DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1072-08

爆炸与电磁加载下无氧铜环、柱壳的断裂模式转变*

郭昭亮,范 诚,刘明涛,任国武,汤铁钢,刘仓理
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要:考虑断面收缩率、局域断裂应变以及平均断裂应变,并基于电磁膨胀环、爆炸膨胀环(柱壳)实验平台,研究了高纯无氧铜(TU1)环及柱壳在高应变率载荷下的膨胀断裂行为。采用高速摄影技术拍摄柱壳外壁的膨胀断裂形貌演化过程,用于确定柱壳平均断裂应变;利用激光干涉测速技术获得样品径向膨胀速度历史,用于确定加载应变率;利用样品的全回收测量及微观表征,确定了无氧铜环、柱壳的局域断裂应变及断裂模式。实验表明,随着应变率的增加,TU1 材料的平均断裂应变增加,断面的收缩程度加剧,并在应变率约为 1.0×10^4 s^{-1} 附近会出现明显的断裂模式转变,断面收缩率出现量级上的跳跃,从 10^0 变化至约 10^3,局域断裂应变呈现明显的分区现象。

关键词:颈缩;断裂;膨胀环;高应变率;断裂应变
中图分类号:O347.3 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

材料及结构在高应变率载荷加载下的动力学响应,涉及材料的快速变形及应变局域化、动态断裂等相关过程。材料在高应变率下的力学行为与准静态加载下不同,需要考虑惯性效应与应变率效应带来的影响[1],特别是应变率敏感材料,材料的屈服应力,断裂应变等都会随着应变率的变化而发生变化[2]。此外,断裂现象的发生是一个动态过程,涉及应力波的传播与能量的快速释放,研究表明,能量总是会选择最快的释放路径[3]。因此,不同载荷作用下的动态断裂将展现出不同的特征形貌。为了研究各种类型的断裂现象,人们采用了不同的比较准则,其中断裂应变作为可直接测量的物理量被广泛使用。然而,针对不同的断裂模式,与之相关的断裂应变的选择标准则会出现较大的差别。在厚壁圆筒膨胀断裂研究中,汤铁钢等[4]采用裂纹张开后爆轰产物泄漏时刻的工程应变作为衡量柱壳承受动态载荷程度的标准。随着诊断技术的进步,任国武等[5-6]在实验中利用高速摄影、多点密排激光干涉测速等技术可精密诊断外壁裂纹萌生时刻的应变。然而需要注意的是,上述两类应变都是采用壳体环向的平均变形来计算,虽然可以作为衡量结构承载程度的标准,但这种基于平均假定的计算方法,会抹平局域颈缩带来的应变局域化特征,它只是一种近似,并不能准确描述局域变形特征。另一方面,从定性描述的角度出发,人们将材料的断裂分为脆性断裂与韧性断裂,但这种定性描述并不能准确描述脆性断裂与韧性断裂的程度。比如对于金属这类韧性较好的材料,不同的应变率加载下,宏观上可能都展现出韧性断裂的特征,然而其变形局域化及断口形貌可能会出现较大的差别,甚至会出现断裂模式的转变。H. Zhang 等[7]在研究中发现,金属环在膨胀断裂过程中存在 3 种断裂模式:(1)diffuse necking;(2)sheet necking;(3)shear banding。虽然断面收缩率较小的 diffuse necking 与断面收缩率较大的 sheet necking 都属于韧性断裂,然而显著的塑性局域化差异已经不能单纯的使用韧脆性这一偏宏观唯象的描述来表征。

为了准确描述金属环、柱壳膨胀断裂过程中结构的局域化特征,本文中尝试引入描述局域化变形与断裂程度的断面收缩率及局域断裂应变;利用电磁膨胀环实验平台开展一维环的拉伸断裂研究,并利用新型的线起爆加载平台,开展金属环、柱壳膨胀断裂实验研究;通过各类实验研究,重点关注平均断裂应变、断面收缩率及局域断裂应变随应变率的变化关系,用以阐述平均断裂应变、局域断裂应变在描述结构综合抗变形断裂能力以及材料韧性方面的应用。

* **收稿日期**:2016-04-21;**修回日期**:2016-09-21
基金项目:国家自然科学基金项目(11172279)
第一作者:郭昭亮(1984—),男,博士研究生,助理研究员;**通信作者**:范 诚,fancheng@caep.cn。

