

文章编号: 1001-1455(2006)05-0423-06

# 不同热处理条件下 45 钢柱壳的动态性能\*

金 山, 汤铁钢, 孙学林, 李庆忠

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 以不同热处理条件下的 45 钢作为研究对象, 利用高速摄影和金相分析来研究 45 钢柱壳在爆轰加载下的膨胀断裂特性, 以及不同热处理条件对材料的动态断裂性能的影响。结果表明: 随着回火温度的升高, 45 钢强度减小、静态延伸率增大, 爆轰加载时柱壳表面裂纹产生及发生贯穿断裂而导致产物泄漏的时刻逐渐推迟, 相应应变逐渐增加, 同时回收到的破片尺寸逐渐增大; 四种 45 钢的静态力学性能及动态断裂性能有明显差异, 是因为不同热处理条件下, 材料细观组织的结构、组成均发生较大变化, 即材料的细观组织决定了材料的静态力学性能及动态断裂性能。

**关键词:** 固体力学; 膨胀断裂; 热处理; 45 钢

**中图分类号:** O347.3

**国标学科代码:** 130·1545

**文献标志码:** A

## 1 引 言

金属材料在爆轰加载下的动态断裂行为吸引了众多学者的关注。20 世纪 40~60 年代, Gurney、Taylor、Hoggatt 等的研究成果对金属材料动态断裂的发展起了极大的推动作用。近年来, M. A. Meyers 等<sup>[1]</sup>、V. F. Nesterenko 等<sup>[2]</sup>发展的厚壁圆筒方法, 又为研究高应变率加载下材料的断裂机理提供了另一种有效手段。徐永波等<sup>[3]</sup>、胡八一等<sup>[4]</sup>、汤铁钢等<sup>[5~6]</sup>也对金属的断裂机制进行了研究。

国内外学者研究了多种金属材料在爆轰加载下的动态断裂机制<sup>[7~8]</sup>, 但对于同种材料在不同热处理条件下的动态断裂性能差异研究较为少见。材料经过热处理后, 基本成份及密度没有变化, 但静态力学性能却可以出现较大差异, 而材料的静态力学性能对材料的变形及失效有重要的影响。为研究不同热处理条件对爆轰加载下材料动态断裂性能的影响, 选取了四种不同回火温度的 45 钢进行实验。

## 2 实验装置及柱壳材料

采用圆管装置来进行对比实验, 如图 1 所示, 装置为内装炸药的 45 钢圆管, 圆管两端为有机玻璃塞, 装置采用一端起爆。

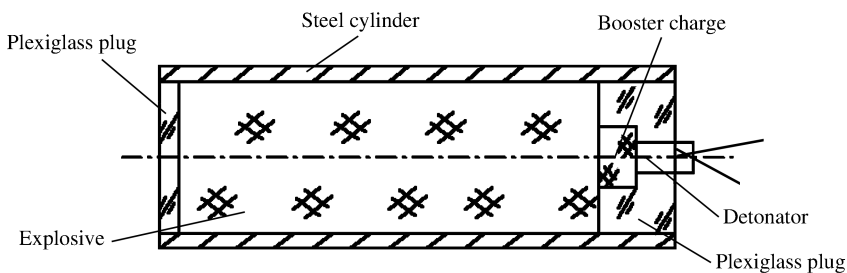


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental set-up

\* 收稿日期: 2005-08-11; 修回日期: 2006-04-04

基金项目: 中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金项目(FZ03001)

作者简介: 金 山(1981—), 男, 学士。

装置主装炸药采用  $\varnothing 32 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  的 RHT-901, 传爆药为  $\varnothing 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的 PETN 药柱, 45 钢柱壳尺寸为: 内径 32 mm、外径 38 mm、长 160 mm, 45 钢柱壳先经  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  淬火, 然后在不同温度下回火处理, 回火温度选取 200、350、500、 $650 \text{ }^\circ\text{C}$  四种。

