



爆轰测试方法

基础(三) 闪光X射线照相技术

张寿云

(1984年10月5日收到)

闪光X射线照相技术是研究高速瞬变过程的有力工具。它广泛应用于弹道学、爆炸动力学、等离子体物理学等研究中；还应用于短暂应力状态下材料的非破坏性检验、运动系统的监视、以及生物学和医学等领域。

闪光X射线照相技术还只有四十多年的历史。首先是由于军事科学上的需要，有力地推动了它的发展和日益完善；在民用上也逐步显示出它的优越性。它已成为现代高速摄影技术的一个重要组成部分^[1]。

一、X射线的产生及其基本性质

X射线是由高速电子撞击到靶(阳极)上产生的。连续辐射。它是一种电磁波辐射。对于以波长为 λ 的X射线辐射的光子能量E为

$$E = hc\lambda^{-1} \quad (1)$$

式中 h 是普朗克常数； c 是光速。不难看出，X射线管是由作为电子源的阴极和作为靶的阳极所构成的。加在两个电极上的电压是用于加速电子的，故光子的能量是与加速电压有关的，其中最大的光子能量 $E_{max} = eV$ (此处 e 是电子的电荷量， V 是阴阳极间的电压)。而从研究发射的X射线频谱可知，它可分为连续辐射和特征辐射两种形式。

连续辐射

图1是在恒压源下产生连续辐射线的频谱曲线。它的总辐射强度 I 为：

$$I = \int_{\lambda} I(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

由经验可知，

$$I_0 = kiZV^n \quad (3)$$

式中 k 是系数； i 是电流； V 是电压； Z 是靶材料的原子序数；指数 n ，在MV量级时， $n \approx 2$ 。如果电压 V 以伏特为单位，电子束能量转换成X射线辐射能量的效率 η 可近似写成：

$$\eta \approx 10^{-9} ZV \quad (4)$$

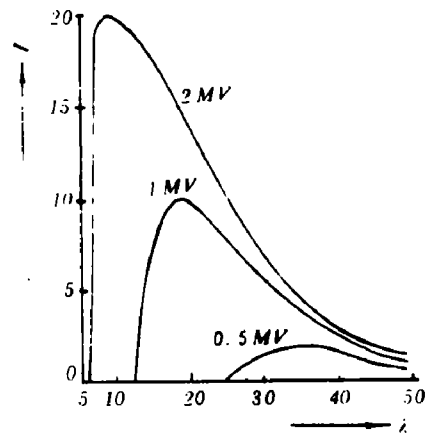


图1 不同管电压下的连续X辐射

这种转换效率是很低的，一般只有千分之几。即电子束的绝大部分能量被转化为热能。

当阳极电压高于 0.5 兆伏时，电子束方向的辐射强度最大；当电压低于 100 千伏时，在电子束方向没有 X 射线，而与电子束成 $60 \sim 80^\circ$ 的方向上辐射强度最大。即连续辐射谱具有角分布的特性。

特征辐射

由于带有足够动能的电子碰撞，阳极原子壳层中的电子可能被激发。激发电子的空位将被更高能层的电子所代替，由于能级的差异而释放出一个光子。这种辐射叠加在连续辐射谱线上，称为特征辐射谱，如图 2 所示。阳极材料所特有的 X 射线线系谱是与不连续的电子能级相关的。特征辐射

元素	原子序数	能量 (keV)
Al	13	1.5
Cu	29	8.9
Mo	42	20.0
W	74	69.3
U	92	115.0

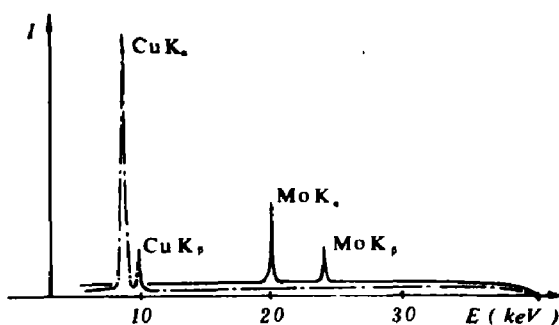


图 2 铜和铜靶的 X 射线谱 (40 kV)

