

## 高速率成形中材料本构关系的研究进展\*

李 风

(武汉理工大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430070)

**摘 要:**在分析高速率成形中材料成形性影响因素的基础上,阐述了高速率成形中材料本构关系的研究进展.指出应变速率界限决定高速率成形中材料本构关系的变化,工件几何外形对材料本构关系有较大地影响.介绍了塑性动力分析在高速率成形中材料本构关系中的应用.

**关键词:**高速率成形;本构关系;工件几何外形;应变速率;进展

**中图分类号:** TG111.4

**文献标识码:** A

高速率成形是指在极短的时间(微秒)内,通过空气、水等介质的高压冲击波瞬间作用于工件之上,使工件以很高的速率变形或贴模的一种成形方法.较之传统的金属成形工艺,高速率成形最大的特点是成形压力大、压力作用时间短、成形速率高、载荷及能量高,比准静态成形方法的成形速率高100~1000倍,工件受惯性和动力效应的影响显著.在高成形速率下金属变形程度增加,这种因高成形速率而使成形性提高的特征称为“高塑性”(Hyperplasticity)<sup>[1]</sup>.典型的高速率成形工艺有电磁成形、电液成形和爆炸成形<sup>[2]</sup>,其中以电磁成形应用前景最为广阔.

材料的本构关系是反应材料变形特性的物理模型,是确定材料成形方法及进行数值模拟的基础数据.只有获得高速率成形中材料的本构关系,建立材料的本构方程,才能确定高速率成形方法.所以,高速率成形中材料的本构关系引起了研究者的极大关注,正日益成为研究的热点.

本文在归纳高速率成形中材料成形性提高的基础上,综述了高速率成形中材料本构关系的研究进展,总结了工件几何外形对高速率成形中材料本构关系的影响,并介绍了塑性动力分析在高速率成形的材料本构关系中的应用.

### 1 高速成形中材料本构关系的研究

针对高速率成形中材料的变形特性和本构关系,美国、法国、日本、中国和俄罗斯的学者进行了大量的研究.研究成果主要有两个方面:一是高速率成形中材料成形性提高的原因、影响因素及失效模式分析,这是建立高速率成形中材料本构关系的理论基础;二是高速率成形中材料本构模型的建立及材料本构关系的分析.

#### 1.1 材料成形性提高的影响因素

影响高速率成形中材料成形性提高的主要因素为惯性、材料本构关系的变化和模具冲击.惯性对高速率成形中材料成形性的影响主要是通过稳定变形、抑制颈缩实现的,是材料成形性提高的决定性因素,工件的几何外形对材料成形性提高有显著的影响.美国 Balanethiram<sup>[3]</sup> 和 Shenoy<sup>[4]</sup> 等人的研究结果表明,惯性影响高速率成形中工件的颈缩生长模式. Hu<sup>[5]</sup> 采用一维动态数值对板材的拉伸和环件胀形进行模拟发现,超过一定的成形速率后,材料成形性得到提高,且总变形量增加. Seth<sup>[6]</sup> 对不同截面的环件进行了电磁胀形实验,结果表明:环件高径比越大,均匀变形和总变形越大;成形速率越大,出现颈

收稿日期:2008-02-25

\* 基金项目:塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室资助项目(05-03)

作者简介:李风(1984—),男,山东菏泽人,硕士研究生.

缩的频率越高;一定速率下,高径比越大,出现颈缩的频率越低。综上所述,成形速率为惯性作用的临界参数,工件的几何外形如厚径比、高径比则对材料成形性的提高有显著影响。

材料本构关系的改变也是影响材料成形性提高的因素之一,在高速应变率下材料的应变率敏感度显著增加<sup>[7]</sup>。应变率的大小是决定材料成形性提高的关键因素。当应变率低于  $10^4 \text{ s}^{-1}$  时,惯性对材料成形性的提高起决定性作用;当应变率达到  $10^4 \text{ s}^{-1}$  时,应变率敏感度及电磁成形中所获得的高应变率对材料成形性的提高起决定性作用<sup>[8]</sup>。

模具的冲击可以使高速率成形中材料成形性极大地提高,通过工件和模具的高速冲击产生的惯性,抑制颈缩和实现模具的挤压减薄<sup>[9-11]</sup>。

## 1.2 材料本构关系的研究进展

高速率成形中材料本构关系是高速率成形研究中的重要内容,取得了大量的研究成果。研究的主要方向为成形速率对应变率的影响及应变率大小对材料本构关系的影响是否起决定性作用。

美国学者 Balanethiram<sup>[12-13]</sup> 及 Altynova<sup>[14]</sup> 等人在电液成形和电磁环件胀形实验中,对经高速率成形和准静态成形后不同材料的硬度进行了比较,研究了成形速率对材料本构关系的影响。研究结果表明,在高速率成形下材料的硬度与传统低速率准静态成形下的差异不大,说明应变硬化和应变率敏感度的增加不是高速率成形中材料本构关系变化的首要因素。