1　断面收缩率与局域断裂应变

H. Zhang 等[8]发现，回收破片中的应变并不均匀，因此认为平均断裂应变并不是一个很好的描述试样环变形的物理量。事实上，试样断裂之后的环向平均应变是结构宏观抗变形能力的综合表征，无法准确展现局域的断裂特征，这由其定义所决定。为了能够比较不同载荷强度下的材料与结构的断裂程度，本文中引入断面的收缩率来定量给出塑性局域化程度。针对本文实验中发现的颈缩导致的两种断裂形式 diffuse necking、sheet necking，定义断面收缩率为初始尺寸与断面截面之比，对于环结构：

$$\psi_{\mathrm{r}}=S_0/S_{\mathrm{f}} \tag{1}$$

式中：S_0为初始截面面积，S_{f}为断面面积。对于柱壳，由于轴向变化相对较小，故断面收缩率近似为：

$$\psi_{\mathrm{c}}=S_0/S_{\mathrm{f}}=h_0/h_{\mathrm{f}} \tag{2}$$

式中：h_0为柱壳的初始厚度，h_{f}为断面厚度。由上述定义可以看出，断面收缩率越大，颈缩程度越严重。

若材料在对应的载荷作用下体积变化不明显，则可视为不可压材料，由 $\mathrm{d}V=\mathrm{d}(Sl)=S\mathrm{d}l+l\mathrm{d}S=0$ 可得

$$\mathrm{d}l/l=-\mathrm{d}S/S=\mathrm{d}\varepsilon \tag{3}$$

式中：l 为与断裂面相垂直方向的尺度，在本文讨论的两类情况下，表示环向尺度。于是可以通过测量断面的面积变化得到样品局域的断裂应变

$$\varepsilon_{\mathrm{f_local}}=\ln(S_0/S_{\mathrm{f}}) \tag{4}$$

因此，为了准确描述环、柱壳膨胀断裂特征，本文中选取的断裂应变分为两类：第一，平均断裂应变，为断面/断口完全张开时刻的环向应变；第二，局域断裂应变，由断面收缩率决定，如公式(4)所示。

2　实验结果及其分析

2.1　实验方法

采用爆炸膨胀环实验平台(图 1(a))以及电磁膨胀环实验平台(图 1(b))开展实验研究。样品材料均为高纯无氧铜 TU1，样品从同一根棒材截取加工而成。爆炸膨胀环(外径 42 mm、内径 40 mm、高 2 mm)、柱壳(外径 42 mm、内径 40 mm、高 80 mm)实验中，驱动器为 20 钢，炸药为黑索金(RDX)粉末或泰安(PETN)粉末填充而成，通过改变装药的直径获得不同应变率的加载状态；电磁膨胀环(外径 42 mm、内径 40 mm、高 1 mm)实验中，通过改变加载电压获得不同应变率的加载状态。TU1 试样环、柱壳实物图如图 2 所示。

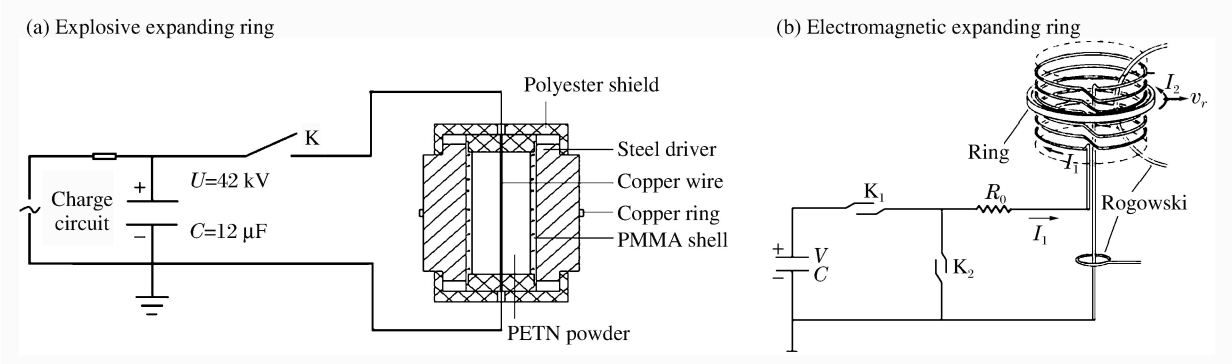

图 1　爆炸膨胀环实验平台[9]和电磁膨胀环实验平台示意图[10]

Fig. 1　Sketch of experimental setup of explosive expanding ring and electromagnetic expanding ring

实验采用中国工程物理研究院流体物理研究所自主研制的激光干涉测速系统(Doppler pins system，DPS)，获得 TU1 样品膨胀断裂过程的径向速度历史，以此计算加载的应变率。样品的断裂模式通过断面的形貌进行判断，平均断裂应变采用样品完全拉断时刻的环向膨胀量进行估计。膨胀环实验中，采用全回收装置，可以利用回收样品几何测量获得最终的平均断裂应变；而在柱壳的膨胀断裂中，很难

做到全回收，于是我们同时使用了高速摄影技术，获得柱壳膨胀断裂的演化图像，利用图像判读柱壳在不同应变率加载下的平均断裂应变；断面收缩率及局域断裂应变利用 SEM 进行断口的微观表征几何测量获得。

