

高能质子照相的研究进展*

许海波[†] 孔令海 彭现科

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

摘要 高能闪光照相是诊断致密物质内部几何结构和物理特性的最有效技术. 高能质子照相在穿透能力、材料识别、空间分辨率等方面都优于 X 射线照相, 已经成为美国先进流体动力学试验装置的优先发展对象. 文章详细介绍了高能质子照相方案及其研究进展.

关键词 光电子学, 质子照相, 综述, 质子加速器, 磁透镜

High-energy proton radiography

XU Hai-Bo[†] KONG Ling-Hai PENG Xian-Ke

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract High-energy flash radiography is the most effective technique to interrogate inner geometrical structure and physical characteristic of dense materials. It is shown that high-energy proton radiography is superior to high-energy x-ray radiography in penetrating power, material composition identification and spatial resolution. Proton radiography is taken as a leading candidate for the Advanced Hydrotest Facility by the United States. The project and current development in high-energy proton radiography is reviewed.

Keywords optoelectronics, proton radiography, review, proton accelerator, magnetic lens

1 引言

高能闪光照相始于美国的曼哈顿计划(Manhattan project), 并持续到现在, 它一直用来获取爆轰压缩过程中材料内部的密度分布、整体压缩的效果以及冲击波穿过材料的传播过程、演变和压缩场的发展的静止“冻结”图像. 这一过程非常类似于医学 X 射线对骨骼或牙齿的透射成像. 高能闪光照相有两个显著特点: 首先, 照相客体是厚度很大的高密度物质, 要求能量足够高; 其次, 客体内的流体动力学行为瞬时变化, 要求曝光时间足够短.

目前, 世界上最先进的闪光照相装置是美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室(LANL)的双轴闪光照相流体动力学试验装置(DARHT)^[1]. 它是由两台相互垂直的直线感应加速器组成的双轴照相系统, 一次实验能从两个垂直方向连续拍摄 4 幅图像, 并且在光源焦斑和强度方面都有提高. 但是, DARHT 也仅

有两个轴, 这是获得三维数据的最小视轴数目, 最多只能连续拍摄 4 幅图像, 不能进行多角度多时刻的辐射照相, 获得流体动力学试验的三维图像. 而且 DARHT 的空间分辨率受电子束斑大小的制约. 由于电子相互排斥, 电子束不能无限压缩, 束流打到转换靶上, 产生等离子体, 使材料熔化, 这在一定程度上扩展了束斑直径, 从而使 X 射线光斑增大. 估计最小的电子束直径为 1—2mm, 制约了空间分辨率的提高.

研究人员希望实现对流体动力学试验进行多角度(轴)、每个角度多时刻(幅)的辐射照相, 从而获得流体动力学试验的三维动态过程图像. 1995 年, 美国 LANL 的科学家 Chris Morris 提出用质子代替 X

* 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(批准号:10576006)重点资助项目

2008-05-14 收到初稿 2008-06-12 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: hbxu2002@yahoo.com.cn

射线进行流体动力学试验透射成像^[2]。首次质子照相得到的图像,其非凡的质量出乎发明者的预料。后续的研究和实验也确认了这项技术的潜在能力。据 Morris 回忆,20 世纪 90 年代初期武器研制计划资助了一项中子照相研究。其立项的主要思想就是利用高能质子、中子和其他强子的长平均自由程,使其成为闪光照相的理想束源。Steve Sterbenz 从这个思路出发,研究了使用中子照相进行流体动力学试验诊断的可能性。然而即使使用质子储存环(PSR)的强脉冲产生中子,中子通量都不足以在流体动力学试验短时间尺度下获得清晰的图像。当时的洛斯·阿拉莫斯介子物理装置(LAMPF)负责人 Gerry Garvey 听到这种意见的第一反应是“为什么不用质子?” Morris 将这些思想统一起来,利用高能质子束实现流体动力学试验诊断的突破,就是水到渠成的事^[3]。Morris 指出:质子照相的实施应归功于现代加速器具有产生高能质子和高强度质子的能力。促使发展质子照相技术最重要的一步是 Tom Mottershead 和 John Zumbro 提出的质子照相所需的磁透镜系统^[4],以及 Nick King 在武器应用中发展改进的快速成像探测系统^[5]。

