文章编号：1000-5773(2006)04-0434-05

铍青铜柱壳膨胀断裂研究*

金 山[1]，汤铁钢[1]，李庆忠[1]，孙学林[1]，徐永波[2]，沙桂英[2]

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900；
2. 中国科学院金属研究所，辽宁沈阳 110015)

摘要：利用高速摄影和金相分析研究了不同热处理状态的铍青铜(QBe2)柱壳在爆轰加载下的膨胀断裂特性。研究表明：材料的细观组织决定材料的静态力学性能与动态断裂性能。当同种材料的组织结构有较大差异时，材料的静态力学性能及动态断裂性能均会有较大改变；当材料的基体组织没有明显变化、只是基体中强化相的多少发生改变时，材料的静态力学性能会有较大差异，而材料的动态断裂性能将没有明显变化，原因在于造成静态力学性能差异的强化相在爆轰加载下的性能趋于一致。

关键词：固体力学；铍青铜；膨胀断裂；高速摄影；金相分析
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

铍青铜(QBe2)属于典型的沉淀硬化型合金，可以进行固溶时效处理，具有高强度、疲劳极限及耐磨性及优良的抗蚀性及导电导热性，同时铍青铜受冲击时不出现火花，故其在航天、通讯、仪器仪表工业中应用广泛，多用作重要弹性元件、耐磨零件、防爆工具等。国内外对金属壳体在爆轰加载下的膨胀断裂研究已经进行了多年，已进行过多种材料在膨胀断裂方面的机理探索，并得出了一些有关金属壳体断裂模式及断裂机理的推论[1-5]。本工作研究不同热处理状态的铍青铜柱壳在爆轰加载下的膨胀断裂特性，并从宏观和微观两个方面对影响壳体断裂的因素进行分析。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示：铍青铜圆管内装炸药，圆管两端为有机玻璃塞，采用一端起爆方式。实验采用 3 种不同状态的铍青铜柱壳(分别编号为 1、2、3)，各状态柱壳静态力学性能见表 1。

1 号柱壳未经过热处理，2 号柱壳和 3 号柱壳均经过固溶时效处理，但二者时效处理温度不同。可以看出，3 种状态的铍青铜柱壳的静态力学性能差别较大。

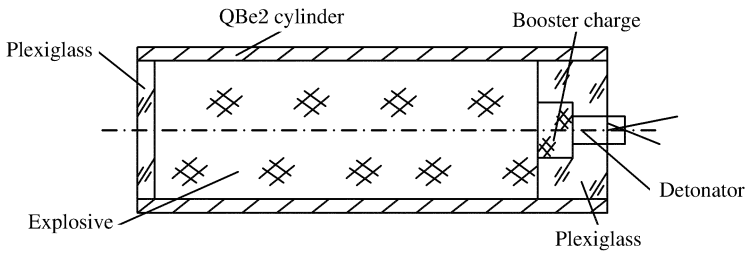


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experiment setup

* **收稿日期**：2005-09-22；**修回日期**：2006-04-07
基金项目：中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金(FZ03001)
作者简介：金 山(1981—)，男，本科，主要从事材料动态断裂研究. E-mail：jin9835@163.com

表 1　3 种状态铍青铜壳体的静态力学性能

Table 1　The static mechanics characteristics of the beryllium bronze cylinder shell