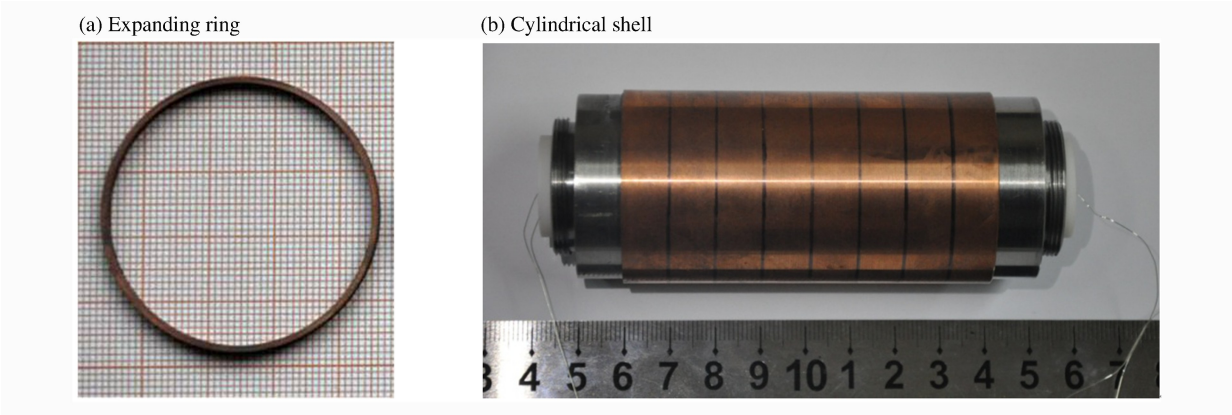

图 2 高纯无氧铜 TU1 环和柱壳样品实物图

Fig. 2 Specimen of oxygen-free high-conductivity copper (TU1)

2.2 实验结果

实验采用 DPS 测速技术、高速摄影及破片回收分析，获得电磁膨胀环、爆炸膨胀环(柱壳)实验数据如表 1 所示，表中 $\dot{\varepsilon}$ 为加载应变率，$\varepsilon_{\text{f-average}}$ 为平均断裂应变，ψ 为断面收缩率，$\varepsilon_{\text{f-local}}$ 为局域断裂应变其中应变率为加载峰值应变率。

表 1 电磁膨胀环、爆炸膨胀环(柱壳)实验数据

Table 1 Strain rate and fracture strain of experiments

实验号	样品	加载	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	$\varepsilon_{\text{f-average}}$	ψ	$\varepsilon_{\text{f-local}}$
1	环	3.0 kV	2.8×10^3	0.155	—	—
2	环	3.5 kV	4.6×10^3	0.224	78	4.36
3	环	4.0 kV	5.4×10^3	0.333	13	2.56
4	环	爆炸	5.8×10^3	0.130	4	1.39
5	柱壳	爆炸	8.6×10^3	0.267	2.5	0.92
6	柱壳	爆炸	12.0×10^3	0.465	～500	6.21

从表 1 可以看出，随着应变率的增加，电磁膨胀环的平均断裂应变也随之而增加，然而，仅仅通过试样完全拉断时刻的环向平均应变，无法描述与断裂模式相关的信息。为了给出断裂模式对应变率的依赖关系，我们在 SEM 上对膨胀环样品的断面进行了微观表征。图 3 中分别给出了电磁膨胀环与爆炸膨胀环的断面形貌，从图中可以看出，在爆炸驱动加载与电磁驱动加载下，样品的断裂模式均为局域的颈缩拉伸导致的韧性断裂。不同之处在于，爆炸膨胀环断面收缩率较小，在本文的实验状态下约为 4，且断面存在明显的韧窝(图 3(d))；而电磁膨胀环由于试样环中存在大电流，温升较高，在环向失稳之后，由于局域的热软化存在，颈缩程度相比而言更为严重。加载电压为 3.0 kV 时(图 3(a))，样品局域的表观断面收缩率为 6，然而我们注意到样品在断口局域出现了较为明显的烧蚀熔化现象，表观的断面收缩率并非纯粹由热软化导致，而是耦合了其它物理(局部放电)效应，不适合用来判断局域断裂应变。而加载电压为 3.5 kV(图 3(b))、4.0 kV(图 3(c))时，断口局域并未出现明显烧蚀，且断面存在一定程度的韧窝，所以可以较为准确反映材料自身的特征，其断面收缩率分别为约为 78、13。

实验中，利用高速分幅相机拍摄了 TU1 柱壳膨胀断裂过程，典型的破坏图像如图 4 所示，其中图 4(a)为实验 5 结果，其应变率约为 $8.6\times10^3\ \text{s}^{-1}$，图 4(b)为实验 6 结果，应变率约为 $1.2\times10^4\ \text{s}^{-1}$。通过高速摄影图像可以看出，应变率较低时，断裂模式为 diffuse necking，断面收缩率较小；而当应变率较大时，断裂模式为 sheet necking，断面收缩率较大。

