

## 基于 SHPB 实验的挤压 AZ91D 镁合金动态力学行为数值模拟

周 霞<sup>1</sup>, 赵昌美<sup>1</sup>, 李 利<sup>1</sup>, 黄宏军<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 运载工程与力学学部 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;

2. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

**摘 要:** 使用霍普金森压杆技术对挤压 AZ91D 镁合金进行 3 种应变速率下的动态压缩实验, 基于实验数据的拟合确定了其动态压缩的 Johnson-Cook (J-C) 本构方程。采用拟合的 J-C 本构参数和 LS-DYNA 有限元软件对挤压 AZ91D 镁合金在 3 种应变速率下的 SHPB 实验进行了数值模拟, 根据模拟得到的入射波、反射波和透射波形计算得到各应变速率下完整的应力-应变曲线, 并与实验及拟合的应力-应变响应进行了对比。结果表明: 当应变速率在  $400\sim 1000\text{ s}^{-1}$  之间变化时, AZ91D 镁合金的应变率敏感性随应变率增大而增大; 基于 J-C 材料模型描述的 AZ91D 镁合金应变速率相关的应力-应变本构模型, 其数值模拟结果与拟合结果及实验结果基本吻合。

**关键词:** 挤压 AZ91D 镁合金; 动态压缩实验; 本构行为; 数值模拟

中图分类号: O347.3

文献标志码: A

## Numerical simulation of dynamic behavior of extruded AZ91D magnesium alloy based on SHPB experiment

ZHOU Xia<sup>1</sup>, ZHAO Chang-mei<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, HUANG Hong-jun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Materials Science and Technology, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Dynamic compression experiments of extruded AZ91D magnesium alloy at three different strain rates were carried out based on split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique, and a Johnson-Cook dynamic constitutive equation was obtained by fitting the experimental data. The SHPB dynamic compression of the material was simulated by using LS-DYNA software with the fitted Johnson-Cook constitutive parameters. Calculated incident, reflected, and transmitted waves were correlated with the stress-strain response of the extruded AZ91D sample using two-wave analytical method; the stress-strain curves at different strain rates obtained in the simulations were compared with the experimental and fitted stress-strain responses. The results show that the strain rate sensitivity of the extruded AZ91D Mg alloy increases with increasing the strain rate from  $400\text{ s}^{-1}$  to  $1000\text{ s}^{-1}$ . The numerical simulation results and fitted results based on the Johnson-Cook strain-rate dependent constitutive model for the extruded AZ91D Mg alloy are basically in agreement with the experimental results.

**Key words:** extruded AZ91D Mg alloy; dynamic compression experiment; constitutive behavior; numerical simulation

镁合金由于具有密度低、比强度高、比弹性模量大、散热好、消震性好等优点而被广泛应用于航空航

天、汽车、化工等领域<sup>[1-3]</sup>。AZ91D 镁合金是目前工业上应用最广泛的镁合金之一, 在其工作过程中除了

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272072); 辽宁省自然科学基金资助项目(201102040)

收稿日期: 2013-10-20; 修订日期: 2014-05-19

通信作者: 周 霞, 教授, 博士; 电话: 0411-84706782; E-mail: zhouxia@dlut.edu.cn

承受准静态荷载外,还不可避免地会受到爆炸、冲击等动态荷载的作用,为了更好地分析和设计这些镁合金结构,有必要进一步研究 AZ91D 镁合金在动态荷载下的力学行为。

目前,对 AZ91D 镁合金力学行为的研究主要集中在对其准静态压缩和拉伸力学性能方面<sup>[4-8]</sup>,较少涉及由低到高应变速率( $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ )范围的动态力学行为<sup>[9]</sup>。对 AZ91D 镁合金在高应变率时的动态力学行为的研究主要是通过霍普金森杆实验进行的,该实验技术可以宏观地研究镁合金的动态响应及其本构特性、强度特征和破坏机理。沙桂英等<sup>[10]</sup>和赵峰等<sup>[11]</sup>研究了 AZ91 镁合金的动态压缩应力应变行为、应变率效应及其破坏机理,发现镁合金 AZ91 在高应变率时表现出明显的应变率敏感性,材料动态破坏断口形貌与准静态破坏断口相比也有很大不同;廖慧敏等<sup>[12]</sup>对 AZ91D 压铸镁合金分别进行了静态和动态拉伸实验,研究了不同应变速率对 AZ91D 镁合金力学行为的影响规律,并确定了其 Johnson-Cook (J-C)本构关系;GUPTA 等<sup>[13]</sup>使用分离式 SHPB 压杆测试方法对 AZ91D 镁合金在中等应变速率下的压缩力学行为和反复压缩失效机理进行了试验分析,得出在中等应变速率下试样的失效表现为基体开裂和沉积相破碎,这两种失效机理导致试样在初始变形时的高能吸收;AHMAD 等<sup>[14]</sup>对铸造 AZ91D 镁合金在应变速率为  $300 \sim 1250 \text{ s}^{-1}$  之间的动态拉伸力学行为进行了实验研究,发现 AZ91D 镁合金在应变速率高于  $1000 \text{ s}^{-1}$  时具有较高的应变率敏感性,而当应变增大时应变率敏感性下降。进一步地,AHMAD 等<sup>[15]</sup>对铸造 AZ91D 镁合金在应变速率为  $300 \sim 1250 \text{ s}^{-1}$  之间的动态压缩力学行为进行了实验研究,并与 AM50 镁合金进行了对比,发现 AZ91D 镁合金的应变率敏感性随着应变率增大先增大后减小,而 AM50 镁合金在实验范围内具有正应变率敏感性,同一应变速率时 AZ91D 镁合金具有较高的应力。此外,毛萍莉等<sup>[16]</sup>还对挤压态 Mg-Gd-Y 稀土镁合金沿不同方向的动态压缩力学性能与失效行为进行了实验研究,发现随应变速率的提高,该材料具有正应变率强化效应,沿挤压方向材料的动态压缩性能较好,动态压缩载荷下的断裂呈准解理断裂特征,其变形方式表现为孪生和滑移共同作用。

