第21卷 第2期
2007年6月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 21, No. 2
June, 2007

文章编号:1000-5773(2007)02-0145-06

高应变率拉伸下纯铝中氦泡长大的动力学研究*

祁美兰[1,2],贺红亮[2],王永刚[2],晏石林[1]

(1.武汉理工大学理学院,湖北武汉 430070;
2.中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621900)

摘要:分析了高应变率加载下纯铝中氦泡长大的动力学过程,给出了含内压氦泡长大的动力学方程,并且分别研究了氦泡内压、基体材料惯性、粘性、表面张力以及基体环境温度对初始半径为1 nm氦泡长大的影响。研究结果表明:(1)初始内压可以促使氦泡快速长大,当氦泡直径超过1 μm时,内压对氦泡长大的影响可以忽略不计。(2)表面张力在氦泡整个长大过程中的影响都很小。(3)材料惯性对氦泡长大起抑制作用,并且随着氦泡半径的增长,抑制效应越来越明显。(4)在所有因素中,温度对氦泡长大的影响最为明显,温度升高,材料的粘性降低,氦泡的内压增加,促使氦泡加速长大。

关键词:高应变率;氦泡;内压;惯性;粘性
中图分类号:O347.1 **文献标识码**:A

1 引 言

层裂现象是造成材料断裂、损伤的重要原因之一,在民用、国防及航空航天等领域都受到高度重视,它也是固体力学研究领域的一个重要课题。在动态冲击、爆轰加载或强激光辐照下,延性金属材料内部会发生层裂破坏现象。层裂的主要原因是由于冲击作用下,材料自由面和界面反射的稀疏波相互作用产生拉伸应力,使材料内部发生了微孔洞成核、长大以及贯通效应。

目前关于拉伸应力作用下材料内部孔洞长大问题的研究已取得了很好的进展[1-7],但对延性金属中存在的气体泡(如氦泡)的动态长大研究还比较欠缺,仅有少量报道[8]。金属中注入的氦气或金属氚化物中氚发生放射性衰变产生的氦气会在晶格中发生积聚[9],由于氦不溶于材料基体,累积的氦将聚集、沉淀,形成氦-空位复合物,乃至形成氦泡。在较高的温度下或外界拉伸应力作用下,氦泡易于在晶界、相界及位错处长大,导致宏观性能下降,例如不锈钢中的氦会导致材料脆化。因此,对于拉伸应变率作用下氦泡的长大问题应当受到高度重视。

氦泡长大过程的机理非常复杂,影响其长大的因素也很多,如氦泡的内压、材料的惯性和粘性以及温度等。本研究从Seaman和Curran[10]的工作出发,给出了外界恒定拉伸应力作用下,含内压氦泡长大的动力学方程。并且分别考虑了氦泡内压、材料粘性、惯性以及温度对纯铝中氦泡长大的影响。计算表明:氦泡长大初期,内压对其长大有明显的贡献;表面张力对氦泡长大的影响可以忽略不计;惯性的抑制作用会随着氦泡的长大而增加;温度升高,材料的粘性下降,氦泡的内压增大,均有利于氦泡的长大。

* **收稿日期**:2006-07-25;**修回日期**:2006-10-16
基金项目:国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(NSAF)(10476027)
作者简介:祁美兰(1974—),女,博士研究生,讲师,主要从事断裂与损伤研究. E-mail:emmy_qi@163.com
通讯作者:贺红亮(1963—),研究员,博士生导师,主要从事高压材料科学与力学研究. E-mail:honglianghe@263.net

2 纯铝中氦泡的动态长大

2.1 氦泡长大的动力学方程

假设延性金属材料中微孔洞尺寸和形状都是随机的，位置分布也是随机的，可以将其作为各向同性均匀材料来处理。并且在基体材料不可压缩的假定下，微孔洞各向同性长大的贡献远大于形状改变的贡献，则可把微孔洞近似当作球形来处理。Carroll 和 Holt[1] 于 1972 年提出了一个高应变率加载下延性金属中微孔的演化方程。如图 1 所示，以一个空心球壳代替微孔洞，作如下定义

