文章编号：1000-5773(2011)02-0183-05

# 无氧铜环颈缩区孔洞长大与局域化温升效应研究*

桂毓林，孙承纬，张光升，李　强

（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国防科技重点实验室，四川绵阳　621900）

**摘要**：利用金相显微镜，对电磁加载下无氧铜（M 态 TU1）环碎片的颈缩部位进行了金相分析，观察到了颈缩区孔洞长大、汇通及孔洞壁熔化现象。利用球形孔洞模型，分析了颈缩区孔洞长大条件，发现周向偏应力更适合于描述膨胀环颈缩区的孔洞长大。据此，讨论了颈缩区的局域化温升效应。研究结果为延性金属环膨胀颈缩失稳的细观机理研究提供参考。

**关键词**：孔洞长大；局域化温升效应；无氧铜环；金相分析；颈缩

**中图分类号**：O521.2　　**文献标识码**：A

## 1　引　言

目前，针对膨胀环颈缩失稳的理论和数值模拟，人们已经开展了大量的研究工作。例如：Rajendran 等人[1]将多孔塑性作为主要失效机制，研究了膨胀环的颈缩和断裂；Johnson[2]以横截面积和孔隙率为失稳源对膨胀环的颈缩和断裂进行了数值计算，结果表明膨胀环截面局域化导致颈缩和断裂的产生。1995 年，Han 等人[3]利用有限元方法分析了膨胀环颈缩的形成，分析认为：没有任何缺陷的膨胀环在轴对称加载下，环周上不会有波传播；当引入一个小缺陷时，环周上将出现波传播，并几乎同时出现多个分布均匀的颈缩，且有缺陷截面的颈缩发展速度比无缺陷快；当引入一个较大缺陷时，颈缩集中在初始缺陷截面附近。1996 年，Altynova 等人[4]的数值模拟结果表明：无缺陷膨胀环几乎同时断裂成多个碎片，膨胀期间的应力状态接近于单轴拉伸状态，且临界截面与膨胀环横截面成 30°剪切。1999 年，Pandolfi 等人[5-6]利用延性动态断裂的粘性单元法研究了 Al 6061 环的颈缩和碎裂。2004 年，Mercier 等人[7]利用线性扰动技术，分析了平面应变条件下膨胀环快速径向颈缩的形成与干扰长大速率的关系。

已发表的有关膨胀环颈缩的研究主要集中在结构缺陷、应变硬化、应变率敏感性、温度软化效应、惯性效应等对颈缩形成的影响，很少有膨胀环颈缩区孔洞长大和温升效应的研究。本研究选用电磁加载下无氧铜（M 态 TU1）环碎裂实验[8]中的回收碎片，由金相显微镜观测碎片颈缩区中的孔洞变化，利用延性球形孔洞长大模型[9]分析无氧铜环颈缩部位孔洞长大条件以及颈缩部位形成的局域化温升效应。

## 2　实验方法与金相观测

利用电磁膨胀环加载技术，完成了外径为 43.2 mm、内径为 41.2 mm 的无氧铜（M 态 TU1）环径向拉伸实验。具体实验方法为：将无氧铜环置于螺线管线圈外的中心平面上，当螺线管线圈被电容器放电

* **收稿日期**：2009-09-30；**修回日期**：2009-10-26

**基金项目**：中国工程物理研究院科学技术基金（20060102）

**作者简介**：桂毓林（1973－），男，博士，副研究员，主要从事材料动态力学性能及常规战斗部设计研究.
E-mail：guiyulin@21cn.com

后，在其近区产生一个均匀磁场，该磁场在无氧铜环中感生反向电流，感生电流与磁场相互作用，在无氧铜环上产生一个均匀、向外的力，驱动无氧铜环沿径向运动[8,10]。

选取电磁膨胀环碎裂实验中回收的无氧铜碎片，截面尺寸为 1 mm×1 mm。采用金相显微镜，对无氧铜碎片进行金相观测，金相分析取样如图 1 所示。由图 1 可知，$B$ 处的颈缩程度比 $A$ 处大。

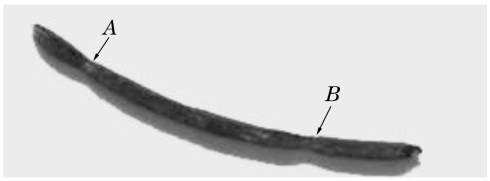



图 1 金相分析取样

Fig. 1 Sample of metallographic analysis

对 $A$、$B$ 两处进行金相分析。对于 $A$ 处：采用低倍镜观察时，发现颈缩处有较多晶粒发生了变形，晶内有少量滑移，同时还存在少量孔洞，并且孔洞周围有滑移和微观剪切现象；放大 500 倍时（见图 2），可以明显观察到已经长大的球形孔洞及孔洞汇聚现象。对于 $B$ 处：采用低倍镜观察时，发现样品中存在较大的孔洞，并且颈缩程度比 $A$ 严重；局部放大 500 倍时（见图 3），则更加明显地看出 $B$ 处形成的孔洞（标记为 $C$、$D$）大于 $A$ 处，并且 $C$ 孔洞由 4 个小孔洞汇通而成，$D$ 孔洞则直接与其它小孔洞汇通，此外 $C$、$D$ 两个孔洞壁上还有熔化现象。

