DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0285-04

金属铍的压缩变形行为*

肖大武,邱志聪,巫祥超,何立峰
(中国工程物理研究院材料研究所,四川 江油 621908)

摘要:利用材料试验机及 Hopkinson 杆装置系统开展热等静压金属铍在不同温度下的静动态压缩力学行为研究,获得了温度、应变率对金属铍屈服强度和加工硬化行为的影响规律。结果表明:金属铍在压缩应力状态下呈现出良好的塑性,同时其力学性能具有显著的应变率敏感性与热软化效应,屈服强度和流动应力随应变率提高呈明显增大趋势,随着温度升高逐渐降低。同时,室温下其加工硬化行为随着应变增大表现为分段硬化特征,随温度升高则趋于理想塑性。最后,采用修正的 Johnson-Cook 本构模型对实验结果进行了拟合,模型计算结果与实验结果吻合较好。

关键词:固体力学;修正 Johnson-Cook 本构模型;材料试验机;SHPB;铍
中图分类号:O347 **国标学科代码**:1301575 **文献标志码**:A

金属铍具有中子散射截面大、吸收截面小、硬度高、模量高、比强高、热学性能良好等特性,因此被广泛应用于航空航天、军事工业、医疗设备、焊接技术等多个技术领域,如中子反射层,反应堆第一壁材料、中子慢化剂,航空航天结构部件、精密仪表、光学器件及 X 射线管窗口等。国外已开展大量金属铍的变形行为研究,而国内开展的相关研究较少,且主要集中在常温静态拉伸性能方面,对其压缩力学行为尤其是动态压缩特性方面报道较少[1-9]。王零森等[1]研究了晶粒尺寸对铍静态拉伸力学性能的影响,发现随着晶粒度逐渐细化,铍材料的强度显著提高,而晶粒过粗或过细,延伸率均下降。许德美等[2-3]研究了组织缺陷对金属铍室温拉伸断裂行为的影响,其分析结果表明铍的"脆性"特征主要来源于杂质、片状晶体疏松和孔洞等初始缺陷,最关键因素是杂质的尺寸、间距和其在材料内部的分布形态。W. R. Blumenthal 等[4-5]对不同制备工艺下的铍进行了较为系统的研究。实验结果表明,铍的压缩应力应变响应具有较强的应变率敏感性和一定的热软化效应,并指出孪生是高应变率下铍变形的主要机制。D. W. Brown 等[6-8]系统开展了应变率对热压和轧制铍的力学性能和变形机理的研究工作,分析结果表明屈服强度对应变率不敏感,而加工硬化则受织构的影响具有较强的率相关性。T. Nicholas[9] 和 D. Breithaupt[10]研究了铍在常温 $10^2 \sim 10^3\ s^{-1}$ 应变率下的动态压缩性能,结果表明铍具有良好的塑性,应变增大至 0.25 时样品才发生断裂。由此可见,国外开展的相关研究工作重点关注制备工艺、温度、应变率等条件对金属铍滑移及孪晶变形机制的影响研究,获得描述金属铍变形织构行为的本构模型参数。国内开展的研究则主要围绕金属铍静态拉伸应力状态下的"脆性"行为的微观变形机制,对其压缩行为研究工作较少,尤其是动态加载下温度、应变速率对其变形行为的影响未见相关研究报道。

本文中利用材料实验机及 Hopkinson 杆装置系统开展了热等静压金属铍在不同温度、应变率下的压缩力学行为研究,获得金属铍压缩载荷下强度、塑性与实验温度、应变率之间的对应关系。并采用 Johnson-Cook 本构模型对获得的应力应变曲线进行拟合,模型计算结果与实验结果吻合较好。

1 实验材料及方法

铍在机加后表面会有较大的残余应力,为了消除残余应力对测量结果的影响[11],室温力学实验前

* **收稿日期**:2014-12-03; **修回日期**:2015-06-09
基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2013B0301048)
第一作者:肖大武(1983—),男,博士,副研究员,hopkinson@163.com。

对样品进行了蚀刻处理，蚀刻剂配方为：H_3PO_4，750 mL；H_2SO_4，30 mL；Cr_2O_3，71 mg；H_2O，200 mL。蚀刻方法为将铍试样放入酸洗液约 50 s 取出，用蒸馏水等清洗干净。