为了更清晰地展现不同断裂模式下的断口特征，并对断面收缩率进行定量测量，利用 SEM 对回收样品断口形貌进行了表征，图 5 中分别给出了 TU1 柱壳在应变率为 8.6×10^{3} s^{-1}（图 5(a)）与 12.0×10^{3} s^{-1}（图 5(b)）加载下的断面形貌。其中图 5(a))的断面出现大小不同的韧窝，是典型的韧性断裂；但图 5(b))却呈现出类似刀刃状的断口。通过断口几何测量，发现应变率较低时，柱壳径向的收缩率约为 2.5；而当应变率较高时，由于断面过于锋利，断面收缩率很难精确测量，约为 500～1 000 的量级。虽然加载应变率变化不大，却出现了完全不同的断裂模式，断面收缩率出现了显著的量级增加。

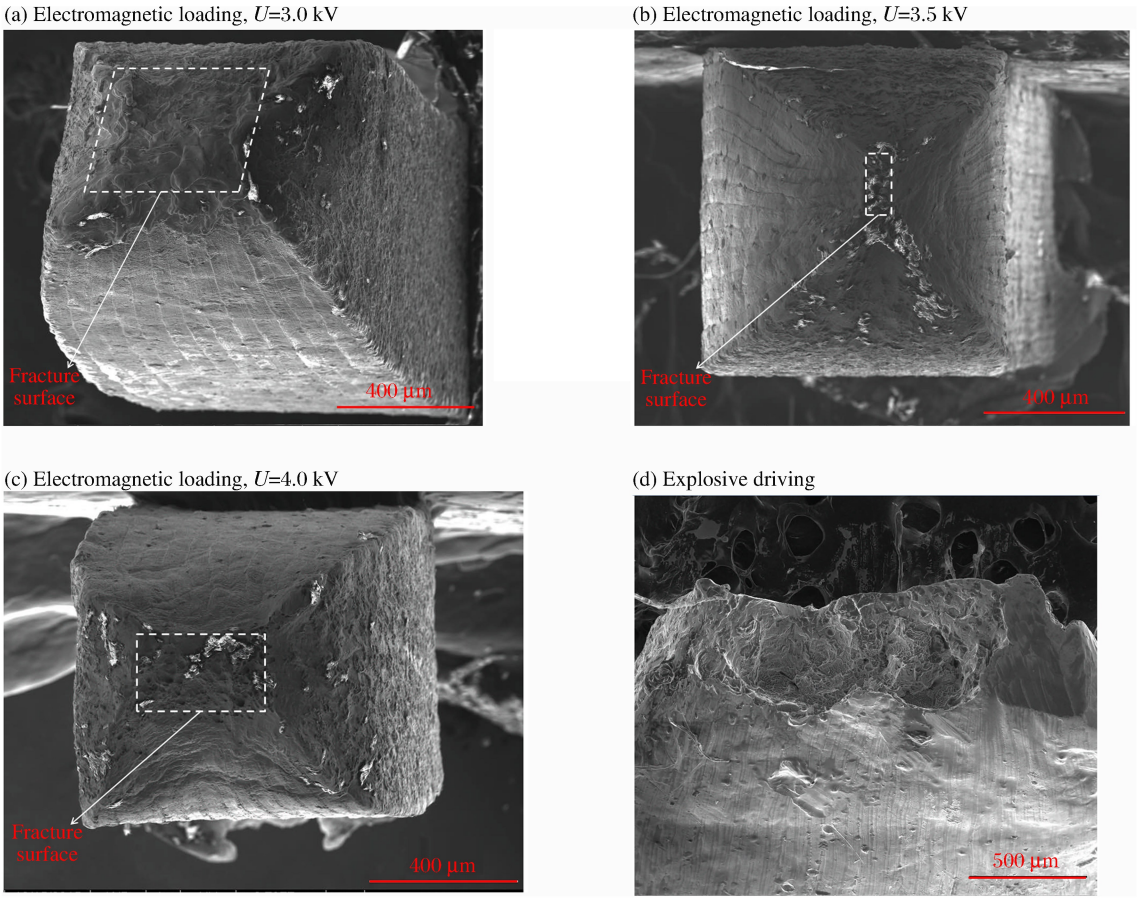

图 3　电磁膨胀环、爆炸膨胀环典型断面形貌

Fig. 3　Fracture feature of expanding rings under electromagnetic and explosive loading