$$\xi = (a/b)^3, \text{或 } \alpha = 1/(1-\xi) \tag{1}$$

式中：a、b 分别为空心球的内、外半径，ξ、α 分别为材料的孔隙度和膨胀比。

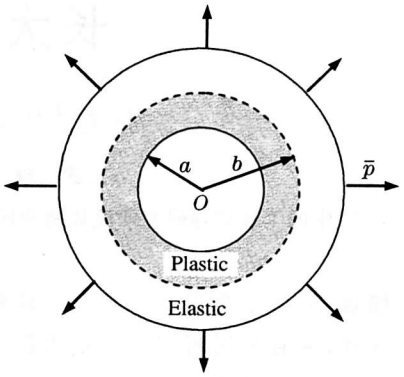


图 1 微孔洞长大的空心球壳模型

Fig. 1 Hollow ball model of micro-void growth

Johnson[2] 1981 年将此模型用于描述延性材料的层裂现象，他从空心球壳的内外应力平衡的角度建立了一个孔洞长大的动力学方程

$$\tau^2 Y_0 Q(\ddot{\alpha},\dot{\alpha},\alpha) = \alpha(\bar{p} - p_g) - 2\int_a^b \frac{\Delta s}{R}\mathrm{d}R \tag{2}$$

式中：Y_0 为材料的屈服应力，$\bar{p}$ 为外界施加的径向应力，p_g 为孔洞的内压，Δs 为径向应力和轴向应力之差，R 为孔洞半径，$\tau^2 = \rho a_0^2/3Y_0(\alpha_0-1)^{2/3}$，$a_0$ 为初始孔洞半径，α_0 为初始膨胀比，Q 为膨胀比的函数，其详细表达式参阅文献[2]。

从 Carroll 和 Holt[1] 的模型出发，Wang[3] 基于空心球壳长大过程的能量平衡，即系统能量的变化应该等于外部施加的应力所做的功

$$W = \Delta E_k + \Delta E_s + \Delta E_i \tag{3}$$

式中：ΔE_k、ΔE_s、ΔE_i 分别为空心球壳的动能、表面能和内能，W 为外部应力所做的功，由此，得到塑性介质中球型孔洞在外加动态拉伸应力作用下，以膨胀比 α 为参数的孔洞长大演化方程

$$\dot{\alpha} = \frac{1}{2F_1(\alpha)}\left\{-F_4(\alpha) \pm \sqrt{[F_4(\alpha)]^2 - 4F_1(\alpha)F_5(\alpha)}\right\} \tag{4}$$

式中：$F_1(\alpha)$、$F_4(\alpha)$ 和 $F_5(\alpha)$ 都为膨胀比的函数，具体表达式参见文献[3]。

此外，张凤国[4]、周洪强[5] 等人各自基于 Carroll 和 Holt 的方法推导出类似的孔洞长大方程。这些方法的计算结果均表明：在孔洞长大过程中，孔洞周围的塑性区域起主要贡献，可以忽略弹性区域的影响。基于这样的考虑，本研究将孔洞周围近似看成是一个塑性场，并且将塑性效应等效为粘性流体。Poritsky[6] 考虑了惯性效应，给出一个最基本的粘性流体中孔洞的长大方程

$$\ddot{R} + \frac{3}{2R}(\dot{R})^2 + \frac{4\eta}{\rho R^2}\dot{R} = \frac{T}{\rho R} \tag{5}$$

式中：R 为孔洞半径，η 为材料的粘性系数，ρ 为材料密度，T 为施加在孔洞外部的拉伸应力。

为了描述惯性、粘性和表面张力对孔洞长大的影响，Seaman[10] 在 Poritsky[6] 工作的基础上给出一个孔洞长大的微分方程

$$\ddot{R} + \frac{3}{2R}(\dot{R})^2 + \frac{4\eta}{\rho R^2}\dot{R} + \frac{2\sigma_s}{\rho R^2} = \frac{P-\sigma_0}{\rho R} \tag{6}$$

式中：R 为孔洞半径，η 为材料的粘性系数，ρ 为材料密度，σ_s 为表面张力，P 为孔洞最大半径处施加的外应力（拉为正），σ_0 为孔洞长大阈值，$\dot{R}$ 和 $\ddot{R}$ 分别表示半径对时间的一阶微分和二阶微分。方程的前两项表示惯性效应，第三项表示粘性效应，第四项表示表面张力的贡献。

对于纳米尺度的氦泡,若假设所选取的基体足够小并符合连续性假定,那么连续介质力学模型同样适用于纳米尺度氦泡的生长。在外界拉伸应力作用下,内压 p 有助于氦泡的快速长大,此压力与外界拉伸应力 P 有同等功效,因此本研究将内压 p 作为方程(6)的外力部分处理,从而得到氦泡长大的动力学方程

$$\ddot{R}+\frac{3}{2R}(\dot{R})^2+\frac{4\eta}{\rho R^2}\dot{R}+\frac{2\sigma_s}{\rho R^2}=\frac{P+p-\sigma_0}{\rho R} \tag{7}$$

