

## 材料强度差效应对薄壁金属管缓冲特性的影响

王丽红<sup>1,2</sup>, 郭怡培<sup>1</sup>, 牛 可<sup>1,2</sup>

(1. 郑州铁路职业技术学院 机车车辆学院, 河南 郑州 451460;  
2. 河南省轨道交通智能安全工程技术研究中心, 河南 郑州 451460)

**摘要:** 为了研究材料强度差效应对应用于轨道车辆的薄壁金属管缓冲特性的影响, 分别使用了 Von Mises 和 CPB06 本构模型进行薄壁金属管轴向压缩有限元仿真分析。首先, 基于薄壁金属管常用材料 6082-T6 铝合金的轴向缺口拉伸和缺口压缩试验结果, 分别对 Von Mises 和 CPB06 本构模型进行了参数标定; 其次, 使用显式动力学有限元计算软件 LS-DYNA 开展了与试验条件一致的仿真分析, 验证了本构模型参数校准的准确性; 最后, 针对某压溃型和膨胀型薄壁金属管开展轴向压缩特性仿真研究, 并对比了是否考虑材料强度差效应对两种薄壁金属管响应特征的影响。结果表明, 材料的强度差效应对压溃型薄壁金属管的变形特性、载荷特征和吸能特性均有较大影响, 而对膨胀型薄壁金属管的影响相对较小。

**关键词:** 强度差效应; 薄壁金属管; 缓冲特性; 本构模型; 压溃型; 膨胀型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.011

中图分类号: U287.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2025) 02-0075-10

## Influence of material strength difference effect on buffering characteristics for thin-walled metal tube

Wang Lihong<sup>1,2</sup>, Guo Yipei<sup>1</sup>, Niu Ke<sup>1,2</sup>

(1. Locomotive and Vehicle College, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 451460, China;  
2. Henan Engineering Research Center of Rail Transit Intelligent Security, Zhengzhou 451460, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of material strength difference effect on the buffer characteristics of thin-walled metal tubes applied to rail vehicles, the axial compression finite element simulation analysis of thin-walled metal tubes was conducted by Von Mises and CPB06 constitutive models. Firstly, based on the axial notch tension and notch compression test results of commonly used 6082-T6 aluminum alloy for thin-wall metal tubes, Von Mises and CPB06 constitutive models were calibrated for parameters. Secondly, the simulation analysis consistent with experimental conditions was conducted by using the explicit dynamic finite element calculation software LS-DYNA to verify the accuracy of parameter calibration for the constitutive model. Finally, a simulation study was conducted on the axial compression characteristics of a certain crush-type and expansion-type thin-walled metal tubes, and the influence of considering or not considering the material strength difference effect on the response characteristics for the two thin-walled metal tubes was compared. The results show that the material strength difference effect has a significant impact on the deformation characteristics, load characteristics and energy absorption characteristics of crush-type thin-walled metal tube, and the impact on the expansion-type thin-walled metal tube is relatively small.

**Key words:** strength difference effect; thin-walled metal tube; buffering characteristics; constitutive model; crush-type; expansion-type

随着轨道交通技术的持续进步, 列车运营速度稳步提升, 但近年来轨道列车的碰撞事故也呈现出增加的态势, 如 2022 年贵广线 D2809 列车撞击泥石流脱线事故, 以及 2023 年北京地铁昌平线列车追尾事故等。列车端部的吸能装置作为列车安全的最后

一道防线, 其被动安全设计受到越来越多的重视, 现已形成一套完整的列车耐撞性设计原则, 即 CEM (Collision Energy Management) 准则。通过在列车端部设置一系列不同刚度的吸能装置, 保证车体在碰撞过程中产生可控的塑性变形吸收动能<sup>[1]</sup>。

薄壁金属管因其结构简单、比强度和比吸能相对较大、稳态力平稳等特点, 被广泛应用于汽车<sup>[2]</sup>或列车碰撞安全防护<sup>[3]</sup>、飞机适坠性设计<sup>[4]</sup>等场景。常用的薄壁吸能管形式主要包括压溃型<sup>[5]</sup>、切削型<sup>[6]</sup>与膨胀型<sup>[7]</sup>, 众多学者针对不同形式的薄壁吸能管开展了

收稿日期: 2024-03-25; 修订日期: 2024-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175123); 河南省科技攻关计划项目 (252102220071, 242102320221)

作者简介: 王丽红 (1980-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: honly\_lee@sina.com

大量的理论、试验和仿真分析,包括薄壁金属管吸能特性分析<sup>[8]</sup>、结构优化与参数优化<sup>[9]</sup>、吸能管在列车碰撞的应用<sup>[10]</sup>等相关研究。以上研究往往侧重于结构设计与整车结构碰撞响应分析,而忽略了薄壁金属管应用的边界条件变化导致其材料力学性能的差异。部分学者注意到,由于列车碰撞速度较高,材料的应变速率效应对薄壁吸能管力学特性的影响不可忽视。曾必强等<sup>[11]</sup>发现对于具有负应变速率效应的材料,薄壁金属管的缓冲力级随冲击速度增加而减小;吴鸿超等<sup>[12]</sup>发现随着冲击速度的提高,薄壁金属管的缓冲力稳定性降低,而缓冲力波动范围和力级有所增加;陈书剑等<sup>[13]</sup>通过试验与仿真相结合的手段研究了应变速率效应对 5083P-O 和 6008-T6 两种铝合金材料的膨胀型吸能管的影响。此外,材料在不同应力状态下的损伤与断裂行为同样会影响薄壁金属管的吸能特性。吴章斌等<sup>[14]</sup>研究了 AZ31B 镁合金矩形管的破坏机制和吸能特性;冯悦等<sup>[15]</sup>分别采用常应变断裂模型和 GISSMO 失效模型研究了压溃型和膨胀型薄壁金属管的碰撞性能,发现材料的破坏会显著降低压溃型薄壁金属管的吸能效率;Bhutada S 等<sup>[16]</sup>研究了开槽对铝管受轴向压缩载荷条件下破坏行为的影响。

虽然国内外学者对薄壁金属吸能管开展了大量的研究,但大多未考虑应力状态对材料塑变性能的影响,即认为在不同应力状态下材料的应力应变关系是相同的。研究表明,很多金属材料在不同应力状态下存在强度差效应,最典型的包括镁合金与钛合金等 HCP 型金属,由于在塑性变形中存在滑移和孪生两种机制,导致其在拉伸和压缩加载条件下力学性能差异较大<sup>[17-18]</sup>。此外,铝合金等列车车体常用材料也存在一定的强度差效应<sup>[19]</sup>。针对这一现象,很多学者构建了考虑偏应力效应或静水压力效应的本构模型,如 Drucker 系列模型<sup>[20-22]</sup>,通过引入各向异性系数同样可以表征材料的强度差效应,如 Hill 系列模型<sup>[23-24]</sup>。本文基于薄壁金属管常用材料 6082-T6 铝合金的试验结果,对经典的 Von Mises 本构模型和考虑材料强度差效应的 CPB06 本构模型<sup>[25]</sup>进行参数标定,通过与试验结果对比验证模型的有效性。在此基础上,对压溃型和膨胀型薄壁金属管的轴向缓冲特性开展研究与分析。