静态力学实验在 CMT5105 型材料试验机及其配置的高温真空炉中进行，高温炉温度控制精度为 ±3 ℃，真空度优于 1×10^{-2} Pa，试样在 1 h 内加热到规定温度，保温 15 min 后开始实验，应变率为 1.0×10^{-3} s^{-1}，测试温度范围为室温至 800 ℃。动态压缩实验采用∅10 mm 的 Hopkinson 杆装置。试样为∅5 mm×5 mm 的圆柱体，应变率范围为 $0.5\times10^{3}\sim2.5\times10^{3}$ s^{-1}，在常温下进行。

2 实验结果与分析

图 1 所示为铍在不同温度下的准静态压缩实验结果。由图 1 应力应变曲线可以看出，金属铍在室温至 800 ℃的温度范围内压缩变形具有良好的塑性。屈服强度和流动应力随实验温度升高而降低，加工硬化行为也随之降低。图 2 所示为不同固定应变下的流动应力随实验温度的变化。由图中可以看到，在室温至 200 ℃时，不同固定应变下流动应力均下降较快，高于 200 ℃时流动应力下降趋势变缓，呈线性下降特征。当实验温度高于 400 ℃时，不同应变下的流动应力值基本一致，这表明此时材料的塑性变形行为趋于理性塑性流动。

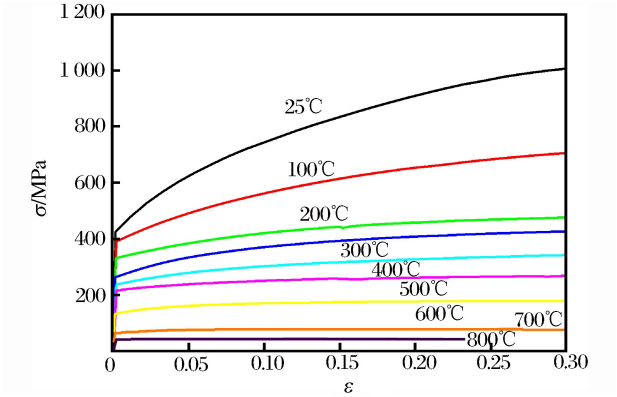


图 1 金属铍在准静态条件下应力应变关系

Fig. 1 Relation between stress and strain under quasi-static condition

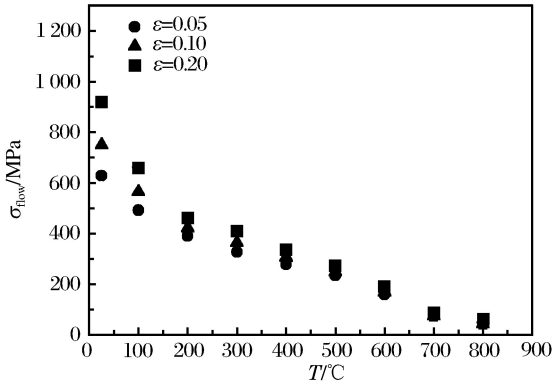


图 2 金属铍在准静态条件下流动应力随温度变化曲线

Fig. 2 Relation between flow stress and temprature under quasi-static condition

图 3 所示为铍的动态压缩实验结果。可以看出，铍的屈服强度和加工硬化行为随应变率增大而显著增大，在初始变形阶段，加工硬化行为呈现非线性特征，随变形量增大，转变为线性硬化。由文献[4]可知，准静态和动态加载下，金属铍的塑性变形控制机制有显著区别。与大多数对称性低、滑移系统少的密排六方晶系金属一样，由于晶体的取向不利于发生滑移，孪生成为铍塑性变形的重要方式。在初始变形阶段，变形机制由位错滑移控制，随着变形增大，位错滑移困难，通过孪生协调变形，尤其在动态加载过程中，晶粒内部将产生大量的孪晶，由于滑移与孪生机制的竞争导致了不同应变率、不同应变下金属铍屈服强度和加工硬化行为的显著区别。

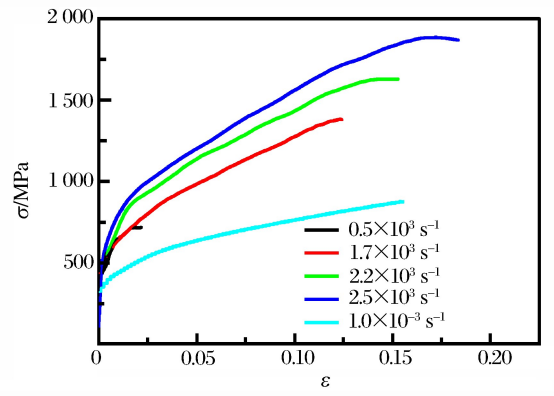


图 3 金属铍的动态压缩力学行为

Fig. 3 The dynamic compressive behavior of beryllium

3 本构模型

Johnson-Cook 模型是目前应用最广泛的本构模型之一，模型中将流动应力表述为应变硬化效应、

应变率效应和温度软化效应的乘积，方程的基本形式如下：

$$\sigma=(A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right)(1-T^{*m}) \tag{1}$$