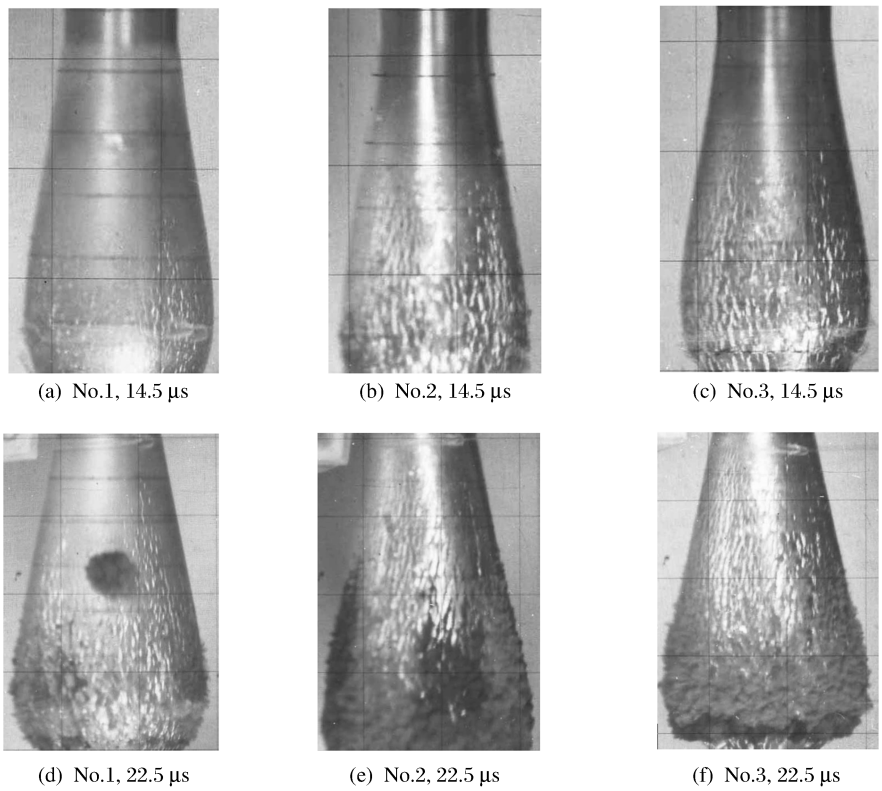
No.	E/(GPa)	$\sigma_{0.2}$/(MPa)	σ_b/(MPa)	δ/(%)
1	—	—	628	24.8
2	139	921	1 110	11.8
3	138	1 181	1 310	6.8

3　实验结果及分析

3.1　圆管膨胀断裂实验

进行了 3 发不同状态的铍青铜柱壳膨胀断裂实验,利用 FJZ-250 型高速转镜式分幅相机拍摄柱壳膨胀断裂过程。所有实验采用相同的测试参数,高速相机转速均为 2.4×10^5 r/min(即照片幅间距为 0.5 μs),实验中对破片进行软回收[6]。

3 种状态铍青铜柱壳的动态膨胀断裂图像如图 2 所示。可以看出,1 号柱壳与后两种柱壳相比,表面裂纹产生及发生贯穿断裂而导致产物泄漏的时刻明显推迟;而后两种状态之间,柱壳裂纹产生及产物泄漏的差异不明显。



(a) No.1, 14.5 μs　(b) No.2, 14.5 μs　(c) No.3, 14.5 μs

(d) No.1, 22.5 μs　(e) No.2, 22.5 μs　(f) No.3, 22.5 μs

图 2　3 种状态铍青铜柱壳不同时刻的动态膨胀图像

Fig. 2　Dynamic swelling images of three kinds of the beryllium bronze cylinder shell

选取距起爆端 90 mm 处为测量点,以实验装置起爆时刻为零时刻,对高速摄影底片进行测量。由于加载条件相同,3 发铍青铜柱壳膨胀实验的平均膨胀速度相近,约 1.3～1.4 mm/μs;平均应变率均在 10^4 s^{-1}量级。表 2 中列出了 3 种状态铍青铜柱壳出现裂纹及产物泄漏的时刻及应变。

从表 2 可以看出,1 号柱壳与另外两种柱壳相比,出现裂纹时刻和产物泄漏时刻均推迟 4～5 μs,相应断裂应变也大幅增加;而 2 号柱壳和 3 号柱壳的裂纹产生时刻相差 0.5 μs,产物泄漏时刻相差 1 μs,

相应应变也变化较小,若考虑相机幅间距为 0.5 μs,同时还存在底片测量误差及人为判读误差,可以认为 2 号柱壳和 3 号柱壳的膨胀断裂时间及应变没有明显差异。

表 2 3 种状态铍青铜柱壳出现裂纹及产物泄漏时刻及应变

Table 2 Time and strain of crack generating and resultant leakage

No.	Crack generating time/(μs)	Crack generating starin/(%)	Resultant leakage time/(μs)	Resultant leakage strain/(%)
1	19.0	60.47	26.5	130.23
2	15.5	30.23	21.5	83.72
3	15.0	25.58	22.5	86.05

3.2 宏观断口分析

图 3 为回收到的铍青铜破片,从左到右分别对应 1 号、2 号、3 号柱壳加载后的破片。从图中可以看出,1 号柱壳的破片尺寸明显大于 2 号和 3 号柱壳的破片尺寸,而 2 号柱壳和 3 号柱壳的破片大小没有明显差异。