加工 45 钢柱壳的同时设计加工了相应的标准静态拉伸试样, 并与柱壳进行同样的淬火-回火处理, 通过材料拉伸实验测得的 45 钢静态力学性能见图 2。从图中可以看出, 45 钢随着回火温度的升高, 强度大幅降低, 韧性显著提高。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 圆管膨胀断裂实验

分别进行四发不同热处理的 45 钢柱壳膨胀实验。实验采用相同的场外布局及条件: 利用炸药激发氩气作为照明光源, 采用双前照明方式; 用 FJZ-250 型高速转镜式分幅相机拍摄柱壳膨胀过程; 均采用白纱布作为背景。四发 45 钢柱壳实验采用相同的测试参数, 高速相机转速均为  $2.4 \times 10^5 \text{ r/min}$  (即照片幅间距  $0.5 \mu\text{s}$ ), 实验中对破片进行软回收。四种状态 45 钢柱壳动态膨胀图像如图 3 所示。

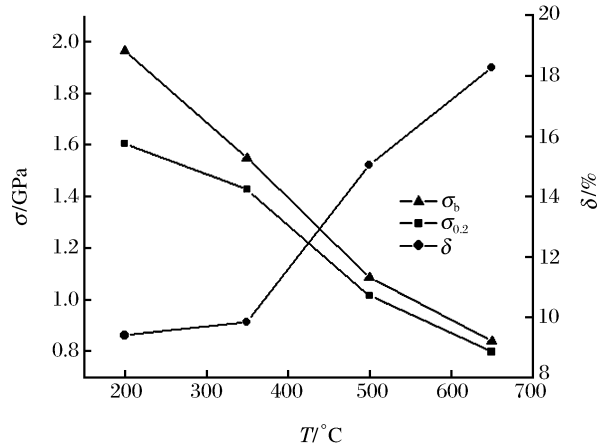
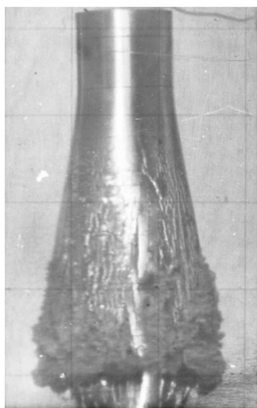
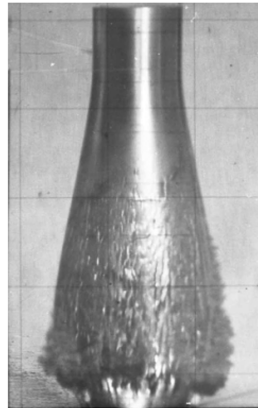


图 2 45 钢静态力学性能随回火温度变化趋势  
Fig. 2 The trend of static mechanics characteristic of the 45 steel following the temper temperature



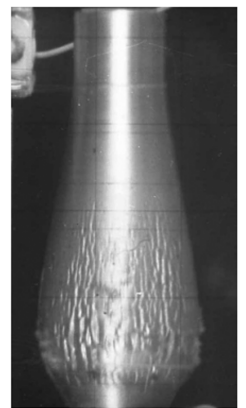
(a)  $T=200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=15.5 \mu\text{s}$



(b)  $T=350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=15.5 \mu\text{s}$



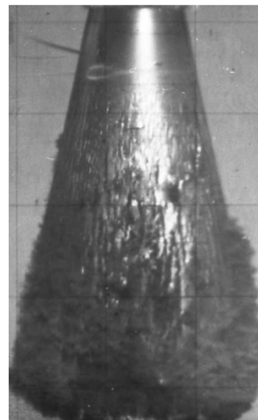
(c)  $T=500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=15.5 \mu\text{s}$



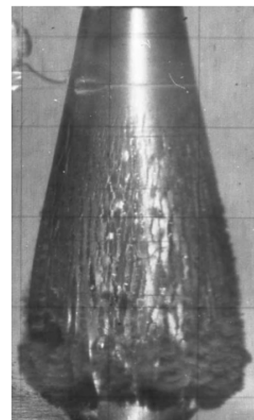
(d)  $T=650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=15.5 \mu\text{s}$