尽管霍普金森杆实验是描述材料在高应变率下动态力学性能的重要方法,但除了实验测试手段以外,采用数值模拟方法可以较好地再现实验现象、减少实验量,验证实验获得的相关材料参数<sup>[17]</sup>。众所周知,同铸造 AZ91D 镁合金相比,挤压 AZ91D 镁合金由于

晶粒细化和沉积相的均匀分散,其强度和塑性得到很大提高。少数研究者<sup>[18-21]</sup>对其准静态力学性能和腐蚀性能进行了研究,但有关其动态力学性能的研究还鲜见报道<sup>[22]</sup>。本文作者采用 ANSYS-LS-DYNA 动力学分析软件,对 AZ91D 镁合金在 3 种不同应变速率下沿挤压方向的动态压缩本构行为进行数值模拟,分析镁合金应力的应变速率相关性,探讨 Johnson-Cook 模型描述一维应力状态下镁合金相关本构关系的可行性,同时与实验对比验证镁合金 SHPB 实验的有效性。

## 1 动态压缩力学性能实验及结果

将标准成分的 AZ91D 合金铸锭先在  $200^\circ\text{C}$  保温时效处理 2 h,再在  $410^\circ\text{C}$  固溶处理 22 h,然后随炉冷却直到室温,最后将热处理后的样品在  $380^\circ\text{C}$  时以 18.3:1 的挤压比和  $2.5 \text{ mm/s}$  的挤压速度进行热挤压,挤压 AZ91D 合金棒材横截面的原始金相显微组织如图 1 所示,其组织由等轴晶和细小的再结晶晶粒组成,平均晶粒度在  $10 \mu\text{m}$  左右。

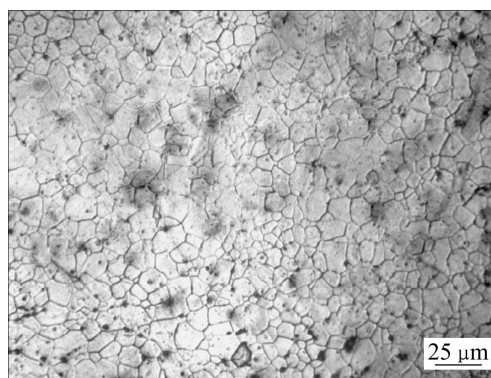


图1 挤压 AZ91D 镁合金的显微组织

Fig. 1 Microstructure of extruded AZ91D Mg alloy

用线切割从棒材上切取实验压缩试样,试样尺寸分为  $d 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  和  $d 8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  两种,大尺寸试样用于准静态实验,小尺寸试样用于应变率在  $400 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$  之间的动态实验。常温准静态实验在 Instron 材料试验机上进行,准静态压缩试验采用的加载应变率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$ 。常温动态压缩实验采用霍普金森压杆(SHPB)装置完成(见图 2),所选实验条件为 3 种应变率( $440$ 、 $760$  及  $1050 \text{ s}^{-1}$ )。上述所有试样的压缩方向都与挤压方向相同,并在进行压缩试验前,需将试样端面打磨光滑,以减少端面与压头的摩擦。

通过上述实验方法,获得的部分不同应变率下的实验结果见图 3。其中,试样中的应变率  $\dot{\epsilon}_s(t)$ 、应变

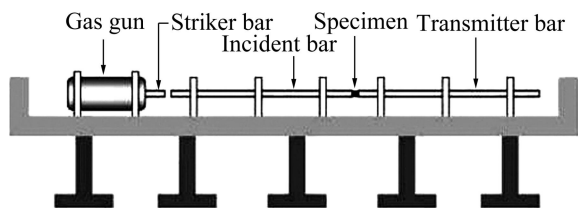


图 2 SHPB 实验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of SHPB system

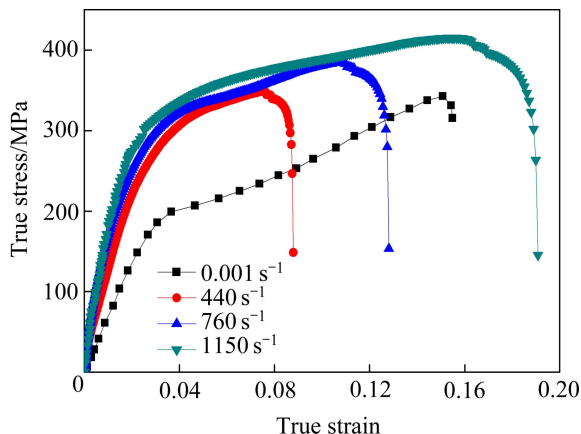


图 3 不同应变率下挤压 AZ91D 合金压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of extruded AZ91D alloy under different strain rates