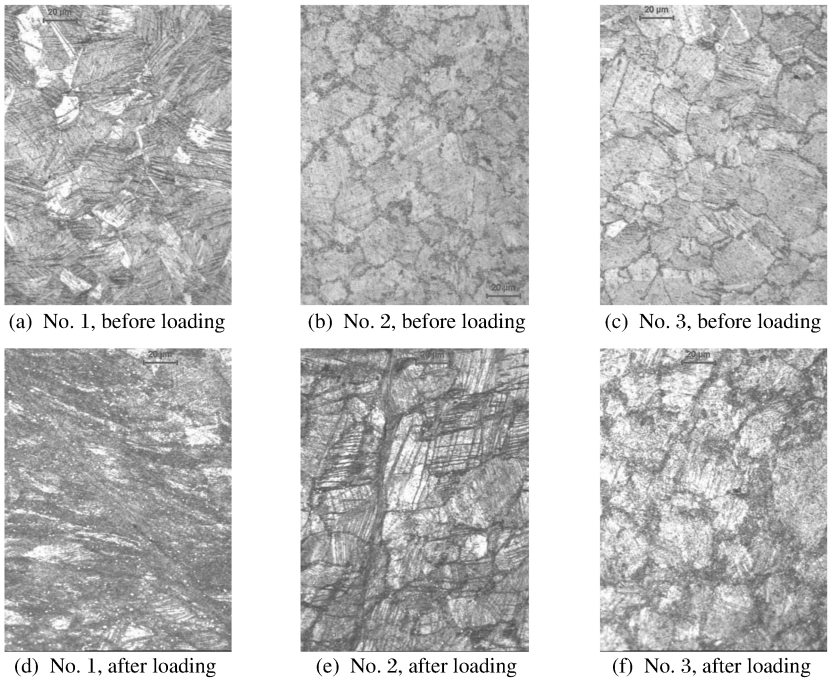
图 3 3 种柱壳状态的破片

Fig. 3 Fragments of three kinds of beryllium bronze

仔细比较 3 种铍青铜的破片,可以发现,1 号柱壳的破片厚度远小于 2 号破片和 3 号破片的厚度,这与从高速摄影照片上观测到的结果相一致,即 1 号柱壳经历了较长时间的膨胀拉伸作用。同时,1 号柱壳具有明显的剪切断裂,2 号和 3 号则破片形状极不规则,可观测到拉伸断裂与剪切断裂并存。

3.3 金相分析

对爆轰加载前的样品和回收到的破片沿垂直于轴向的方向进行切割,经抛光、腐蚀后,在光学金相显微镜下进行观察,3 种状态铍青铜柱壳的原始及破片金相照片如图 4 所示(所用的侵蚀剂为氯化高铁盐酸水溶液,侵蚀 4～6 s)。



(a) No. 1, before loading (b) No. 2, before loading (c) No. 3, before loading

(d) No. 1, after loading (e) No. 2, after loading (f) No. 3, after loading

图 4 3 种状态铍青铜柱壳加载前后金相照片(400×)

Fig. 4 Micrographs of three kinds of beryllium bronze (400×)

图 4 中上面一排为加载前各状态柱壳的金相照片(图 4(a)～图 4(c)),下面一排为加载后各状态破片的金相照片(图 4(d)～图 4(f))。

1 号柱壳组织(图 4(a))为 α-固溶体(面心立方晶格)以及少量的 β 相(体心立方晶格)。2 号柱壳和 3 号柱壳的金相组织(图 4(b)、图 4(c))没有明显差别,但与 1 号柱壳明显不同,由于二者经过固溶时效处理,其金相组织基体为过饱和 α-固溶体,同时有富铍的 γ' 及 γ''强化相从 α-固溶体中析出,弥散分布在 α 相界上与晶内,造成 α 相的滑移阻力,这样就提高了铍青铜的强度及硬度,同时由于两者时效温度不同,故强化相析出的多少不同,引起了两者静态力学性能的差异。

在爆轰加载前,经过热处理的 2 号和 3 号柱壳与未经过热处理的 1 号柱壳组织相比,具有明显的晶界,各晶粒大小分布较为均匀。经历爆轰加载后,在图 4(d)中观测到了形变剪切带,但在图 4(e)和图 4(f)中只存在裂缝及晶粒细化现象。可以看出,加载前原始组织的差异导致了断裂方式的差异,并进一步影响柱壳断裂时间及应变。这进一步说明,壳体基体组织发生较大变化时,断裂模式将会发生变化,进而断裂时间及断裂应变也将随之变化。

3.4　分析讨论

对比分析 3 种状态的铍青铜柱壳的静态力学性能及膨胀断裂过程,可以发现,3 种状态铍青铜柱壳的静态力学性能相互之间差别均较大,而从动态断裂性能来看,1 号柱壳与后两种柱壳差别较大,而后两种柱壳之间差别不明显。

