

爆炸加载下钨合金的断裂特性*

刘小苹 周益春 王春奎 段祝平

(中国科学院力学研究所)

摘要 用微量炸药接触爆炸的方法,研究了钨合金 93W-4Ni-3Fe 在高加载率条件下的断裂特性,通过宏、微观观察,以及与静态断裂特性相比较,发现随着加载率的增加,钨-钨界面裂纹增加,致使钨合金的断口呈脆性状态.

关键词 钨合金, 高应变率, 爆炸载荷, 断裂特性

1 试验方法

实验材料是真空退火态的钨合金,其成分(wt-%)为: W 93.36, Ni 3.94, Fe 2.45, Co 0.25. 试件分为三组.

表面载荷试验装置的试件(1号)为实心圆柱体,药包为泰安(PETN)粗粉装填的药饼,药量 0.254 g,密度 1.01 g/cm^3 ,置于试件的端面上. 中心载荷试验装置用直径 29 长 24 mm 试件(2号)加工成部分空心圆柱体. 下端面有一加工顶孔. 为使中心孔(直径 5mm)内的药柱达到稳定爆轰,在试件上面放置直径 28 长 10 mm 的 40Cr 钢块,钨合金和钢块穿同心孔. 药柱 0.556 g 装填密度为 0.95 g/cm^3 , 3号试件是在同样条件下,将试件中心药柱孔的深度由 19.8mm 降为 15 mm,装药密度为 1.1 g/cm^3 ,药量为 0.541 g.

中心载荷下角口的影响试验装置,同样在试件上放一 40Cr 钢块,炸药装填密度 1.15 g/cm^3 ,试件中心药柱孔深 14 mm,药量 0.541 g. 与第 2 组试验不同,在试件周边沿母线方向开有 4 个高为 14 mm 的角口,4 个角口互相对称,角口的顶角为 45° ,一对角口深为 4 mm,另一对深为 2 mm. 在这组实验中,做了两个条件相同的实验,试件分别为 4, 5 号.

试件都用有机玻璃罩罩住,且置于室内小型的真空爆炸箱中. 由于试件药柱装药量较小,不宜用雷管引爆,改用特制的叠氮化铅引爆头引爆.

2 实验结果

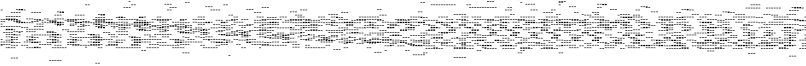
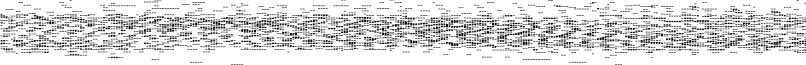
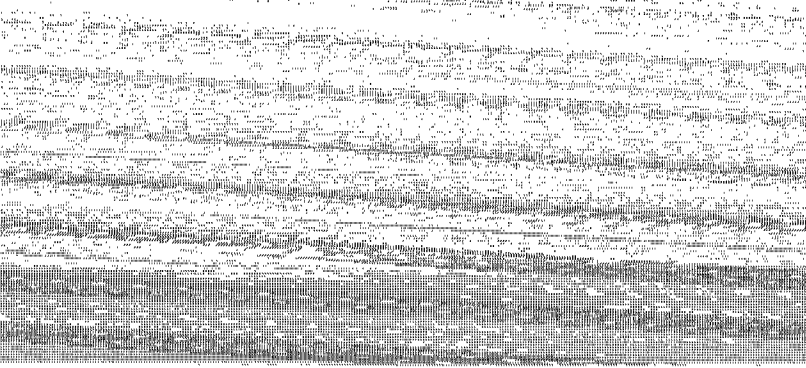
2.1 宏观现象