$\varepsilon_s(t)$ 、应力  $\sigma_s(t)$  分别用下列公式计算:

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (2)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_t$  分别为入射杆上和透射杆上应变片测得的应变值;  $C_0$  为压杆波速;  $A_s$  和  $l_s$  分别为复合材料试件的横截面积和试验段长度;  $E$  和  $A$  分别是压杆的弹性模量和横截面积。

由图 3 可以看到, 在实验中由于采用波形整形器, 实验获得的应力-应变曲线比较光滑, 其动态下的屈服极限最大可达 170 MPa。与挤压 AZ91D 在准静态下的压缩力学性能相比, 当应变率由  $400 \text{ s}^{-1}$  至  $1000 \text{ s}^{-1}$  变化时, 材料的塑性流变应力呈逐渐上升趋势, 且随着应变的增大而增大, 该材料在常温下显示出正应变率效应和应变硬化效应, 且其在高应变速率下的应力均高于准静态时的应力。

## 2 Johnson-Cook 本构拟合

Johnson-Cook 强度模型的简单形式包含了应变率和温度效应的影响, 并且可以对金属材料的本构关系给出比较理想的预测。本文作者尝试在 J-C 强度模型的基础上描述 AZ91D 镁合金的常温动态压缩力学行为, J-C 模型表达式如下:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (4)$$

该模型包含了  $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$  这 5 个参数, 需要通过实验来确定, 公式中  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$  是通过参考应变率  $\dot{\varepsilon}_0$  无量纲化的应变率, 取  $\dot{\varepsilon}_0$  为  $1 \text{ s}^{-1}$ 。  $T^*$  为无量纲化的温度:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (5)$$

式中:  $T_r$  为室温;  $T_m$  为材料的熔点。Johnson-Cook 模型在温度从室温到材料熔点温度的范围内都是有效的。本实验中有有限元模拟不考虑温度的影响, 即  $T^*$  值为零。

结合挤压 AZ91D 镁合金静动态压缩实验下应力-应变曲线的特征, 拟合出挤压 AZ91D 的 Johnson-Cook 本构关系, 拟合结果见式(6):

$$\sigma = (164 + 343\varepsilon^{0.283})(1 + 0.021 \ln \dot{\varepsilon}) \quad (6)$$

## 3 SHPB 实验的有限元模拟

### 3.1 有限元模型与网格划分

有限元模型的建立主要参考 SHPB 实验装置, 子弹、入射杆、透射杆、试样均为圆柱体, 且共轴。数值模型对设备和试件尺寸进行了简化, 子弹长度为 2 cm, 入射杆长度为 100 cm, 透射杆长度为 80 cm, 子弹、压杆的直径均为 2.5 cm, 试件长度为 1.5 cm, 直径为 2 cm。计算单元使用 8 节点六面体单元 3Dsolid164, 该单元可用于三维的显式结构实体, 节点在 X、Y、Z 方向有平移、速度和加速度的自由度。因为系统为对称结构, 为了减少计算量, 模拟采用 1/4 有限元模型。采用外圆内方的方式进行网格划分, 由于子弹的网格划分精度对计算结果影响很大, 故本模拟中对子弹的网格进行了细分, 子弹的单元边长为 0.67 cm, 压杆的单元边长为 1 cm, 试件单元边长为

