

内部爆轰加载下的钢管膨胀断裂研究

胡八一 董庆东 韩长生 王德生 胡海波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都 610003)

摘要 采用一种改进后的前照明分幅摄影技术,研究了45号钢管在三种不同猛度炸药加载下的膨胀断裂行为,得到了与材料动态断裂行为有关的一些参数值。还结合壳体材料性质及载荷强度,对破片的断裂特征及尺度分布进行了讨论。

关键词 爆炸加载 钢管 动态断裂 破片

金属管在爆炸载荷下的高速变形和碎裂问题,由于其重要的应用背景,很早就引起了人们的重视。1943年 Gurney^[1]给出了一个预测圆筒在爆炸加速下破片速度的经验公式,几乎同时, Mott^[2]则利用统计激活的概念来处理断裂新产生的表面上弹性和塑性卸载波的传播,导出了一个破片分布公式。这期间, Taylor^[3]对这一问题作了深入广泛的研究,由于他在实验中引入了光学照相,观测证实管子破裂是由外表面沿径向向内壁发展的,于是提出了当管内爆轰产物压力降至壳体材料的屈服强度时,管子发生贯穿性断裂的著名的 Taylor 断裂判据。后来, Hoggatt^[4]对 Taylor 的工作做了一些改进,以便能解释剪切唇的存在。1976年 Ivanov^[5]从能量观点出发,导出了管子断裂时刻的应变及应变率($\epsilon \sim \dot{\epsilon}$)关系。近来, 封加波等^[6]从累积损伤的观点出发,提出了壳体断裂时刻的损伤度判据,较好地解释了 $\epsilon \sim \dot{\epsilon}$ 关系中“塑性峰”的存在。

70年代以来,国外在这一领域的研究扩展到断裂机理的探讨和断裂的数值模拟方面^[7-8],并取得较大进展。陈大年等^[9]也曾对45#钢管的膨胀断裂作了研究,基于流体弹塑性模型,运用 Taylor 判据,计算了壳体的断裂时刻,结果与 X 光阴影法摄影数据较为接近。

本文的目的是将一种改进后的前照明分幅照相技术应用到这一研究中,以期对脉冲加载下的金属柱壳的动态断裂有较深入一步的认识。

1 实验方法

试验钢管由正火态的45#钢的棒材加工而成,有两种尺寸。一种圆管长220mm,内径32mm,壁厚有3.6mm及8mm两种;另一种圆管长240mm,内径100mm,壁厚11mm。这种钢经600℃油淬和400℃回火后,其细观组织由粗大不均匀的铁素体/珠光体转为细小均匀的索氏体。加载用的炸药是 J0-9159, TNT/RDX(40/60)及 RDX/PVB(55/45),其爆压各为36.8GPa、27.0GPa和4.8GPa,密