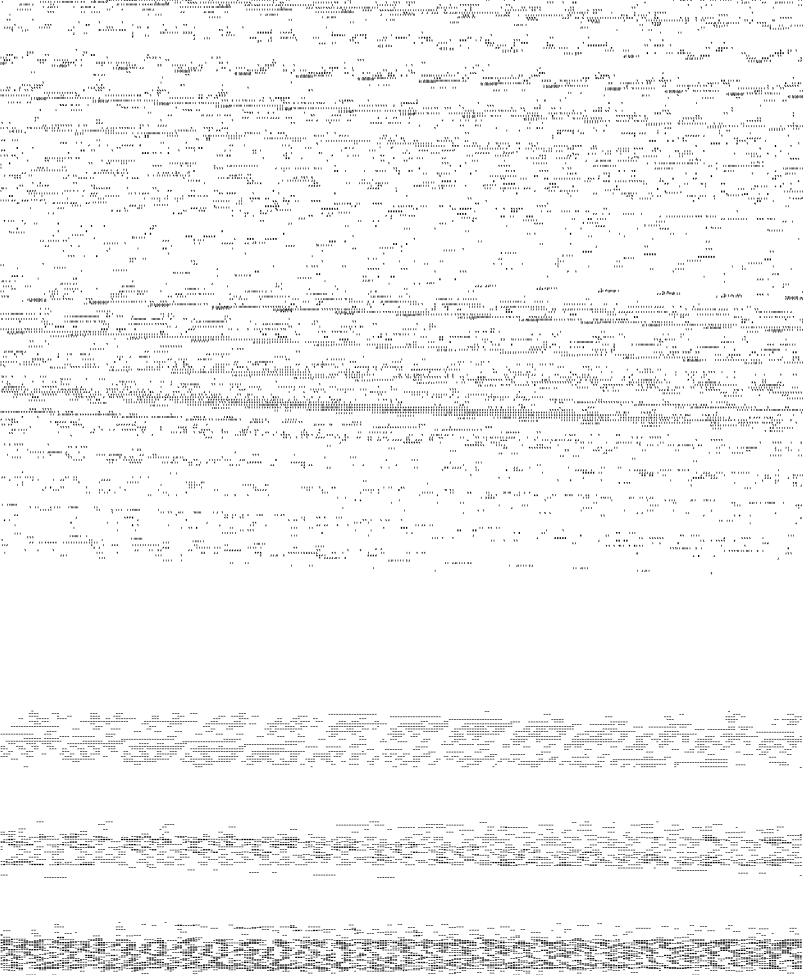
1 号试件:除有机玻璃罩炸碎外,外观上看钨合金试件无任何变形和破坏现象.

* 中国兵器科学研究院资助项目

1993 年 8 月 10 日收到初稿; 1993 年 10 月 18 日收到修改稿.

本文通讯联系人: 刘小苹, 副研究员, 北京(100080)中国科学院力学研究所





3 讨 论

3.1 冲击载荷及应变率的估算

炸药与物体接触爆炸时,物体的破坏取决于壁面上受到的压力和冲量.在计算时,如果考虑炸药爆炸造成钨合金试件内径的变形或破坏产生的侧壁膨胀效应,以及孔底的压缩变形等,问题就变得相当复杂,将问题简化成一维情况,假设40Cr钢及试件的中心孔壁都是刚壁.

引爆面处 $x=0$,炸药引爆后,爆轰波以 D 的速度向右传播,紧跟在爆轰波后面的是由 $t=0, x=0$ 点发出的右传中心膨胀波,它的波头也以 D 的速度向右传播.当 $t=L/D$ 时(L 是总装药柱的深度),爆轰波抵达右端面立即反射回来一左传波系.此左传波系是在被右传中心膨胀波扰动过的区域中传播的,因此被第一道反射压缩波传过的区域成为一复合波区.在任一断面 x 处,爆轰产物的质点速度 u 和声速 c 的变化规律为:

$$\text{当 } x/D \leq t \leq (2L-x)/D \text{ 时, } u = \frac{x}{2t} - \frac{D}{4}, \quad c = \frac{x}{2t} + \frac{D}{4} \quad (1)$$