高能质子束为内爆物理研究提供了堪称完美的射线照相“探针”,因为其平均自由程与流体动力学试验模型的厚度相匹配。射线照相信息通过测量透过客体的射线投影图像来获取。如果辐射衰减长度过短,则只有客体外部边界能够测量;如果辐射衰减长度过长,则没有投影产生。质子照相为流体动力学试验提供了一种先进的诊断方法。

2 质子与物质相互作用机制

高能质子与物质相互作用的机制是质子照相原理的基础。首先,需要从质子与物质的相互作用出发,对质子在物质中的穿透性和散射过程进行分析研究。

所有质子都在被测物质内部并与其发生相互作用。质子与物质的相互作用分为强作用力和电磁作用力^[6]。强作用力是短程力,质子与核的强作用力分为弹性碰撞和非弹性碰撞两种:如果是弹性碰撞,以某种角度散射的质子保持其特性和动量,质子因受核力的强大作用,会偏转很大角度,这种现象叫做核弹性散射(如果采用角度准直器,这部分贡献可以忽略);如果是非弹性碰撞,质子被吸收,也就是说,损失大部分能量分裂核,产生亚原子粒子——

π 介子。当质子能量达到 GeV 量级,质子与原子核的强相互作用占主导地位。质子与物质原子核中的质子和中子发生非弹性核相互作用,造成质子束指数衰减,其衰减规律可表示为

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i}\right), \quad (1)$$

其中 N_0 , N 分别为入射到被测物体上的质子通量和穿过被测物体的质子通量; λ_i 和 l_i 分别为第 i 种材料的平均自由程和厚度。当质子能量达到 GeV 量级,核反应截面几乎不变,单就穿透能力而言,质子能量达到 GeV 量级就足够了。核反应截面不变有利于质子照相的密度重建,因为质子在客体中的散射过程可能导致质子能量发生变化。

由于质子带电,它也通过长程电磁作用力与物质相互作用。当质子能量达到 GeV 量级时,电磁作用只能产生很小的能量损失和方向变化:

质子与原子核的库仑力作用称为弹性散射,穿过原子核的每个质子,即使和核并不接近,也能导致质子方向发生小的变化,每个小散射效应可以累积,这种现象叫做多重库仑散射。多重库仑散射的理论由 Enrico Fermi 在 20 世纪 30 年代建立。质子与原子核之间的库仑力作用发生多重库仑散射,多重散射可以近似用高斯分布表示:

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{1}{2\pi\theta_0^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\theta_0^2}\right), \quad (2)$$

式中 θ_0 为多次散射角的均方根值,可用下式表示:

$$\theta_0 \approx \frac{14.1}{p\beta} \sqrt{\sum_i^n \frac{l_i}{R_i}}, \quad (3)$$

式中 p 为束动量, β 是以光速为单位的的速度, R_i 是材料的辐射长度,其值近似地表示为

$$R_i = \frac{716A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})}, \quad (4)$$

其中 A 是原子量, Z 是原子序数。多重库仑散射的结果很重要,特别是对重物质,最终导致图像模糊。另一方面,因为 R_i 与材料的原子序数有关,也正是这个特性使质子照相具有识别材料组分的独特能力^[7]。

质子和电子之间也会产生库仑力作用,通常是非弹性的。因为电子质量与质子相比很小,库仑力的作用使电子方向和速度产生跃变,而对质子的方向和能量只产生缓变。也就是说,质子通过电离原子(把电子击出轨道),损失小部分能量。这种作用不会导致质子运动方向大的改变,但会导致质子能量的减少。20 世纪 30 年代著名的贝特-布洛赫(Be-