## 1 材料模型

### 1.1 应力状态参数

由于应力状态对材料力学性能有一定的影响,

故首先需要引入应力张量不变量和应力状态参数的概念。3 个应力张量不变量的定义如下:

$$\begin{cases} I_1 = \text{tr}(\sigma_{ij}) = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 = \frac{1}{2}s_{ij}s_{ij} = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \\ J_3 = \frac{1}{3}s_{ij}s_{jl}s_{li} = (\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_1$  为第一主应力张量不变量;  $J_2$  和  $J_3$  分别为第二和第三偏应力张量不变量;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  为 3 个主应力;  $\sigma_m$  为平均应力;  $\sigma_{ij}$  和  $s_{ij}$  ( $s_{jl}$  和  $s_{li}$ ) 分别为应力张量和偏应力张量分量;  $i, j, l = 1, 2, 3$ ;  $\text{tr}(\ )$  为矩阵的迹, 等于矩阵对角线元素之和。

其中,  $\sigma_m$  和  $s_{ij}$  的表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m \\ \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

应力三轴度  $\eta$  用于表征静水应力在材料所受应力水平中的占比权重, 被定义为平均应力与 Von Mises 等效应力的比值。其表达式如下:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}_{\text{VM}}} = \frac{I_1}{3\sqrt{3}J_2} \quad (3)$$

式中:  $\bar{\sigma}_{\text{VM}}$  为 Von Mises 等效应力。

洛德角  $\theta$  则是用于表征偏应力在材料所受应力水平中的占比权重, 反映了最大主应力与其他两个主应力间的相对比例, 取值范围为  $[0, \pi/3]$ 。为了便于直观地描述洛德角对材料力学性能的影响, 提出归一化的洛德角参数  $\xi$ , 其取值范围为  $[-1, 1]$ 。洛德角  $\theta$  和归一化洛德角参数  $\xi$  的表达式如下:

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{3}\arccos\left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}}\right) \\ \xi = \cos(3\theta) \end{cases} \quad (4)$$

对于单轴拉伸和单轴压缩这两种基本应力状态, 其应力状态参数 ( $\eta, \xi$ ) 分别为  $(1/3, 1)$  和  $(-1/3, -1)$ 。由于金属的塑性不可压缩性, 通常认为静水应力不影响其屈服, 因此, 将使用偏应力相关的本构模型描述应力状态对材料力学性能的影响。

### 1.2 Von Mises 与 CPB06 本构模型

Von Mises 本构模型由于表达式简单和物理含义

明确而成为工程中最常用的屈服准则之一。该模型未考虑加载方向和应力状态对材料强度的影响，其物理意义是在一定的变形条件下，当材料的单位体积形状改变的弹性形变能达到某一常数时发生屈服。基于 Von Mises 等效应力  $\bar{\sigma}_{VM}$  的屈服函数  $f$  表达式如下：

$$f = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)} = \bar{\sigma}_{VM} \quad (5)$$

式中： $S_1 \sim S_3$  为偏应力张量  $\mathbf{S}$  的 3 个主偏应力。

CPB06 本构模型可以描述材料在不同加载方向下的拉伸、压缩屈服应力的不对称行为。该模型考虑了偏应力对材料屈服的影响，而认为与静水应力无关。当不考虑各向异性时，CPB06 等效应力  $\bar{\sigma}_{CPB}$  的表达式如下：

$$f = (|S_1| - kS_1)^a + (|S_2| - kS_2)^a + (|S_3| - kS_3)^a = \bar{\sigma}_{CPB} \quad (6)$$

式中： $k$  为用于描述材料的拉压屈服应力非对称行为的参数； $a$  为齐次方程的阶数。

可以发现，当  $k=0$ 、 $a=2$  时，CPB06 等效应力将退化为 Von Mises 等效应力。单轴拉伸和单轴压缩应力状态下等效应力的比值计算如下：

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_C} = \left\{ \frac{[\frac{2}{3}(1+k)]^a + 2[\frac{1}{3}(1-k)]^a}{[\frac{2}{3}(1-k)]^a + 2[\frac{1}{3}(1+k)]^a} \right\}^{1/a} \quad (7)$$

式中： $\sigma_T$  为单轴拉伸应力状态下的等效应力； $\sigma_C$  为单轴压缩应力状态下的等效应力。

当考虑材料的各向异性时，采用线性变换张量将式 (6) 修正如下：

$$f = (|\Sigma_1| - k\Sigma_1)^a + (|\Sigma_2| - k\Sigma_2)^a + (|\Sigma_3| - k\Sigma_3)^a = \bar{\sigma}_{CPB} \quad (8)$$

式中： $\Sigma_1 \sim \Sigma_3$  为经过线性变换后的  $\Sigma$  的 3 个主偏应力； $\Sigma = \mathbf{C} : \mathbf{S}$ ； $\mathbf{C}$  为线性变换张量。

$\mathbf{C}$  的表达式如下：

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{13}$ 、 $C_{22}$ 、 $C_{23}$ 、 $C_{33}$ 、 $C_{44}$ 、 $C_{55}$  和  $C_{66}$  为线性变换参数。

在平面应力状态下，考虑  $C_{44} = C_{55} = C_{66}$ ，此时  $\Sigma_1 \sim \Sigma_3$  的计算过程如下：

$$\begin{cases} 3\Sigma_{xx} = (2C_{11} - C_{12} - C_{13})\sigma_{xx} + (-C_{11} + 2C_{12} - C_{13})\sigma_{yy} \\ 3\Sigma_{yy} = (2C_{12} - C_{22} - C_{23})\sigma_{xx} + (-C_{12} + 2C_{22} - C_{23})\sigma_{yy} \\ 3\Sigma_{zz} = (2C_{13} - C_{23} - C_{33})\sigma_{xx} + (-C_{13} + 2C_{23} - C_{33})\sigma_{yy} \\ \Sigma_{xy} = C_{44}\sigma_{xy} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Sigma_1 = \frac{1}{2}(\Sigma_{xx} + \Sigma_{yy} + \sqrt{(\Sigma_{xx} - \Sigma_{yy})^2 + 4\Sigma_{xy}^2}) \\ \Sigma_2 = \frac{1}{2}(\Sigma_{xx} + \Sigma_{yy} - \sqrt{(\Sigma_{xx} - \Sigma_{yy})^2 + 4\Sigma_{xy}^2}) \\ \Sigma_3 = \Sigma_{zz} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{xy}$  分别为线性变换前  $x$ 、 $y$  方向的主应力分量和  $xy$  平面内的剪应力分量； $\Sigma_{xx}$ 、 $\Sigma_{yy}$ 、 $\Sigma_{zz}$  和  $\Sigma_{xy}$  分别为线性变换后  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的主应力分量和  $xy$  平面内的剪应力分量。