$$\text{当 } (2L-x)/D \leq t < \infty \text{ 时, } u = \frac{x-L}{t}, \quad c = \frac{L}{t} \quad (2)$$

$$\text{在壁面上压强的变化规律为: } P = P_H (c/c_H)^3 \quad (3)$$

下标 H 表示爆轰时 $C-J$ 平面处产物的相关参数, $P_H = \rho_0 D^2 / 4$, $c_H = 3D / 4$, 这里 ρ_0 是炸药的装药密度,泰安(PETN)炸药的波速 $D = 8000 \text{ m/s}$,由(3)式计算出的压强随时间的变化关系如图4所示.图4a曲线1,2,3是2号试件在不同的 x 点的冲击载荷.图4b是2,3,4号试件在内孔侧壁中 b 点处的冲击载荷时间曲线.可以看出,试件侧壁受到的冲击压力高达22GPa,且除了孔底外,侧壁都要受到二次冲击,第一个波是右传爆轰波,第二个波是右传膨胀波和由孔底反射的压缩波组成的复合波系.

冲击载荷作用的时间约为 $8 \mu\text{s}$,因为2,3,4号试件最大的残余变形分别为0.08,0.06和0.10,因此在最粗略的估算下,应变率 $\dot{\epsilon}_\theta = \epsilon_\theta / \Delta t$ 对于2,3,4号试件分别为: $10^4, 7.5 \times 10^3$ 和 $1.25 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$.这是最保守的估算,实际上瞬时应变率要大得多,尤其是扩展裂纹顶端的应变率更高,甚至可达 10^7 s^{-1} 的数量级⁽¹⁾.

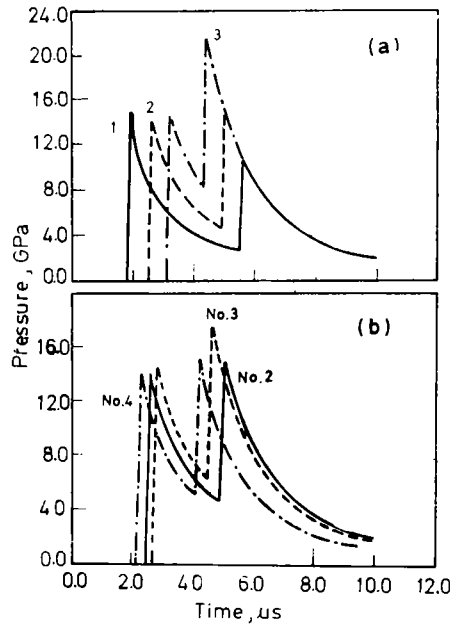


图4 冲击载荷的时间曲线

Fig.4 History of explosive loading

(a) specimen No.2,

1,2,3—various x points,

(b) specimens No.2, 3 and 4

3.2 宏观断裂机制

实验表明钨合金的断裂基本上是脆性断裂. 比较 2, 3 号试件看出: 后者虽然药量只比前者少 0.015 g, 药柱深度小 4.8 mm, 但前者完全被炸裂, 而后者未见任何宏观小裂纹. 这说明, 一旦形成宏观裂纹源, 它就迅速以声速扩展而造成试件的整体破坏, 这是脆性断裂特征.

虽然内孔壁所受的冲击载荷是瞬时地从零上升到最大值(图 4), 但根据文献(2), 圆孔边切向应力 σ_θ 是由压应力逐渐变为拉应力的, 在 $t = 4a / C_d$ 时 σ_θ 达到最大值. 内孔半径 $a = 2.5$ mm, C_d 是钨合金中的声速, 为 4000 m/s ⁽³⁾, 则在 $t = 2.5 \mu\text{s}$ 时切向应力 σ_θ 达到最大拉应力, 而径向应力 σ_r 总是压应力. 因此对于 2 号试件来说, 在受载约 $2.5 \mu\text{s}$ 后, 在内圆孔边产生沿径向的裂纹源, 进而该裂纹源在 σ_r , σ_θ 及 σ_z 的复合应力作用下, 由内向外扩展造成试件破坏.