the - Bloch)公式很好地解释了这种机制. 能量损失依赖于质子束能量, 能量损失速率与它的动能成反比. 质子束穿过厚度为 l 的材料时, 能量损失为

$$\Delta T = \int_0^l \frac{dT}{dl} dl \approx \frac{dT}{dl} l. \quad (5)$$

当质子能量达到 GeV 量级 dT/dl 的值几乎与动能无关. 如果 E 和 T 以 m_0c^2 为单位 p 以 m_0c 为单位, 则

$$E = T + 1, \quad E^2 = P^2 + 1. \quad (6)$$

因此, 能量损失引起的动量分散为

$$\delta = \frac{\Delta p}{p} = \frac{dp}{dT} \frac{\Delta T}{p} = \frac{T+1}{T+2} \frac{\Delta T}{T}. \quad (7)$$

质子通过物体后损失能量, 发生能量分散. 磁透镜对不同能量的质子聚焦位置不同, 也将导致模糊, 这就是所谓的色差^[8].

3 质子照相原理

质子照相原理与 X 射线照相原理都是通过测量入射到被测物体上的粒子束衰减来确定被测物体的物理性质和几何结构.

由于多重库仑散射, 穿过被照物体的质子束有不同的散射方向, 形成一个相对于入射方向的锥形束, 需要磁透镜系统才能成像. 如果质子照相的模糊效应持续存在的话, 质子照相的潜力可能永远不会被发掘出来. 1995 年, Morris 发现磁透镜能使质子聚焦进而消除模糊效应, 最初进行的实验证实了他的观点的正确性. 后来, LANL 的另一位物理学家 John Zumbro 改进了磁透镜系统的设计方案, 称为 Zumbro 透镜^[4].

Zumbro 透镜的主要优点是它的消色差能力. 加速器产生质子束并非是单一能量的束流, 实验客体对质子的散射增加了质子能量的分散, 不同能量的质子具有不同的焦距, 导致图像模糊. 基于这样的考虑, Zumbro 采用在入射质子束的路径上增加一个匹配透镜 (matching lens), 匹配透镜的设计使得入射到被测物体上的质子束具有角度 - 位置关联, 即质子与透镜光轴夹角与质子离轴的径向距离成正比. 而且, 角度 - 位置的关联系数与成像系统磁透镜的设计有关^[9]. 这样, 可以消除由能量分散引起图像模糊的主要色差项.

剩余的色差项为

$$x = -x_0 + C_x \theta_0 \delta, \quad (8)$$

式中 C_x 为透镜的色差系数, θ_0 为多重库仑散射角, δ 为动量的分散. 由 (3) 式和 (7) 式可知, 多重库仑散

射角和动量的分散都与入射质子的能量成反比. 因此, 为了尽可能减小色差对空间分辨率的影响, 质子束的能量越高越好. 高能量意味着大规模和高造价, 根据空间分辨率随能量的变化趋势以及大尺度流体动力学试验的精度要求, LANL 为先进流体动力学试验装置 (AHF) 建议的质子能量为 50 GeV.

质子照相技术的关键之处在于其独特的磁透镜系统. 图 1 给出了 LANL 质子照相磁透镜成像示意图^[10]. 首先, 质子束通过金属薄片扩散, 再经过匹配透镜照射到客体 (匹配透镜除了减小色差以外, 还可以使质子束在击中物体前发散开来, 以便覆盖整个物体, 避免了使用很厚的金属作为扩束器) 这部分称为照射 (illuminator) 部分, 接着是三个负恒等透镜组, 分别是监控 (monitor) 透镜组、两级成像透镜组.

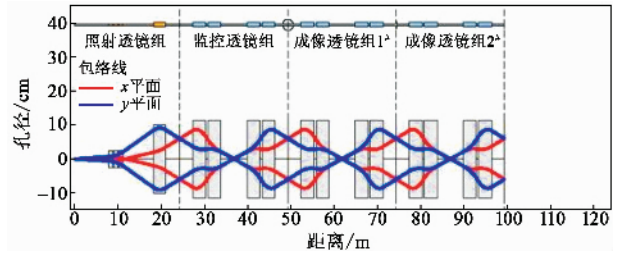


图 1 LANL 质子照相磁透镜成像示意图

Tom Mottershead 和 John Zumbro 论证了可以根据库仑散射角的不同, 在透镜系统的某个位置 (傅里叶平面), 可以将不同的散射质子束区分开来. 在傅里叶平面, 散射角等于 0 的质子位于中心, 散射角越大, 半径越大. 离开这个透镜后, 质子就能在空间上聚焦. 如果在这个位置平面放置角度准直器, 可以将某些散射角度的质子束准直掉, 对允许的角度范围进行积分, 得到总质子通量为