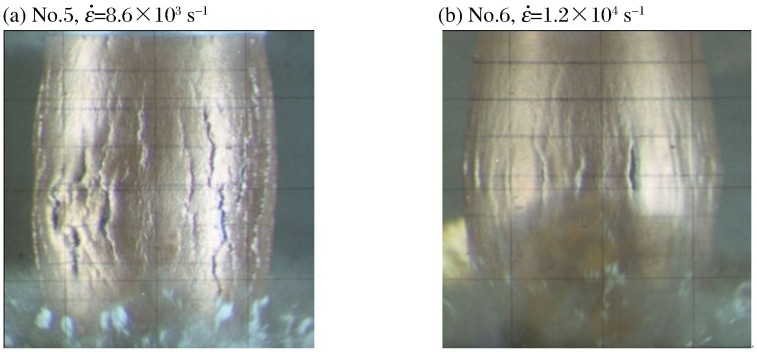

图 4　爆炸膨胀柱壳高速摄影图像

Fig. 4　High speed camera images of expanding cylindrical shell

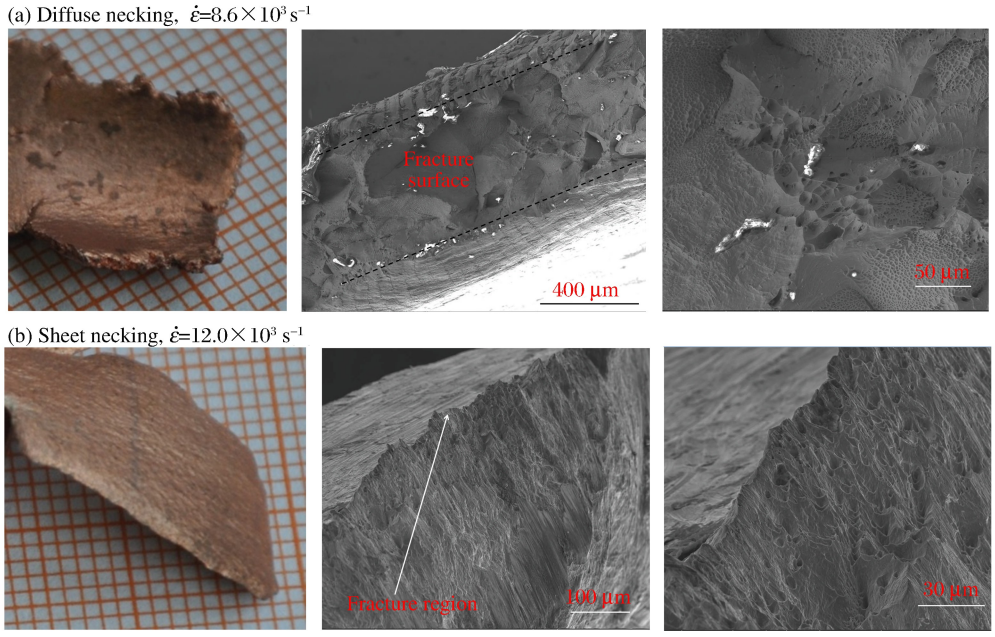

图 5 膨胀柱壳拉伸破片及断面微观表征图片

Fig. 5 Fragments and microscopic fracture surface of expanding cylindrical shell

2.3 平均断裂应变、局域断裂应变对应变率的依赖关系

通过 SEM 的分析已经发现，随着应变率的增加，断裂模式发生了转变，为了对这一过程进行量化，本节将尝试寻找断裂模式转变与断裂应变之间的半定量关系。研究发现应变率对材料与结构的变形与断裂起着非常重要的影响，D. Grady[2] 指出，断裂应变 ε_f 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 之间满足关系 $\varepsilon_f \propto \dot{\varepsilon}^{2/3}$。为了更好地理解 TU1 断裂应变与应变率之间的关系，我们利用文献[11]中 M 态 TU1 膨胀环碎裂数据计算其平均断裂应变，如表 2 所示。在膨胀环实验研究中，加载应变率尚未达到 $10^4\ s^{-1}$，为了与膨胀柱壳的应变率进行对比，选择文献[12]中关于 TU1 环数值模拟的数据，并将这些数据与本实验结果绘制于同一张图中，如图 6 所示。

表 2 不同应变率下 M 态 TU1 环碎裂数据[11]

Table 2 Fragmentations data of M state TU1 rings at varying strain rates

实验编号	R_0/mm	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	N_f	$\bar{L}_f$/mm	$\varepsilon_{f\text{-average}}$
MR-01	21.1	3.50×10³	3	51.0	0.143
MR-02	21.1	4.70×10³	4	39.3	0.170
MR-03	21.1	5.04×10³	7	23.1	0.199
MR-04	21.1	5.50×10³	7	24.0	0.237
MR-05	21.1	6.05×10³	9	21.6	0.388

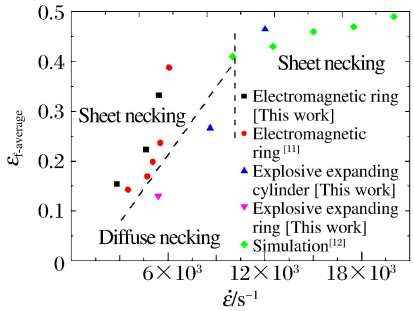

图 6 电磁膨胀环、爆炸膨胀环/柱壳中平均断裂应变与应变率的关系

Fig. 6 Relationship between strain rate and average fracture strain in electromagnetic ring and explosive expanding ring/cylinder

