的关系。可以看出,相同轴向应力状态下,随着应变率 $\dot{\varepsilon}$ 或者围压管壁厚 $\delta$ 的增加,试样所受到的围压应力均呈增大趋势;表明被动围压条件下,浇注PBX炸药所受围压应力不仅取决于加载速率,还与围压管的壁厚密切相关。但对比图4的轴向应力-应变曲线可以看出,不同应变率和不同壁厚围压管加载下,浇注PBX炸药的弹性模量基本一致,说明围压应力对材料弹性段内的轴向力学响应影响不大。而在非线性响应阶段,围压应力大



(a)  $200 \text{ s}^{-1}$ 应变率



(b)  $10 \text{ mm}$ 厚围压管

图5 被动围压下的围压应力-轴向应力曲线

Fig. 5 Confining stress-axial stress curves under passive confinement

的试样轴向应力也大;说明围压应力对材料黏塑性响应阶段有明显的强化效应。

### 2.3 围压应力对轴向应力的影响

如前所述,被动围压下浇注 PBX 炸药的围压应力与加载应变率和围压管壁厚密切相关;但在给定围压应力条件下,轴向应力的大小主要取决于当前的约束比,即围压应力  $\sigma_c$  与非围压、参考应变率条件下压缩强度  $S_{z_0}$  之比。在主动围压条件下,围压应力对轴向应力的影响系数  $k$  可以表示为当前约束比的函数<sup>[12-13]</sup>:

$$k = \alpha + \beta \frac{\sigma_c}{S_{z_0}} \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$  为待定参数。

假设围压条件下,浇注 PBX 炸药的力学响应不受应力路径的影响<sup>[14]</sup>,被动围压条件下的围压应力对轴向应力的影响系数  $k'$  也可表示为:

$$k' = 1 + \alpha \frac{\sigma_c}{S_{z_0}} \quad (4)$$

式中: $\alpha$  为待定参数。

考虑到研究的被动围压加载条件下最大轴向应力并未达到试样的轴向压缩强度,因此, $S_{z_0}$  取材料的轴向压缩屈服强度。试验结果表明:被动围压下浇注 PBX 炸药的轴向应力随围压应力的增大呈指数增大的趋势;其屈服点处轴向应力  $\sigma'_z$  与围压应力  $\sigma'_c$  之间的关系可表示为:

$$\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z_0}} = k' \cdot \Phi\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z_0}}\right) = \left(1 + a \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z_0}}\right) \cdot \exp\left[b\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z_0}}\right)^c\right] \quad (5)$$

式中: $\sigma'_{z_0}$  为非围压条件下参考应变率为  $200 \text{ s}^{-1}$  时浇注 PBX 炸药的轴向压缩屈服强度,此时; $S_{z_0} = \sigma'_{z_0}$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

图 6 对比了被动围压加载下试验测量与模型预测得到的归一化轴向屈服应力  $\sigma'_z/\sigma'_{z_0}$  随当前约束比

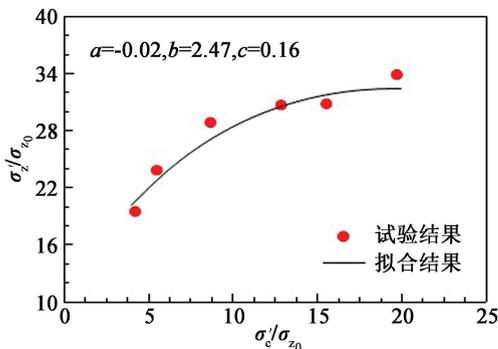


图 6 归一化轴向屈服应力-当前约束比曲线

Fig. 6 Normalized axial yield stress-current confinement ratio curves

$\sigma'_c/\sigma'_{z_0}$  的变化曲线,两者吻合良好,最大误差不超过 7%。

### 3 结论

1) 被动围压 (10 mm 厚围压管) 条件下,浇注 PBX 炸药的轴向压缩力学性能较非围压条件下显著提高,其弹性模量和屈服应力分别是非围压测试值的 22.24 倍和 30.78 倍。

2) 随着应变率 ( $200, 600 \text{ s}^{-1}$ ) 和围压管壁厚 (4、10 mm) 的增大,被动围压加载下浇注 PBX 炸药的轴向应力-应变曲线呈增强趋势。且相同轴向应力状态下,围压应力随围压管壁厚和应变率的增大而增大。

3) 被动围压加载下浇注 PBX 炸药的轴向应力随围压应力的增大呈指数增长趋势。拟合得到轴向屈服应力与当前约束比之间的函数关系,拟合结果与试验结果吻合良好。

### 参 考 文 献

[1] 唐明峰,李明,蓝林钢. 浇注 PBX 力学性能的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 812-817.  
TAND M F, LI M, LAN L G. Review on the mechanical properties of cast PBXs[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(6): 812-817.

[2] WIEGAND D A, REDINGIUS B, ELLIS K, et al. Pressure and friction dependent mechanical strength-cracks and plastic flow[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(11/12): 1617-1629.