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\sum_i \frac{L_i}{\lambda_i}\right) \left[\exp\left(-\frac{\theta_{\min}^2}{2\theta_0^2}\right) - \exp\left(-\frac{\theta_{\max}^2}{2\theta_0^2}\right) \right]. \quad (9)$$

第一个角度准直器允许通过的角度范围为 $[0, \theta_{1\text{cut}}]$, 则第一幅图像接收到的质子通量为

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\sum_i \frac{L_i}{\lambda_i}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_{1\text{cut}}^2}{2\theta_0^2}\right) \right]. \quad (10)$$

第二个角度准直器允许通过的角度范围为 $[0, \theta_{2\text{cut}}]$, 且 $\theta_{2\text{cut}} < \theta_{1\text{cut}}$, 则第二幅图像接收到的质子通量为

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\sum_i \frac{L_i}{\lambda_i}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_{2\text{cut}}^2}{2\theta_0^2}\right) \right]. \quad (11)$$

角度准直器的使用增加了图像的对比度. 根据

物体的光程调节角度范围,可获得最佳的图像对比度.通过分析两幅图像得到的数据,可以提供密度和材料组分的信息.

考虑到探测器记数服从泊松统计分布,面密度的测量精度要达到1%,则图像平面上每个像素需要的入射质子数应为 10^4 ,每幅图像大约需要的质子数应为 10^{11} .如果一次流体动力学试验需要获得12个角度,每个角度20幅图像,则每次加速的质子总数达 3×10^{13} 个.

4 质子照相装置

质子照相技术自1995年首次在美国LANL被论证以来,LANL和布鲁克海文国家实验室(BNL)进行了大量的实验,其中很多次是和圣地亚(SNL)、劳伦斯·利弗莫尔(LLNL)以及英国原子武器研究机构(AWE)合作完成的,直接针对流体动力学有关的关键科学问题^[11].实验主要分为两部分:一是在LANL的洛斯·阿拉莫斯中子散射中心(LANSCE)上进行的小型动态实验(质子能量800MeV),小型动态实验主要包括:高能炸药的爆轰特性实验、金属和材料对强冲击加载的复杂响应实验(包括失效、不稳定性及微喷射等)以及验证内爆过程后期的材料动力学和材料状态的实验;二是在BNL的交变同步加速器(AGS)上进行的用于诊断大尺度流体动力学试验的高能质子照相实验(质子能量12GeV或24GeV).进行高能质子照相的目的是:发展高能质子照相所需技术,验证采用质子照相进行大尺度流体动力学试验的能力,以及与DARHT进行某些直接比较.对于厚的流体动力学试验客体而言,质子照相的质量远好于DARHT的照相结果.如果DARHT要获得同样的照相细节,需将其剂量提高100倍.而且比照片质量更重要的是,质子照相具有定量的特性.质子照相因其低剂量、定量的密度重建、亚毫米空间分辨率以及超过每秒500万幅的多幅照相频率等特性而成为新一代流体动力学试验闪光照相设施的必然选择.

LANL为AHF建议的质子照相装置包括质子束源、照相布局、磁透镜成像及探测器系统,图2给出了质子加速器和分束系统方案^[12].质子束源是一台能量为50GeV的同步加速器和12条束线,包括一台 H^- 直线加速器注入器,一台3GeV的增强器和一台50GeV的主加速器.采用快速束束调制器将质子束从3GeV增强器注入50GeV主加速器,经过同

步传输系统和使用分束器将质子平均分成多个子束.最后从多个方向同时照射到实验靶上.质子束穿过实验靶后,磁透镜系统对质子束信号进行分类,由探测系统记录数据.实验布局的复杂性都远远超出了闪光照相实验.