结果表明，文献[11]中的 TU1 膨胀环应变率与断裂应变之间的关系，与本文电磁膨胀环的数据落在同一个区域，电磁膨胀环的断裂主要以 sheet necking 模式为主，断面的收缩率约在 $10^1 \sim 10^2$ 的量级。不同载荷形式下的 TU1 环、柱壳中平均断裂应变随着应变率的增加，呈现出先增加，然后在达到一定值之后趋于稳定，这一趋势的过渡恰好位于应变率 $10^4\ s^{-1}$ 附近，断裂模式发生转变之处。这一改变对于爆炸加载下的 TU1 样品而言，意味着应变率诱导的断裂模式转变，与之对应的断面收缩率则发生了量级的跳跃。爆炸膨胀环、柱壳结构，在低于此应变率时，断面的收缩率（$\sim 10^0$）较小，以 diffuse necking 为主，而高于

此应变率时，断面的收缩率(10^2～10^3)急剧变大，以 sheet necking 为主。需要特别指出的是，在应变率-平均断裂应变图上，需要特殊的标记才能给出不同断裂模式之间的分区，在图 6 中利用虚线进行区分。除非事先知道实验结果，否则单从应变率-平均断裂应变图上，很难进行区分。这一现象从另个一侧面说明，采用平均思想获得的断裂应变，本质上而言，很难准确抓住不同断裂模式的特征。

为了更清晰地定量描述断裂模式的转变，图 7 中给出了电磁膨胀环、爆炸膨胀环/柱壳断面收缩率随着应变率的变化关系。

电磁膨胀环在 3.0 kV 加载下，由于无氧铜韧性较好，应变率较低时局域断裂较慢，于是颈缩区域会有充裕的时间进行局部放电，由此导致的烧蚀熔化影响了对断面收缩率的解读。为此，在图 7 中只给出了加载 3.5、4.0 kV 的数据。在材料体积变化不显著的情况下，利用公式(4)可以在断裂收缩率与局域断裂应变之间建立起定量关系，图 8 中给出了电磁与爆炸加载下平均断裂应变与局域断裂应变随应变率的变化。

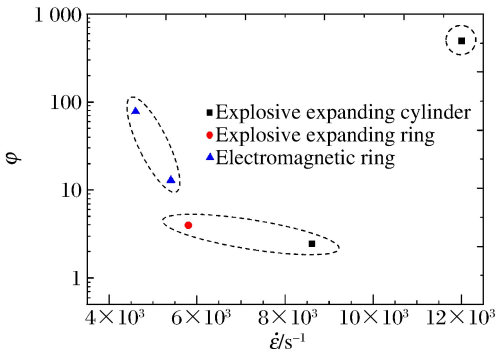

图 7 断面收缩率随应变率的变化

Fig. 7 Variation of area reduction with strain rate

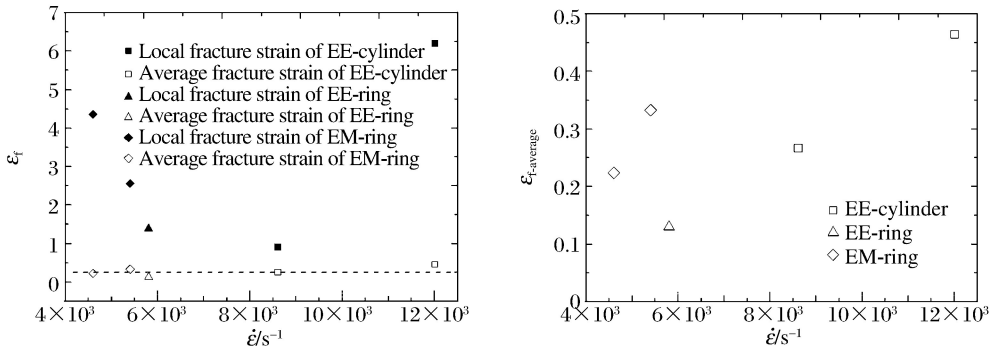

图 8 爆炸与电磁加载下膨胀环、柱壳局域断裂应变与平均断裂应变

Fig. 8 Local fracture strain and average fracture strain of explosive expanding ring/cylinder (EE-ring/EE-Cylinder) and electromagnetic ring (EM-ring)