最主要的跃迁发生在较高的能级差额之间。从 L 层到 K 层 (K_α 辐射) 跃迁的典型能量列于表中。应当注意到，与连续辐射谱不同，特征辐射是各向同性的。

X 射线的吸收

当 X 射线束通过厚度为 x 的物质时，遵守材料吸收衰减的指数定律：

$$I_2 = I_1 \exp(-\mu x) \quad (5)$$

I_1 和 I_2 分别是射入和射出的强度。X 射线强度的损失是由于与物质中原子相互作用的结果。它们作用的方式有：(a) 光电效应；(b) 相干散射；(c) 非相干散射 (康普顿散射)；(d) 电子对效应。这些作用方式与射线的能量和物质的原子序数密切相关。

二、闪光 X 射线装置

闪光 X 射线照相技术大多用于观察研究高速 ($10^2 \sim 10^4$ 米/秒) 运动现象，这时要求曝光时间在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 秒之间，图象的运动模糊才可以忽略。常规 X 射线装置的曝光时间是以秒计算的，其管电流为毫安量级。闪光 X 射线装置必须采用高压脉冲电源，为满足照相的剂量要求，管电流应达到 $10^3 \sim 10^4$ 安培。要产生如此大的电流，必须有一个发射大量电子的源和以正离子补偿电子的空间电荷效应。这可采用气体放电、真空放电和场致发射来实现。实际应用中，大多采用真空放电形式。

1. 闪光 X 射线管

闪光 X 射线管是使用低于 10^{-3} 托的真空管，分为封闭管和动态管两种类型。封闭管在使用中不需要附加抽气系统，它的操作控制比较简单。而动态管是可拆卸的，可以改变阳极和输出窗口的材料、结构，以及调整电极间的距离。特别是大功率脉冲下工作的管子，阳极工作的次数有限，使用动态管更为有利；其次，动态管的工艺要求比较简单。只是由于它附有抽真空系统而显得有些不便。

最简单的二极管式闪光 X 射线管，有发射电子的冷阴极和作为靶的阳极。当两个电极间再加一个触发电极时，就构成了三极管式的闪光 X 射线管。图 3 和图 4 表示了几种典型的电极系统。

它们的共同特点是：冷阴极有锐利的边角和尖端，以促进场发射电流的建立；阳极的设计则是尽量使辐射强度最大，而平行于照相方向的辐射投影面积最小（接近点源）。

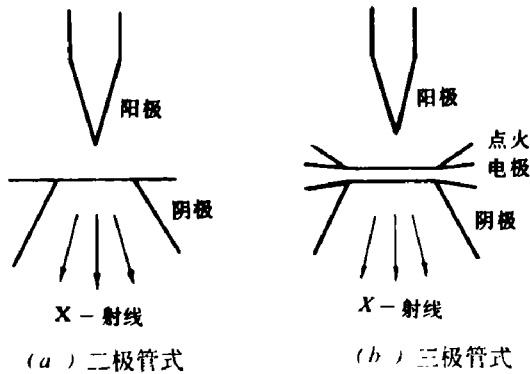


图3 闪光X射线管电极系统

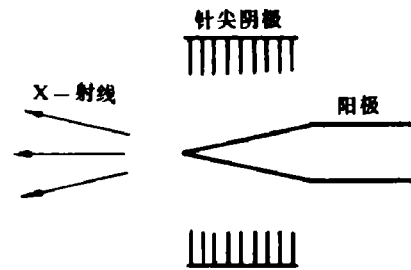


图4 多针尖阴极结构示意图

阴极材料大多采用不锈钢、镍等，多针尖阴极则常用钨丝制成。钨是高原子序数物质，又有高的熔点，作为阳极靶材料，它是优先选用的。但如果需要在某特征谱线下工作，就应选择相适应的靶材料。