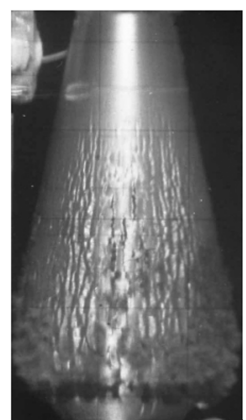
(e)  $T=200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=20.5 \mu\text{s}$



(f)  $T=350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=20.5 \mu\text{s}$



(g)  $T=500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=20.5 \mu\text{s}$



(h)  $T=650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t=20.5 \mu\text{s}$

图 3 四种不同回火温度的 45 钢柱壳动态膨胀图像

Fig. 3 Dynamic expanding images of the 45 steel cylinder shell of four different temper temperatures

从图 3 可以看出,在相同时刻,经不同回火温度处理的 45 钢柱壳膨胀断裂有明显差异。随着回火温度的增加,柱壳表面裂纹产生及发生贯穿断裂而导致产物泄漏的时刻逐渐推迟。柱壳表面裂纹产生定义为在选定标记线处观测到 1~2 条裂纹,产物开始泄漏定义为测试截面上所有裂纹均出现产物<sup>[5]</sup>。这表明不同温度的回火热处理不仅改变了 45 钢柱壳的静态力学性能,同时也明显改变了材料的动态断裂性能。

选取距起爆端 90 mm 处为测点,以装置起爆时刻为零时刻,对得到的高速摄影底片进行测量计算。由于除壳体的静态力学性能外,其他加载条件(如炸药质量、壳体质量、装置构型及起爆方式等)相同,四发 45 钢柱壳膨胀实验的平均膨胀速度相近,约 1.3~1.4 km/s;平均应变率均在  $9 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  左右。

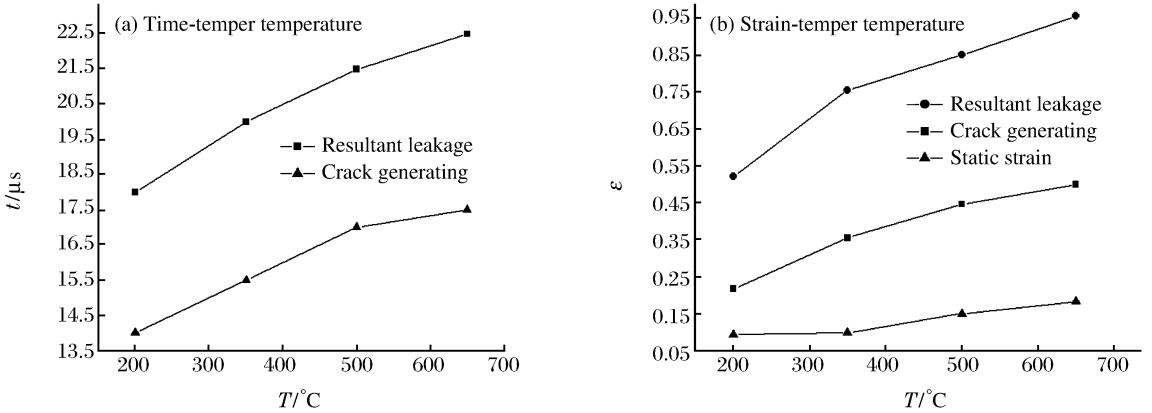


图 4 45 钢柱壳裂纹产生和产物泄漏的时间及应变

Fig. 4 Time and strain of crack generating and resultant leakage

图 4 中列出了 45 钢柱壳裂纹产生和产物泄漏的时间及应变随回火温度的变化趋势,可以看出,随着回火温度的增加,45 钢柱壳的裂纹产生及贯穿断裂导致产物泄漏的时间逐渐推迟,与之相对应的应变逐渐增大。图 4(b)中还同时列出了 45 号钢的静态延伸率,与裂纹产生时应变相比,静态延伸率的值要小很多,但二者随回火温度的变化趋势一致,均随回火温度升高而增大。