式中：σ 为 Von-Mises 流动应力，ε_{p} 为等效塑性应变，A 为准静态下的屈服应力，B 为应变硬化系数，n 为应变硬化指数，$\dot{\varepsilon}_{0}$ 为参考应变率（可取准静态应变率），C 为应变率敏感系数，T^{*} 为温度相关项，具体表达式为 $(T-T_{\mathrm{r}})/(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{r}})$，$T_{\mathrm{r}}$ 和 T_{m} 分别为参考温度和熔化温度，一般取 T_{r} 为 300 K，m 为热软化系数。由式(1)可见，Johnson-Cook 本构模型忽略了材料变形历史的影响，即如果材料服从 Johnson-Cook 本构模型，则不同应变率下的应力应变曲线是相似的。

而由图 1～3 中的应力应变曲线可以看到，不同温度或应变率下铍的应力应变曲线呈发散趋势，传统的 Johnson-Cook 本构模型已不适用。因此，本文中采用一个修正的 Johnson-Cook 本构模型对实验数据进行拟合，在应变硬化项中增加屈服强度温度相关线性函数，同时参考 Zerrilli-Armstrong 本构模型中描述 hcp 晶体结构材料变形硬化的函数关系式，在幂指数应变硬化项中添加应变率指数硬化项和温度指数软化项，分别描述温度、变形历史对材料屈服强度和流动应力的影响，以及流动应力随应变率明显的增加趋势，其表达式为：

$$\sigma=[A(1-A_{1}T^{*})+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n}\mathrm{e}^{\alpha\dot{\varepsilon}}(B_{1}+B_{2}\mathrm{e}^{\beta T^{*}})]\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right) \tag{2}$$

和传统 Johnson-Cook 模型相比，修正模型中增加了 4 个参数。取准静态应变率 $10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}$ 为参考应变率，$T_{\mathrm{m}}=1\ 557$ K。本构拟合参数为：$A=424$ MPa，$B=1\ 010$ MPa，$A_{1}=1.487$，$B_{1}=0.107\ 3$，$B_{2}=0.885\ 4$，$n=0.485$，$\alpha=0.000\ 39$，$\beta=-13.83$，$C=0.015$。

采用修正模型计算结果与实验结果对比如图 4 所示，实线为采用修正 Johnson-Cook 本构模型的计算结果。可以看到，模型的计算结果与实验结果符合较好，修正后的 Johnson-Cook 本构模型能够较好地描述金属铍在不同温度、应变和应变率下的压缩变形行为。

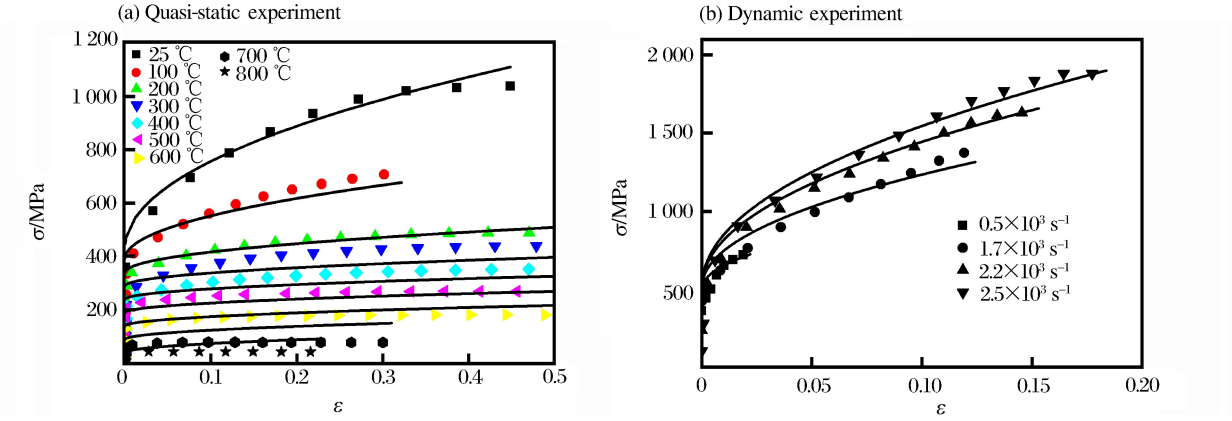


图 4　修正 Johnson-Cook 模型计算结果与实验结果对比

Fig. 4　Comparison of experimental results with calculated results by modified Johnson-Cook model