作为阳极的形式可分为透射式和反射式两种。透射式适合于1兆伏以上的电压，它的靶一般用钨或钨箔，其厚度决定于电子的能量。透射式靶不易得到小的焦点。反射式靶用于几百千伏的电压下是合适的。如反射式锥形阳极可获得良好的聚焦。锥顶角一般在30°左右，电子轰击在锥面上，在辐射最强的方向，焦点直径最大等于锥基的直径。

2. 脉冲高压电源

脉冲高压电源的规模和形式，以及输出参数的要求，决定于所需X射线的能量和剂量。下面简要介绍几种基本电源形式。

(1) 单个电容器放电电源

将一个三极管式的管子和一个电容器联结起来就构成了最简单的脉冲X射线发生器，如图5所示。电容器先充正电压U，然后射线管触发电，在阴、阳极间引起放电，伴随着产生X射线。从放电开始到阴阳极间形成电弧，管阻抗从无穷大下降到10Ω左右。此放电过程相当于一个高阻尼谐振电路放电。阳极电压U、电流i、X射线强度I与时间t的关系描绘在图6中：电压和电流的相位

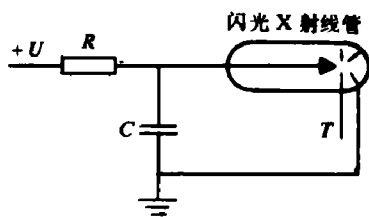


图5 单个电容器放电电路
T—触发电极

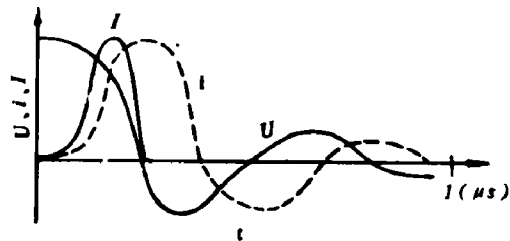


图6 阳极电压U、电流i、射线强度I与时间t的关系

相反，当电流达到极值时，已发展到电弧放电阶段，这时已没有X射线发射。当电压高于100千伏时，射线管的绝缘较困难，则可采用带有火花隙S的线路。为了有较高的电压加到射线管上，必须尽量降低火花隙的电阻和电感

(2) 脉冲变压器电源

脉冲变压器电源的X射线装置线路如图7所示。充电到 U 的电容器，通过火花隙 S 经变压器初级放电，在阳极上可得到理论值为 nU 的脉冲高压。此处 n 是变压器次级和初级的匝数比，一般 n 为20左右。

为提供放电过程中的大电流，电容器的容量必须足够大。在此条件下，即便采用自感很低的初级线圈，电流脉冲上升时间也需 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 秒，脉冲宽度达数微秒。如果需要，可把熄火花隙放入次级电路，以减少上升时间和脉宽，一般可达到亚微秒的脉冲宽度。

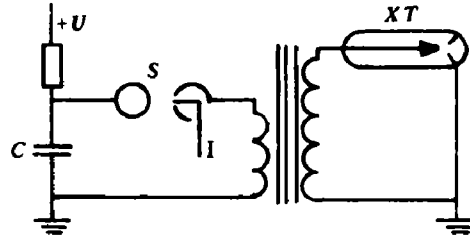


图7 变压器电源产生X射线脉冲

S 为火花隙, T 为触发电极, XT 为X射线管

(3) Marx发生器电源

Marx发生器是闪光X射线装置中使用较普遍的一种电源。尽管Marx发生器有多种结构形式，其基本概念都是先给电容器并联充电，然后使其串联放电，输出一个幅值很高的脉冲电压。图8描绘了一台4级Marx发生器闪光X射线装置的接线原理图。电容器 C 通过电阻(R_1, R_2, \dots, R_n)并联充电到 U ，第一对火花隙由外部

