

# 炮药断裂韧性初探

曾昭煌 胡国胜 罗运军 牛秉彝  
(太原机械学院)

**摘要** 高膛压炮的问世,对炮药的力学性能提出了更高的要求。本文根据炮药的性质、加工和使用的特点,探讨炮药断裂韧性的测定。

**关键词** 炮药 断裂韧性 三基药 柔度法

## 一、前言

构件的强度根据传统的许用应力法进行计算,只要工作应力 $\sigma \leq [\sigma]$ ,就可以保证其正常工作。在第二次世界大战期间及其以后,工程上有许多用高强度的塑性材料制成的构件,却在工作应力远低于屈服极限 $\sigma_s$ 的情况下发生脆性断裂的现象(称为低应力脆断),酿成了严重事故。经过研究发现低应力脆断都是由于裂纹或类裂纹缺陷的扩展引起的。这样Griffith于1920年提出的断裂理论重新得到重视,并从六十年代逐步发展成为以研究裂纹扩展规律为内容的断裂力学体系。根据断裂力学理论知道,裂纹的扩展不仅与工作应力 $\sigma$ 有关,且与裂纹的长度和形态有关。由这些因素组成的应力强度因子 $K$ ,不仅决定了裂纹尖端附近的应力场和位移场,而且控制着裂纹的扩展。当应力强度因子 $K$ 达到某一固定值时,裂纹便发生失稳地扩展,这时的强度因子就称为临界应力强度因子 $K_c$ (断裂韧性)。它已日益成为与屈服极限 $\sigma_s$ 、强度极限 $\sigma_b$ 并列的材料强度指标之一。

现代火炮为了提高其威力和射程,日益提高其膛压。相应地要求炮药能提供更大的火药力、较低的等容火焰温度和较好的力学性能。如果力学性能差,容易发生破碎,就可能引起弹道反常,出现严重事故。而炮药在生产、贮存和运输过程中,其表面和内部都不可避免地存在着某些缺陷,如含有杂质、气泡、各种形状的划痕或裂纹等。因此,除了必须进行力学性能基本参数(不是只限于传统的压缩强度极限)的测定和应力分析,做无缺陷情况下的考核外,还应当用断裂力学的理论和方法来考核其具有缺陷情况下的断裂韧性指标,以避免药粒由于点火冲击力的作用造成裂纹失稳扩展、大量破碎而引起燃烧面积急剧增加,造成膛压激增,发生弹道反常或膛炸事故。

## 二、断裂韧性 $K_c$ 的测定方法

工程中以张开型(I型)裂纹最为普遍也最为危险<sup>[1]</sup>,故通常以 $K_{Ic}$ 表示材料的断裂韧性。根据实验知道材料的断裂韧性值随试件厚度的增加而降低,达到一定厚度(处于平面应变状态)时,断裂韧性值稳定于某一最小值。所以 $K_{Ic}$ 通常是指处于平面应变状态的断裂韧性值。而炮药由于加工工艺(挤压成型)的原因,试件不能做得很厚,一般只能到3~

5 mm厚, 否则溶剂挥发不净, 不同批号成品的含溶剂量就会不同, 因而影响性能的稳定。所以我们测得的断裂韧性值是属于平面应力状态的值而不是平面应变状态的值, 故以 $K_{Ic}$ 表示, 便于区别。由于实用炮药厚度与试件厚度相近, 因此测得的 $K_{Ic}$ 仍有科学研究的参考价值 and 实用价值。

构件裂纹发生扩展(开裂)时若裂纹扩展力尚不一定有足够的能量使构件继续产生新的裂纹表面, 则此时并不意味着构件将不能正常工作而被破坏。只有裂纹扩展力大到能使裂纹产生失稳扩展时, 构件才不能继续使用而发生断裂。炮药最初开裂时也是如此, 它并不就此破碎, 也不致于明显地改变其燃烧规律而导致弹道反常(因为燃烧面积的增加是微乎其微的)。尽管如此, 我们仍然用开裂时的载荷来确定其断裂韧性, 这样要求是比较高的, 比炮药在实际工作的条件要严格些, 可切实保证其安全。