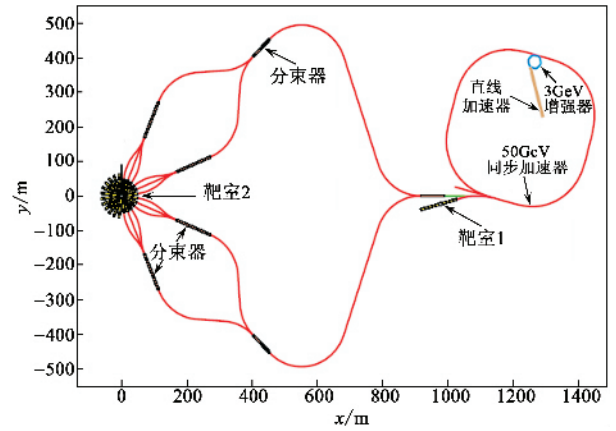


图2 LANL的质子加速器和分束方案

LANL提出的质子照相装置的主要指标:质子束能量达到50GeV,空间分辨率优于1mm,密度分辨率达到1%;每次加速的质子总数达 3×10^{13} 个,每幅图像的质子数达到 1×10^{11} 个;每个脉冲的间隔最小为200ns,质子到达靶的前后误差不超过15ns;每个视轴可连续提供20个脉冲,视轴数12个,覆盖角度达 165° .这样,一次流体动力学试验可获得12个角度,每个角度20幅图像.

2000年,LANL给出了发展质子照相的研究计划.整个装置预计投资20亿美元,其中质子加速器系统使用原有的部分设备,需要5678.8万美元.装置的建造时间需要10到15年,分几个阶段进行:2007年前,建造50GeV同步加速器、2个轴成像系统和靶室1;2008—2009年,建造3MeV增强器(booster)、4个轴成像系统和靶室2;2010—2011年,8—12个轴成像系统.从目前的调研情况来看,原计划2007年前完成的任务没能按期完成.因此,这个计划要推迟.最新的研究计划未见报道.

5 质子照相与X射线照相的比较

我们通过与现有最好的流体动力学试验装置——DARHT比较来说明质子照相的特点和优势^[13].

(1) 三维动态照相.由于质子加速器固有的多脉冲能力和质子束分离技术,因此,质子照相能够提

供多个时刻、多个方向的三维动态过程图像。质子照相能够提供超过 20 幅的图像,这种多幅能力可得到内爆运动过程的动态图像。而 DARHT 沿一个轴只能得到 4 幅图像,沿其垂直轴得到 1 幅图像。另外,质子照相不需要转换靶,保证了多次连续照相不受影响,而 X 射线照相由于需要转换靶,需要考虑束斑的影响。

(2) 精细结构分辨。高能质子穿透能力强,其穿透深度和流体动力学试验模型达到理想匹配。相比之下,X 射线只有在 4MeV 能量时才能达到最大图像对比度,此时其穿透能力只有高能质子的 1/10。质子照相能测定密度细微变化的另一个理由是质子散射能得到控制。散射质子可以被聚焦形成视觉上无背景、对比鲜明的图像。而实验客体对 X 射线形成的大角度散射无法控制,降低了照相的精度和灵敏度。

(3) 质子对密度和材料都比较敏感,可以分辨密度差别不大的两种物质。实际上,质子散射的利大于弊,它能用于识别物质的化学组成。利用两个相同的磁透镜系统和不同孔径准直器串联组成的两级成像系统,通过对两种不同准直孔径得到的数据进行分析,可以提供材料的密度和组分信息。而 X 射线只对密度敏感,故分辨不出密度差别不大的两种物质。