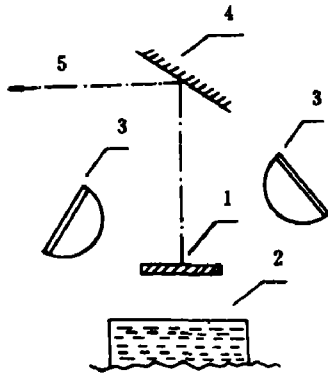


图 1 实验场地布局图

1. 试验圆管, 2. 回收桶, 3. 照明弹,
4. 反光镜, 5. 至分幅相机

Fig. 1 Schematic diagram of
experimental arrangement

1. Explosion tube, 2. Recovery pail, 3. light-bomb,
4. Reflector, 5. To the frame camera

200mm×10mm 的 TNT/RDX 药饼构成, 圆管正下方埋入一回收桶, 桶中装满水以实现软回收的目的。

2 结果与分析

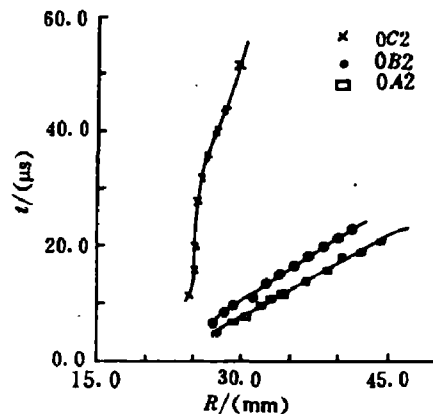
2.1 圆管的膨胀破裂特征

实验发现, 高能炸药 A、B 加载的管子, 管内爆轰波所到之处, 管壁即刻向外膨胀, 经过几个微秒或更长时间(与管子厚度成正比), 圆管外表面才出现裂纹, 再经历几个微秒或十多个微秒后, 管子才发生贯穿性断裂, 爆轰产物向外逸出。低能炸药 C 加载的管子, 爆轰波传过很久之后, 起爆端附近才出现径向膨胀, 随后轴向裂纹出现, 并贯穿、冒烟, 此时整个管子的膨胀还很小, 裂纹数量也屈指可数。图 2 即是未热处理的 45# 钢在三种炸药加载下, 管子外表面中部同一点的膨胀(至断裂为止)历史。从图中明显看到, 炸药猛度愈大, 管子径向加速度愈大, 贯穿断裂前的塑性变形量也越大。

将分幅底片置于大型工具显微镜下, 测量各圆管的同一观察点的 $R(t)$ 值, 直到该处有产物逸出为止。表 1 即为断裂时刻的实测数据, 其中 t_f 表示管内滑移爆轰波到达测量点的时间, R_f/R_0 则为该处管子发生贯穿性断裂时壳体外半径 R_f 与初始外半径 R_0 之比, $\bar{\epsilon}_f = (R_f -$

度分别是 $1.86\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $1.78\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $0.83\text{g}/\text{cm}^3$ 。为简明起见, 我们在此作以下的约定, 设置一三位数来表示各次实验, 将钢管壁厚由薄到厚的三个尺寸约记为 1、2、3(置个数位), 把前述三种炸药记为 A、B、C(置十数位), 正火态的钢以 0 标志, 热处理后的钢以 1 标志(置百数位)。例如, 0B2 表示未调质的 45# 钢管, 壁厚 8mm, 在 TNT/RDX 加载下的实验号。

受 Clark^[10] 实验照片的启发, 我们对传统的前照明分幅照相技术进行了摸索改进, 测得了很清晰的壳体运动图象, 为断裂过程的分析及一些参数的准确测量, 提供了可信的基础。实验场地布局如图 1 所示, 在圆管前方左右各置一照明弹, 一上一下, 照明弹由大约 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的氩气袋和一块 \varnothing

图 2 钢管在 A、B、C 三种炸药加载下的 $R-t$ 曲线Fig. 2 The $R-t$ curves of the steel tube under internal explosion loadings with A, B, C explosives, respectively

$R_0)/R_0, \dot{\bar{\epsilon}}_f = \bar{\epsilon}_f/t_f, C/M$ 为炸药质量 C 与圆管质量 M 之比值。以上结果表明, $\dot{\bar{\epsilon}}_f$ 在 $10^3 \sim 10^6 \text{s}^{-1}$ 范围, 同种金属材料在强度不同的脉冲载荷下, 其力学响应机制不同, 载荷越强, 金属发生塑性变形的趋势越大, 其断裂前的膨胀应变也越大。这与 Clark^[10] 的实验结果相吻合, 他对 HF-1 钢管 ($\delta=6\text{mm}$) 及 Bearcat 钢管 ($\delta=6\text{mm}$) 各用 PBX-9404、TNT 及 Baratol 加载, 结果发现“管子贯穿断裂的应变各为 1.7、1.5、1.3 和 1.6、1.5、1.3”。

表 1 圆管断裂时刻的实验数据比较

Table 1 Comparison of experimental data when the tube was broken

数据 No	0A1	1A1	0A2	1A2	0B2	0C2
C/M	0.44	0.44	0.18	0.18	0.16	0.08
$t_f/(\mu\text{s})$	15.9	15.4	20.9	22.5	18.4	56.0
R_f/R_0	2.32	2.29	1.85	1.89	1.52	1.26
$\bar{\epsilon}_f/(\%)$	131.1	129.0	84.7	88.7	52.3	26.4
$\dot{\bar{\epsilon}}_f/(\times 10^6 \text{s}^{-1})$	0.83	0.84	0.41	0.38	0.28	0.05