炮药是高聚物和多种物质的混合物, 其力学性能对温度的反应很敏感。在常温为较“软”的药, 在273 K以上可表现为延性断裂, 在低温(如233 K)却表现为脆性断裂。按理说, 材料不同力学行为的断裂性能应该用不同的表示方法和不同的测试方法, 但因同一种药由于温度不同而表现出不同的断裂特性是渐变的, 其温度界限不易划清, 同时目前对延性断裂的测试尚没有公认的成熟方法, 而且同一种药在不同温度用不同的指标表示, 则其自身的可比性就成问题, 更不用说几种药之间的相互比较了。所以我们不论“硬”药还是“软”药, 都统一采用一种测试方法、一种指标来表示, 以便于比较。

基于炮药上述性质及其加工和使用上的特点, 我们用紧凑拉伸试验(CT试样)来测定炮药的断裂韧性 $K_{Ic}$ 值。其试件的形状、尺寸和取向如图1及表1所示。将专门挤压制出的药板按挤压取向切成单块, 把四边铣削到公称尺寸, 再划线钻孔。裂纹制作是先用片铣刀开槽, 其深度比所需裂纹深度差1~2 mm, 最后用尖锐刀片切出尖锐裂纹到所需深度。并在试件有裂纹的侧面上、裂槽的上下唇各粘上一块钢质刀口, 以备装卡双悬臂夹式位移计, 用以测量试件受载后受裂纹影响的张开位移。将试件装卡在电子万能试验机上, 通过双悬臂夹式位移计、电阻应变仪和x-y函数记录仪, 可以记录到试件的载荷 $P$ 和刀口张开位移 $s$ 的曲线。为了探索各种炮药的 $K_{Ic}$ 与温度和裂纹深度的关

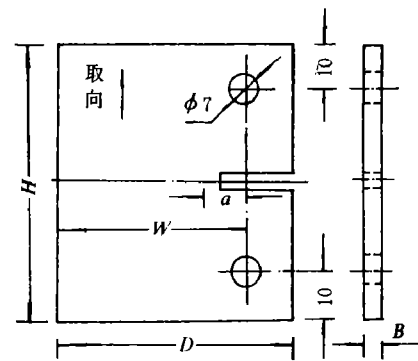


图 1  
Fig. 1

表 1 各种炮药的试件尺寸

Table 1 Size of various propellant specimens

| 品名 \ 尺寸(mm) | H  | D  | B   | W  | a                |
|-------------|----|----|-----|----|------------------|
| 三基药 A       | 45 | 40 | 4.6 | 30 | 3, 6, 9, 12, 15  |
| 三基药 B       | 45 | 40 | 4.6 | 30 | 3, 6, 9, 12, 15  |
| 三基药 C       | 60 | 50 | 3.4 | 40 | 4, 8, 12, 16, 20 |
| 单基药         | 60 | 50 | 3.4 | 40 | 4, 8, 12, 16, 20 |

系, 每种炮药进行了包括低温、摄氏零度、高温共五个不同温度。每个温度有五个不同裂纹深度组的试验。(每个裂纹深度试验五个试样)。

根据记录到的各  $p$ - $s$  曲线图读取各有关数据 (弹性阶段的载荷  $p_e$  和位移  $s_e$ , 裂纹开裂时的载荷  $p_c$  和位移  $s_c$ ), 分别计算出每个试件的弹性阶段无量纲柔度  $(BEs/p)_e$  和开裂时的无量纲柔度  $(BEs/p)_c$ 。式中  $B$  为试件厚度,  $E$  为弹性模量, 是在相应温度下进行拉伸试验得到的实验值。将同一裂纹深度组的五个无量纲柔度  $(BEs/p)_e$  求其平均值, 这样每种药样在每一温度可得到五个不同无量纲裂纹深度  $(a/W)$  的平均值及其对应的无量纲柔度  $(BEs/p)_e$  的平均值, 用计算机拟合出一条无量纲柔度  $(BEs/p)$  和无量纲裂纹深度  $(a/W)$  的二次曲线, 其方程为