4　结　论

本文中研究了较宽温度范围和应变率下热等静压金属铍的压缩力学行为。结果表明铍的屈服强度和加工硬化行为随应变率的提高而显著增大，随温度的升高而降低。常温下其加工硬化行为在初始变形阶段呈现非线性特征，随变形增大转变为线性硬化。温度高于 400 ℃时，其变形行为趋于理性塑性流动。考虑温度、变形历史对材料屈服强度和加工硬化的影响，对 Johnson-Cook 模型进行了修正，修正后的本构模型预测结果和实验结果吻合较好。

参考文献：

[1]　王零森，钟景明，付晓旭，等. 晶粒尺寸对等静压铍材力学性能的影响[J]. 中南大学学报，1999，30(4)：395-397.
Wang Lingsen, Zhong Jingming, Fu Xiaoxu, et al. The influence of grain size on mechanical properties of isostati-

cally pressed beryllium materials[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 1999, 30(4): 395-397.

[2] 许德美,李峰,王东新,等. 组织缺陷对金属铍室温断裂行为的影响规律研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(6): 844-849.
Xu Demei, Li Feng, Wang Dongxin, et al. Effects of microstructure defects on fracture behavior of beryllium metal at room temperature[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(6): 844-849.

[3] 许德美,秦高梧,李峰,等. BeO 杂质形态与分布对金属铍力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(4): 769-776.
Xu Demei, Qin Gaowu, Li Feng, et al. Effects of morphology and distribution of BeO impurity on mechanical properties of metal beryllium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(4): 769-776.

[4] Blumenthal W R, Abeln S P, Cannon D D, et al. Influence of strain rate and temperature on the mechanical behavior of beryllium[C]// The Tenth American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. 1998.

[5] Blumenthal W R, Abeln S P, Mataya M C, et al. Dynamic behavior of beryllium as a function of texture[R]. Los Alamos National Laboratory, 1999.

[6] Brown D W, Beyerlein I J, Sisneros TA, et al. Role of twinning and slip during compressive deformation of beryllium as a function of strain rate[J]. International Journal of Plasticity, 2012, 29(2): 120-135.

[7] Brown D W, Almer J D, Clausen B, et al. Twinning and de-twinning in beryllium during strain path changes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559(1): 29-39.

[8] Sisneros T A, Brown D W, Clausen B, et al. Influence of strain rate on mechanical properties and deformation texture of hot-pressed and rolled beryllium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(20): 5181-5188.

[9] Nicholas T. Mechanical properties of structural grades of beryllium at high strain rates[R]. Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, 1975.

[10] Breithaupt D. Dynamic compressive strain rate tests on two types of beryllium[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1983.

[11] 张鹏程,田黎明. 车削加工对铍组织与性能的损伤[J]. 稀有金属, 2001, 25(2): 90-93.
Zhang Pengcheng, Tian Liming. Effects of lathe on microstructure and mechanical properties of beryllium[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2001, 25(2): 90-93.

Compressive deformation behaviors of beryllium

Xiao Dawu, Qiu Zhicong, Wu Xiangchao, He Lifeng

(*Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Jiangyou* 621908, *Sichuan, China*)

Abstract: The quasi-static and dynamic compression behavior of beryllium was investigated by using MTS and SHPB at different temperatures. Investigated results show that beryllium exhibits excellent plasticity under compression. Sensitive to the changes in temperature and strain rate, the yield point and flow stress of beryllium have an marked tendency to increase with the increase of the strain rate, and to decrease gradually with the rise of temperatures. At the same time, the work hardening behavior of beryllium exhibits a piecewise hardening feature as the strain increases at room temperature, and tends to become smooth as the temperature rises. Finally, a modified Johnson-Cook constitutive model was developed to predict the deformation behavior of beryllium over a wide range of temperatures and strain rates. The calculation results of the model are in good agreement with those achieved from the experiment.

Key words: solid mechanics; modified Johnson-Cook constitutive model; material testing machine; SHPB; beryllium

(责任编辑 王易难)