0.05 cm。图 4 和图 5 所示分别为计算几何模型和有限元网格模型, 有限元模型单元与节点数如表 1 所列。

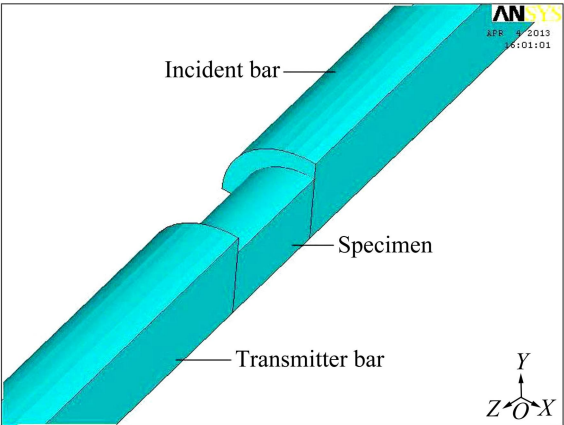


图 4 SHPB 几何模型图  
Fig. 4 Geometric model of SHPB

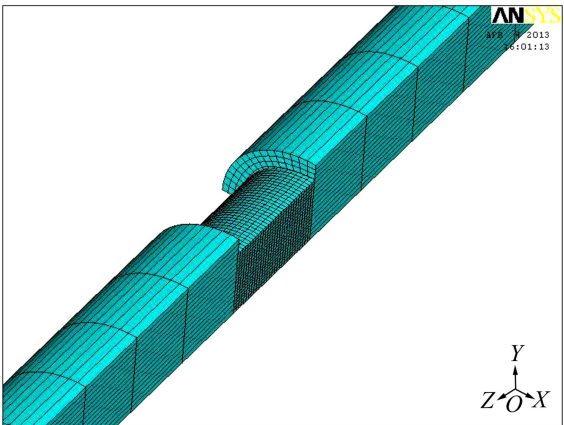


图 5 SHPB 有限元网格模型  
Fig. 5 Finite element mesh model of SHPB

表 1 SHPB 有限元模型单元及节点数

Table 1 Unit and node numbers of finite element model for SHPB

| Unit            | Unit number | Node number |
|-----------------|-------------|-------------|
| Striker         | 5760        | 6727        |
| Compressive bar | 34560       | 39494       |
| Specimen        | 9000        | 10261       |

3.2 材料属性和边界条件

子弹和压杆均采用线弹性钢材料模型, 其密度为  $7900\text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $210\text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.3$ , 试件采用 Johnson-Cook 材料模型以及 Gruneisem 状态方程来描述其动态响应过程。镁合金的密度为  $1820\text{ kg/m}^3$ , 常温下弹性模量为  $45\text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.35$ , J-C

本构参数如表 2 所示。

表 2 AZ91D 镁合金的 Johnson-Cook (J-C) 本构参数

Table 2 Johnson-Cook (J-C) constitutive model parameters for AZ91D magnesium alloy

| $A/\text{MPa}$ | $B/\text{MPa}$ | $n$   | $C$   | $m$ |
|----------------|----------------|-------|-------|-----|
| 164            | 343            | 0.283 | 0.021 | 0   |

对于边界条件的设置, 与  $X$  轴垂直的平面施加  $X$  方向的位移约束, 与  $Y$  轴垂直的平面施加  $Y$  方向的位移约束, 接触类型选择面面自动接触, 忽略各接触面之间的摩擦。依据 SHPB 试验, 采用直接对子弹设定加载速度的方式进行动态模拟。

3.3 数值模拟计算结果与讨论

为了确定计算时间, 必须满足入射杆应力波的输入端不能出现入射波和反射波的重叠这一条件<sup>[23]</sup>, 也就是在输入应力脉冲的时间内, 应力波的传播距离不能超过两倍的入射杆长度, 经过计算应力波的传播时间  $t_s \leq 400\text{ }\mu\text{s}$ , 因此, 计算时间取  $400\text{ }\mu\text{s}$  就可以得到完整的波形图。

选择入射杆中心位置附近的单元(15873), 其入射波与反射波应变波曲线如图 6 所示。在计算结果的入射杆及透射杆中点附近位置选取对称的两点(15873 单元和 32873 单元), 获得入射波和透射波应变波曲线, 如图 7 所示。根据该位置处的应变-时间曲线按两波法重构得到镁合金的应力-应变曲线。

当子弹入射速度为  $10\text{ m/s}$  时, 经过计算应变率为  $440\text{ s}^{-1}$ , 在时间  $t=186\text{ }\mu\text{s}$  左右时, 应力波还未到达试件, 试件上 Mises 应力基本为零, 如图 8 所示。在时间  $t=264\text{ }\mu\text{s}$  时, 经过应力波的反射和透射, 试件达到

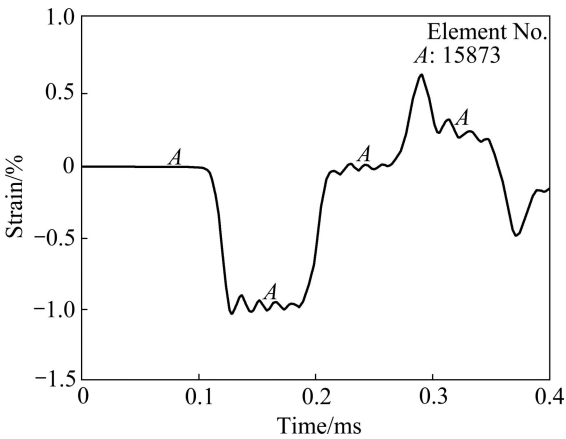


图 6 入射杆中心外围单元入射波与反射波  
Fig. 6 Incident and reflected strain waves at input bar

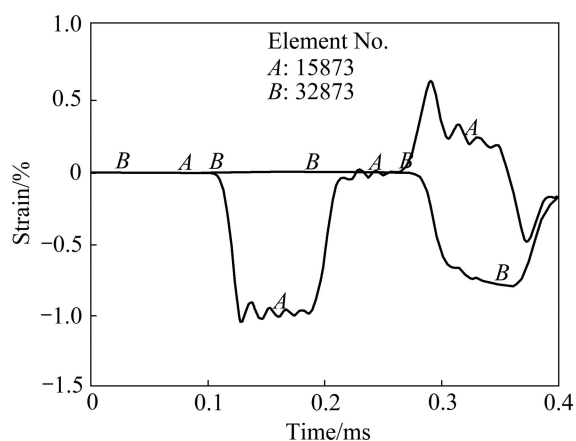


图 7 入射杆与透射杆上对称位置单元上的入射与透射波形  
Fig. 7 Incident and transmitted strain waves at symmetrical units of input and output bars