高速率成形中应变率对材料本构关系的影响是不可忽略的因素之一。Gorham<sup>[15]</sup> 通过高应变率的压缩试验发现,当应变率敏感系数增加时,应变率值与工件尺寸有很大关系,但并不完全表示是材料本构关系发生了很大变化,可能是惯性的作用导致了此现象。Dioh<sup>[16]</sup> 等人在高应变率下利用分离式 Hopkinson 压杆进行压缩试验。试验结果显示,高应变率下流动应力和工件厚度有关,较厚工件的流动应力明显比薄工件的高。Michel<sup>[17]</sup> 等人在铜板拉伸和液压胀形试验中观测到,工件几何形状对材料的本构关系有较大的影响。

Oosterkamp<sup>[18]</sup> 在单轴压制试验和分离式 Hopkinson 压杆试验中,对不同厚度工件的本构关系进行测试分析,并在考虑应力波传播的基础上利用数

值模拟与试验结果进行了比较。结果显示,高应变率下应变率敏感度的变化与工件几何参数有很大关系,应为应变波传播所致。

法国学者 Brosius<sup>[7-8]</sup> 采用在线测量和有限元迭代相结合的方法,研究了电磁胀形铝合金 6061 圆环颈缩现象,并得出铝合金高速率变形时屈服应力、塑性应变和应变率之间的关系。研究结果表明,材料的应变率敏感度及材料在电磁成形过程中所获得的高应变率( $10^4 \text{ s}^{-1}$  级)是影响材料本构关系变化的主要因素。

法国学者 Michel<sup>[17]</sup> 采用胀形高速率成形方法,对不同厚度、不同大小的 CuZn36 平板工件进行实验,引入工件尺寸效应因子,在 Swift 本构模型(式 1)基础上建立了新的高速率成形中材料本构关系的模型(式 2)。二者可以用于描述不同尺寸工件的高速率成形中材料本构关系。另外,高速率成形中工件温度的升高也可能对材料本构关系的改变有一定影响,温度的软化效应可能引起工件流动应力和应变率的下降,从而影响材料本构关系的变化。

$$\sigma_K = (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_K F(\lambda, \bar{\epsilon}) \quad (2)$$

以前人们认为,材料本构关系的改变主要是高应变率下的应变率敏感度发生了改变,在  $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  应变率下大部分金属的流动应力和应变率敏感度都明显增加,并认为是应力波的传播导致本构关系的改变,但是缺少相关实验数据的证实。

目前,利用最新电磁胀管和胀环实验结果<sup>[19]</sup> 及逆推法,能揭示材料本构关系的改变。Pierre L'Eplattenie<sup>[14]</sup> 在电磁胀管实验中应用 ls-dyna 动力分析及 Johnson-Cook 本构模型,预测了高应变率下材料的流动应力,同时考虑了惯性和应变率的影响。结果显示,高成形速率使材料的流动应力大大增加,材料本构关系的改变是存在的。密歇根大学的 J. D. Thomas 和 N. Triantafyllidis 博士<sup>[20]</sup> 采用弱光栅分析双轴拉伸板料,建立了电磁成形极限图。虽然建立的成形极限图与实验结果相符,但是超过了实际成形极限,只适合电磁成形的第一个放电波形。说明高速率成形中材料本构关系发生了改变,惯性是不可忽略的影响因素。

综上所述,在高应变率下应变率敏感度明显增加,对热软化效应有一定影响,材料本构关系的改变是材料成形性提高的重要因素。高速率成形中获得的高应变率很大程度上受工件几何外形的影

响,材料本身的应变速率敏感度和工件的几何外形决定了高速率成形中材料本构关系的变化;应变速率界限决定着材料本构关系的变化,对成形性提高起决定性作用。

## 2 塑性动力分析在材料本构关系中的应用

在高速率成形中材料变形时间短,载荷以脉冲形式为主,惯性对成形性有很大影响,变形中有应力波的传播。基于以上变形特点,高速率成形属于塑性动力分析的范畴。运用塑性动力学分析高速率成形的关键问题,是获得易于计算并能正确代表材料动力性能的本构关系。

通过塑性动力分析建立动态本构方程的途径有两种<sup>[21]</sup>:一是在静态本构的基础上,加入成形性影响因子和应变率效应因子,得到修正的动态本构模型;另一种是从微观机理如位错、孪晶,从能量角度建立动态本构模型。法国学者 Michel<sup>[17]</sup>在 Swift 本构模型基础上,计入几何因子建立了新的本构关系模型。Milinari<sup>[22]</sup>在分析不同成形速率下材料微观结构的基础上,建立了高应变速率下材料本构关系。

高速率成形中材料本构关系的确定,需要运用塑性动力分析建立完整的材料变形的几何方程、运动方程,综合边界条件、初始条件和材料连续条件,在已有的本构模型上建立修正的材料动态本构关系。