4, 5 号试件的断裂方式与 2 号试件完全不一样. 因为在 $2.5 \mu\text{s}$ 之前, 在 $r = a$ 处拉应力 σ_θ 不足以产生裂纹源, 而在 $t = 2.0 \mu\text{s}$ 时, 应力波已经传到外圆缺口较深处, 造成应力集中, 使缺口处产生裂纹源, 并由外向内扩展.

3.3 微观断裂机制

随着加载率的增加, 钨合金由韧性向脆性转化, 这与基质、钨颗粒的韧性降低有关, 表现为钨-钨界面破坏模式所占比例增加.

准静态断裂的断口形貌同高加载率下的不同, 它几乎是由钨颗粒的剪切劈裂(如图 1b 所示)所造成的, 很少有完整的钨颗粒⁽¹⁾. Liu⁽⁴⁾等的研究表明, 在很低应变时, 钨粒子内部就由滑移而出现位错的堆积, 造成钨粒子劈裂的裂纹源都是在滑移带内形成的. 一旦少数钨粒子裂开, 等于存在一些孔洞, 使基质材料受到更高应力的作用. 因此宏观裂纹的产生与扩展, 关键取决于这些“孔洞”的长大与连接. 也就是说, 在低应变率下裂纹的产生与扩展由应变所决定. 所以在低应变率下钨合金呈韧性断裂特性.

随着应变率的增加, 材料屈服强度增加⁽⁵⁾, 劈开钨颗粒的应力 σ^* 比破坏钨颗粒间界面及钨颗粒与基质界面所需的应力更大; 因而使 W-W 及 W-M 断裂模式所占比例增加, 即钨合金的材料特性由韧性向脆性转化.

4 结 论

随着加载率的增加, 93W-4Ni-3Fe 合金的断裂由韧性向脆性转化. 为了使钨合金在高应变率下不致脆化, 可以通过增加 W-W 及 W-M 间的结合能和减少 W-W 间的接触面积来实现. 本文只是提供一种简单的实验方法, 定性地研究钨合金在高应变率下的断裂行为, 通过高应变率下材料动力学性能的准确测试以及二维计算程序能对钨合金在炸药接触爆炸下的动力学响应作出定量的研究, 这是我们今后工作的内容.

参 考 文 献

- 1 Lankford J, Anderson C E Jr, Bodner S R. *J Mater Sci Lett*, 1988; 7: 1355
- 2 杨桂通, 张善元. 弹性动力学. 北京: 中国铁道出版社, 1988; 202
- 3 Anderson C E Jr, O'Donoghue P E, Bodner S R. *Int J Impact Eng*, 1989; 8: 69
- 4 Liu J M, Shen B W. *Metall Trans*, 1984; 15A: 1247
- 5 Cougue H, Lankford J. *Inst Phys Conf Ser*, 1989; Section 2: 89

FRACTURE BEHAVIOUR OF TUNGSTEN ALLOY AT HIGH RATES OF STRAIN BY EXPLOSIVE LOADING

LIU Xiaoping, ZHOU Yichun, WANG Chunkui, DUAN Zhuping

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing)

(Manuscript received 10 August, 1993; in revised form 18 October, 1993)

ABSTRACT A contact explosion technique is developed using PETN compact powder explosive to study the fracture behaviour of 93W-4Ni3Fe W alloy at high strain rates. The fractograph exhibits a strong feature of brittle type. This fact is because of greater increase in W-W fracture interface at high loading rates in comparison with the existing results in quasi-static test.

KEY WORDS W alloy, strain rate, explosion loading, fracture

Correspondent: LIU Xiaoping, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080