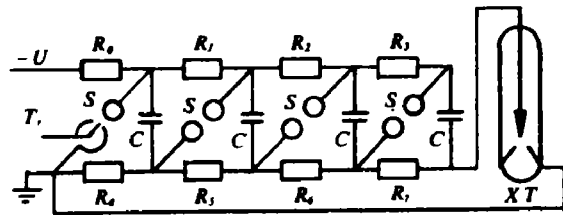


图8 Marx发生器电源的闪光X射线装置接线原理图

触发电点 T ，尔后的火花隙相继击穿，即电容器经火花隙 S 串联放电。当级数为 n 时，Marx空载输出电压的理论值可以达到 n 倍的充电电压。但由于分布电容的影响，空载输出电压低于 nU 。实际上，为使发生器达到高的输出效率，应尽量降低放电回路的电感和电阻。

(4) Blumlein线

Blumlein线是由三个同轴圆柱导体(图9)或由三块平行金属板组成，导体之间填有绝缘电介质。它的前级电源多数采用Marx(也可使用其他类型电源)。仔细调整主开关 S ，当Blumlein线充电至一定电压，主开关击穿放电，Blumlein线输出一短脉冲高压加到X射线管(XT)上。从电磁波在Blumlein线中的传输、反射和射可知，如果X射线管(负载)阻抗 $R_L = 2Z$ (此处 Z 是传输线的特性阻抗)，理论上负载两端将呈现一个脉冲方波，脉冲幅度等于充电电压；脉宽 $\tau = 2l\sqrt{LC}$ (此处 L 和 C 分别为传输线单位长度的电感和电容， l 是传输线的长度)。采用分布参数的Blumlein线结构的优点，不仅有助于获得短的脉冲宽度，而且可以得到大的功率输出。

3. 高能闪光X射线装置

采用加速器技术可以获得高能量、高强度的闪光X射线辐射。例如：

(1) PHERMEX (Pulse High Energy Radiographic Machine Emitting X-rays) 是美国洛斯·阿拉莫斯实验室研制的一台驻波加速器。目前达到50兆伏、100安培，

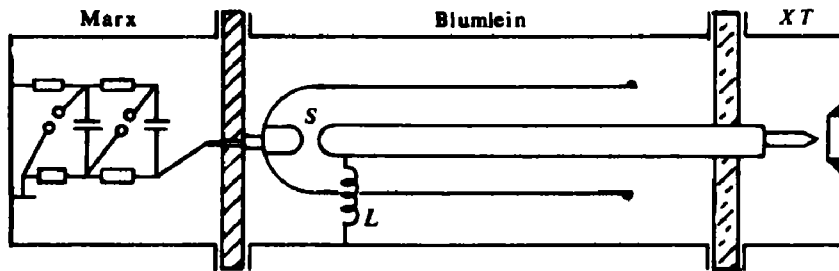


图9 Blumlein线结构原理图

斑直径1毫米、脉宽200毫微秒、在1米处的剂量达到100拉德。

(2) FXR (Flash X-ray Radiography)是美国利弗莫尔实验室研制的一台感应直线加速器。20兆伏、2.3千安、焦斑直径4毫米、脉冲半高宽为60毫微秒、在1米处的剂量达500拉德。