结果发现，高应变率加载下无氧铜环的平均断裂应变(0.333)高于低应变率加载下的平均断裂应变(0.224)；但高应变率加载下的断面收缩率(13)反而要低于低应变率加载下的断面收缩率(78)。这种反转现象产生的原因在于，平均断裂应变是通过回收样品的环向伸长量去计算的，既包含了均匀变形区域在环向的变形贡献，又包含了颈缩点、断裂点对变形区域的贡献，高应变率加载下颈缩点、断裂点的数目多于低应变加载，因此高应变率加载下的平均断裂应变要高于低应变率加载下的平均断裂应变，因此平均断裂应变是样品环向整体的变形表征，材料与结构抗变形能力的体现；而局域断裂应变是通过断口的收缩率确定的，是断裂点处的变形表征，是材料的抗变形能力的体现，随着应变率的增加，局域断裂应变的变小可能与高应变率脆断特征相关。这一发现告诉我们，利用平均断裂应变评估材料的韧性，可能会极大地低估材料的抗变形能力，而断裂点的局域断裂应变则能更好地评估材料的抗变形能力。此外，在所有的加载状态下，平均断裂应变均显著低于局域断裂应变。这一特征与平均断裂应变、局域断裂应变的计算相关。

同时，我们通过塑性功的计算发现，爆炸加载下膨胀环在初期受到冲击载荷之后自由膨胀，在结构失稳之前温升较小，约为 20～30 ℃，应变率大约在 10^4 s^{-1} 以下时，断面的收缩率在 10^0 的量级，这一区域对应较低应变率加载下的爆炸膨胀环/柱壳；而当应变率在 10^4 s^{-1} 之上时，断裂模式转变导致断面收缩率急剧增加，因此在断面收缩率图(见图 7)上展现出较为明显的分区现象。另一方面，由于电磁膨胀

环在加载阶段环内存在感应电流，将导致约 200～300℃的温升，温度的升高相当于附加给试样环较高的环境温度，带来比爆炸加载更大的软化效应。温度的软化效应使得金属环更容易发生塑性流动，从而导致断裂应变的增加，断面收缩率约 10^1～10^2。所以与爆炸膨胀环相比，相同应变率加载下的电磁膨胀环断裂应变更大。因此在图 7 中，电磁加载下的断面收缩率要明显高于爆炸加载下的断面收缩率。

通过上述的分析我们发现，爆炸膨胀环、柱壳断裂模式的转变，主要以应变率效应为主导，随着应变率的增加，超过一定的临界值(TU1 材料约为 10^4 s^{-1})之后，断面的收缩率会出现量级的跳跃，从 10^0 变化至约 10^3；而爆炸膨胀环与电磁膨胀环之间的断裂模式转变则是温度效应与应变率效应共同主导，相同应变率加载下，电磁膨胀环的局域变形程度要明显高于爆炸膨胀环。同时，我们通过图 6～8 之间的对比可以发现，在较低应变率的状态时，爆炸膨胀环与电磁膨胀环的环向平均断裂应变相对比较接近，但断面的收缩率却落在完全不同的区域，这直接导致了平均断裂应变与局域断裂应变的显著差异。这一特征告诉我们，描述断裂现象尤其是涉及断裂模式转变时，除了平均断裂应变之外，还需要断面收缩率/局域断裂应变来确定不同应力状态下的断裂特征差异。

3 结 论

本研究利用电磁膨胀环，爆炸膨胀环、柱壳实验，研究了高纯无氧铜 TU1 的动态拉伸断裂行为，为了更好地刻画断裂模式的转变，在平均断裂应变的基础上引入了断面收缩率以及局域断裂应变，初步得到如下结论：

(1)高纯无氧铜 TU1 环、柱壳的平均断裂应变随着应变率的增加而增加，且在应变率约为 10^4 s^{-1} 附近会出现断裂模式转变，平均断裂应变增长率骤然变缓，但断面收缩率从约 10^0 变化至 10^2～10^3，发生数量级的跳跃；低于此应变率，高纯无氧铜 TU1 环、柱壳的断裂模式以 diffuse necking 为主，高于此应变率，断裂模式以 sheet necking 为主。

(2)在较低应变率加载下，虽然爆炸膨胀环与电磁膨胀环的平均断裂应变相对接近，但其断面收缩率出现约 1～2 个量级的差异，断面收缩率-应变率图上，呈现出相对孤立的区域，与之相应的局域断裂应变同样差异显著；其原因在于电磁膨胀环实验中，样品环在加载初期即存在大电流，导致了环的整体软化，使之更易于进行塑性流动，随后在颈缩局域产生更大的塑性变形，增加了断面收缩率。

(3)所有的加载状态下，平均断裂应变均显著低于局域断裂应变，原因在于平均断裂应变的计算既包含了均匀变形区域在环向的变形贡献，又包含了颈缩点、断裂点对变形区域的贡献，而局域断裂应变只体现断裂点处的变形特征；所以可以认为平均断裂应变是材料与结构抗变形能力的综合体现，局域断裂应变是材料抗变形能力的体现。