均匀变形阶段, 其单元上的应力如图 9 所示。随着应力波在压杆中的扩散, 试件进入卸载阶段, 如图 10 所示。

选择试件上同一横截面上的 5 个单元(见图 11), 其等效应力和应变随时间的变化曲线分别如图 11 和图 12 所示。

按照上述同样的计算方法可以分别计算子弹冲击速度分别为 15 和 20 m/s 时试件的动态力学响应, 最后根据模拟得到的波形图对不同子弹速度冲击时试件上的应力和应变进行计算便可以得到应力-应变曲线, 图 13 显示了子弹冲击速度分别为 10、15 及 20 m/s 或对应应变速率分别为 440.7、762.9 及 1101.4  $\text{s}^{-1}$  时试件应力-应变曲线的对比。

应变速率对试件的应力-应变曲线有很大影响, 应

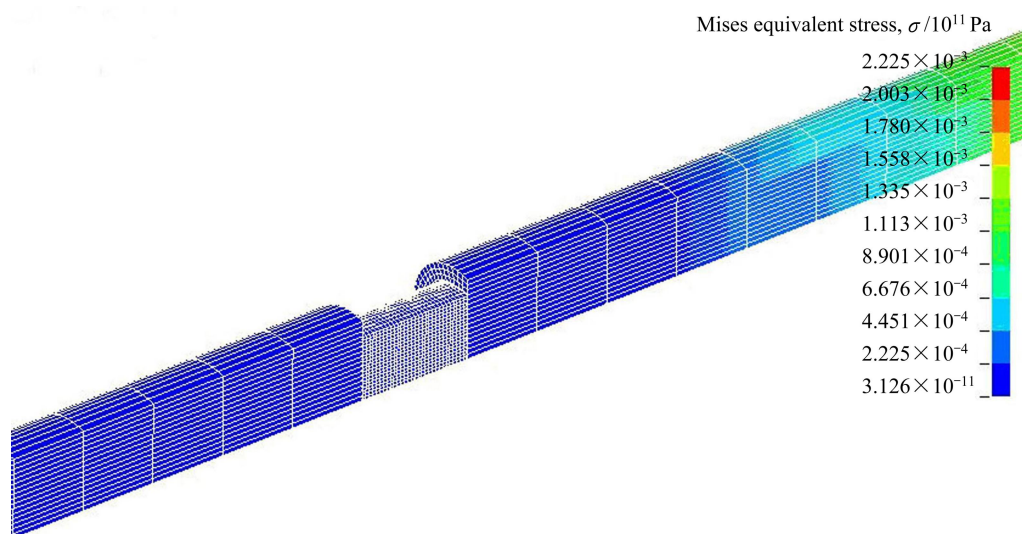


图 8 应力波前沿在 186  $\mu\text{s}$  到达试件时的 Mises 等效应力  
Fig. 8 Mises equivalent stress when stress wave reaching specimen at 186  $\mu\text{s}$

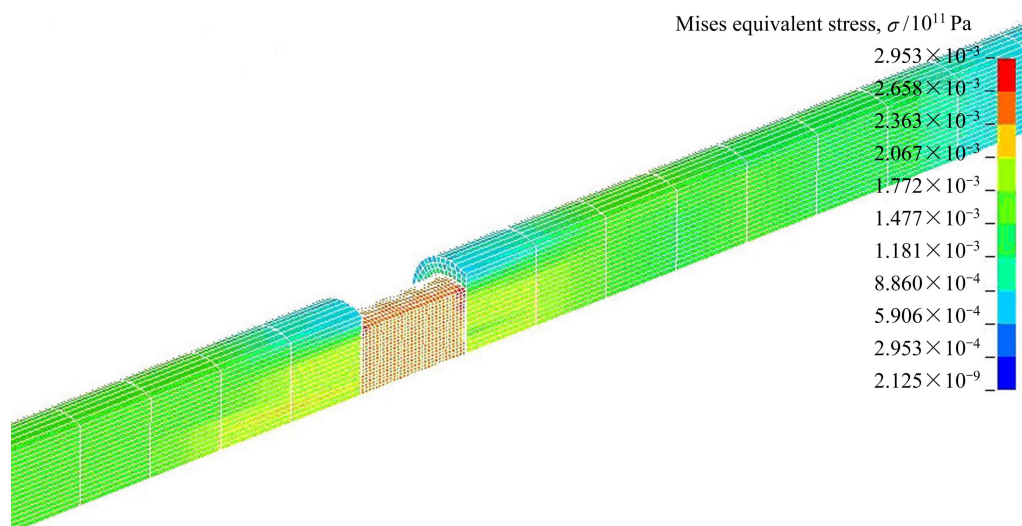


图 9 试件在 264  $\mu\text{s}$  经历均匀变形时的 Mises 应力分布  
Fig. 9 Mises stress distribution after specimen experiencing uniform deformation at 264  $\mu\text{s}$