(4) 曝光时间可调。质子加速器能够产生持续时间为 100ps、间隔为 5ns 的“微小脉冲束”,每幅图像可用 8—20 个脉冲的时间进行曝光。因此,质子照相可任意选定曝光时间和间隔。内爆初期,研究人员可以选择较长的曝光时间和间隔,对较慢的运动进行连续式“冻结”照相。当内爆速度变快时,可以缩短曝光时间。DARHT 的脉冲时间由电路决定,一旦脉冲的时间间隔和持续时间固定,只能以固定的时间间隔照相,研究人员只能指定第一幅图像的时间。

(5) 探测效率高。质子是带电粒子,直接与探测介质中的电子相互作用产生信号,因此,很薄的探测器就能将质子探测出来。如此薄的探测介质接收不到被探测客体中产生的中子和 γ 光子。

(6) 空间分辨率高。X 射线照相是 X 射线穿过样品打到闪烁体或底片成像,没有聚焦过程(事实上,对 4MeV 的 X 射线还没有聚焦办法),图像的空间分辨率由光源的尺寸(焦斑)决定。质子散射虽然也会引起图像模糊,但质子散射是可控的,可以通过磁透镜聚焦成像。磁透镜不仅能聚焦质子,而且能减小次级粒子的模糊效应。但不同能量质子的聚焦不同,也将导致模糊。Zumbro 改进了透镜系统,消色差

提高了图像品质。对于小尺寸物体的静态质子照相,空间分辨率可到 $100\mu\text{m}$,最近的质子照相实验已达到 $15\mu\text{m}$,并有达到 $1.2\mu\text{m}$ 的潜力。

6 结束语

质子照相是美国国防研究与基础科学相结合而诞生的高度多用性的发明。质子照相若不是与国防基础研究共同立项,也绝不会有如今的发展。雄厚的武器实验基础能持续提供人员和创新技术。质子照相极大地提高了流体动力学试验的测量能力。它所具有的高分辨率能够精细辨别内爆压缩的细节,多角度照相有利于建立完整的流体动力学模型,多幅连续照相更加容易判断冲击波和混合物随时间变化的情况。近年来,科学家们加紧了对高能质子照相的研究。目前,X 射线照相仍然是流体动力学试验的主要设备。总有一天,质子照相将代替 X 射线照相并对流体动力学试验进行充分解释。

参考文献

- [1] Burns M J, Carlsten B E, Kwan T J T *et al.* DARHT Accelerators Update and Plans for Initial Operation. In: Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York, 1999. 617
- [2] Gavron A, Morris C L, Ziocck H J *et al.* Proton Radiography. Los Alamos National Report, LA-UR-96-420, 1996
- [3] Morris C L. Proton Radiography for an Advanced Hydrotest Facility. Los Alamos National Report, LA-UR-00-5716, 2000
- [4] Mottershead C T, Zumbro J D. Magnetic Optics for Proton Radiography. In: Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. Vancouver B C, 1997. 1397
- [5] King N S P, Ables E, Alrick K R *et al.* Nucl. Instrum Methods in physics research A, 1999, 424(1): 84
- [6] Fishbine B. Proton Radiography Sharper “X-Ray Vision” for Hydrotests. In: The Winter 2003 Issue of Los Alamos Research Quarterly. Los Alamos National Laboratory, 2003
- [7] Aufderheide III M B, Park HS, Hartouni E P *et al.* Proton Radiography as a Means of Material Characterization. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-134595, 1999
- [8] Amann J F, Espinoza C J, Gomez J J *et al.* The Proton Radiography Concept. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-98-1368, 1998
- [9] Barbara B, Andrew J J. Chromatically Corrected Imaging Systems for Charged-Particle Radiography. In: Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. Knoxville, 2005. 225
- [10] Andrew J J, David B B, Barbara B *et al.* Beam-Distribution System for Multi-Axis Imaging at the Advanced Hydrotest Facility. In: Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago, 2001. 3374
- [11] Morris C L, Hopson J H, Goldstone P. Proton Radiography. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-06-0331, 2006
- [12] Thiessen A. The Advanced Hydrotest Facility Overview. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-01-3742, 2001
- [13] Cunningham G S, Morris C L. The Development of Flash Radiography. In: Los Alamos Science. Los Alamos National Laboratory 2003