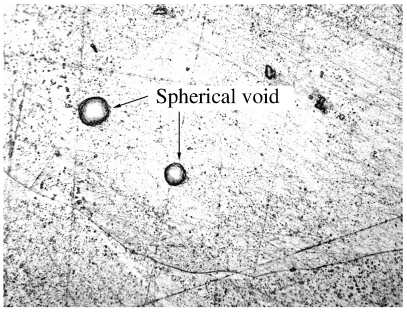



图 2 $A$ 处颈缩的金相照片（×500）

Fig. 2 The metallographic photo of necking at position $A$ (×500)

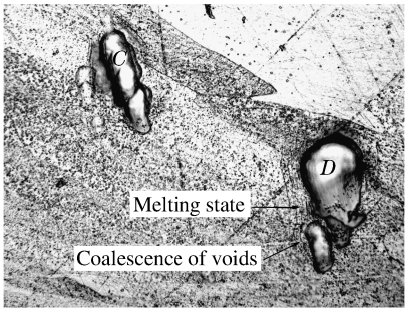



图 3 $B$ 处颈缩的金相照片（×500）

Fig. 3 The metallographic photo of necking at position $B$ (×500)

由金相观测结果可知：颈缩处发生了较大的塑性变形，并且存在孔洞长大现象；颈缩程度越高，孔洞越大；在颈缩严重的区域，孔洞壁有熔化现象，说明孔洞发生了剧烈的局域温升。

## 3 膨胀环颈缩区孔洞长大条件分析

为了研究颈缩区中微孔洞在一维动态拉伸应力加载下的长大方式，利用 $p$-$\alpha$ 球形孔洞长大模型，分析延性金属膨胀环颈缩区域内微孔洞的长大条件。

### 3.1 $p$-$\alpha$ 球形孔洞模型

1972 年，Carroll 等人[9]提出了一个非常有用的多孔延性材料孔洞塌陷模型。由该模型可推导出一维拉伸应力加载下的孔洞长大模型，所不同的是，孔洞长大时孔洞内部压力为负。图 4 为球形孔洞模型。在半径为 $a$ 的孔洞周围包裹着一层塑性区和一层弹性区，包含孔洞、塑性区和弹性区的整个区域半径为 $b$。

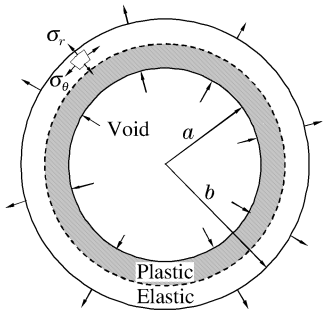



图 4 球形孔洞模型

Fig. 4 The spherical void model

1981 年，Johnson[11]利用 Carroll 等人的 $p$-$\alpha$ 模型，对一维拉伸应力加载下的孔洞长大进行了详细推导，得到拉伸加载条件下孔洞膨胀的平衡条件为

$$p_{eq} = -\frac{2Y_0}{3\alpha}\ln\frac{\alpha}{\alpha-1} \tag{1}$$

式中:$p_{eq}$为孔洞膨胀平衡压力(拉伸加载下,$p_{eq}$为负);$Y_0$ 为材料屈服强度;$\alpha$ 为孔洞膨胀因子,且 $\alpha=b^3/(b^3-a^3)$。

### 3.2 孔洞长大条件分析

利用延性孔洞长大模型,Johnson 描述了 A533B 钢膨胀环中的孔洞长大,研究发现环中的拉伸应力远小于孔洞长大的阈值应力。他认为环中孔洞长大的平均拉伸应力 $p_{eq}$为[11]

$$p_{eq} = -\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\ln\frac{\alpha_0}{\alpha_0-1} \tag{2}$$