## 2 6082-T6 铝合金本构模型参数校准与验证

### 2.1 本构模型参数校准

Holmen J K 等<sup>[19]</sup>给出了轨道交通车体常用材料 6082-T6 铝合金缺口圆棒试样的拉伸和压缩试验结果，其中轴向（加载方向）应力  $\sigma_{11}$  和轴向应变  $\varepsilon_{11}$  的计算公式如下：

$$\sigma_{11} = \frac{F_1}{A}, \quad \varepsilon_{11} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (12)$$

式中： $F_1$  为试验机实时测量的纵向载荷； $A_0$  为试样最小截面处的初始横截面积， $A_0 = \pi D_0^2/4$ ； $A$  为试样最小截面处的当前横截面积， $A = \pi D_1 D_2/4$ ； $D_0$  为最小截面的初始直径； $D_1$  和  $D_2$  分别为最小截面两个垂直方向的当前直径。

当试样塑性变形相对较小时，计算得到的轴向应变  $\varepsilon_{11}$  近似等于等效塑性应变  $\varepsilon_p$ （忽略弹性应变）；而由于试样中缺口会引入额外的静水应力，因此，需采用 Bridgman 计算方法<sup>[26]</sup>将上述计算的缺口轴向应力  $\sigma_{11}$  修正为单轴拉伸或单轴压缩应力状态下的轴向应力  $\sigma$ ，此时其绝对值等于相应的 Von Mises 等效应力  $\bar{\sigma}_{VM}$ 。Bridgman 计算公式如下：

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{11}}{\left(1 + \frac{2R_n}{R_0}\right) \ln\left(1 + \frac{R_0}{2R_n}\right)} \quad (13)$$

式中： $R_n$  为试样颈部曲率半径， $R_n = 3.6$  mm； $R_0$  为试样最小截面半径， $R_0 = 3.2$  mm。

将文献 [19] 中的试验结果进行计算，并采用

Voce 硬化准则对 6082-T6 铝合金在单轴拉伸和单轴压缩下的 Von Mises 等效应力-等效塑性应变进行拟合, 拟合结果见图 1a, 拟合关系式见式 (14), 得

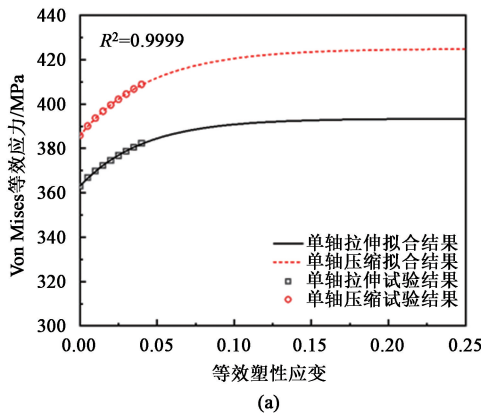


图 1 两种加载条件下试验与本构模型拟合结果对比

(a) Von Mises 本构模型 (b) CPB06 本构模型

Fig. 1 Comparison between experimental and constitutive model fitting results under two loading conditions

(a) Von Mises constitutive model (b) CPB06 constitutive model

$$\bar{\sigma}_{VM} = A_p + B_p [1 - \exp(-C_p \varepsilon_p)] \quad (14)$$

式中:  $A_p$ 、 $B_p$ 、 $C_p$  均为材料参数。

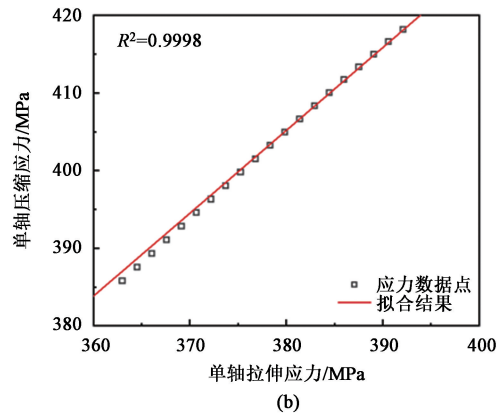
表 1 6082-T6 铝合金 Von Mises 本构模型参数

Table 1 Parameters of Von Mises constitutive model for 6082-T6 aluminum alloy

应力状态	$A_p$ /MPa	$B_p$ /MPa	$C_p$
单轴拉伸	362.985	30.433	244.950
单轴压缩	385.804	33.640	25.533

由图 1b 可知, 6082-T6 铝合金存在一定的拉压不对称效应。由于在不同应变水平下其单轴拉伸和单轴压缩的应力比基本一致, 为简单起见, 将 CPB06 本构模型中的齐次方程阶数  $a$  固定为 2, 并采用式 (13) 对参数  $k$  进行拟合。拟合结果如图 1b 所示, 其拟合优度  $R^2$  为 0.9998, 得到的  $k$  值为

到的参数见表 1, 其拟合优度  $R^2$  均大于 0.999, 表明 Voce 硬化准则可以较好地拟合该材料的 Von Mises 等效应力、等效塑性应变关系。



-0.0972。此外, 由于本文未考虑材料的各向异性, 因此, 令线性变换参数  $C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_{44} = 1$ ,  $C_{12} = C_{13} = C_{23} = 0$ 。通过不同应变水平下应力的计算, 即可得到 CPB06 等效应力-等效塑性应变关系。

## 2.2 模型验证

为了验证以上本构模型的准确性, 基于显式动力学有限元计算软件 LS-DYNA, 建立了与文献 [19] 中试验试样和边界条件一致的有限元计算模型, 如图 2 所示。其中, 发生塑性大变形的区域采用尺寸为  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$  的六面体网格进行划分, 其他区域则适当地增大网格尺寸以减小计算成本。分别采用 \* MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY 和 \* MAT CAZACU BARLAT 材料模型来表征 Von Mises 本构模型和 CPB06 本构模型, 其中 Von Mises 本构模型的输入选择为基于轴向拉伸试验得到的数据点。