2.2　氦泡内压力的确定

材料中的氦泡之所以存在是由于表面能的约束以及材料基体存在的抗剪能力,因此一个非常简单的气泡生长连续性模型[9]可用来求解氦泡的初始内压

$$p=(2\gamma+\mu b)/R \tag{8}$$

式中:γ 为表面自由能,μ 为剪切模量,b 为 Burgers 矢量,R 为氦泡初始半径。本研究只考虑材料的塑性效应,所以忽略基体的抗剪能力,则氦泡的初始内压 $p=2\gamma/R$,若取氦泡初始半径 $R=1$ nm,表面自由能 $\gamma=1$ kJ/m^2,则氦泡初始内压 $p=2$ GPa。考虑到氦泡的初始压强较大,故状态方程采用钢球堆积模型[9],方程为

$$pV=Nk_BT(1+Y+Y^2-Y^3)(1-Y)^{-3} \tag{9}$$

$$Y=N(d/R)^3/8 \tag{10}$$

式中:p 为氦泡内压,V 为氦泡体积,N 为氦泡所含的原子数,d 为室温下氦原子的有效钢球直径,取为 0.217 nm,R 为氦泡半径,k_B 为玻耳兹曼常数,T 为绝对温度。设氦泡初始内压 $p=2$ GPa,半径 $R=1$ nm,取 293 K,则本研究求得泡内原子数 $N=309$。假设氦泡在外界拉伸应力作用下长大过程中所含原子数始终不变。

2.3　温度对氦泡长大的影响

本研究着重考虑基体的环境温度对氦泡长大的影响,这里需要考虑两个方面的温度变化。一方面,在高应变率加载状态下,塑性应变产生的塑性功绝大部分转变成热,由于变形速率很高,所产生的热来不及扩散而在局部范围沉积下来,使该区域的温度急剧增加,从而产生热软化效应,对材料参数造成强烈的影响。另一方面当基体处于高温实验环境中,环境温度也会使基体材料的温度升高,影响材料参数的变化。氦泡内表面及邻近区域中温度的升高对氦泡的长大具有强烈的影响,这种影响主要表现在温度 T 与氦泡内压 p 以及材料的粘性系数 η 的关系上,且表现为温度升高,内压 p 增加,η 减小,对于内压与温度的关系(9)式中已给出,T 与 η 的关系本研究取如下定量形式[11]

$$\eta=\eta_m\exp\left[B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_m}\right)\right] \tag{11}$$

式中:T_m 为材料的熔化温度,η_m 为材料熔化时的粘性系数,B 为一系数,可根据室温 T_0 下的粘性系数 η_0 来确定,将 $T_0=293$ K,$T_m=923$ K,$\eta_0=20$ Pa·s 以及 $\eta_m=2\times10^{-2}$ Pa·s[12]代入(11)式得到 $B=2.97\times10^3$ K。

3　计算结果与讨论

本工作以纯铝为研究对象,采用有限差分法分别计算了内压、表面张力、惯性、粘性、以及基体环境温度对氦泡长大的影响。计算时间取为 10 μs,时间步取为 10 000 步,表 1 中给出了计算时用到的参数值,其中,根据文献[12],σ_0 取为 0.2 GPa。η_m 难以查到,文献[12]中给出流动金属的粘性系数是 10^{-3} 量级,因为本研究的目的是确定温度对氦泡长大趋势的影响,并不需要得出精确结果,故 η_m 取 η_0 的 10^{-3} 倍不会影响本研究的讨论。计算基体环境温度对氦泡长大的影响时,分别取室温(293 K)、473 K 和 773 K。

3.1　内压对氦泡长大的影响

材料中的微观氦泡,无论是过压还是热平衡,内部都会产生很高的压力,一旦这种平衡被破坏,内压就会促使氦泡快速长大,氦泡长大的过程中内压会逐渐减小,从而对氦泡长大的影响也越来越小,如

图 2,图中还给出了氦泡刚开始长大时的局部放大。从图中看出,在外界拉伸应力作用下,氦泡刚开始生长时内压对其长大的影响表现得较为明显,当氦泡长到 0.1 μm 时氦泡的内压已小到可以忽略不计。