式中:$\alpha_0$ 为初始膨胀因子,$\alpha_s$ 为与屈服强度无关的材料参数。

对于无氧铜环,如果取 $\alpha_0=1.0003$、$\alpha_s=170$ MPa,则由(2)式计算得到孔洞长大的平均拉伸应力为 $-1.38$ GPa。对于膨胀环,由于只有一个非零主应力分量 $\sigma$,因此孔洞膨胀的平衡压力为 $\sigma/3$。也就是说,只有当膨胀铜环中 $\sigma$ 达到 4.1 GPa 时,延性孔洞才会开始长大,这是完全不可能的。因为在无加工硬化的均匀塑性变形情况下,周向应力 $\sigma$ 不可能达到屈服强度 $Y_0$,即使存在加工硬化,其屈服强度也不会增加到 4 GPa 以上。因此,Johnson 认为在平均拉伸应力影响下球形孔洞模型不适合描述膨胀环中的孔洞长大。

我们注意到:孔洞平均拉伸应力(图 4 中的 $\sigma_r$)长大的条件为

$$p_{eq} < \frac{1}{3}\sigma \tag{3}$$

孔洞周向偏应力(图 4 中的 $\sigma_\theta$)长大的条件为

$$p_{eq} < \frac{2}{3}\sigma \tag{4}$$

式中:$\sigma$ 为膨胀环流动应力。

对于延性金属膨胀环:在金属环膨胀初期,孔洞周围绝大部分为弹性区,初始膨胀因子 $\alpha_0$ 非常小,即 $b/a$ 较大;当金属环处于塑性变形期时,孔洞周围绝大部分为塑性区,几乎没有弹性区,甚至可能出现空化现象,此时膨胀因子 $\alpha_0$ 非常大,即 $b/a$ 较小。

对于无氧铜环,假设颈缩区中只有 1 个微孔洞(即不考虑孔洞汇通情况),并且微孔洞处于膨胀环截面中心,微孔洞半径为 1 $\mu$m。取材料屈服强度 $Y_0=90$ MPa,考虑以下 3 种情况。

(1) 金属环处于膨胀初期。若 $b=15a$,则 $\alpha_0=1.0003$,由(1)式可计算得到孔洞长大的平均拉伸应力 $p_{eq}=487$ MPa。如果采用孔洞平均拉伸应力条件(即(3)式),那么环中流动应力要达到 1.46 GPa 时孔洞才会长大,这是不可能的;如果采用孔洞周向偏应力条件(即(4)式),那么环中流动应力只需达到 365 MPa 时孔洞就会长大,这是可能的。因此,采用平均拉伸应力来描述时,孔洞不会长大,但采用周向偏应力描述时,孔洞会长大。

(2) 金属环处于塑性变形期。若 $b=5a$,则 $\alpha_0=1.008$,由(1)式可得 $p_{eq}=289$ MPa。同样,应用(3)式时环中的流动应力为 864 MPa,应用(4)式时,环中流动应力为 216 MPa。因此,用平均拉伸应力来描述时,孔洞不会长大,但用周向偏应力来描述时,孔洞将长大。

(3) 金属环处于塑性变形期。若 $b=2a$,则 $\alpha_0=1.143$,由(1)式可得 $p_{eq}=110$ MPa。同样,应用(3)式时环中的流动应力为 330 MPa,应用(4)式时则为 82 MPa。此时,无论是用平均拉伸应力来描述还是用周向偏应力描述,孔洞都将长大。

由上述分析可知,利用球形孔洞长大模型解释膨胀环金相实验观察到的孔洞长大现象时,似乎要满足球形孔洞周向偏应力条件时孔洞才能长大,即环中的拉伸应力刚好沿孔洞周向偏应力方向。

## 4 颈缩区的局域化温升效应分析

Johnson[11] 的研究表明,非均匀变形的颈缩区中存在非常大的局域化温升效应,膨胀孔洞壁处的塑

性剪切应变将达到百分之几千，可以通过孔洞壁处的塑性剪切应变来计算对应的温升幅值。Johnson 推导出的孔洞壁塑性剪切应变 $\varepsilon_p$ 为

$$\varepsilon_p = -\left(\frac{\alpha_0-1}{\alpha-1}\right)^{-2/3}+\left(\frac{\alpha_0-1}{\alpha-1}\right)^{1/3} \tag{5}$$

单位质量膨胀孔洞壁的塑性功为

$$W_p = -\frac{Y_0\varepsilon_p}{\rho_0} \tag{6}$$

式中：$\rho_0$ 为材料初始密度。假设孔洞膨胀过程是绝热的，则温升表达式为

$$\Delta T = \frac{W_p}{c_p} \tag{7}$$

式中：$c_p$ 为材料的定压比热容。

结合(5)式～(7)式，可以得到不同孔隙度下 $\Delta T$-$\alpha_0$ 曲线，如图 5 所示。从图 5 中可以看出：初始膨胀因子越小，温升越快，孔洞越容易达到熔化状态，也就是说，金属环处于拉伸状态时，球形孔洞周围的塑性区半径越大，就越容易引起剧烈升温；随着拉伸程度的不断增大，孔洞膨胀因子增加，相应地，孔洞孔隙度($m=\alpha-1$)增加，孔洞壁的温升越来越大，进而发生熔化。如果取 $\alpha_0=1.0002$、$\alpha=1.1$($m=10\%$)，通过(5)式～(7)式可计算出温升 $\Delta T=1636$ K，超过无氧铜的熔点 1356 K。如果微孔洞的初始膨胀因子 $\alpha_0<1.00027$，则温度可以达到使孔洞发光。因此，可以用球形孔洞模型中孔洞壁塑性剪切应变引起的温升来解释实验观测到的局域化温升效应。