三、触发与同步技术

用闪光照相记录快速过程中某指定时刻的状态，必须配以同步和时间测量电路。图10(a)和

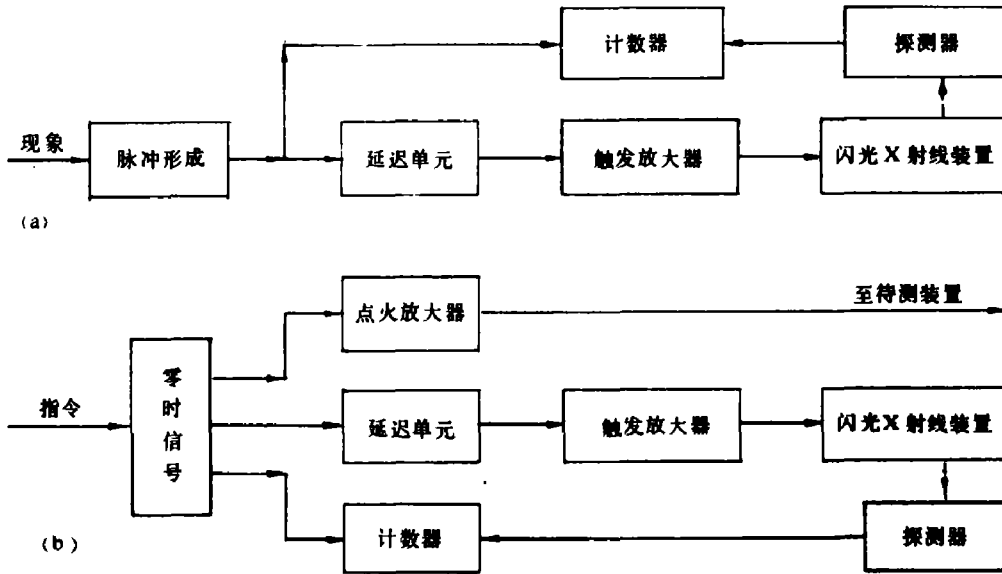


图10 同步和时间测量电路的原理方框图(a)现象启动、(b)指令启动

(b)给出了这种电路的原理方框图。图10(a)是从被研究的现象给出一个信号，经相应的电路转换成形，输出一电压脉冲到延迟单元，经时间调制后，输入到触发放大器，经放大后启动闪光X射线装置进行照相。脉冲形成电路还同时输出一信号给计数器开门；计数器的关门信号是由X射线探测器提供的。图10(b)是用指令启动多路零时信号装置，同样可达到在指定时刻进行照相的目的。

值得指出的是，为达到在指定时间范围内进行照相，对上述系统(包括闪光X射线装置)的稳定性是有严格要求的：时间稳定性一般应达到 10^{-7} 秒。

四、闪光X射线电影摄影

为得到某现象发展过程的大量讯息，可使用电影摄影技术。

1. 单管电影摄影

在图11中描绘了一个单管电影摄影电路。电容器 C_1 通过X射线管的放电，是用熄火隙 Q 控制的。熄火隙是用相距50~200微米的几个金属圆盘构成的。圆盘之间的气体经 T ，触发放电而变成等离子体。由于金属圆盘的大热容量和导热，等离子体迅速冷却，电流减弱以至中止，气体又变为绝缘的，等待着下一次的触发启动。这种摄影的帧幅数是受电容器中存储的能量所制约的。一般从几十幅到几百幅。当帧速不太快(10^3 帧/秒)时，可用鼓形摄影机记录图象；如帧

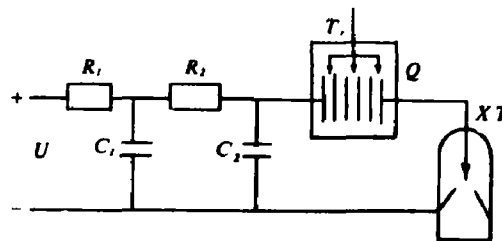


图11 单管电影摄影电路

速较快, 则可用X射线象增强器或光学象增强器记录。

2. 多管电影摄影

依次触发几个闪光X射线管照相可获得几幅连续的照片。连续两幅之间的时间间隔是不受限制的。当然, 所使用的设备要庞大得多。如被研究的物体沿轨道运动(如子弹)时, 闪光X射线装置可如图12那样布置; 如果被研究的对象具有对称轴中心或集中发生的现象, 则可采用图13的方法排