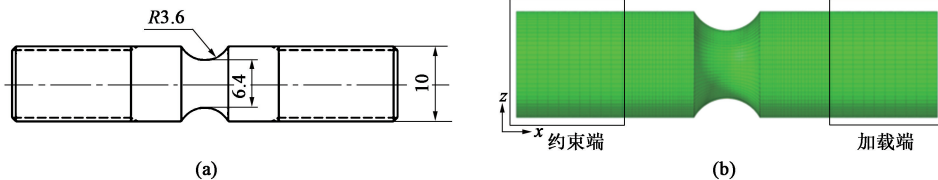


图 2 材料模型验证

(a) 试样几何尺寸 (b) 有限元仿真模型

Fig. 2 Verification of material models

(a) Geometry sizes of specimen (b) Finite element simulation model

分别使用两种本构模型仿真得到了单轴拉伸和单轴压缩试样的轴向截面力和最小截面的变化量,

并采用式 (7) 计算得到试样的轴向应力与轴向应变, 与试验结果的对比如图 3 所示。由图 3a 可以看



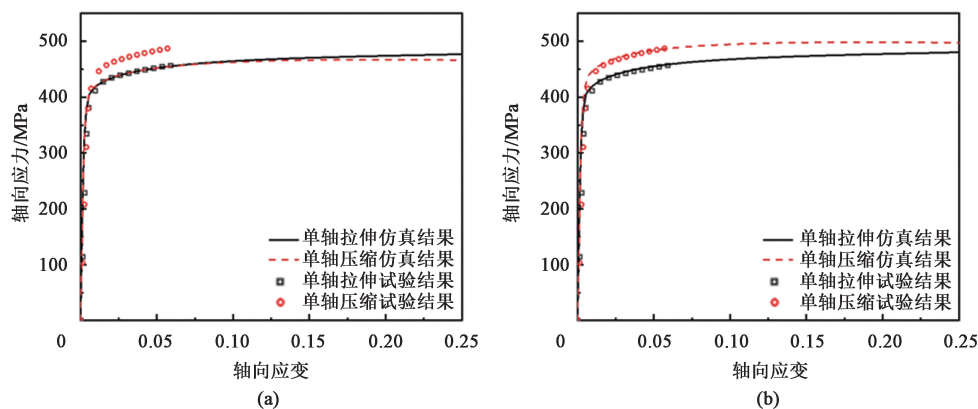


图3 试验结果与本构模型有限元仿真结果对比

(a) Von Mises 本构模型 (b) CPB06 本构模型

Fig. 3 Comparison between experimental and constitutive model finite element simulation results under two loading conditions

(a) Von Mises constitutive model (b) CPB06 constitutive model

出, 当使用 Von Mises 本构模型时, 轴向拉伸加载条件下仿真得到的轴向应力-轴向应变曲线与试验结果相吻合; 轴向压缩加载条件下的仿真结果与试验结果差异较大。轴向压缩与轴向拉伸仿真结果在轴向应变低于 0.12 时基本一致, 而在大于 0.12 时出现少量偏差, 这是由于当塑性变形较大时, 缺口试样的颈部曲率半径变化较大, 此时两种加载条件下的应力状态均发生了较大的变化, 使得基于式 (7) 的计算结果准确性降低。由图 3b 可以看出, 当使用 CPB06 本构模型时, 两种加载条件下的仿真结果与试验结果均吻合良好。以上结果充分证明了 6082-T6 铝合金的 Von Mises 本构模型和 CPB06 本构模型参数校准的准确性。

### 3 薄壁金属管缓冲特性仿真分析

#### 3.1 计算模型与边界条件

本节对轨道车辆防爬装置常用的压溃型薄壁金属

管和车钩缓冲器中内置的膨胀型薄壁金属管开展了轴向缓冲特性研究。其中, 压溃型薄壁金属管壁厚为 4 mm, 长度为 400 mm, 截面为正方形, 其内接圆半径为 75 mm, 头部开有 8 个 18 mm×6 mm 的诱导槽以减小初始峰值力; 膨胀型薄壁金属管壁厚为 8 mm, 长度为 180 mm, 截面为圆形, 其外径为  $\Phi 50$  mm。

采用特征尺寸为 2 mm 的网格将两种薄壁金属管进行离散 (压溃型薄壁金属管采用 2 mm×2 mm 的矩形网格, 膨胀型薄壁金属管采用 2 mm×2 mm×2 mm 的六面体网格), 材料参数与第 2 章的校准结果保持一致。薄壁金属管一端固定于刚性墙, 另一端刚性墙 (针对压溃型薄壁管) 或刚性锥头 (针对膨胀型薄壁管) 以速度  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  匀速轴向冲击薄壁金属管。本文未考虑应变速率效应对薄壁金属管缓冲特性的影响。模型中各组件施加面面自动接触和单面自动接触, 动静摩擦因数分别设置为 0.10 和 0.15。两种薄壁金属管的仿真模型如图 4 所示。

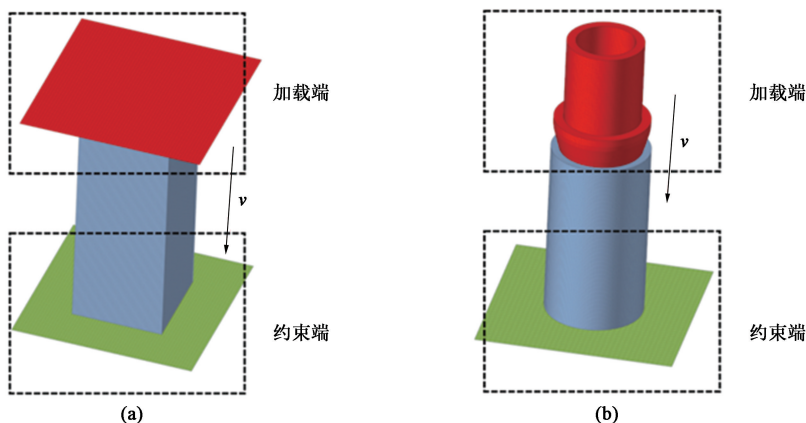


图4 压溃型 (a) 和膨胀型 (b) 薄壁金属管仿真模型

Fig. 4 Simulation models of crush-type (a) and expansion-type (b) thin-walled metal tubes

### 3.2 计算结果与分析

图 5 给出了采用两种本构模型计算得到的压溃型薄壁金属管结构变形。可以看到,薄壁金属管首先在开诱导槽处变形,随着压缩位移的增加,3 个塑性铰从加载端到固定端逐渐形成。Von Mises 本构模型计算得到的塑性铰变形量较使用 CPB06 本构模型的计算结果

更大,其中使用前者计算得到的第 2 个塑性铰处的平均等效塑性应变为 0.29,而使用后者计算得到的第 2 个塑性铰处的平均等效塑性应变为 0.31。以上结果表明,材料的强度差效应对压溃型薄壁金属管受轴向压缩载荷下的变形特性有一定的影响,使用 CPB06 本构模型计算得到的压溃型薄壁金属管变形更不均匀。