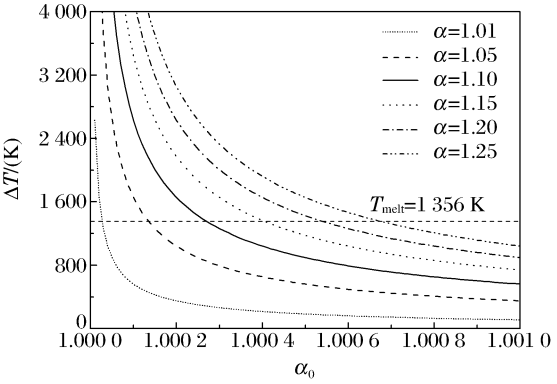



图 5 温升与初始膨胀因子关系曲线

Fig. 5 The temperature rise versus initial expansion factor

## 5 结 论

通过对具有颈缩的无氧铜环碎片(横截面积为 1 mm$^2$)进行金相分析，找到了细环颈缩部位存在孔洞长大和汇通现象的证据。利用球形孔洞模型及周向偏应力条件，对颈缩区孔洞长大条件进行了初步分析，并对金相观察到的孔洞壁熔化现象进行了比较合理的解释。研究结果为一维拉伸应力加载下颈缩形成的细观机理研究提供帮助。

## References:

[1] Rajendran A M, Fyfe I M. Inertia Effects on the Ductile Failure of Thin Rings [J]. J Appl Mech, 1982, 49(1): 31-36.

[2] Johnson J N. Ductile Fracture of Rapidly Expanding Rings [J]. J Appl Mech, 1983, 50(3): 593-600.

[3] Han J B, Tvergaard V. Effect of Inertia on the Necking Behaviour of Ring Specimens under Rapid Radial Expansion [J]. Eur J Mech A, 1995, 14(2): 287-307.

[4] Altynova M, Hu X Y, Daehn G S. Increased Ductility in High Velocity Electromagnetic Ring Expansion [J]. Metall Mater Trans A, 1996, 27(7): 1837-1844.

[5] Pandolfi A, Krysl P, Ortiz M. Finite Element Simulation of Ring Expansion and Fragmentation: The Capturing of Length and Time Scales through Cohesive Models of Fracture [J]. Int J Fract, 1999, 95(1-4): 279-297.

[6] Pandolfi A,Ortiz M. Solid Modeling Aspects of Three-Dimensional Fragmentation [J]. Eng Comput,1999,14(4):287-308.

[7] Mercier S,Molinari A. Analysis of Multiple Necking in Rings under Rapid Radial Expansion [J]. Int J Impact Eng,2004,30(4):403-419.

[8] Gui Y L. The Dynamic Fracture and Fragmentation of Metal Freely Expanding Ring Driven by Electromagnetically Loading [D]. Mianyang:China Academy of Engineering Physics,2007. (in Chinese)
桂毓林. 电磁加载下金属膨胀环的动态断裂与碎裂研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2007.

[9] Carrol M M,Holt A C. Static and Dynamic Pore-Collapse Relations for Ductile Porous Materials [J]. J Appl Phys,1972,43(4):1626-1635.

[10] Gourdin W H. Analysis and Assessment of Electromagnetic Ring Expansion as a High-Strain-Rate Test [J]. J Appl Phys,1989,65(2):411-422.

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

# Void Growth and Local Temperature Rise in Necking Region of OFHC Ring

GUI Yu-Lin,SUN Cheng-Wei,ZHANG Guang-Sheng,LI Qiang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang* 621900,*China*)

**Abstract**: The fragmentation tests of high-conductivity oxygen-free copper (M-state TU1) rings have been carried out by the electromagnetically driven expanding ring technique. Using a metallographic microscope, the void growth and coalescence were observed in the necking region of recovery fragment. The void growth conditions in the thin ring were analyzed with a spherical void model. The results showed that the circumferential deviatoric stress is more suitable for describing the void growth in necking zone of the expanding ring. Moreover, the local temperature rise effect of necking region was also discussed. This work may be helpful for the further meso-mechanics studies on necking instability of expanding metal ring.

**Key words**: void growth; local temperature rise effect; oxygen-free copper expanding ring; metallographic analysis; necking