$$(BEs/p) = A + B(a/W) + C(a/W)^2 \quad (1)$$

将每个试件开裂时无量纲柔度  $(BEs/p)_c$  代入上式求出开裂时的等效无量纲裂纹深度  $(a/W)_c$  值。再根据断裂力学公式<sup>[1]</sup>

$$K_c = \frac{p_c}{B\sqrt{W}} Y\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2)$$

式中  $Y(a/W)$  为形状因子, 是  $(a/W)$  的函数, 紧凑拉伸时为

$$Y(a/W) = 29.6(a/W)^{1/2} - 185.5(a/W)^{3/2} + 655.7\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 1017(a/W)^{7/2} + 638.9(a/W)^{9/2} \quad (3)$$

将每个试件开裂时的载荷  $p_c$ 、等效无量纲裂纹深度  $(a/W)_c$  以及厚度  $B$ 、宽度  $W$  代入 (3) 式和 (2) 式, 可以得出每个试件的  $K_c$  值, 再用数理统计方法求出每一裂纹深度组  $K_c$  的平均值。各种炮药在各温度下各裂纹深度组的有关数据如表 2 ~ 表 5 所示。

表 2 三基药 A 有关数据一览表

Table 2 Data about triple-base propellant A

| 温度 (K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BEs}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |         |         | $K_c / (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|--------|---------------|--------------------------------|-------------|---------|---------|-------------------------------------|
|        |               |                                | A           | B       | C       |                                     |
| 233    | 0.1022        | 5.5430                         | 5.827       | -9.451  | 55.465  | 2.75                                |
|        | 0.2155        | 5.9014                         |             |         |         | 2.31                                |
|        | 0.3004        | 8.6000                         |             |         |         | 2.44                                |
|        | 0.4018        | 10.6810                        |             |         |         | 2.11                                |
|        | 0.5069        | 15.3440                        |             |         |         | 2.12                                |
| 253    | 0.1074        | 7.2290                         | 8.564       | -23.973 | 121.328 | 2.85                                |
|        | 0.2095        | 9.3960                         |             |         |         | 2.50                                |
|        | 0.3076        | 12.0400                        |             |         |         | 2.00                                |
|        | 0.3937        | 18.2090                        |             |         |         | 2.07                                |
|        | 0.5095        | 27.8260                        |             |         |         | 2.16                                |

续表 2

| 温度<br>(K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BEs}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |          |         | $K_c / (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|-----------|---------------|--------------------------------|-------------|----------|---------|-------------------------------------|
|           |               |                                | A           | B        | C       |                                     |
| 273       | 0.1185        | 8.3300                         | 19.293      | -120.865 | 313.33  | 3.06                                |
|           | 0.2131        | 9.7730                         |             |          |         | 2.61                                |
|           | 0.3064        | 11.8660                        |             |          |         | 2.36                                |
|           | 0.4032        | 19.2560                        |             |          |         | 2.08                                |
|           | 0.4991        | 38.1080                        |             |          |         | 1.93                                |
| 293       | 0.1157        | 19.0350                        | 29.122      | -117.836 | 375.036 | 1.59                                |
|           | 0.2105        | 23.6069                        |             |          |         | 1.56                                |
|           | 0.3054        | 27.2470                        |             |          |         | 1.37                                |
|           | 0.3982        | 40.0390                        |             |          |         | 1.34                                |
|           | 0.4946        | 63.5544                        |             |          |         |                                     |
| 313       | 0.1099        | 14.8060                        | 10.253      | 32.649   | 115.987 | 0.69                                |
|           | 0.2066        | 21.9200                        |             |          |         | 0.65                                |
|           | 0.3074        | 30.8060                        |             |          |         | 0.68                                |
|           | 0.3992        | 42.4230                        |             |          |         | 0.82                                |
|           | 0.4893        | 53.7400                        |             |          |         |                                     |