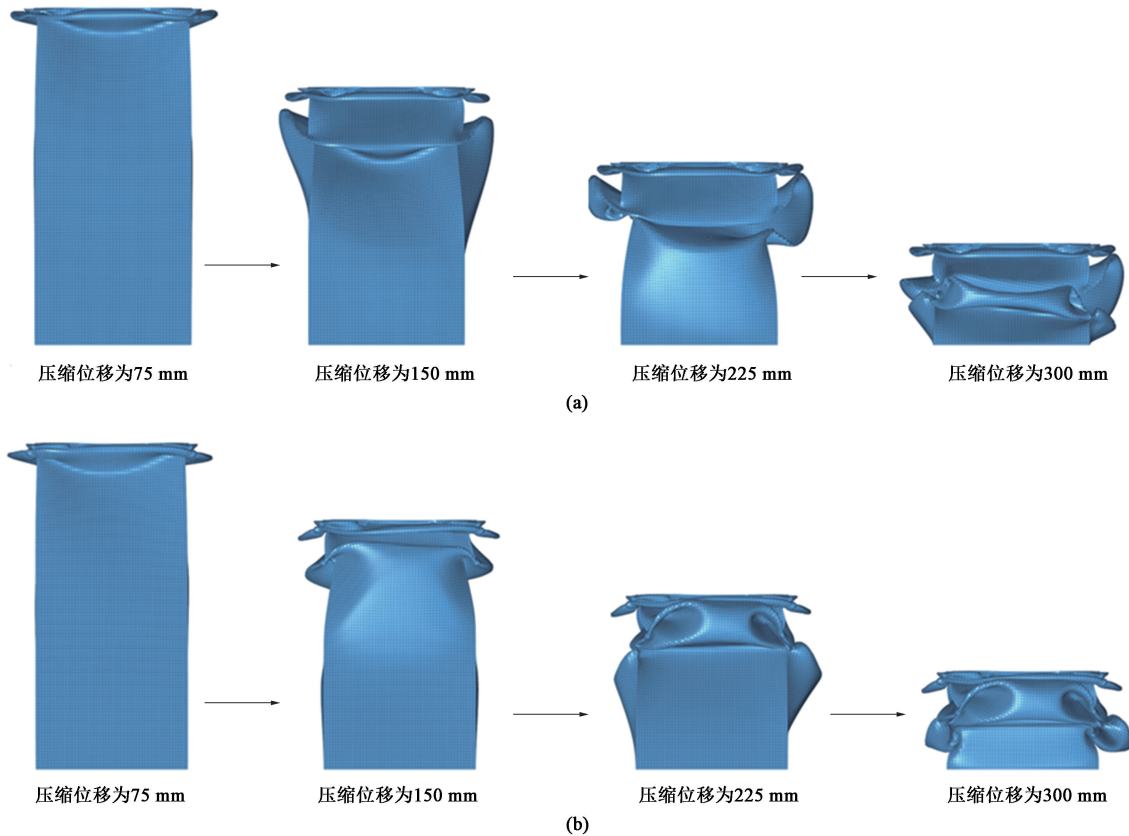


图 5 Von Mises 本构模型 (a) 和 CPB06 本构模型 (b) 计算的压溃型薄壁金属管结构变形图

Fig. 5 Structural deformation diagrams of crush-type thin-walled metal tube calculated by Von Mises constitutive model (a) and CPB06 constitutive model (b)

为进一步探究材料强度差效应对压溃型薄壁金属管力学响应的影响,选取了 5 个网格进行研究,如图 6a 所示。图 6b 和图 6c 则展示了压缩位移为 75 mm 时 5 个网格及其附近的归一化洛德角参数  $\xi$  云图。表 2 给出了分别使用两种本构模型计算得到的 5 个网格的最大等效塑性应变  $\varepsilon_{CPB}$  和  $\varepsilon_{Von}$ , 以及相对差值 ( $|\varepsilon_{CPB} - \varepsilon_{Von}| / \varepsilon_{Von}$ )。可以看到,采用两种模型计算得到的网格 1 和网格 5 的最大等效塑性应变差异相对较小,网格 3 差异最大。这是由于:网格 1 和网格 5 所在区域的归一化洛德角参数  $\xi$  接近 1,对应单轴拉伸应力状态,此时两种模型对应的应力应变关系差异相对较小;而网格 3 所在区域的归一化洛德角参数  $\xi$  接近 0,对应纯剪切应力状态,此时两种模型对应的应力应变关系差异相对较

大。此外,由于压溃型薄壁金属管变形过程中各区域应力状态差异较大,导致采用两种模型计算得到的变形不尽相同,进一步加剧了应力状态的差异。

压溃型薄壁金属管的缓冲力-压缩位移曲线计算结果如图 7a 所示。当使用 Von Mises 本构模型时,其初始峰值缓冲力为 769.523 kN,在 0~310 mm 压缩位移内的平均缓冲力为 232.567 kN。当使用 CPB06 本构模型时,其初始峰值缓冲力为 820.164 kN,在 0~310 mm 压缩位移内的平均缓冲力为 244.084 kN。可以看到,材料的强度差效应对压溃型薄壁金属管初始峰值缓冲力的影响较平均缓冲力更大。此外,两种本构模型计算得到的缓冲力-压缩位移曲线波动趋势有一定的差异,进一步说明材料的强度差效应会影响其变形特性。由图 7b 可知,采用 Von Mises

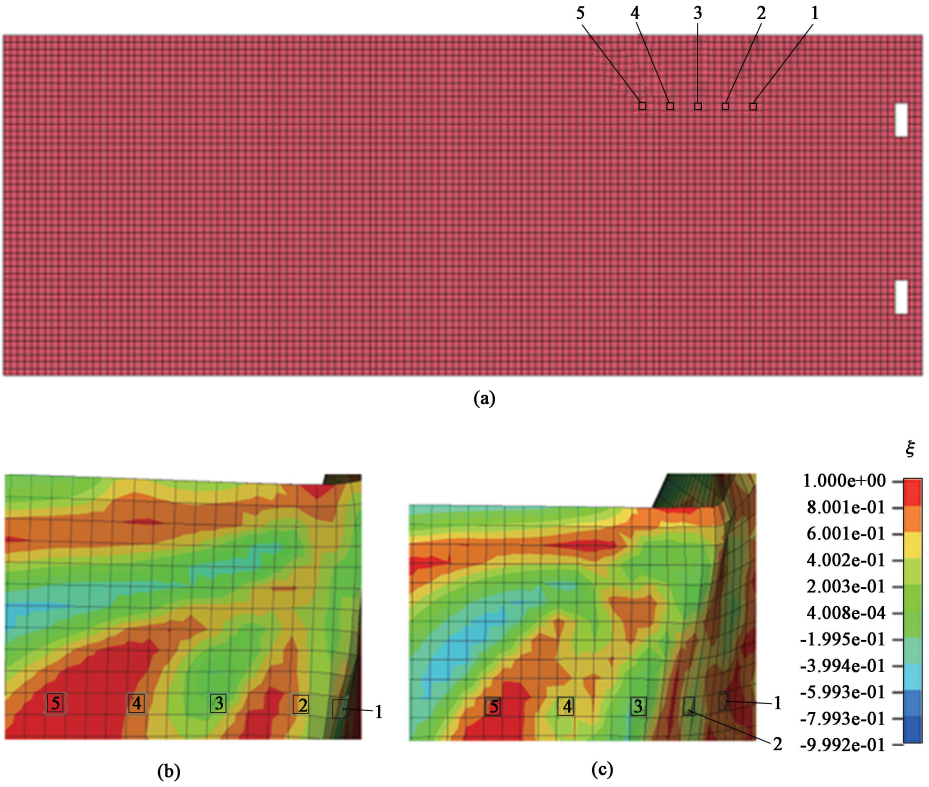


图 6 特征网格选取示意图 (a) 和 Von Mises 本构模型 (b) 及 CPB06 本构模型 (c) 计算的  $\xi$  云图

Fig. 6 Schematic diagram of feature grid selection (a) and nephograms of  $\xi$  calculated by Von Mises constitutive model (b) and CPB06 constitutive model (c)