2.2 45# 钢的断裂曲线

Garg^[11] 的研究表明, 对任何脉冲加载问题, 其断裂判据的构成中必须含有 $\dot{\epsilon}$ 这一物理量才是合乎实际力学条件的, 表 1 中的实验结果也说明了这一点。因此, 我们采用含有 $\dot{\epsilon}$ 、 ϵ 双变量的 Ivanov^[6] 判据来讨论 45# 钢的断裂。

由于壳体产生新的断裂面需要消耗能量, 若这些能量由断面邻区介质在受拉伸过程中所贮存的弹性变形能提供, 则对于圆管有 $\int q dV = \lambda S$, 其中 q 为单位体积弹性变形能, λ 为扩展裂纹的单位面积的比功, S 为断裂面积, V 为体积。假定流应力满足粘弹性关系 $\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\epsilon}$, 可推出 Ivanov 判据为:

$$\mu^2 \dot{\epsilon} \epsilon (\epsilon + 2) / 2 + \dot{\epsilon} (2\mu \epsilon - \alpha) + \ln(\epsilon + 1) = 0 \quad (1)$$

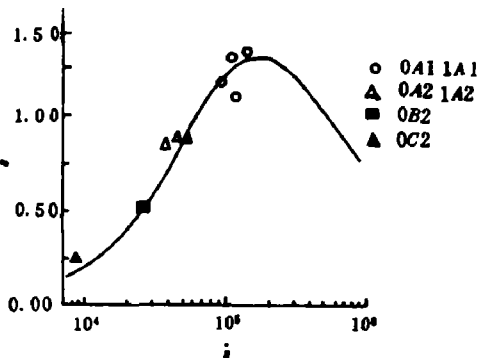


图 3 钢管的 Ivanov 断裂曲线

Fig. 3 Ivanov's fracture curve for steel tube

式中 $\mu = \eta/\sigma_0, \alpha = 4E\lambda/3c\sigma_0^2$, 其中 E 为杨氏模量, c 为声速。对 45# 钢, 由文献[5-6], 取 $\sigma_0 = 5.7 \times 10^8 \text{Pa}, E = 2.1 \times 10^{11} \text{Pa}, c = 4.6 \times 10^3 \text{m/s}$, 在计算机上调节 η 和 λ 两个动态参数, 直到 45# 钢的 $\bar{\epsilon} \sim \dot{\epsilon}$ 曲线与实验中所得到的断裂瞬时的 $\bar{\epsilon} \sim \dot{\epsilon}$ 数据最佳吻合, 如图 3 所示, 这时 $\eta = 2.1 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{s}, \lambda = 10.4 \times 10^4 \text{J/m}^2$ 。这两个值与 Ivanov^[6] 及 Stelly^[12] 对其它钢的结果在量级上是一致的。因此, 我们认为 45# 钢的断裂曲线有其实际意义。即只要 45# 钢管的 $\bar{\epsilon}_f$ 和 $\dot{\bar{\epsilon}}_f$ 满足曲线上的任一点

值, 断裂便产生了。

2.3 破片断裂特征

将各次试验回收到的全部破片分析归类,我们发现管子的碎裂呈图4所示趋势,即存在两类基本的断裂方式,拉伸和剪切。当管子的径向膨胀应变率由 10^3s^{-1} 增大到 10^5s^{-1} 时,断裂由拉伸转为剪切;当壳体材料的晶粒由粗大不均匀的珠光体/铁素体组织变为细小均匀的索氏体时,亦有同种趋势。

拉伸断裂面呈灰暗纤维状,如图5(a)所示;剪切断裂面则光亮平滑,如图5(b)所示。在扫描电镜下(SEM),拉伸断口的细观组织形貌如图6(a)所示,即主要是解理和准解理特征,显然它是一种低能量的断裂方式,属脆性断裂。图6(b)则为剪切断口的细观特征,密排韧窝,韧窝的存在表明圆管碎裂前曾经历了强烈的塑性剪切变形,显然这是一个消耗高能量的动态韧性断裂过程。