表 3 三基药 B 有关数据一览表

Table 3 Data about triple-base propellant B

| 温度<br>(K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BEs}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |         |         | $K_c / (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|-----------|---------------|--------------------------------|-------------|---------|---------|-------------------------------------|
|           |               |                                | A           | B       | C       |                                     |
| 233       | 0.1054        | 6.7080                         | 7.879       | -18.458 | 84.564  | 2.04                                |
|           | 0.2107        | 8.1740                         |             |         |         | 1.71                                |
|           | 0.3105        | 10.0350                        |             |         |         | 1.45                                |
|           | 0.4102        | 14.4380                        |             |         |         | 1.29                                |
|           | 0.5021        | 19.0290                        |             |         |         | 1.21                                |
| 253       | 0.1088        | 10.8290                        | 13.486      | -39.098 | 126.689 | 2.45                                |
|           | 0.2096        | 10.7010                        |             |         |         | 1.94                                |
|           | 0.3061        | 13.2620                        |             |         |         | 1.86                                |
|           | 0.4049        | 18.7610                        |             |         |         | 1.44                                |
|           | 0.4990        | 25.3710                        |             |         |         | 1.31                                |

续表 3

| 温度<br>(K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BEs}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |         |         | $K_c / (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|-----------|---------------|--------------------------------|-------------|---------|---------|-------------------------------------|
|           |               |                                | A           | B       | C       |                                     |
| 273       | 0.1058        | 13.9880                        | 8.514       | 41.039  | 122.166 | 1.66                                |
|           | 0.2003        | 21.6550                        |             |         |         | 1.44                                |
|           | 0.3133        | 34.8900                        |             |         |         | 1.67                                |
|           | 0.4043        | 43.0580                        |             |         |         | 1.41                                |
|           | 0.5074        | 61.4950                        |             |         |         |                                     |
| 293       | 0.1059        | 20.5800                        | 23.708      | -60.51  | 408.58  | 0.95                                |
|           | 0.2033        | 27.8890                        |             |         |         | 0.87                                |
|           | 0.3068        | 52.8470                        |             |         |         | 0.87                                |
|           | 0.4063        | 54.1250                        |             |         |         | 0.87                                |
|           | 0.4993        | 100.1540                       |             |         |         |                                     |
| 313       | 0.1031        | 29.3953                        | 30.593      | -36.796 | 380.281 | 0.43                                |
|           | 0.2172        | 42.5305                        |             |         |         | 0.35                                |
|           | 0.3064        | 54.6690                        |             |         |         | 0.33                                |
|           | 0.4010        | 74.1224                        |             |         |         | 0.33                                |
|           | 0.5010        | 109.0854                       |             |         |         | 0.35                                |

表4 三基药C有关数据一览表

Table 4 Data about triple-base propellant C

| 温度<br>(K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BEs}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |         |        | $K_c / (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|-----------|---------------|--------------------------------|-------------|---------|--------|-------------------------------------|
|           |               |                                | A           | B       | C      |                                     |
| 233       | 0.1103        | 2.4504                         | 4.879       | -28.553 | 92.974 | 3.35                                |
|           | 0.2091        | 3.7209                         |             |         |        | 2.82                                |
|           | 0.3061        | 5.0429                         |             |         |        | 2.29                                |
|           | 0.4127        | 7.8670                         |             |         |        | 2.18                                |
|           | 0.5035        | 14.6062                        |             |         |        | 2.40                                |
| 253       | 0.1114        | 2.3885                         | 2.637       | -6.331  | 52.846 | 3.47                                |
|           | 0.2079        | 4.0301                         |             |         |        | 2.83                                |
|           | 0.3075        | 5.5933                         |             |         |        | 2.75                                |
|           | 0.4049        | 8.4438                         |             |         |        | 2.64                                |
|           | 0.5034        | 13.0047                        |             |         |        |                                     |