从更为广泛的角度而言，在材料与结构的动态断裂现象描述中，断裂应变使用时需要重点区分平均断裂应变与局域断裂应变，平均断裂应变是材料与结构抗变形能力的表征，与结构的失稳相关，是材料动态性能、样品的宏观几何结构以及加载历史耦合所致；而局域断裂应变则主要是材料动态性能与加载历史相互作用所致。由于结构中尚存在较大比例的均匀变形区域，利用平均断裂应变评估材料的韧性，会极大低估材料的抗变形能力。因此，除了环向平均断裂应变之外，还需要引入描述颈缩程度的断面收缩率、局域断裂应变及颈缩点断裂点的数目，这样才能更完整地展现材料与结构的断裂特征。

感谢张世文在文章撰写过程中对本文的指导帮助。

参考文献：

[1] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京：国防工业出版社，2005.

[2] Grady D. Fragmentation of rings and shells—The legacy of N. F. Mott[M]. Berlin: Springer, 2006.

[3] 周风华，郭丽娜，王礼立. 脆性固体碎裂过程中的最快卸载特性[J]. 固体力学学报，2010，31(3)：286-295.
Zhou Fenghua, Guo Lina, Wang Lili. The rapidest unloading characteristics in the fragmentation process of brittle solids[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(3): 286-295.

[4] 汤铁钢，李庆忠，孙学林，等. 45 钢柱壳膨胀断裂的应变率效应[J]. 爆炸与冲击，2006，26(2)：129-133.
Tang Tiegang, Li Qingzhong, Sun Xuelin, et al. Strain-rate effects of expanding fracture of 45 steel cylinder shells driven by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 129-133.

[5] 任国武，郭昭亮，汤铁钢，等. 高应变率加载下金属柱壳断裂的实验研究[J]. 兵工学报，2016，37(1)：77-82.
Ren Guowu, Guo Zhaoliang, Tang Tiegang, et al. Experimental research on fracture of metal case under loading at high strain rate[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(1): 77-82.

[6] Ren Guowu, Guo Zhaoliang, Fan Cheng, et al. Dynamic shear fracture of an explosively-driven metal cylindrical shell[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 95: 35-39.

[7] Zhang H, Ravi-Chandar K. Dynamic fragmentation of ductile materials[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(21): 214010.

[8] Zhang H, Ravi-Chandar K. On the dynamics of necking and fragmentation—I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O[J]. International Journal of Fracture, 2006, 142: 183-217.

[9] 汤铁钢，李庆忠，陈永涛，等. 实现材料高应变率拉伸加载的爆炸膨胀环技术[J]. 爆炸与冲击，2009，29(5)：546-549.
Tang Tiegang, Li Qingzhong, Chen Yongtao, et al. An improved technique for dynamic tension of metal ring by explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5): 546-549.

[10] 桂毓林，孙承纬，李强，等. 实现金属环动态拉伸的电磁加载技术研究[J]. 爆炸与冲击，2006，26(6)：481-485.
Gui Yulin, Sun Chengwei, Li Qiang, et al. Experimental studies on dynamic tension of metal ring by electromagnetic loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6): 481-485.

[11] 桂毓林. 电磁加载下金属膨胀环的动态断裂与碎裂研究[D]. 四川绵阳：中国工程物理研究院，2007.

[12] 陈磊，周风华，汤铁钢. 韧性金属环高速膨胀碎裂过程的有限元模拟[J]. 力学学报，2011，43(5)：861-870.
Chen Lei, Zhou Fenghua, Tang Tiegang. Finite element simulation of the high velocity expansion and fragmentation of ductile metallic rings[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(5): 861-870.

Fracture mode transition in expanding ring and cylindrical shell under electromagnetic and explosive loadings

Guo Zhaoliang, Fan Cheng, Liu Mingtao, Ren Guowu, Tang Tiegang, Liu Cangli

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In the present study, we designed the electromagnetic and explosive driving expanding ring/cylinder experiments and investigated the expanding fracture characteristics of oxygen-free high-conductivity copper (OFHC) in consideration of the conception of the reduction of area, the local fracture strain and the average fracture strain. We used a high speed camera to record the fracture process and obtain the fracture strain of the copper cylinder and the Doppler pins system (DPS) to obtain the radial velocity of the specimen in order to achieve the strain rate of the loading. We verified the local fracture strain and the fracture mode by analyzing the soft-recovered fragments of the expanding ring and the cylinder. Based on the experimental results, we found that the average fracture strain and the reduction of the area increases as does the strain rate. Moreover, the fracture mode transition may occur at the strain rate of about $1.0\times10^4\ s^{-1}$, and the reduction of the area may increase by an order of magnitude, i.e. from the order of 10^0 to that of 10^3, and the local fracture strain exhibits an obvious subarea.

Keywords: necking; fracture; expanding ring; high strain rate; fracture strain

(责任编辑　曾月蓉)