表 2 两种模型计算得到的特征网格最大等效塑性应变

Table 2 Maximum equivalent plastic strain of feature grid calculated by two models

模型	网格 1	网格 2	网格 3	网格 4	网格 5
Von Mises 本构模型	0.110	0.193	0.220	0.156	0.095
CPB06 本构模型	0.146	0.300	0.404	0.250	0.121
相对差值/%	32.73	55.44	83.64	60.26	27.37

本构模型计算得到的金属管形变能为 89.114 kJ，采用 CPB06 本构模型计算得到的滑移能和金属管形变能之和为 92.472 kJ，二者相差 3.77%，说明强度差效应对压溃型薄壁金属管的吸能特性有一定的影响。

使用 Von Mises 和 CPB06 本构模型计算得到的膨胀型薄壁金属管的结构变形及等效塑性应变云图如图 8 所示。可以看到，膨胀型薄壁金属管变

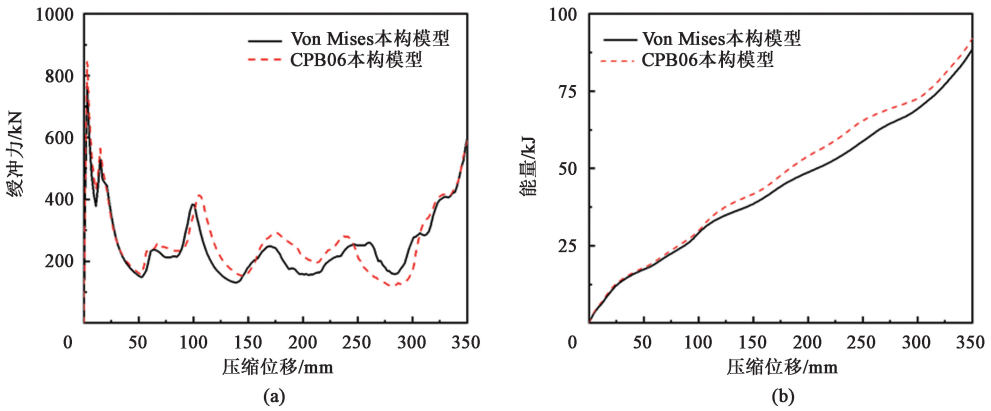


图 7 压溃型薄壁金属管缓冲力与能量变化曲线

(a) Von Mises 本构模型 (b) CPB06 本构模型

Fig. 7 Change curves of buffering force and energy for crush-type thin-walled metal tube

(a) Von Mises constitutive model (b) CPB06 constitutive model



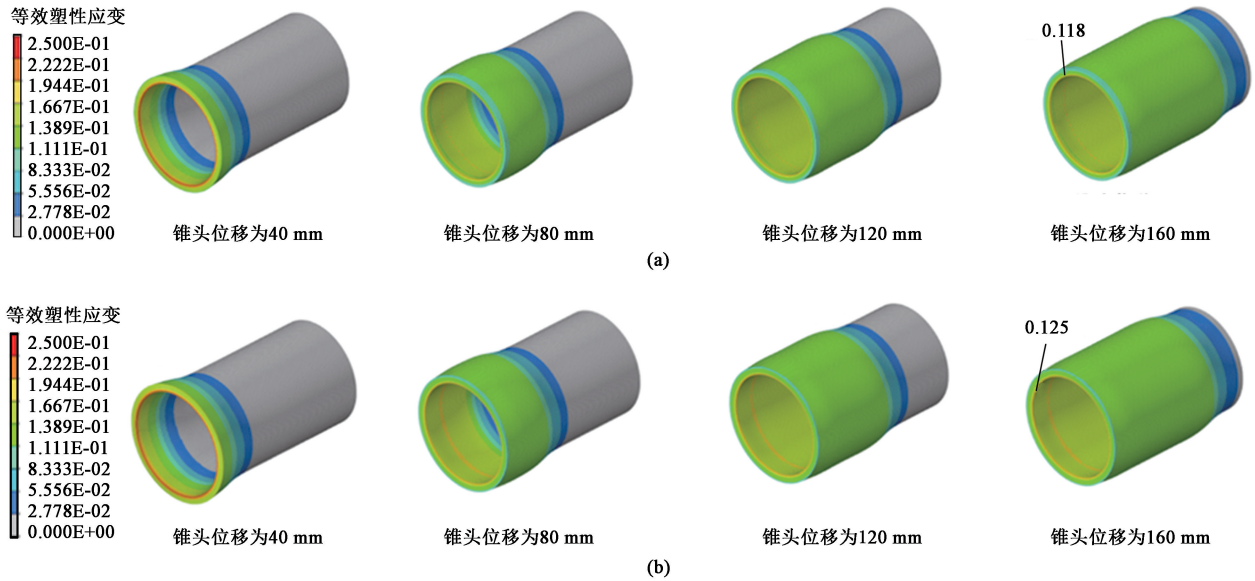


图 8 膨胀型薄壁金属管结构变形与等效塑性应变云图

(a) Von Mises 本构模型 (b) CPB06 本构模型

Fig. 8 Structural deformation and equivalent plastic strain nephograms of expansion-type thin-walled metal tube

(a) Von Mises constitutive model (b) CPB06 constitutive model

形式稳定, 采用两种模型计算得到的应变场较为一致。其中, 采用 Von Mises 本构模型计算得到的薄壁金属管均匀变形段的最大等效塑性应变为 0.118, 采用 CPB06 本构模型计算得到的薄壁金属管均匀变形段的最大等效塑性应变为 0.125。以上结果表明, 使用两种本构模型计算得到的膨胀型薄壁金属管变形趋势类似, 说明强度差效应对该类型薄壁管的力学特性影响较小。

膨胀型薄壁金属管的缓冲力-锥头位移曲线计算结果如图 9a 所示, 可以看到, 使用两种本构模型计算的结果存在一定的差异, 但较压溃型薄壁金属管的计算差异更小。锥头位移为 0~35 mm 时, 两种模型