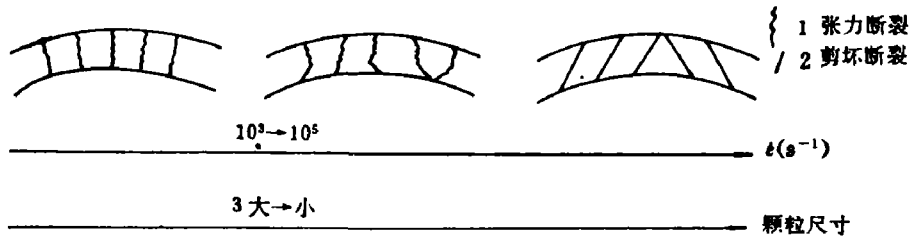
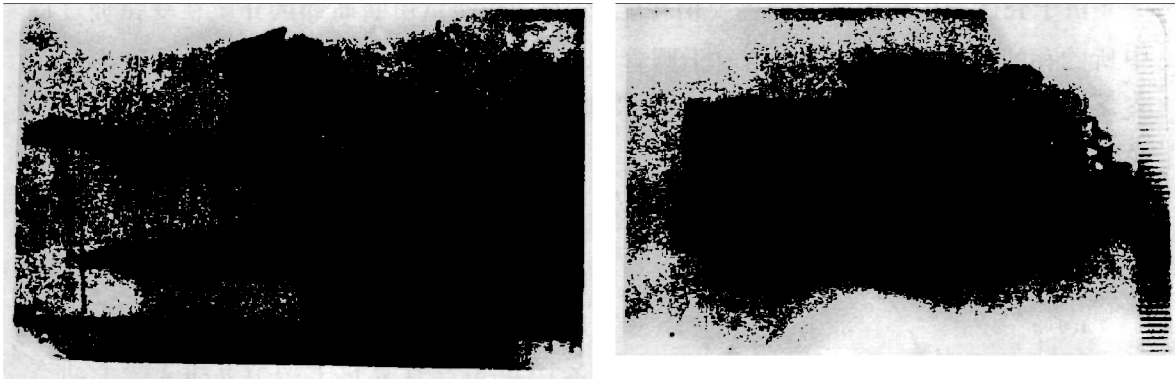


图1 钢管的断裂模式

Fig. 1 The fracture modes of the steel tubes

1. Tensile fracture 2. Shear fracture 3. Big-small



(a) 拉伸断裂

(b) 剪切断裂

图5 钢破片断口宏观特征

(a) Tensile fracture

(b) Shear fracture

Fig. 5 The macro-characters of the steel fragments

2.4 破片的大小分布

处理破片大小分布的数学方法有许多,这里我们采用 Bedford 提出的修正 Payman^[7] 分布,即将 $\lg p$ 与 m/M 构成无量纲坐标轴,(其中 p 为质量大于某个值的破片累积重量百分比, m 是破片质量组中单个破片的最小质量, M 是总的回收破片质量),这样破片的分布为一直线,该直线与纵轴 $\lg p$ 的夹角 α 就叫该圆管的碎裂参数, α 越小,表示圆管碎裂愈

严重,破片分布尺度亦越小。

图 7(a)是比较不同细观组织对圆管碎裂所带来的差异。从上发现,45# 钢经热处理后,两种壁厚的管子碎裂参数 α 都变大了些,这说明细化均匀化晶粒导致破片块度增大,



(a) 拉伸区域

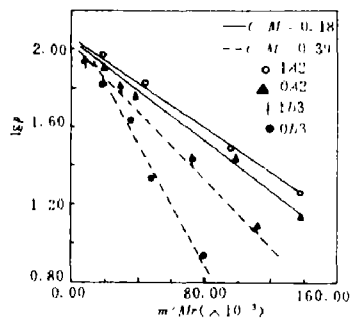
(b) 剪切区域

图 6 钢破片断面微观特征

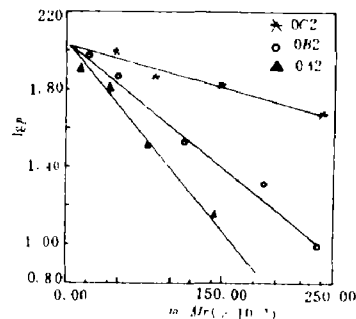
(a) Tensile fracture area;