同时从测量数据可以看出,爆轰产物并没有在裂纹产生之后立刻泄漏,而是经历了较长一段时间,说明 45 号钢柱壳的断裂模式是以剪切断裂为主。

### 3.2 宏观断口分析

回收到的 45 号钢破片中,除圆管两端的破片外,几乎所有的断口都明显呈剪切断裂。垂直于轴向的破片截面大部分为平行四边形,具有内外表面和两个剪切面。其余还存在两种类型,一种截面为三角形,只存在外表面及两个剪切面;另一种为五边形,存在内外表面及三个剪切面。占了绝大部分的平行四边形截面,即是文献[9]所提到的单旋现象的结果;而截面为三角形和五边形的破片则是因为剪切方向不一致而造成的。

测量比较四种回火温度状态的柱壳所产生的破片,可以看出,随着回火温度升高,回收到的破片的平均尺寸逐渐增大,这与材料脆性越大,其加载后破片的尺寸越小这一结论相吻合。

当壳体膨胀时,由于拉伸作用,柱壳的半径逐渐变大,同时柱壳厚度随之减小,直到壳体断裂为止。

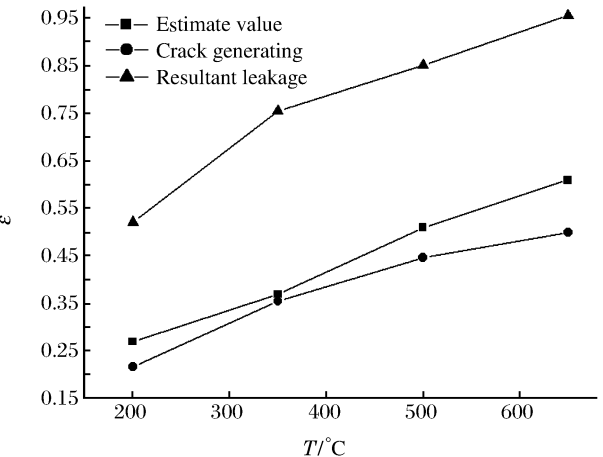


图 5 45 钢断裂应变估算值与实测值的比较

Fig. 5 The contrast of estimated value and measured value of fracture strain



通过测量破片厚度,即可推断柱壳断裂时的应变。

对实验回收到的破片进行测量,根据测量结果计算出的断裂应变如图5所示。与实测值相比,得出的估算值与裂纹产生时刻的应变相近,同时远远低于产物泄漏时刻的应变;可以看出,与产物泄漏时刻的应变相比,裂纹产生时刻的应变更适合于作为表征材料断裂性能的一个参量。

### 3.3 金相分析

对初始样品和回收到的破片沿垂直于轴向的方向进行切割、镶样、预磨、抛光、腐蚀后,在光学金相显微镜下进行观察。四种状态45号钢柱壳的原始及破片金相照片如图6所示。图中上面一排为加载前各状态柱壳的金相照片(图6(a)~(d)),下面一排为爆裂加载后各状态破片的金相照片(图6(e)~(h))。