计算得到的缓冲力趋于一致, 均由 0 缓慢上升; 锥头位移为 35~165 mm 时, 缓冲力趋于平稳, 两种模型得到的平均稳态缓冲力分别为 283.276 和 292.195 kN; 锥头位移为 165~180 mm 时, 由于膨胀型薄壁金属管末端固定于安装座使得缓冲力增大, 随后纵向冲击结束。由图 9b 可知, 采用 Von Mises 本构模型计算得到的滑移能和金属管形变能分别为 29.910 和 19.285 kJ, 采用 CPB06 本构模型计算得到的滑移能和金属管形变能分别为 30.473 和 19.286 kJ, 较前者的动能耗散提高了 1.15%。以上结果充分说明在变形模式与变形程度基本一致的情况下, 材料的强度差效应对膨胀型薄壁金属管的吸能特性仍有一定的影响。

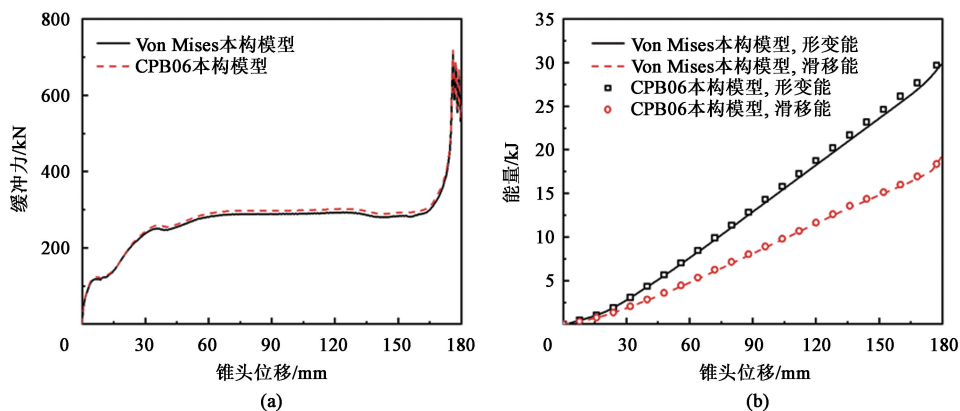


图 9 膨胀型薄壁金属管缓冲力与能量变化曲线

(a) Von Mises 本构模型 (b) CPB06 本构模型

Fig. 9 Change curves of buffering force and energy of expansion-type thin-walled metal tube

(a) Von Mises constitutive model (b) CPB06 constitutive model



## 4 结论

(1) 采用 Voce 硬化准则可以很好地描述 6082-T6 铝合金在单轴拉伸和单轴压缩应力状态下的应力应变关系。

(2) 试验与仿真结果的对比表明, Von Mises 本构模型能够很好地表征缺口试样拉伸载荷特征, CPB06 本构模型可以很好地表征 6082-T6 铝合金的强度差效应。

(3) 材料的强度差效应对压溃型薄壁金属管的变形特性有一定的影响, 使用 CPB06 本构模型计算得到的薄壁金属管变形更不均匀; 而对膨胀型薄壁金属管的变形特性影响较小。

(4) 材料的强度差效应对两种薄壁金属管的载荷特征和吸能特性均有一定的影响, 使用两种本构模型计算得到的压溃型薄壁金属管的吸能量相差 3.77%, 膨胀型薄壁金属管的吸能量相差 1.15%。

### 参考文献:

- [1] Zhu T, Xiao S N, Lei C, et al. Rail vehicle crashworthiness based on collision energy management: An overview [J]. International Journal of Rail Transportation, 2021, 9 (2): 101-131.
- [2] 白中浩, 周存文, 龚超, 等. 仿生层级薄壁方管的耐撞性研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (1): 181-190.  
Bai Z H, Zhou C W, Gong C, et al. Crashworthiness of bio-inspired hierarchical thin-walled square tubes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (1): 181-190.
- [3] 朱涛, 肖守讷, 杨超, 等. 机车车辆被动安全性研究综述 [J]. 铁道学报, 2017, 39 (5): 22-32.  
Zhu T, Xiao S N, Yang C, et al. State-of-the-art development of passive safety of rolling stocks [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39 (5): 22-32.
- [4] 马懿瑶. 大型飞机典型货舱地板下部结构坠撞吸能特性研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2018.  
Ma C Y. Crash Characteristic for the Cargo Subfloor Structure of Civil Aircraft [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.
- [5] 周礼, 王宇, 蒋忠城, 等. 泡沫填充铝合金多胞防爬器的吸能机理 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (2): 231-241.  
Zhou L, Wang Y, Jiang Z C, et al. Energy absorption mechanism of foam-filled aluminum alloy multi-cell anti-climber [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (2): 231-241.
- [6] Gao Q C, Xiao S N, Wang X R, et al. Tool failure analysis and multi-objective optimization of a cutting-type energy-absorbing structure for subway vehicles [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (3): 1619.
- [7] 贺世忠, 黄科. 轨道车辆膨胀管式吸能元件吸能特性分析 [J]. 机械强度, 2019, 41 (4): 1006-1011.
- [8] 邹广平, 闫安石, 唱忠良, 等. 金属薄壁夹层结构变形形式及吸能特性研究 [J]. 机械强度, 2023, 45 (5): 1249-1253.  
Zou G P, Yan A S, Chang Z L, et al. Study on deformation form and energy absorption characteristics of metal thin-walled sandwich structure [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45 (5): 1249-1253.
- [9] 许平, 杨丽婷, 姚曙光, 等. 城轨列车方锥式防爬吸能结构碰撞力学参数设计及多目标优化 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (5): 1689-1699.  
Xu P, Yang L T, Yao S G, et al. Collision mechanics parameter design and multi-objective optimization of square cone anti-climbing energy-absorbing structure for urban rail trains [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53 (5): 1689-1699.
- [10] 袁成标, 肖守讷, 杨宝柱. 低地板列车吸能防爬装置的碰撞特性研究 [J]. 机车电传动, 2018 (5): 83-88.  
Yuan C B, Xiao S N, Yang B Z. Study on collision properties of anti-climbing energy absorption device for low-floor vehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2018 (5): 83-88.
- [11] 曾必强, 胡远志, 谢书港. 材料应变率强化效应对结构碰撞响应的影响 [A]. 第八届国际汽车交通安全学术会议论文集 [C]. 芜湖, 2010.  
Zeng B Q, Hu Y Z, Xie S G. Effect of strain rate strengthening on structural collision response [A]. Proceedings of the 8th International Forum of Automotive Traffic Safety [C]. Wuhu, 2010.
- [12] 吴鸿超, 梁增友, 冯阳, 等. 薄壁金属管在中高速冲击下的缓冲特性研究 [J]. 应用力学学报, 2016, 33 (2): 325-331.  
Wu H C, Liang Z Y, Feng Y, et al. Energy absorption characteristics of the expansion of thin-walled circular metal tubes by middle-speed and high-speed impact of a rigid cylinder [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33 (2): 325-331.
- [13] 陈书剑, 肖守讷, 朱涛, 等. 5083P-O 和 6008-T6 铝合金的应变率效应对缓冲器缓冲特性的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (11): 2665-2675.  
Chen S J, Xiao S N, Zhu T, et al. Influence of 5083P-O and 6008-T6 aluminum alloys strain rate effect on cushioning characteristics of thin-walled circular metal tube buffer [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (11): 2665-2675.
- [14] 吴章斌, 桂良进, 范子杰. AZ31B 镁合金挤压矩形管的轴向压溃试验与吸能特性分析 [J]. 工程力学, 2015, 32 (10): 183-190.  
Wu Z B, Gui L J, Fan Z J. Axial compression tests and energy absorption characteristics of extruded magnesium alloy AZ31B rectangular tubes [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (10): 183-190.
- [15] 冯悦, 肖守讷, 朱涛, 等. 考虑材料失效准则的吸能装置失效行为与碰撞特性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019,

