

金属相变超塑性的研究进展

谢文玲^a, 周顺勇^b, 郭翠霞^a, 李秀兰^a

(四川理工学院 a. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室;b. 人工智能四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要:综述了国内外金属相变超塑性的研究现状,包括金属相变超塑性的实现条件、影响因素和太合金变形机制,提出了相变超塑性的研究方向。

关键词:相变超塑性;影响因素;变形机制

中图分类号:TG142.7

文献标志码:A

引言

超塑性现象于 1912 年开始有所报导^[1],至今已超过百年。“超塑性”这一名词是在 1945 年,由前苏联科学家 Andrei A. Bochrar 和 Zojia A. Sviderskaj^[2] 等发现 Zn-Al 共析合金具有异常高的延伸率而提出的。1964 年,美国的 Backofen^[3] 对 Zn-Al 合金进行了系统的研究,并提出了应变速率敏感性指数 m 值这个新概念,为超塑性研究奠定了基础。已发现的超塑性材料很多,包括铝合金、镁合金、钛合金、超高碳钢、金属间化合物、金属基复合材料、陶瓷材料等。从上世纪六十年代起,各国学者在超塑性材料、力学、机理、成形等方面进行了大量的研究。

众所周知,目前的金属超塑性研究以组织超塑性为主^[4,9]。通常认为,当金属晶粒尺寸小于 $10\ \mu\text{m}$,变形温度 $T > 0.5 T_m$,应变速率控制在 $10^{-4} \sim 10^{-1}\text{s}^{-1}$ 范围内时出现组织超塑性。组织超塑性的优点在于恒温下易于操作,故大量应用于超塑性成形^[5,10-11],但其最主要的缺点是需要晶粒的微细化预处理。相变超塑性则无须材料

具备超细晶粒,因而在工业生产中具有广阔的应用前景。本文从相变超塑性的实现途径、影响因素出发,探讨了金属相变超塑性的实现机制和研究方向。

1 金属相变超塑性的实现条件

相变超塑性也称动态超塑性,是指在其相变发生和进行时,施加低应力就会产生的现象^[12],与组织超塑性不同的是,它不要求材料具备超细晶粒,但必须满足以下条件:(1)材料必须具有固态相变;(2)在一定的外加载荷作用下,通过在相变温度上下循环加热和冷却来诱发材料产生反复的组织结构变化来获得超塑性^[13-16]。

2 金属相变超塑性的影响因素

影响相变超塑性的因素主要有:材质(材料必须具有固态相变)、作用应力 σ 、热循环幅度 ΔT ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$)、热循环频率 $\Delta T/t$ (即加热-冷却的速度)以及循环次数 N 等。由于相变超塑性是在相变温度上下进行反复的升温与降温而产生的,因此 ΔT 、 $\Delta T/t$ 和 N 是影

收稿日期:2014-01-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51301115);四川理工院校级项目(2012PY06);四川理工学院人才引进项目(2013RC06)

作者简介:谢文玲(1975-),女,四川成都人,副教授,主要从事新型金属材料方面的研究,(E-mail) zsyxwl@126.com

响相变超塑性的最重要因素,尤其是在相变超塑性的应用中。

2.1 材质

金属相变超塑性要求材料必须具有固态相变。固态相变的种类很多,包括纯金属的同素异构转变,合金或钢中的珠光体相变、贝氏体相变以及具有可逆性的马氏体相变等都可以通过温度循环产生超塑性,此外还包括有序和无序转变、固溶和脱溶等。如利用 $\alpha \leftrightarrow \gamma$ 、 $\alpha' \leftrightarrow \gamma$ 、 $\alpha' \leftrightarrow \alpha + \beta$ 等相变循环实现超塑性^[9,14-20]。

2.2 应力

相变超塑性中的应力可来源于几个方面:(1)相互转变的两相其比容或密度不同将导致在相变过程中相伴发生体积膨胀或收缩,从而产生应力;(2)组织结构不均匀、两种相的强度或硬度不同,变形可能不均匀,也会在金属中引起应力;(3)反复加热和冷却过程中的膨胀和收缩产生的应力。

从相变超塑性的定义出发,只要求在相变循环过程中有应力作用与之同步,并未明确提出应力大小与相变超塑性之间的关系,因此研究较少^[20]。阳永春等研究 T8 钢获得相变超塑性时的流动应力为 38.5 MPa^[9],经预先调质处理的 30CrMnSiA 钢超塑性获得最大延伸率时的应力为 55 MPa^[17],经预先调质处理的 GCr15 钢超塑性获得最大延伸率达 800% 时的流动应力为 24 MPa^[21],刘宇慧^[18]等研究 Zn-5Al 合金直接采用了 0.6~1.6 MPa 的应力并获得了相变超塑性,从上述结果看出现有的相变超塑性研究均采用的是小应力。