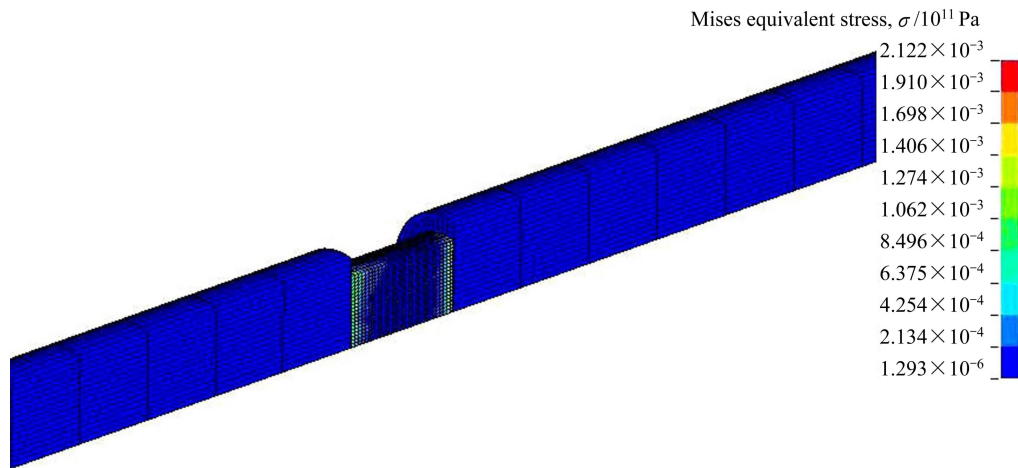


图 10 试件在 372  $\mu$ s 处于卸载阶段的 Mises 应力

Fig. 10 Mises equivalent stress during unloading period of specimen at 372  $\mu$ s