从金相组织可以看出,造成 1 号柱壳与其他两种柱壳的静态力学性能及动态断裂性能均有较大差别的原因应是,1 号柱壳的微观组织(α-固溶体与少量 β 相)与后两种柱壳的微观组织(过饱和 α-固溶体及少量强化析出相)明显不同。

同样可以看出,2 号柱壳和 3 号柱壳的静态力学性能差别较大,而动态断裂性能差别不明显。由于经过不同的时效温度处理后,两种状态柱壳中由过饱和 α-固溶体析出的强化相的多少不同,而细小强化相是影响柱壳静态力学性能的主要因素,故导致二者静态力学性能产生较大变化;而由于二者的基体组织(过饱和 α-固溶体)几乎没有变化,当材料受到高应变率加载时,析出的细小强化相可能在加载下趋于一致,故并未对材料的动态性能造成明显影响,最终两种状态柱壳表现出的动态断裂性能的差别并不明显。

综上所述,材料的细观组织影响材料的静态力学性能及动态断裂性能。当材料的细观组织发生较大的变化(晶格基本结构发生变化或晶格形状大小发生较大变化)时,不仅材料的静态力学性能有较大改变,材料的动态断裂性能也将受到较大影响。当只有材料细观组织中细小强化相的多少发生变化、而基体组织并没有发生明显变化时,材料的静态力学性能才可能有较大变化,但材料在高应变率加载下的动态断裂性能将变化不明显。

4　结　论

(1) 3 种不同状态的铍青铜柱壳,其静态力学性能差别较大,同时 1 号柱壳在爆轰加载下的动态断裂性能与后两种柱壳差别较大,而后两种柱壳在爆轰加载下的动态断裂性能差别不明显;

(2) 由 3 种不同状态铍青铜柱壳的动态膨胀实验和金相分析对比可得:材料的静态力学性能及动态断裂性能由材料的细观组织决定。当材料的晶格基本结构发生变化或晶格形状大小发生较大变化时,不仅材料的静态力学性将有较大改变,材料的动态断裂性能也将随之有较大变化;当只有材料细观组织中细小强化相的多少发生变化、而基体组织并没有发生明显变化时,材料的静态力学性能才会有较大变化,但材料在高应变率加载下的动态断裂性能没有明显变化。

References:

[1]　Gurney R W. The Initial Velocity of Fragments from Bombs:Shells and Grenades [R]. BRL Report 450,1943.

[2]　Taylor G I. Science Papers of Sir G I Taylor [M]. London:Cambridge University Press,1963:387-393.

[3]　Hoggatt C,Recht R. Fracture Behavior of Tubular Bombs [J]. J Appl Phys,1968,39(3):187-195.

[4] Xu Y B, Bai Y L, Shen L T, et al. Formed and Developed Process of Localized Shear Bands in Steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(11): 485-492. (in Chinese)
徐永波, 白以龙, 沈乐天, 等. 钢中剪切变形局部化的形成与发展 [J]. 金属学报, 1995, 31(11): 485-492.

[5] Hu B Y, Dong Q D, Han C S, et al. Studies of Expansion and Fracture of Explosive-Filled Steel Cylinders [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1): 49-54. (in Chinese)
胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. 内部爆轰加载下的钢管膨胀断裂研究 [J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 49-54.

[6] Tang T G, Gu Y, Li Q Z, et al. Expanding Fracture of Steel Cylinder Shell by Detonation Driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 529-534. (in Chinese)
汤铁钢, 谷 岩, 李庆忠, 等. 爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 529-534.

Expanding Fracture of Beryllium Bronze Cylinder Shell

JIN Shan[1], TANG Tie-Gang[1], LI Qing-Zhong[1],
SUN Xue-Lin[1], XU Yong-Bo[2], SHA Gui-Ying[2]

(1. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110015, *China*)

Abstract: High-speed camera and optical microscope were used to study the expanding fracture characteristic of the beryllium bronze (QBe2) cylinder shell under detonation loading. The experimental result show that the static mechanics characteristics and the dynamic fracture characteristic of the material depend on the material's microcosmic structure. When the microcosmic structure of the material has evident difference, the static mechanics characteristics and the dynamic fracture characteristic of the material will be evident changed. When the basic structure of the material have no evident difference while the number of the strengthen phase in the basic structure is changed, the static mechanics characteristics of the material can be evident different, but the dynamic fracture characteristic of the material will be not greatly changed. A reason for such a behavior might be that the strengthen phase which occurs to the difference of the static mechanics characteristics of the material tends to the identical under detonation loading.

Key words: solid mechanics; beryllium bronze; expanding fracture; high-speed photography; micrograph analysis