

X射线法测定药柱的残余应力

王守道

(中国工程物理研究院科技信息中心)

摘要 叙述了药柱中残余应力产生的原因,介绍了残余应力的X射线测试方法及初步的测试结果。表明用X射线法测试药柱的残余应力,是一种可行的方法。

关键词 炸药装药 残余应力 X射线

1 引言

高能炸药的成型工艺及装药质量的检测,涉及诸多内容。除保证药柱达到高能量的指标外,还要求它具有较好的力学性能、较宽温度范围内的环境适应性及良好的形稳性等。

然而药柱在压制、注装及温变过程中,即伴随产生残余应力,它影响药柱本身的强度、耐疲劳、形稳性等性能,因此也就与产品的力学性能、环境适应能力、精密装配及长期贮存等密切相关。随着武器研制工作的进展,对药柱质量、性能的要求越来越高,对产生某些变化的原因也需进一步研究和探讨,因此有必要对药柱的残余应力进行测试。

长期以来,X射线法测定残余应力,限于用在金属部件方面。本工作的目的在于试图将这一方法引入非金属部件的测试中,用来测定炸药药柱的残余应力。

2 残余应力的产生及其原因

残余应力是当没有外力作用时,在物体内部保持平衡而存在的应力。即没有通过物体表面向物体内部传递垂直应力和切应力的外力作用时,在物体内部保持平衡的应力系统,有人也把它称做内应力^[1]。

按残余应力相互作用范围的大小,可分为宏观应力和微观应力。或者考虑到材料的组织和残余应力产生的原因等方面,也可分为体积应力(与宏观应力相对应)和组织应力(与微观应力相对应)。从产生过程来说,体积应力是由于外部的机械作用、热作用或化学作用,对物体的不均匀影响而产生的。因此,即使材料是完全均匀的也会产生体积应力。组织应力则是由于组织不均匀而引起的。在组织不均匀的情况下,就是外加的宏观作用如变形、加热、冷却或化学变化等,即使都一样,也会产生残余应力。就压装药柱或注装药柱来说,无论是体积应力还是组织应力都是存在的。

3 药柱残余应力的X射线测试法

残余应力的测试方法有多种,如利用电阻变化、机械引伸等,但这些方法都较粗糙、精

确度不高,且都是破坏性的,需要通过破坏样品来测定残余应力,它们均不可取,而 X 射线法是残余应力测量中唯一的非破坏性测试方法^[2]。

3.1 测量原理

X 射线测定应力是根据 X 射线衍射得知的晶面间距变化来计算晶体应变,由此应变求出残余应力的一种方法,它准确可靠,用途日益广泛^[2,3]。

药柱是由许许多多杂乱取向的晶粒所组成的,当一束波长为 λ 的特征 X 射线照射到炸药制件上时,则产生衍射。根据布拉格 (Bragg) 公式:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

式中: d 为晶面间距; θ 为衍射角, n 为衍射级的正整数。当药柱受力时,晶面间距 d 即改变。微分 (1) 式,可得

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot\theta \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

(2) 式说明根据衍射角的变化,晶面间距的变化,即应变,就可得知。无应力状态时,晶面间距用 d_0 表示,同样条件下的衍射角用 θ_0 表示,则垂直于晶面方向的晶格应变 $\epsilon_{\phi X}$ (图 1) 可从公式 (2) 计算如下:

$$\epsilon_{\phi X} = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)_{\phi X} = -\cot\theta_0 \cdot (\theta_{\phi X} - \theta_0) \quad (3)$$

公式 (3) 给出了应变和衍射角的关系,但残余应力和衍射角的关系是怎样的呢? 经运算得出:

$$\sigma_X = \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\partial \epsilon_{\phi X}}{\partial (\sin^2 \psi)} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cot\theta_0 \cdot \frac{\partial (2\theta_{\phi X})}{\partial (\sin^2 \psi)} \quad (4)$$

式中: σ_X , X 方向的应力; E , 弹性模量; ν , 泊松比; ϕ_0 , X 射线入射角; ψ , 试样法线与衍射晶面法线的夹角; θ_0 , 药柱样品在无应力状态下的 X 射线衍射角; $\theta_{\phi X}$, 垂直于 OP 晶面的衍射角; $2\theta_{\phi X}$, 仪器测得的衍射角。

在实际工作中衍射角 $2\theta_{\phi X}$ 是对应几个入射角 ϕ_0 来测定的。 $\sin^2 \psi$ 与 $2\theta_{\phi X}$ 的关系 ($2\theta - \sin^2 \psi$ 图) 理论上是直线的, 如图 2 所示:

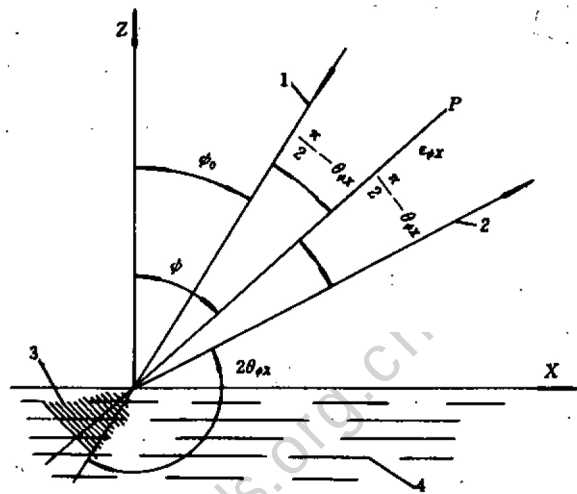


图 1 衍射原理图

1——入射 X 射线; 2——衍射 X 射线;
3——衍射晶面; 4——试样。

Fig. 1 Theorem diagram of diffraction

1——Incident X-ray, 2——Diffraction X-ray,
3——Diffraction crystal faces, 4——Specimen.

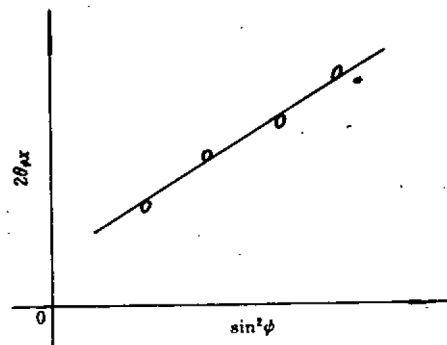


图 2 $\sin^2 \psi - 2\theta_{\phi X}$ 图

Fig. 2 Relation of $\sin^2 \psi - 2\theta_{\phi X}$

由此直线的斜率 M , 应力 σ_x 和衍射角的关系, 可将(4)式, 改写成:

$$\sigma_x = k \cdot M \quad (5)$$

在此,

$$k = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \operatorname{ctg} \theta_0, \quad M = \frac{\partial(2\theta_x)}{\partial(\sin^2 \psi)}$$

(5)式即为试验数据的最后计算公式。对于一个特定的测试样品, 其 k 为常数, 由被测药柱的 E 、 ν 和 θ_0 所确定。

3.2 测试方法

3.2.1 X射线机靶的选择

样品不同, 所选择的特征 X 射线也不同, 因此必须注意靶的选择^[4]。所选靶产生的 X 射线应使衍射角 2θ 越大越好, 最好接近 170° , 其原因是为了提高测试精度。因为由(2)式得 $\Delta\theta = -\operatorname{tg} \theta \frac{\Delta d}{d}$, 即在一定的应变 $\frac{\Delta d}{d}$ 状态下, θ 越大, 则 $\Delta\theta$ 的绝对值也就越大, 从而提高测试精度。对于铁素体, 通常选用 Cr-K 特征谱线和 (211) 晶面, 此时对应的 2θ 为 156° 。对于以奥克托今(HMX)为基的塑料粘结炸药来说, 也以选用 Cr 靶的 K 特征射线为最好, 这时在面间距 $d=1.20\text{Å}$ 处, 出现一较强的衍射峰, 且 2θ 也较大, 为 145° ; 若用 Fe 靶, 面间距 $d=1.13\text{Å}$ 的衍射峰仍是相当好的, 此时的 2θ 约为 120° 。

3.2.2 X射线管的电压和电流

为了避免测量的波动, 特征 X 射线需要较高的强度, 则用较高的电压以增加其强度, 因此电压必须在 25kV 以上, 电流应尽可能大。

3.2.3 X射线入射角

理论上, 在 $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 图中直线的斜率 M 可以由两次测量来测定。但在实际测定中往往有些波动, 其中有些原因来自试样。在材料有强烈织构的情况下, $2\theta_x\text{-}\sin^2\psi$ 图不可能是直线, 因此仅仅两点的测量是不够准确的, 需做三点或四点的测量, 如采用 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 和 45° 的四个入射角来进行测试。

3.2.4 衍射线峰位置的确定

在 X 射线应力测定中, 是由记录的衍射曲线来确定衍射角的, 衍射角要测准, 因为应力值的计算是基于衍射角的相对改变量。根据衍射峰的位置来确定衍射角的方法有多种。在衍射峰尖锐清晰对称性良好的情况下, 用目视峰位法, 即可准确地确定衍射角, 我们在实验中所用的即为此种方法。

3.3 药柱样品的测试

为了验证方法的可行性, 分别做了无应力自由状态下的 HMX 粉末和有应力状态下的 HMX 压装的 2701 药柱, 以揭示衍射角的改变量及测试精度。药柱 2701 配方为 HMX: 聚乙烯: 聚对苯二甲酸癸二酸乙二酯: 聚乙烯醇缩甲乙醛 = 97: 1: 1: 1, 密度 $1.81\text{g}/\text{cm}^3$, 抗压强度 17.5MPa 。实验结果如图 3、图 4 所示。因无 Cr 靶, 实验中所用为 Cu 靶。