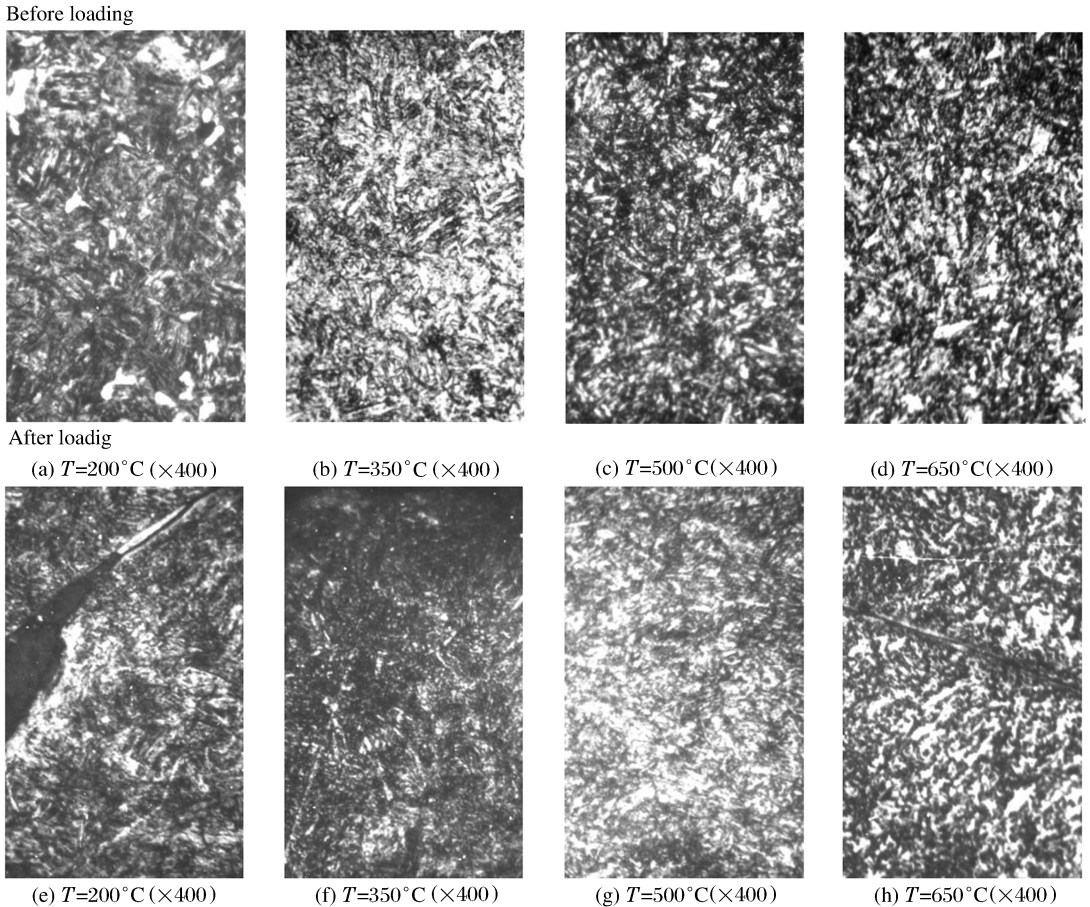


图6 四种状态45钢加载前后金相照片

Fig. 6 Micrographs of four kinds of 45 steel

经850℃淬火后,45钢的细观组织主要为体心正方晶格的马氏体(畸变的体心立方晶格),如果淬火温度或时间不够,还会存在铁素体及少量奥氏体。进行回火热处理时,首先马氏体开始分解,马氏体中的碳以 $\epsilon$ 碳化物( $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$ )的形式析出,使过饱和度减小,这种组织即为回火马氏体;随着回火温度上升,过饱和固溶体很快转变为铁素体(面心立方晶格),同时 $\epsilon$ 碳化物也逐渐转变为稳定的渗碳体(金属化合物),这样形成的由尚未再结晶的铁素体和细颗粒状的渗碳体组成的混合物,即为回火屈氏体;随着回火温度进一步升高,渗碳体逐渐聚集长大,形成较大的粒状渗碳体,同时铁素体也开始再结晶,失去马氏体原有形态而成为多边形铁素体,这种由多边形铁素体和粒状渗碳体组成的混合物,称为回火索氏体。

在加载前的原始金相图中,200℃回火属低温回火,其组织为回火马氏体,存在大量块状铁素体,同时还有极少量残余奥氏体;出现块状铁素体可能是由于淬火温度偏低造成的。350℃回火属中温回火,



其组织为回火屈氏体。500℃和650℃回火属高温回火,其组织为回火索氏体。

可以看出,在回火热处理过程中,45钢的细观组织经历了回火马氏体—回火屈氏体—回火索氏体的转变过程,晶粒的结构、成份及形状大小等均发生了改变。

经历爆轰加载后,各状态破片的基体组织没有明显变化,但在破片中均发现多条绝热剪切带,且剪切带具有多种形态,包括形变剪切带和白色的相变剪切带;所不同的是,500℃回火破片中只在中心区域发现剪切带,破片边缘只发现孔洞和裂缝。