续表 4

| 温度<br>(K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BEs}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |         |        | $K_{Ic}/(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|-----------|---------------|--------------------------------|-------------|---------|--------|--------------------------------------|
|           |               |                                | A           | B       | C      |                                      |
| 273       | 0.0999        | 2.2424                         | 2.856       | -12.001 | 69.412 | 2.46                                 |
|           | 0.2062        | 3.4388                         |             |         |        | 2.13                                 |
|           | 0.3077        | 6.1881                         |             |         |        | 2.02                                 |
|           | 0.4085        | 8.8250                         |             |         |        | 1.76                                 |
|           | 0.5032        | 14.7000                        |             |         |        | -                                    |
| 293       | 0.1079        | 2.3404                         | 2.814       | -9.862  | 53.136 | 1.58                                 |
|           | 0.2100        | 3.4604                         |             |         |        | 1.44                                 |
|           | 0.3102        | 5.4065                         |             |         |        | 1.30                                 |
|           | 0.4112        | 8.3489                         |             |         |        | 1.27                                 |
|           | 0.5079        | 12.9149                        |             |         |        |                                      |

表5 单基药有关数据一览表

Table 5 Data about single-base propellant

| 温度<br>(K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BEs}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |        |        | $K_{Ic}/(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|-----------|---------------|--------------------------------|-------------|--------|--------|--------------------------------------|
|           |               |                                | A           | B      | C      |                                      |
| 233       | 0.1150        | 3.5970                         | -0.898      | 6.546  | 32.386 | 3.14                                 |
|           | 0.2016        | 3.8147                         |             |        |        | 2.04                                 |
|           | 0.2997        | 6.3588                         |             |        |        | 1.92                                 |
|           | 0.3916        | 8.7918                         |             |        |        | 1.97                                 |
|           | 0.5003        | 14.1183                        |             |        |        | 2.24                                 |
| 273       | 0.1026        | 2.1743                         | 0.424       | 7.293  | 25.791 | 2.45                                 |
|           | 0.1982        | 2.8513                         |             |        |        | 2.13                                 |
|           | 0.3030        | 5.1488                         |             |        |        | 1.89                                 |
|           | 0.3681        | 5.7407                         |             |        |        | 1.83                                 |
|           | 0.4947        | 11.0000                        |             |        |        | 2.44                                 |
| 298       | 0.1117        | 3.6237                         | 0.623       | 10.117 | 30.141 | 2.47                                 |
|           | 0.2000        | 4.0450                         |             |        |        | 2.31                                 |
|           | 0.3001        | 5.6223                         |             |        |        | 2.00                                 |
|           | 0.3810        | 7.1935                         |             |        |        | 1.97                                 |
|           | 0.4990        | 13.5925                        |             |        |        | 2.36                                 |

续表 5

| 温度 (K) | $\frac{a}{W}$ | $\left(\frac{BE_s}{p}\right)_c$ | 拟合出的柔度曲线的系数 |       |        | $K_c / (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ |
|--------|---------------|---------------------------------|-------------|-------|--------|-------------------------------------|
|        |               |                                 | A           | B     | C      |                                     |
| 313    | 0.1049        | 2.8303                          | 0.673       | 7.610 | 38.478 | 2.73                                |
|        | 0.2058        | 4.4130                          |             |       |        | 2.02                                |
|        | 0.3017        | 5.7633                          |             |       |        | 2.08                                |
|        | 0.3756        | 7.6280                          |             |       |        | 1.93                                |
|        | 0.5042        | 14.8958                         |             |       |        |                                     |
| 333    | 0.1046        | 4.2877                          | 0.886       | 6.361 | 71.550 | 2.80                                |
|        | 0.2004        | 5.5513                          |             |       |        | 2.44                                |
|        | 0.2991        | 8.7718                          |             |       |        | 2.32                                |
|        | 0.3796        | 12.2928                         |             |       |        | 2.17                                |
|        | 0.5004        | 22.9780                         |             |       |        |                                     |