2.3 热循环幅度 ΔT ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$)

相变超塑性是在相变温度上下进行温度循环而产生的。因此热循环幅度 ΔT (上限和下限温度差)是最重要的影响因素。

研究^[22]发现,若下限温度不变,随着上限温度的下降, ΔT 减小,伸长率急速下降,当上限温度低于相变温度以下时,由于不发生相变使伸长率下降为零;上限温度不变,若下限温度低于相变温度,下限温度的变化对伸长率的影响不明显,当下限温度高于相变温度时,因不再发生相变,伸长率为零。

在相变超塑性中,热循环的目的是获得反复相变,因此必须满足上限温度高于相变温度,下限温度低于相变温度,对于不同材料,采用的温度不同。如轴承钢一般采用的是 680~710 °C^[17,21],而铸态 Zn-5% Al 共晶合金则采用了 T_{\min} 为 20 °C, T_{\max} 为 350 °C 的大热循环幅度进行拉伸时也产生了超塑性^[15]。

2.4 热循环频率 $\Delta T/t$

热循环频率即加热和冷却的速率。有文献^[22-23]指出随着循环速率的增高,相变速率及应变速率相应增高,使 $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ 关系曲线移向较高应变速率范围内,这和晶粒度的减小对于微细超塑性的影响相似。此外,采用较大的热循环频率还可以防止氧化和过多的蠕变变形。

2.5 循环次数 N

相变超塑性的实现主要是由于材料在相变循环过程中产生的塑性积累,因此,总延伸率的大小一般取决于相变循环周期数 N ,循环次数越多,材料的总延伸率越高。

3 相变超塑性实现机制

与组织超塑性相比,迄今为止,对于相变超塑性变形机制的研究比较少^[18,22,24]。但随着相变超塑性在生产实际中的广泛应用,相变超塑性变形机制将是今后研究的一个重点。

组织超塑性的晶界滑移变形机制也适用于相变超塑性。李世春^[24]提出了溶解-扩散层理论,他认为 Zn-5Al 共晶合金的超塑性变形机制是 α/β 相界滑移。在超塑性温度时, β 相中的 Zn 经扩散溶入到 α 相中,从而在 α/β 界面间形成扩散-溶解层 α' ,并对 α/β 相界滑移起控制作用,随着 α' 中溶入 Zn 量的增加,变形抗力增大,相界滑移不易进行,当 α' 达到饱和溶解度时,变形抗力达到最大值。

Becker 认为相变超塑性属于非晶质流动,在相变中新旧两相界面有空隙产生,因此相变超塑性适用于高温位错蠕变机制。

Greenwood 和 Johnson 模型则假定发生相变的材料为非理想材料,金属中有强、弱两相共存时,在内应力和

外加应力作用下塑性流动发生在弱相中,并得到每发生一次相变所产生的应变 ε 和外加应力 σ 之间的关系为:

$$\varepsilon = \frac{5}{6} \frac{\Delta V}{V} \frac{\sigma}{\sigma_Y} \quad (1)$$

式中, $\frac{\Delta V}{V}$ 为新旧相的相对容积差; σ_Y 为弱相的屈服应力。

4 相变超塑性的研究方向

由于相变超塑性无需超细晶粒、高温变形和低应变速率,所以在材料前期准备上具有优势,是今后研究的热点。

4.1 新型相变超塑性材料及新工艺的开发

现相变超塑性研究采用的是 $\alpha \leftrightarrow \gamma$ 、 $\alpha' \leftrightarrow \gamma$ 、 $\alpha' \leftrightarrow \alpha + \beta$ 相变循环实现超塑性,工艺单一,相变类型少。从相变超塑性实现的条件出发,只要能满足实现相变超塑性的两个条件(应力作用与相变循环)就能实现超塑性,因此今后相变超塑性的研究将重在开发新型相变超塑性材料及新工艺,并找出其产生超塑性的能力的程度。

4.2 相变超塑性的机制研究

与相变超塑性在工业上的应用相比,目前相变超塑性的机制研究较少,还未取得较为统一的认识。只有正确认识相变超塑性的微观机制,才能从根本上掌握相变超塑性,从而更好地应用相变超塑性。而在相变超塑性的机制研究中,今后的研究重点将在相变循环过程中的应力、温度、材料组织等对相变超塑性的影响及这些因素间的交互作用在相变超塑性中的作用。