## 4 结 论

(1) 通过实验对比可以发现,回火热处理对45钢的静态力学性能及动态断裂性能均有较大影响:随着回火温度的升高,45钢的抗拉强度及条件屈服强度降低、静态延伸率增大,同时柱壳表面裂纹产生及发生贯穿断裂而导致产物泄漏的时刻逐渐推迟、相应的应变逐渐增大,实验后回收到的破片尺寸也逐渐增大。

(2) 热处理影响材料动态断裂性能的实质是改变了材料的细观组织,即是说,材料的细观组织决定了材料的静态力学性能及动态断裂性能;不同的回火热处理下,45钢细观组织的结构、成份及大小形状等有较大的不同,因而其静态力学性能及动态断裂性能也有明显差异。

## 参考文献:

- [1] Meyers M A, Nesterenko V F. High-strain, high-strain-rate deformation of tantalum: the thick-walled cylinder method[A]. Metallurgical and Materials Application of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena[C]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 1995: 487—494.
- [2] Nesterenko V F, Meyers M A, Wright T W. Collective behavior of shear bands[A]. Metallurgical and Materials Application of Shock-wave and High-Strain-Rate Phenomena[C]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 1995: 397—404.
- [3] 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.  
XU Yong-bo, BAI Yi-long, SHEN Le-tian, et al. Formed and developed process of localized shear bands in steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(11): 485—492.
- [4] 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.  
HU Ba-yi, DONG Qing-dong, HAN Chang-sheng, et al. Studies of expansion and fracture of explosive-filled steel cylinders[J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1):49—54.
- [5] 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.  
TANG Tie-gang, GU Yan, LI Qing-zhong, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 529—534.
- [6] 汤铁钢,胡海波,王德生,等. 内爆压缩加载下抗氢钢管管剪切断裂研究[J]. 高压物理学报,2002,16(1):75—79.  
TANG Tie-gang, HU Hai-bo, WANG De-sheng, et al. Shear fracture of HR-2 steel tube under shock loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(1): 75—79.
- [7] Shih C J, Meyers M A, Nesterenko V F. Dynamic behavior of silicon carbide[A]. Fundamental Issues and Applications of Shock-Wave and High-Rate Phenomena[C]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2001:209—217.
- [8] Stokes J L, Nesterenko V F, Shlachter J S. Comparative behavior of Ti and 304 stainless steel in a magnetically-driven implosion at the Pegasus-II facility[A]. Fundamental Issues and Applications of Shock-Wave and High-Rate Phenomena[C]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2001:585—592.
- [9] 胡海波,汤铁钢,胡八一,等. 金属柱壳在爆炸加载断裂中的单旋现象[J]. 爆炸与冲击,2004,24(2):97—107.  
HU Hai-bo, TANG Tie-gang, HU Ba-yi, et al. An study of uniform shear bands orientation selection tendency on explosively loaded cylindrical shells[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 97—107.

## Dynamic characteristics of 45 steel cylinder shell by different heat treatment conditions

JIN Shan<sup>\*</sup>, TANG Tie-gang, SUN Xue-lin, LI Qing-zhong  
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** High-speed camera and optical microscope were used to study the fracture characteristics of the 45 steel cylinder and the effect of the heat treatment conditions on them. Results show that while the temper temperature rises, the intensity decreases and static fracture strain increases, the time of crack generation and resultant leakage in the outer surface of the 45 steel cylinder delays under detonation loading, at the same time the corresponding strain increases, the size of the fragment increases. The reason that the static mechanics characteristics and the dynamic fracture characteristic of the 45 steel are evidently different is that the buildup and the component of the material's microcosmic structure are greatly changed, i. e. static mechanics characteristic and dynamic fracture characteristic depend on the material's microcosmic structure.

**Key words:** solid mechanics; expanding fracture; heat treatment; 45<sup>#</sup> steel

---

\* Corresponding author: JIN Shan  
E-mail address: jin9835@163.com  
Telephone: 0816-2493325