[3] XIAO Y C, SUN Y, ZHEN Y B, et al. Characterization, modeling and simulation of the impact damage for polymer bonded explosives[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 103: 149-158.

[4] DONG C X, KWAN A K H, HO J C M. A constitutive model for predicting the lateral strain of confined concrete [J]. Engineering Structures, 2015, 91: 155-166.

[5] BAILLY P, DELVARE F, VIAL J, et al. Dynamic behavior of an aggregate material at simultaneous high pressure and strain rate: SHPB triaxial tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(2/3): 73-84.

[6] 施绍裘,王礼立. 材料在准一维应变下被动围压的 SHPB 试验方法[J]. 实验力学, 2000, 15(4): 377-384.  
SHI S Q, WANG L L. Passive confined pressure SHPB test method for materials under quasi-one dimensional

[5] 赵文才, 韩奎侠, 徐卫昌, 等. 低温动态加载下老化 HTPB 推进剂单/准双轴拉伸力学性能[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(5): 593-596, 641.  
ZHAO W C, HAN K X, XU W C, et al. Uniaxial and quasi-biaxial tensile mechanical properties of aged HTPB propellant at low temperatures under dynamic loading [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(5): 593-596, 641.

[6] 董可海, 裴立冠, 孔令泽, 等. 定应变下 NEPE 推进剂的储存老化性能[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 403-408.  
DONG K H, PEI L G, KONG L Z, et al. Storage aging performance of NEPE propellant under constant strain [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3): 403-408.

[7] FRENCH D M, ROSBOROUGH L. Oxidation and heat aging of carboxyl-terminated polybutadiene [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1966, 10(2): 273-289.

[8] 叶慈南, 曹伟丽. 应用数理统计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[9] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

[10] 郭萍. 双因素方差分析的应用及 Matlab 实现[J]. 长沙大学学报, 2014, 28(5): 138-140.  
GUO P. Application of two factor analysis of variance and its realization with Matlab [J]. Journal of Changsha University, 2014, 28(5): 138-140.

[11] 岳哲, 叶义成, 王其虎, 等. 低强度相似材料性能指标双因素方差分析[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(2): 110-114.

YUE Z, YE Y C, WANG Q H, et al. Double-factor variance analysis on performance index of low strength similar material [J]. Mining Research and Development, 2016, 36(2): 110-114.

[12] 复合固体推进剂高温加速老化试验方法: QJ 2328A—2005[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2005.

[13] 火药试验方法: GJB 770B—2005[S]. 北京: 国防科学技术工作委员会, 2005.

[14] 复合固体推进剂性能测试用件: QJ 1113—1987[S]. 北京: 中华人民共和国航天工业部, 1987.

[15] 复合固体推进剂硬度测试方法: QJ 1360—1988[S]. 北京: 中华人民共和国航天工业部, 1988.

[16] 李洋, 马松, 李国平, 等. PBT/N100 胶片的力学性能及交联网络的完整性[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(2): 197-202.  
LI Y, MA S, LI G P, et al. Mechanical properties and network structure integrity of PBT/N100 binder system [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(2): 197-202.

[17] 王苗苗. 双因素方差分析模型的构建及应用[J]. 统计与决策, 2015(18): 72-75.

[18] 沈业炜, 仇玉成, 童丽伦. PBT 钝感高能推进剂高温力学性能调节技术研究[J]. 推进技术, 2018, 39(11): 2595-2600.  
SHEN Y W, ZHANG Y C, TONG L L. Study on adjustment technology for high temperature mechanical properties of PBT insensitive high energy propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(11): 2595-2600.

(上接第 28 页)

strain state [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(4): 377-384.

[7] ELLIS K, LEPPARD C, RADESK H. Mechanical properties and damage evaluation of a UK PBX [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(23): 6241-6248.

[8] LI J L, LU F Y, QIN J G, et al. Effects of temperature and strain rate on the dynamic responses of three polymer-bonded explosives [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2011, 47(2): 104-112.

[9] LIU M S, LI Y L, XU F, et al. Dynamic compressive mechanical properties and a new constitutive model of 2D-C/SiC composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 489(1/2): 120-126.

[10] LIU M, HUANG X C, WU Y Q, et al. Modeling of the deformation and damage of plastic-bonded explosive in consideration of pressure and strain rate effects [J]. In-

ternational Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103722.

[11] 肖有才. PBX 炸药的动态力学性能及冲击损伤行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
XIAO Y C. Study of dynamic mechanical property and impact damage behavior of PBX [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[12] TENG J G, HUANG Y L, LAM L, et al. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2): 201-210.

[13] LAI M H, LIANG Y W, WANG Q, et al. A stress-path dependent stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. Engineering Structures, 2020, 203: 109824.

[14] LAI M H, CHEN M T, REN F M, et al. Uni-axial behaviour of externally confined UHSCFST columns [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 142: 19-36.