## 3 结 语

综上所述,高速率成形中材料的成形性有较大提高,材料的本构关系发生一定的变化,惯性是材料成形性提高的主要因素;工件的几何外形对应变速率有很大的影响,在一定程度上决定着高速率成形中材料本构关系的变化;应变速率界限对材料本构关系及材料成形性的提高有一定的影响。

虽然有关高速率成形已经取得了众多研究成果,但是高速率成形中材料本构关系的研究仍然不够完善,还缺乏高速率成形中不同材料的本构方程,以指导高速率成形工艺。所以,高速率成形中材料本构关系的研究可以集中在以下几个方面:(1)利用 LS-OPT 优化工具分析应变速率对材料本构关系的影响,消除惯性作用对材料本构关系的影响,单独考

察高速率成形中材料本构关系的变化;(2)引入工件几何因子等因素,建立高速率成形中各种材料本构关系的模型,进而得到高速率本构方程;(3)分析高速率成形中不同应变速率界限下材料本构关系的模型;(4)完善塑性动力分析在高速率成形中材料本构关系中的应用,运用材料塑性变形微观机制分析高速率成形中材料本构关系。

### 参考文献:

- [1] 李春峰. 高能率成形技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2001: 1-5.
- [2] BALANETHIRAM V S, HU X, ALTENOVA M, et al. Enhanced formability at high rates[J]. J Mater Process Technol, 1994, 45: 595-600.
- [3] BALANETHIRAM V S, DAEHN G S. Increased forming limits at high workpiece velocity[J]. Scripta Materialia, 1994, 30: 5-15.
- [4] SHENOY V B, FREUND L B. Necking bifurcations during high strain rate extension[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999, 47: 2209-2233.
- [5] HU X, DAEHN G S. Effect of velocity on flow localization in tension[J]. Acta Mater, 1996, 44: 1021-1033.
- [6] SETH M, DAEHN G S. Effect of aspect ratio on high velocity formability of aluminum alloy[J]. Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries, 2005(3): 59-64.
- [7] FOLLANSBEE P S, KOCKS U F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of mechanical threshold stress as an internal state variable[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36 (1): 81-93.
- [8] BROSIUS A, BEERWALD C, KLEINER M. Determination of flow curves at high strain rates using the electromagnetic forming process and an iterative finite element simulation scheme[J]. Journal De Physique, 2003, 110(4): 537-542.
- [9] SETH M. High velocity formability of high strength steel sheet [D]. Columbus: The Ohio State University, 2002.
- [10] SETH M, VOHNOUT V J, DAEHN G S. Formability of steel sheet in high velocity impact[J]. J of Materials Processing Technology, 2005, 168: 390-400.
- [11] IMBERT J M, WINKLER S L, WORSWICK M J, et al. The effect of tool/sheet interaction on damage evolution in electromagnetic forming of al alloy sheet [J]. J of Engg Mat Tech, 2005, 127: 45-153.
- [12] BALANETHIRAM V S. Enhanced formability of

- sheet metals at high velocity [D]. Columbus: The Ohio State University, 1996.
- [13] BALANETHIRAM V S, DAEHN G S. Enhanced formability of interstitial free iron at high strain rates [J]. *Scripta Materialia*, 1992, 27: 17-83.
- [14] ALTYNNOVA M. The improved ductility of aluminum and copper rings by electromagnetic forming technique [D]. Columbus: The Ohio State University, 1995.
- [15] GORHAM D A. Effect of specimen dimensions on high strain rate compression measurements of copper [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1991, 24: 1489-1492.
- [16] DIOH N N, LEEVERS P S, WILLIAMS J G. Thickness effect in split hopkinson pressure bar test [J]. *Polymer*, 1993, 34: 4230-4234.
- [17] MICHEL J F, PICART P. Size effects on the constitutive behavior for brass in sheet metal forming [J]. *J of Materials Processing Tech.* 2003, 141: 439-446.
- [18] OOSTERKAMP L D, IVANKOVIC A, VENIZELOS G. High strain rate properties of selected aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, A278: 225-235.
- [19] SETH M. High velocity formability and factors affecting [D]. Columbus: The Ohio State University, 2006.
- [20] THOMAS J D, SETH M, DAEHN G S, et al. Forming limits for electromagnetically expanded aluminum alloy tubes [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55 (8): 2863-2873.
- [21] 杨桂通. 塑性动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 20-55.
- [22] MOLINARI A, RAVICHANDRAN G. Constitutive modeling of high-strain-rate deformation in metals based on the evolution of an effective microstructural length [J]. *Mechanics of Materials*, 2005, 37: 737-752.

## Research progress of material constitutive behavior in high velocity forming

LI Feng

(School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Based on the analysis of factors influencing material formability in high velocity forming (HVF), the state-of-the-art research on constitutive behavior of HVF was summarized. It concluded that the change of constitutive behavior was determined by the level of strain-rate and effected by the geometric shape of workpieces. And the application of plastic dynamic analysis was also introduced in the research of material constitutive behavior in high velocity forming process.

**Key words:** high velocity forming; constitutive behavior; geometric shape of workpieces; strain rate; progress