根据测试原理, 2θ 角越大越好, 最好能大于 140° , 但在 Cu 靶的情况下, HMX 高于 85.8° 的强峰又没有, 故取 2θ (即 $2\theta_0$) = 85.8° 的衍射峰为检测 HMX 残余应力的峰线。此角对应 HMX 的原 (211) 晶面, 面间距 $d = 1.1315 \text{ \AA}$, 这与 HMX 的结晶学数据的文献值是一致的。

图 4 中 $2\theta = 86.3^\circ$ 的衍射峰 (晶面间距 $d = 1.126 \text{ \AA}$) 对应于图 3 中 85.8° 的衍射峰, 二者 2θ 之差为 0.5° , 晶面间距之差为 $0.0055 \text{ \AA}$ 。这结果显示了粉状 HMX 与 2701 药柱衍射图谱的差异, 这差异就是残余应力存在和无残余应力存在的鉴别和

测量。 2θ 可读至 0.01° , 对应于 $0.0001 \text{ \AA}$ 的面间距的改变, 这样如此微小应变的精确测出, 说明了残余应力的测定可达到很准确的程度。但由于所用压装药柱的密度略低, 影响了测试精度, 若对于 1.86 g/cm^3 以上的高密度试样, 残余应力更大, 测试效果会更好。当然, 在用 Cr 靶的情况下测试精度也会更高。

4 结 语

4.1 用 X 射线法测定残余应力, 从理论上说, 只要被测物体是晶体就可行。常用的高能炸药为晶体材料, 当然为适用对象。

4.2 理论和初步的实验说明, 用 X 射线法无损地测量药柱的残余应力是完全可行的。

4.3 若能培养 HMX、RDX 等炸药的单晶体, 测试这些单晶体受力时与受力后的性能状态^[5], 则对进一步了解炸药在各种比压下的行为, 改进装药工艺, 设法消除残余应力, 无疑会有大的裨益。

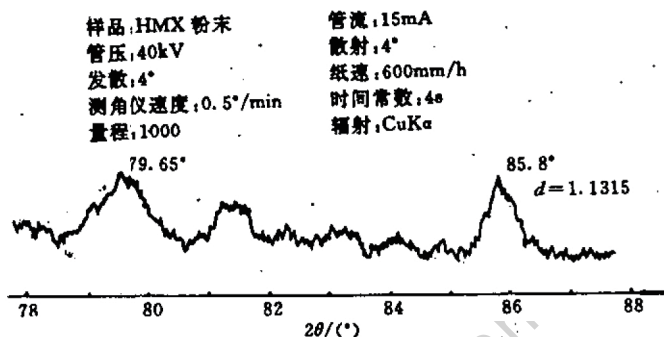


图 3 HMX 粉末的衍射图

Fig. 3 Diffraction diagram of HMX powder

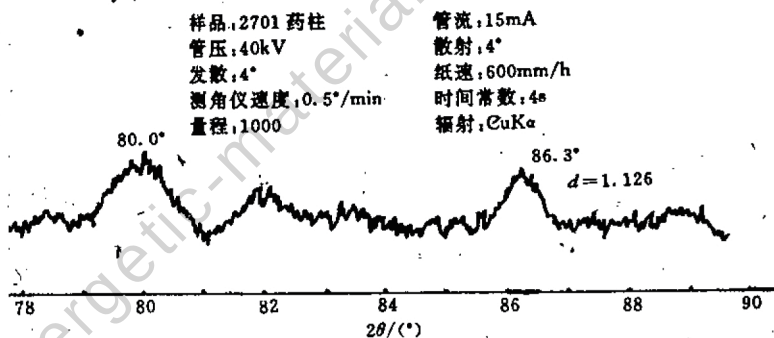


图 4 2701 药柱的衍射图 (密度 1.81 g/cm^3)

Fig. 4 Diffraction diagram of 2701 charge

致谢: 在测试中, 曾得到西安 204 所堵祖岳等同志的帮助, 特表谢意。

参 考 文 献

- 1 一机部机电研究所. X射线应力测定, 1978.
- 2 何家雯. X射线残余应力测定方法(私人通讯). 1981.
- 3 Etheridge J M, Fuorney M E. Critical Review of Various Methods of Residual Stress Measurement. *Experim. Stress. Anal.*, 1977, 35(2): 12~129
- 4 一机部机电研究所翻译. X射线应力测定标准方法(日本材料学会颁发), 1973.
- 5 Ewald P P. A Method for Determining Stresses in Single Crystals by X-ray Diffraction. *Acta Cryst*, 1971, A27(4): 578~585

X-RAY METHOD OF RESIDUAL STRESS MEASUREMENT IN EXPLOSIVE CHARGES

Wang Shoudao

(*Science and Technique Information Center, CAEP*)

ABSTRACT This paper describes the factors causing residual stress in explosive charges and their measurement method by X-ray. The primary test results indicate that the X-ray method of residual stress measurement is feasible for evaluating the mechanical properties of explosive charges.

KEY WORDS explosive charge, residual stress, X-ray.