表 1 理论计算参数

Table 1 Parameters in the calculation

ρ/(kg/m^3)	η_0/(Pa·s)	η_m/(Pa·s)	σ_0/(GPa)	p/(GPa)	σ_s/(Pa)	k_B
2700	20	20×10^{-3}	0.2	1	20	1.38×10^{-23}

3.2 惯性和表面张力对氦泡长大的影响

方程(7)的前两项表示惯性对氦泡长大的影响,第四项表示表面张力的影响。对于纯铝,其表面张力约为 20 Pa[12],计算结果表明,含表面张力与不含表面张力计算得到的氦泡长大曲线几乎完全重合(本文未给出),因此,表面张力对氦泡长大的影响可以忽略不计。Curran 等人[12]指出,材料在强动载荷作用下的动态响应和动态断裂过程中,惯性效应是一个不可忽略的因素,而且它对韧性基体材料中的孔洞长大起抑制作用,且随着孔洞的增长,这种抑制也呈增长趋势,如图 3 所示。

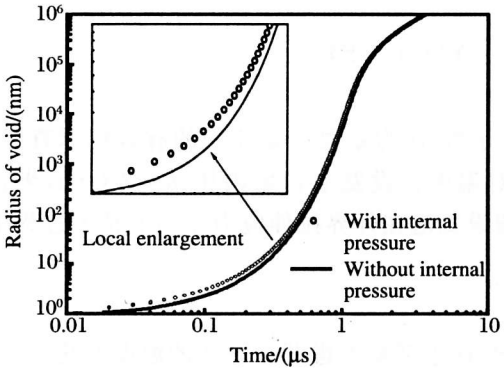


图 2 内压对氦泡长大的影响

Fig. 2 Radius of helium bubble growth vs. time controlled by inner pressure

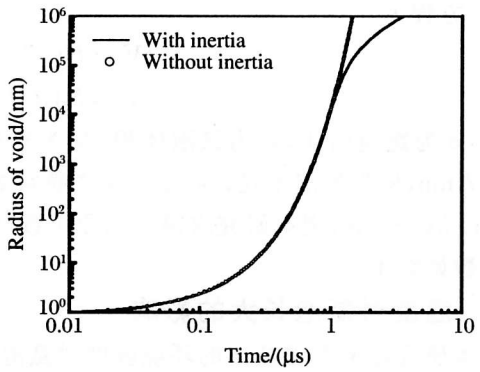


图 3 惯性对氦泡长大的影响

Fig. 3 Radius of helium bubble growth vs. time controlled by inertia effect

3.3 温度及粘性效应

在高应变率状态下,基体的环境温度会对氦泡的长大产生强烈的影响。当基体温度升高时,氦泡表面基体材料的热量会传入氦泡内部,引起氦泡内压的增大,从而促使氦泡加速长大,但当氦泡长到一定尺寸时,内压变得非常小,温度已不能对其产生作用了,如图 4 所示,图中只给出了温度对氦泡内压的影响。

在室温(293 K)下,由于材料的粘性较大,氦泡的生长受到一定的抑制,生长比较缓慢。当温度升高时,热效应引起粘性系数的下降使得材料的流动性增强,促使氦泡快速长大,如图 5 所示,高温下氦泡明显比室温下快很多,而且当温度高于 473 K 时,温度对粘性的影响已不明显。

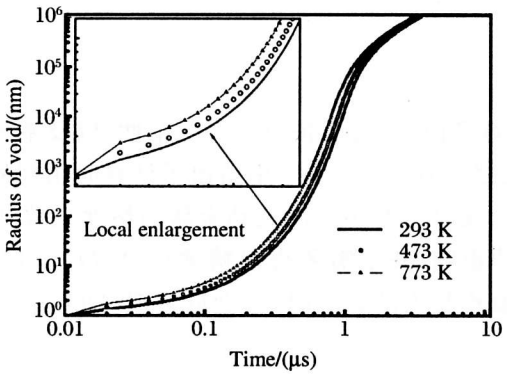


图 4 不同温度下内压对氦泡长大的影响

Fig. 4 Radius of helim bubble growth vs. time controlled by internal pressure at different temperature

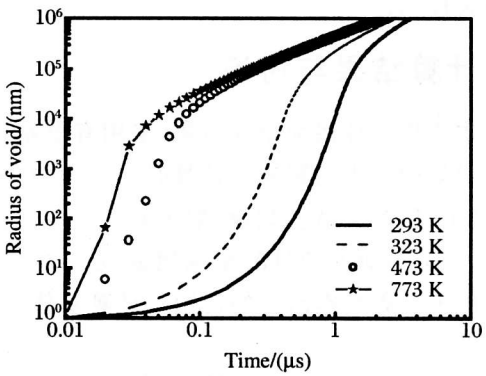


图 5 不同温度下粘性对氦泡长大的影响

Fig. 5 Radius of helium bubble growth vs. time controlled by viscosity at different temperature