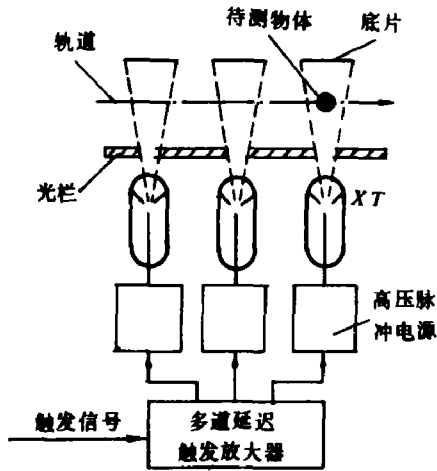


图 12 用多管的闪光 X 射线装置拍摄子弹运动的 X 射线照片

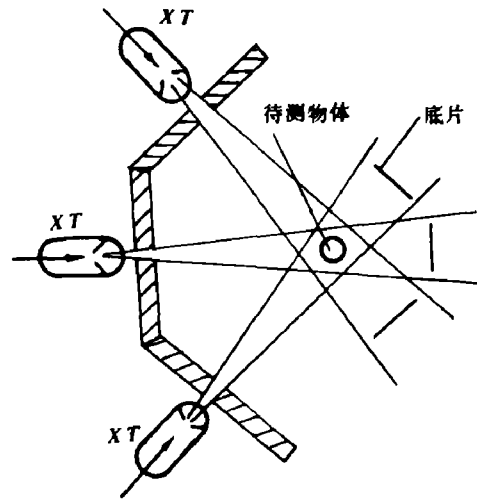


图 13 多管的电影摄影

列。为保证每个管子发射的 X 射线只照射到相应的底片上, 用铅板隔离, 限制 X 射线束的照射张角是必要的。多管电影摄影的记录中没有图象重叠的问题。

五、图象记录

1. X 光胶片及其与增感屏的组合

在闪光 X 射线照相中可用 X 光胶片直接记录图象。但应看到, 投射到胶片上的 X 射线, 其中绝大部分都穿过胶片而去; 仅有极少部分为胶片敏感层所吸收, 并随射线能量的提高而减少。如能量在 60 千电子伏时, 被吸收部分占入射强度的 1%; 当能量达到 500 千电子伏时, 吸收部分只占 0.1%。在很多情况下, 用 X 光胶片直接记录图象, 往往曝光不足, 而必须采用 X 光胶片与增感屏的组合接收办法。这种组合的选择, 主要决定于 X 射线的能量和到达 X 光胶片上的剂量。

增感屏分金属屏、荧光屏和金属荧光屏三类。为满足不同的照相条件又有不同的规格和型号。

金属屏可用金、铂、铋、铅、钽等材料制作。其中以铅屏应用较广。金属屏与胶片相接触, X 射线与金属作用, 释放出电子, 电子进入乳胶层, 形成潜影。金属屏一般使用在射线能量为几百千电子伏以上的情况。

在许多情况下, 金属屏的增感作用是不够的, 必须借助荧光增感。荧光屏的作用是将 X 射线光子转换成可见光被乳胶层吸收。荧光物质主要有钨酸钙、硫化锌(镉)、硫酸盐(铅或钡)等, 和稀土元素制品—如硫酸化钆屏、溴氧化镧屏等。一般在照射强度很弱的条件下可选用稀土屏。金属荧光屏可谓是金属屏与荧光屏的综合, 可在高能量、低强度下采用。通常, 荧光屏对图象质量的影响较大。在实际应用中, 增感效果不是唯一的决定因素, 必须根据 X 射线的参数和照相条件选择合适的 X 光胶片与屏的组合。

如果试验中X射线的总对比度超过了一种胶片的灵敏度范围,还可采用“堆叠技术”这就是使用几种不同感光速度的胶片,吸收补偿器,以及不同增感屏的组合装置,在几张胶片上分别得到不同剂量部分的清晰图象。在极弱的射线强度条件下,还可使用很灵敏的偏振光底片。