- 50 (2): 487-496.
- Feng Y, Xiao S N, Zhu T, et al. Failure behavior and collision characteristics of energy-absorbing structures considering material failure criteria [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50 (2): 487-496.
- [16] Bhutada S, Goel M D. Study of effect of provision of cut-outs on axial collapse behaviour of circular aluminium tubes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 178 (1): 104599.
- [17] 梁海成, 于仁杰, 崔海涛. 挤压态 Mg-Gd-Y 镁合金的热变形行为 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59 (22): 332-342.
- Liang H C, Yu R J, Cui H T. Thermal deformation behavior of extruded Mg-Gd-Y magnesium alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59 (22): 332-342.
- [18] 张斌, 郭玲梅, 汪洋, 等. TA7 钛合金拉伸和压缩加载时的孪生变形行为 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31 (9): 2427-2435.
- Zhang B, Guo L M, Wang Y, et al. Deformation twinning behavior of TA7 titanium alloy under tension and compression [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31 (9): 2427-2435.
- [19] Holmen J K, Frodal B H, Hopperstad O S, et al. Strength differential effect in age hardened aluminum alloys [J]. *International Journal of Plasticity*, 2017, 99: 144-161.
- [20] Drucker D C. Relation of experiments to mathematical theories of plasticity [J]. *Journal of Applied Mechanics Transactions*, 1949, 16 (4): 349-357.
- [21] Yoon J W, Lou Y S, Yoon J H, et al. Asymmetric yield function based on the stress invariants for pressure sensitive metals [J]. *International Journal of Plasticity*, 2014, 56: 184-202.
- [22] Lou Y S, Yoon J W. Anisotropic yield function based on stress invariants for BCC and FCC metals and its extension to ductile fracture criterion [J]. *International Journal of Plasticity*, 2017, 99: 144-161.
- [23] Hill R. Theoretical plasticity of textured aggregates [J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1979, 85 (1): 179-191.
- [24] Lou Y S, Yoon J W. Lode-dependent anisotropic-asymmetric yield function for isotropic and anisotropic hardening of pressure-insensitive materials. Part I: Quadratic function under non-associated flow rule [J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 166: 103647.
- [25] Cazacu O, Plunkett B, Barlat F. Orthotropic yield criterion for hexagonal closed packed metals [J]. *International Journal of Plasticity*, 2006, 22 (7): 1171-1194.
- [26] Bridgman P W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture: With Special Emphasis on the Effect of Hydrostatic Pressure* [M]. New York: McGraw-Hill, 1952.
- +++++
- (上接第 39 页)
- [2] 王睿. 基于 Deform 软件的四通管道阀热锻过程模拟及模具优化设计 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (13): 177-180.
- Wang R. Hot forging process simulation and die optimization design of four way pipeline valve based on Deform software [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47 (13): 177-180.
- [3] 殷华英. 基于有限元模拟的四通阀体多向模锻工艺研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2022, 30 (2): 81-90.
- Yin H Y. Multi-directional die forging process for four-way valve body based on finite element simulation [J]. *Materials Science and Technology*, 2022, 30 (2): 81-90.
- [4] 高贵, 殷璟, 孙仲辉, 等. 空调冷冻阀阀体锻造成形工艺分析及优化 [J]. *锻压技术*, 2024, 49 (2): 24-30.
- Gao G, Yin J, Sun Z H, et al. Analysis and optimization on forging process for air conditioning freezing valve body [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2024, 49 (2): 24-30.
- [5] 姜雪鹏, 潘晴, 李毅波, 等. T 型三通多向模锻过程变形力预测方法 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (5): 113-125.
- Jiang X P, Pan Q, Li Y B, et al. Deformation force prediction method of tee valve in multi-directional die forging process [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (5): 113-125.
- [6] 刘乐, 殷银银, 金宏, 等. 行星齿轮架中空多向锻造工艺及模具设计 [J]. *制造技术与机床*, 2022 (6): 140-146.
- Liu L, Yin Y Y, Jin H, et al. Multi direction forging process and die design of hollow planetary carrier [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2022 (6): 140-146.
- [7] 顾文俊, 李俊杰, 赵坤民. 空排止回阀阀体多向模锻工艺分析 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (11): 81-85.
- Gu W J, Li J J, Zhao K M. Analysis of multi-directional die forging process for valve body of air vent check valve [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (11): 81-85.
- [8] 葛苏, 任杰, 张家伟. 带凸台无底缸体零件的多向模锻工艺研究 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53 (1): 143-147, 154.
- Ge S, Ren J, Zhang J W. Research on multi-ram die forging process of bottomless cylinder parts with lug boss [J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53 (1): 143-147, 154.
- [9] 陈学文, 杨喜晴, 王纳纳. GCr15SiMn 钢的温变形行为及 Hansel-Spittel 流变应力模型 [J]. *金属热处理*, 2018, 43 (5): 34-38.
- Chen X W, Yang X Q, Wang N N. Warm deformation behavior and Hansel-Spittel of constitutive model of GCr15SiMn steel [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43 (5): 34-38.
- [10] 高新, 任运来, 彭加耕. *多向模锻技术* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- Gao X, Ren Y L, Peng J G. *Multi-directional Forging Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [11] 叶星辉, 郑光文, 白凤梅, 等. 基于 DEFORM-3D 的压料油缸闭塞成形工艺可行性研究 [J]. *精密成形工程*, 2016, 8 (5): 131-136.
- Ye X H, Zheng G W, Bai F M, et al. Feasibility study on the forming technology of press cylinder block based on DEFORM-3D [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2016, 8 (5): 131-136.
- [12] 胡建军, 李小平. *Deform-3D 塑性成形 CAE 应用教程* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- Hu J J, Li X P. *Deform-3D Plastic Forming CAE Application Tutorial* [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.