4 结　论

氦泡内压、基体的环境温度、材料的粘性、惯性以及表面张力都对氦泡的长大有影响。从分析结果来看,氦泡长大初期,内压对其长大的影响较为明显,后期的影响越来越小;在所有因素中,温度对氦泡长大的影响最为强烈,温度升高,材料粘性降低,氦泡内压增大,这些都有助于氦泡的长大;表面张力在氦泡整个长大过程中的影响都很小,可以忽略不计;惯性对氦泡长大有抑制作用,且随着氦泡尺寸的增长,这种抑制作用表现的更加明显。因此,高应变率作用下,氦泡周围塑性区域的温升对氦泡长大的影响必须加以重视。

感谢张兴钤院士对本研究工作给予的有益建议。

References:

[1] Carroll M M, Holt A C. Static and Dynamic Porecollapse Relations for Ductile Porous Media [J]. J Appl Phys, 1972, 43: 1626-1636.

[2] Johnson J N. Dynamic Fracture and Spallation in Ductile Solids [J]. J Appl Phys, 1981, 52(4): 2812-2825.

[3] Wang Z P. Growth of Voids in Porous Ductile Materials at High Strain Rate [J]. J Appl Phys, 1994, 76(3): 1535-1542.

[4] Zhang F G, Cui Y P, Qin C S, at el. Nucleation and Growth of Voids in Ductile Materials under High Pressure Dynamic Loading [J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(6): 730-733. (in Chinese)
张凤国,崔亚平,秦承森,等. 动载荷作用下延性材料的孔洞增长和成核 [J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 730-733.

[5] Zhou H Q, Sun J S, Wang S Y. The Growth of Microvoids in Ductile Materials under Dynamic Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 415-419. (in Chinese)
周洪强,孙锦山,王书元. 动载荷下延性材料中微孔洞的增长模型 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 415-419.

[6] Poritsky H. The Collapse or Growth of a Spherical Bubble or Cavity in a Viscous Fluid [A]//Cloutier L, Rancourt D. Proc of the First U S National Congress of Applied Mechanics [C]. New York: ASME, 1952: 813-815.

[7] Seaman L, Curran D R. Inertia and Temperature Effects in Void Growth [A]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: American Institute of Physics, 2002: 607-610.

[8] Lensky N G, Navon O, Lyakhovsky V. Bubble Growth during Decompression of Magma: Experimental and Theoretical Investigation [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 129: 7-22.

[9] Donnelly S E. The Density and Pressure of Helium in Bubbles in Implanted Metals: A Critical Review [J]. Radiat Effects, 1985, 90: 1-47.

[10] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computational Models for Ductile and Brittle Fracture [J]. J Appl Phys, 1976, 47(11): 4814-4826.

[11] Carroll M M, Kim K T. The Effect of Temperature on Viscoplastic Pore Collapse [J]. J Appl Phys, 1986, 59(6): 1962-1964.

[12] Curran D R, Seaman L. Dynamic Failure of Solids [J]. Phys Rep, 1987, 147 (5-6): 303-313.

Dynamic Analysis of Helium Bubble Growth in the Pure Al under High Strain-Rate Loading

QI Mei-Lan[1,2], HE Hong-Liang[2], WANG Yong-Gang[2], YAN Shi-Lin[1]

(1. *School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*;
2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Based on the dynamic process of helium bubble growth under high strain-rate, the dynamic equation of helium bubble growth has been presented. The effects of internal pressure of helium bubble, inertia, viscosity, surface tension of base material and environment temperature on helium bubble with 1 nm radius have been considered respectively. Results indicate that: (1) At high strain-rate loading, the original internal pressure may help to accelerate the growth of the helium bubble. When the radius of helium bubble is larger than 1 μm, the internal pressure is too small and it may be omitted. (2) The effect of surface tension is very weak in the whole process of helium bubble growth. (3) The growth of helium bubble may be restrained by the inertia. And this effect will be more obvious with the growth of diameter. (4) While all the above effects are important, the effect of temperature needs to be particularly emphasized. With the temperature rising, the viscosity will decrease and the internal pressure will increase, the growth of helium bubble will be accelerated.

Key words: high strain-rate; helium bubble; internal pressure; inertia; viscosity