必须注意,为获得较满意的探测结果,显影、定影及暗室处理技术是不容忽视的。

2. 象增强器

为了探测底片灵敏范围以下的X射线强度,可使用象增强器,如图14所示。它可将增强的光信号投射到底片上;也可用电视系统进行观察。由于象增强器的畸变失真和分辨率较差,将使图象质量下降。如果采用微通道板技术,电子束在几组平行板中被放大;传导用的玻璃纤维直径为几十微米,放大增强效果将更明显,畸变失真也将有较大的改善。

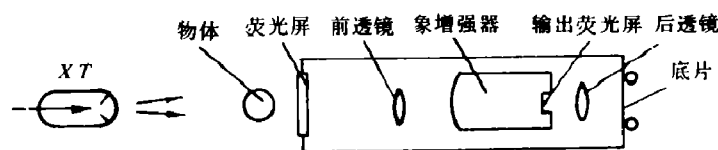


图14 用象增强器记录闪光X射线照相图象

3. 图象质量

图象的质量决定于各种因素的综合效果,一般可用对比度和清晰度两个参量表示。实际上,两者之间是密切相关的。

对比度是指底片上相邻部位的光学密度差。X射线穿透物体后,由于物体各部位的厚度或性质的差异,呈现出空间调制的性质。这个调制取决于X射线的能量、吸收材料的密度和性质。

清晰度是指画面可分辨细节的下降程度,也称为图象的模糊度。它由几何模糊、运动模糊和底片模糊三部分综合而成。它们取决于X射线源的焦点尺寸、物体相对于X射线源和底片的位置、增感屏和底片的种类、物体运动的速度等。

为了评定图象的质量,可以用“图象质量指示器”的X光照片进行估计。图象质量指示器一般是一种材料不同厚度的阶梯,阶梯的厚度按几何级数排列,每级台阶上有几个小孔,孔的直径等于台阶的厚度。另一种图象质量指示器是用不同直径的金属丝制作的。将图象质量指示器放在被研究物体的位置,可测定出能观察的最小厚度变化,和可观察到的最小孔径。原则上,指示器和被研究物体最好是同种材料。其次,考虑到每次闪光辐射的强度变化,可将指示器与试验物体记录在同一张底片上。当然,这种方法不能给出由物体运动而造成图象质量下降的程度。

4. 底片和X射线源的保护

在闪光X射线照相的应用中,被研究的对象常伴有强烈的破坏作用,必须对底片和X射线源采取保护措施。X射线源常置于坚固的钢筋混凝土建筑物内,仅留有较小的射线输出口。但底片距目的物近的多,需要保护的面积也大的多,故保护底片远比保护X射线源装置困难。

图15给出了一种底片暗盒的保护措施示意图。前保护板朝着射线源的方向,一般选用高强度镁铝合金或硬聚乙烯板。为提高抗破坏的能力,也可采用多层结构或圆锥(或球)形结构,减弱冲击波的作用效果,为加强保护效果,可将底片保护装置

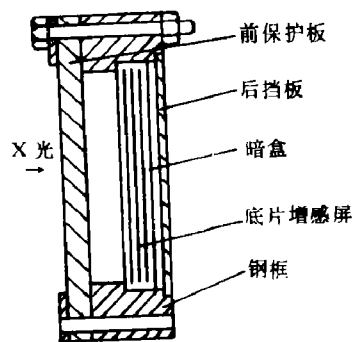


图15 X射线底片保护装置示意图

安装在照相支架的摆动臂上。摆动臂在冲击波的作用下可自由摆动。这样,冲击波传递给保护板的能量,可部分地转化为摆动臂的动能,以减弱冲击波对保护板的作用。

参 考 文 献

- (1) 西南流体物理研究所, 高速摄影与光子学(讲义), 1984年6月.
- (2) Jamet, F., Thomer, G., Flash Radiography, (1976).
- (3) Rudolf Germ er, X-Ray Flash Techniques, *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, **12**(1979), 336.

ELEMENTARY DIAGNOSTIC METHOD FOR DETONATION [3] FLASH X -RAY RADIOGRAPHIC TECHNIQUES Zhang Shouyun