5 结 论

(1) 相变超塑性的实现必须满足以下条件:(1) 材料必须具有固态相变;(2) 在一定的外加载荷作用下,在相变温度上下循环加热和冷却来诱发材料产生反复的组织结构变化。

(2) 影响相变超塑性的重要因素主要有:热循环幅度 ΔT 、热循环频率 $\Delta T/t$ 以及循环次数 N 。合理的 ΔT 、较大的 $\Delta T/t$ 以及 N 的增加对相变超塑性有利。

(3) 目前相变超塑性的实现机制研究较少,是今后相变超塑性研究的方向,此外,开发新型相变超塑性材

料及其新工艺也是以后的研究热点。

参 考 文 献:

- [1] Bengough G D. A study of the properties of alloys at high temperature[J]. Inst Metals, 1912, (7): 123-174.
- [2] 季霍诺夫 A C. 金属与合金的超塑性效应[M]. 刘春林, 译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] Backofen W A, Turner I R, Avery D H. Superplasticity in an Al-Zn Al alloy[J]. Trans. ASM, 1964, (57): 980-990.
- [4] Sergueeva AV, Stolyarov VV, Valiev R Z, et al. Mukherjee Superplastic behavior of ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2002, 323: 318-325.
- [5] 黄 幸. Fe-25Mn-6Si-5Cr 合金的稀土改性及马氏体相变[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [6] [美] 约翰 J. 伯克, 沃克·威斯. 超细晶粒金属[M]. 王燕文, 张永昌, 译. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [7] 肖 凯, 陈拂晓, 杨永顺, 等. 铸态铅黄铜超塑性拉伸组织变化的研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(13): 1-4.
- [8] 张 寒. Mn-Si-Cr 系超高强钢的超塑性及性能优化[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [9] 阳永春, 何锦学. T8 钢的恒温相变超塑性[J]. 热加工工艺, 1993(4): 7-8.
- [10] Dunand D C, Myojin S. Biaxial deformation of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-4V/TiC composites by transformation-mismatch superplasticity [J]. Mater Sci Eng A, 1997, 230: 25-32.
- [11] Sergueeva AV, Stolyarov V V, Valiev R Z, et al. Enhanced superplasticity in a Ti-6Al-4V alloy processed by severe plastic deformation[J]. Scripta Materialia, 2000, 43: 819-824.
- [12] 刘 勤. 金属的超塑性[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- [13] 鲁世红. 焊君璧共析钢的相变超塑性扩散连接[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(6): 555-559.
- [14] 刘宇慧, 李世春, 石志强. 铸态 Zn-5Al 合金相变超塑性的初步研究[J]. 金属热处理, 2004, 29(3): 40-42.
- [15] 石志强, 李世春, 刘宇慧. 热循环频率对铸态 Zn-Al

- 合金相变超塑性的影响[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):69-74.
- [16] 石志强,刘宇慧,李世春.热处理对铸态 Zn-5% 25Al 合金的相变超塑性的影响[J].材料工程,2004,6:33-36.
- [17] 阳永春,何锦学.30CrMnSiA 钢的恒温相变超塑性[J].材料工程,1993(11):12-13.
- [18] 刘宇慧.Zn-5Al 合金相变超塑性研究[D].山东:华东石油大学,2003.
- [19] Yang K L,Huang J C,Wang Y N.Phase transformation in the β phase of super α 2Ti3Al base alloys during static annealing and superplastic deformation at 700 ~ 1000°C [J].Acta Mater,2003,51:2577-2594.
- [20] 尹钟大,周永康.18Ni 马氏体时效钢的相变超塑性[J].金属学报,1992,28(2):A57-A61.
- [21] 阳永春,何锦学.轴承钢 GCr15 的恒温相变超塑性[J].热加工工艺,1994,11(2):23-24.
- [22] 刘勤.流变应力的应变速率敏感性指数(m)及其和超塑性之间的关系[J].机械工程材料,1994(2):59-69.
- [23] 刘建华,李志远,胡伦骥,等.钢铁材料的相变超塑性焊接[J].华中理工大学学报,1995,23(1):15-19.
- [24] 李世春.Zn-Al 共晶合金超塑性的研究[D].北京:清华大学,2000.

Progress in Study on Transformation Superplasticity of Metal

XIE Wenling^a, ZHOU Shunyong^b, GUO Cuixia^a, LI Xiulan^a

(a. Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control; b. Key Laboratory of Artificial Intelligence of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: The progress in study on transformation superplasticity of metal, including the realization condition, the influence factors and deformation mechanisms is summarized and then the research orientation of metal transformation superplasticity is proposed.

Key words: transformation superplasticity; influence factors; deformation mechanisms