测试结果表明,同一种药在同一温度下,不同的无量纲裂纹深度的  $K_c$  值也不同。根据各种炮药在各温度下的数据情况,我们认为无量纲裂纹深度 ( $a/W$ ) 值控制在 0.3~0.6 之间为宜(当  $(a/W)_c$  超过 0.6 的数值时不予采用,因此上列表格中为空格)。为此,我们选取原始无量纲裂纹深度  $a/W = 0.3$  一组的  $K_c$  值为表征炮药在该温度下的断裂韧性值

### 三、结 论

各种炮药测得的断裂韧性  $K_c$  值列于表 6。

表 6  
Table 6 (单位:  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

| 品名 \ 温度(K) | 233  | 253  | 273  | 293        | 313  | 333  |
|------------|------|------|------|------------|------|------|
| 三基药 A      | 2.44 | 2.00 | 2.36 | 1.37       | 0.68 |      |
| 三基药 B      | 1.45 | 1.86 | 1.67 | 0.87       | 0.33 |      |
| 三基药 C      | 2.29 | 2.75 | 2.02 | 1.30       |      |      |
| 单基药        | 1.92 |      | 1.89 | (298K)2.00 | 2.08 | 2.32 |

从表中可知,不同炮药的断裂韧性在不同温度时是不同的,其最高值所在的温度也是不同的,随着药的“硬”的程度增加,有向较高温移动的趋势。其机理尚有待探讨。

### 参 考 文 献

- [1] 吕儒慈著, 高分子材料的强度与破坏, 四川教育出版社, (1988), 206, 217.  
[2] 许凤和编著, 高分子材料力学试验, 科学出版社, (1988), 351.

## PRELIMINARY STUDIES ON FRACTURE TOUGHNESS OF GUN PROPELLANTS

Zeng Zhaohuang Hu Guosheng

Luo Yunjun Niu Bingyi

(Taiyuan Institute of Machinery)

**ABSTRACT** Since the bore pressures of guns are high, we have to set much higher demands on the mechanical properties of gun propellants, especially the fracture toughness of gun propellants,

In the course of production, stockpile and transportation, it is unavoidable to bring some defects in the granules of propellant or on its surface. In order to ensure safety in using it, besides checking the basic data of its mechanical strength and analysing the stress under the flawless hypothesis, we must further study its fracture toughness. Otherwise, the crack of propellants may be enlarged by collision and induced shock waves and temperature gradients in the powder chamber, which in turn leads to abnormal combustion and unstable interior-ballistic process or to cause a breech blow up.

An initial broadening of the crackle on the granule does not mean that it will be destroyed. Only when the extension force is so increased as to produce an unstable extension of the crack on it, the unexpected phenomena would happen. Therefore, we design a special compact tensile specimen with different crack depths and stretch it on an universal electronic testing machine under five different temperatures. The load  $p$  and displacement  $s$  are simultaneously recorded, and the results are treated by curve fitting procedure on a PC. The relation received between dimensionless crack length ( $a/W$ ) and corresponding dimensionless compliance ( $BEs/p$ ) shows that the fracture toughness criteria  $K_c$  under different temperatures differs from one another. The temperatures of maximum  $K_c$  differ from one another, too. There is a tendency the higher the temperature of maximum  $K_c$  the higher hardness of the propellant.

**KEY WORDS** gun propellants, triple-base propellants, fracture toughness, compliance method