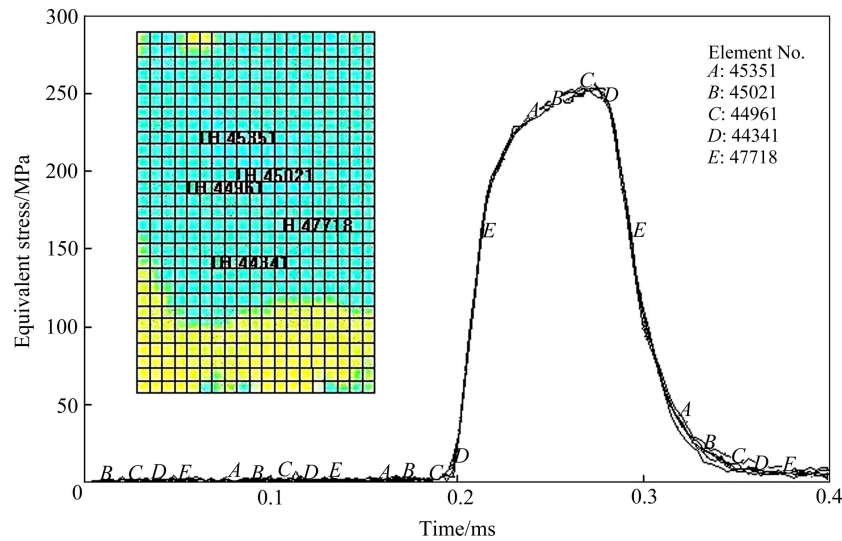


图 11 试件上不同单元的应力-时程曲线

Fig. 11 Stress vs time curves of different units on specimen

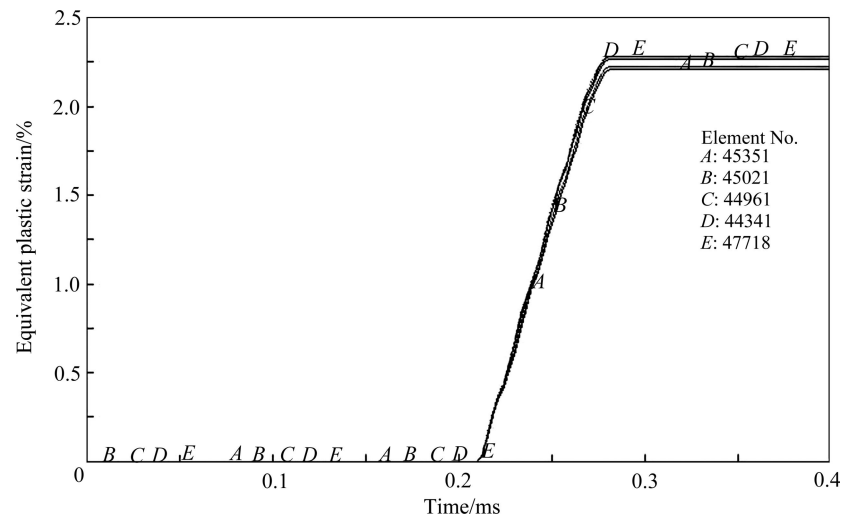


图 12 试件上 5 个单元等效应变随时间的变化曲线

Fig. 12 Equivalent strain vs time curves for five units on specimen

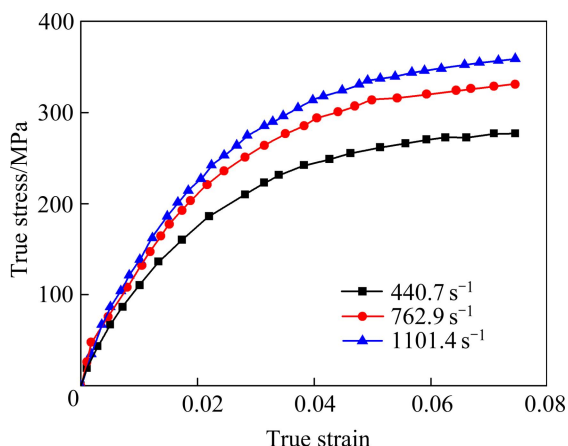


图 13 3 种应变率下试件的应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curves for specimen under three kinds of strain rates

变率越高, 试件的变形越大, 产生的应力也越大。为了验证数值模拟的有效性, 将子弹入射速度为 20 m/s 即冲击速率为  $1101.4 \text{ s}^{-1}$  时的数值模拟结果、拟合数据及试验结果进行了对比, 结果如图 14 所示。可以看出, 使用 Johnson-Cook 本构模型来模拟挤压 AZ91D 镁合金在受到动态压缩荷载时的力学响应是合理的。

从拟合结果来看, 在中等应变大小情况下, 数值模拟结果与实验结果以及基于 Johnson-Cook 本构模型的拟合结果吻合得较好。但是在应变比较大时, 因材料的应变率效应和温度效应耦合在一起, 采用解耦的 Johnson-Cook 模型描述材料的应变率效应将会存在一定的不足。

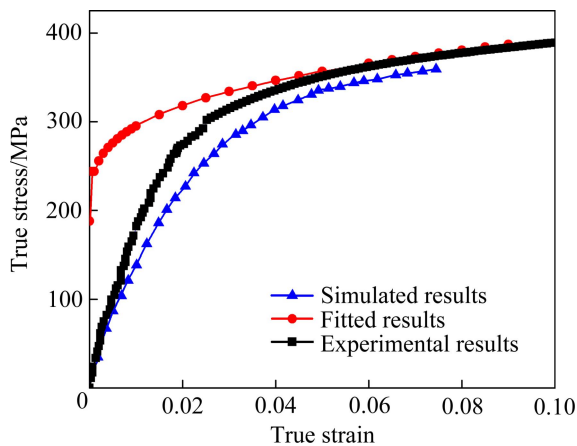


图 14 数值模拟结果与实验及拟合结果的比较

Fig. 14 Comparison among numerical simulation, experimental and fitted results

## 4 结论

1) 在  $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内对挤压

AZ91D 镁合金进行了压缩实验, 获得了其在不同应变率下的压缩应力-应变数据, 且基于实验拟合了该挤压合金的 Johnson-Cook 本构关系表达式。发现挤压 AZ91D 镁合金在室温应变率条件下, 随着应变率增加表现出较强的应变率强化效应, 其动态塑性流变应力均高于准静态时的应力。挤压镁合金较好的动态压缩性能与镁合金变形后出现拉伸孪晶导致二次硬化有关。

2) 在实验基础上, 建立了挤压镁合金试样 SHPB 压缩实验的有限元模型, 模拟分析了应变率在  $400 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$  范围内的压缩应力-应变行为, 模拟结果、拟合结果与实验结果基本一致, 研究结果为金属高应变率力学行为的研究提供了重要的手段和理论指导。

## REFERENCES

- [1] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium: Properties-applications-potential[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 302(1): 37-45.
- [2] HONO K, MENDIS C L, SASAKI T T, OHISHI K. Towards the development of heat treatable high-strength wrought Mg alloys[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(7): 710-715.
- [3] ISHIHARA S, TANEGUCHI S, SHIBATA H, GOSHIMA T, SAIKI A. Anisotropy of the fatigue behavior of extruded and rolled magnesium alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 50: 94-100.
- [4] LI R G, XU Y, QI W, AN J, LU Y, CAO Z Y, LIU Y B. Effect of Sn on the microstructure and compressive deformation behavior of the AZ91D aging alloy[J]. Materials Characterization, 2008, 59(11): 1643-1649.
- [5] KIM B H, LEE S W, PARK Y H, PARK I M. The microstructure, tensile properties, and creep behavior of AZ91, AS52 and TAS652 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 493(1/2): 502-506.
- [6] MAHMUDI R, KABIRIAN F, NEMATOLLAHI Z. Microstructural stability and high-temperature mechanical properties of AZ91 and AZ91+2RE magnesium alloys[J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 2583-2589.
- [7] NAMI B, RAZAVI H, MIRDAMADI S G, SHABESTARI S G, MIRESMAEILI S M. Effect of Ca and rare earth elements on impression creep properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(8): 1973-1982.
- [8] SHAHZAD M, QURESHI A H, WAQAS H, Rafi-ud-din. Influence of pre- and post-extrusion heat treatments on microstructure and anisotropy of mechanical properties in a Mg-Al-Zn alloy[J]. Materials and Design, 2013, 51: 870-875.