(b) Shear fracture area

Fig. 6 The meso-characters of the steel fragments



(a) 热处理效果



(b) 猛度效应

图 7 破片的修正 Payman 分布

(a) Effects of the heat treatment

(b) Effects of the brisance

Fig. 7 The Modified Payman distributions of the fragments

且破片剪切断裂比例也随之提高^[13],这是材料的塑性、韧性增强的缘故。Gourdin^[8]对不同晶粒的 OFHC 铜膨胀环的研究,也发现晶粒越小,碎片数越少,块度越大的现象。此外,Weimer^[14]的高强度钢圆管实验及 Affouard^[15]的马氏体钢的 SHPB 试验,都得到这种结果。

图 7(b)是比较相同管子在猛度不同的炸药加载下的碎裂行为。显见,载荷越强, α 角越小,管子碎裂越严重,破片分布更加细小,数目更多。这反映了金属材料对强脉冲载荷响应及损伤破裂的一基本属性,即载荷越强,材料本身吸能越多,完成断所需的能量也就越充分,壳体中的能量密度也就越大,形成的破片数必然越多。这与 Grady^[16]的研究结果是一致的,即“破片数是由载荷传入到介质中的能量来限制的”。

3 结 语

通过以上研究,我们得到如下认识:

- 1) 本文采用的前照明分幅摄影技术获得了十分清晰的壳体动态图象,它可应用于各类高应变率的实验研究中,如膨胀环的高速膨胀及断裂过程观测。
- 2) 金属圆管在内部爆轰加载下的碎裂是一个极其复杂的过程,但从力学的角度看,决定壳体断裂模式的主要因素仍是应变率和材料本身的细观组织特性。
- 3) 在一定的应变率范围内($10^3 \sim 10^6 \text{s}^{-1}$),载荷越强,金属发生塑性变形的趋势越大,其断裂时刻的应变也越大;同时由于介质中的能量密度较大,导致碎裂越严重,形成的破片数也越多。此外,在相同条件下,细化材料的晶粒亦可增大破片的平均尺度。
- 4) 在本文条件下运用 Ivanov 判据得到了 45# 钢在 $10^3 \sim 10^6 \text{s}^{-1}$ 应变率范围内的动态粘性 η 和断裂比功 λ 值,它们在其他实验条件下的适用性还有待进一步的验证。

高速摄影得到了谭显祥研究员的指导,数值计算得到了董玉斌、张明同志的帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Gurney R W. BRL-Report 405, 1943
- 2 Mott N F. Proc Roy Soc, 1947, 189, 300
- 3 Taylor G I. Scientific Papers of G I Taylor V II, Batchelor G k. ed. Cambridge University Press, 1963, 277
- 4 Hoggatt C R, et al. J Appl Phys, 1968, 39, 1856
- 5 Ivanov A G. Strength of Materials, 1976, 8, 1303
- 6 封加波等. 高压物理学报, 1988, 2(2): 98
- 7 Bedford A J. NASA 73-26915, 1973
- 8 Gourdin W H. Shock Waves in Condensed Matter, 1987. Schmidt S C, et al, ed. North-Holland, Amsterdam, 1988, 351-354
- 9 陈大年等. 爆炸与冲击, 1987, 7(1): 27
- 10 Clark E N. AMMRC-MS-73-2, 1973
- 11 Garg S K, et al. Experimental Mechanics, 1966, 6, 39-44
- 12 Stelly M, et al. Shock-Waves and High Strain-Rate Phenomena, Murr L E, ed. Plenum Press, NY. 1981, 113-125
- 13 胡八一等. 爆炸与冲击, 1992, 4: 391
- 14 Weimer R J, et al. AD-A0272004, 1979
- 15 Affouard J L, et al. Mech Prop High Rates of Strain, Harding H, ed. Oxford, 1984, 533-540
- 16 Grady D E, et al. DE85-004460, 1985

STUDIES OF EXPANSION AND FRACTURE OF EXPLOSIVE-FILLED STEEL CYLINDERS

Hu Baiyi Dong Qingdong Han Changsheng Wang Desheng Hu Haibo
(Southwest Institute of Fluid Physics Chengdu 610003)

ABSTRACT This paper presents expansion and fragmentation behaviour of the 45 steel cylinders loaded with three different brisance explosives, a renewed front-lighting method is employed in the experiment. Some dynamic fracture parameters are given. The relations between material characters combining with loading-strength and fragment mass distribution are also discussed.

KEY WORDS explosion-loading, steel tube, dynamic fracture, fragment