- [9] 杨勇彪, 王富耻, 谭成文, 才鸿年. 镁合金动态力学行为研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(3): 71-73.  
YANG Yong-biao, WANG Fu-chi, TAN Cheng-wen, CAI Hong-nian. Research progress in dynamic mechanical properties of magnesium alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(3): 71-73.
- [10] 沙桂英, 徐永波, 于涛, 张修丽, 韩恩厚, 刘路. AZ91 镁合金的动态应力-应变行为及其应变率效应[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(4): 77-81.  
SHA Gui-ying, XU Yong-bo, YU Tao, ZHANG Xiu-li, HAN En-hou, LIU Lu. Dynamic stress-strain behavior of AZ91 magnesium alloy and its dependence on strain rate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(4): 77-81.
- [11] 赵峰, 李玉龙, 索涛, 黄卫东, 刘建睿. 高应变率下铸造镁合金 AZ91 的动态压缩性能及破坏机理[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(7): 1163-1168.  
ZHAO Feng, LI Yu-long, SUO Tao, HUANG Wei-dong, LIU Jian-rui. Dynamic compressive behavior and damage mechanism of cast magnesium alloy AZ91[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(7): 1163-1168.
- [12] 廖慧敏, 龙思远, 蔡军. 应变速率对 AZ91D 镁合金力学行为影响[J]. 材料科学与工程, 2010, 18(1): 120-123.  
LIAO Hui-min, LONG Si-yuan, CAI Jun. Influence of high strain-rate on the mechanical behavior of Mg-alloy AZ91D[J]. Materials Science & Technology, 2010, 18(1): 120-123.
- [13] GUPTA N, LUONG D D, ROHATGI P K. A method for intermediate strain rate compression testing and study of compressive failure mechanism of Mg-Al-Zn alloy[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(10): 103512.
- [14] AHMAD I R, WEI S D. Mechanical behaviour of magnesium alloy AZ91D using split hopkinson tensile bar (SHTB)[C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2010: 75222C-1-75222C-7.
- [15] AHMAD I R, WEI S D. Compressive properties of AM50 and AZ91D alloys using split hopkinson pressure bar[C]// Proc of SPIE, 2009: 7493.
- [16] 毛萍莉, 于金程, 刘正, 董阳, 席通. 挤压态 Mg-Gd-Y 镁合金动态压缩力学性能与失效行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 889-897.  
MAO Ping-li, YU Jin-cheng, LIU Zheng, DONG Yang, XI Tong. Dynamic mechanical property and failure behavior of extruded Mg-Gd-Y alloy under high strain rate compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(4): 889-897.
- [17] 王焕然, 谢书港, 陈大年, 俞宇颖, 刘国庆. 试论镁铝合金高应变率单轴压缩拟合本构关系的代入校核[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 179-183.  
WANG Huan-ran, XIE Shu-gang, CHEN Da-nian, YU Yu-ying, LIU Guo-qing. On the checking of fitted constitutive relation of an Mg-alloy under uniaxial compression at high strain rates[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 179-183.
- [18] ZHAO Z, CHEN Q, WANG Y, SHU D. Microstructures and mechanical properties of AZ91D alloys with Y addition[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 515(1/2): 152-161.
- [19] PARAMSOTHY M, CHAN J, KWOK R, GUPTA M. The overall effects of AlN nanoparticle addition to hybrid magnesium alloy AZ91/ZK60A[J]. Journal of Nanotechnology, 2012, Article ID 687306, doi:10.1155/2012/687306.
- [20] SONG D, MA A, JIANG J, LIN P, YANG D, FAN J. Corrosion behaviour of bulk ultrafine grained AZ91D magnesium alloy fabricated by equal-channel angular pressing[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 362-373.
- [21] 陈永哲, 柴跃生, 孙钢, 陈睿, 周俊琪, 张敏刚. AZ91D 镁合金棒材挤压过程的数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2011, 3(3): 10-14.  
CHEN Yong-zhe, CHAI Yue-sheng, SUN Gang, CHEN Rui, ZHOU Jun-qi, ZHANG Min-gang. Numerical simulation study of the extrusion process of AZ91D magnesium alloy bar[J]. Journal of Net Shape Forming Engineering, 2011, 3(3): 10-14.
- [22] SRIVATSAN T S, GODBOLE C, QUICK T, PARAMSOTHY M, GUPTA M. Mechanical behavior of a magnesium alloy nanocomposite under conditions of static tension and dynamic fatigue[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(2): 439-453.
- [23] LU J F, ZHUANG Z, SHIMAMURA K, SHIBUE T. Application of numerical simulation to SHPB test to investigate the dynamic compressive behavior of material with failure[J]. Key Engineering Materials, 2003, 243/244: 433-438.

(编辑 龙怀中)