文章编号：1000-5773(2009)01-0001-08

关于自由面速度剖面解读层裂问题的几点商榷*

贺红亮

(中国工程物理研究院流体物理研究所，冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室，四川绵阳 621900)

摘要：基于对层裂问题的理解和相关文献，就自由面速度剖面解读层裂问题的局限性提出了一些看法。指出：自由面速度剖面测量给出的层裂破坏过程是间接信息，而不是直接信息，用它确定的理论模型和数值模拟参数，也许并没有真实地反映层裂过程的物理本质；层裂强度常被人们用来表征材料在高应变率下的抗拉伸能力，但是在目前的层裂强度计算公式中没有考虑损伤介质对波剖面传播的影响，使得计算结果明显偏低；传统的单点测量得到的结果有很大的局限性，对于层裂问题，采用概率评估或者置信度评估，也许更符合真实情况。建议：为了全面真实地评价层裂问题中的物理、力学过程，应该加快发展更多的实验探测和诊断技术，尤其是对内部损伤状态的观测。

关键词：层裂；损伤；自由面速度剖面
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

强冲击载荷作用下延性金属材料的拉伸型损伤与力学失效是许多工程技术领域中的重要科学问题，层裂(Spallation)是这类问题的一种典型破坏现象。关于金属材料的层裂研究，Meyers 和 Aimone[1]对 1983 年以前的主要研究结果有比较系统的总结和综述，Curran 等人[2]也从细观角度对材料层裂破坏现象的实验和理论进行了归纳。层裂现象在 20 世纪初由 Hopkinson 提出，二次世界大战后，由于军事需求的驱动，层裂破坏研究迅速发展。几十年来，在相关的实验技术、理论建模和数值模拟研究等方面，都获得了长足进展。目前，基于新材料和新的应用领域，层裂研究也正面临新的发展机遇。

早期的研究，由于缺乏精密的实验诊断方法和理论分析，针对层裂破坏研究提出了许多经验准则，例如：最大拉伸应力判据[3]、应力梯度准则[4]、以及积分准则[5]等。从 20 世纪 70 年代开始，在层裂研究中提出了损伤演化的概念[6]。这种观念上的变化标志着人们扬弃了传统的经验准则，开启了以物理过程为基础的损伤演化研究，是层裂认识上的重要突破。基于损伤演化的观点，层裂是由于材料内部的微损伤成核、长大以及贯通，最后导致材料发生灾变式断裂的一种物理、力学过程。在 Curran、Seaman 和 Shockey 的 NAG(Nucleation and Growth)模型[2]的基础上，人们将微观损伤统计以及细观断裂力学等理论应用于层裂研究(例如：文献[7-8])，极大地深化了对层裂问题物理本质的认识。最近，Strachan 等人[9]和 Seppälä 等人[10-11]通过分子动力学模拟研究，揭示出延性金属拉伸型动态断裂的损伤发展具有一定的临界行为，即材料内部微损伤的成核、长大是在演化发展到一定临界值以后，才出现灾变式断裂。王永刚等人[12-13]将分子动力学模拟提出的临界损伤断裂的概念发展并应用于描述宏观样品的层裂破坏

* **收稿日期**：2008-07-27；**修回日期**：2009-01-05
基金项目：国防科技重点实验室基金(9140C6701010701)；中国工程物理研究院科学技术基金重点项目(2007A01004)；国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金(10876014)
作者简介：贺红亮(1963—)，男，研究员，博士生导师，主要研究方向为高压材料科学与力学. E-mail：honglianghe@263.net

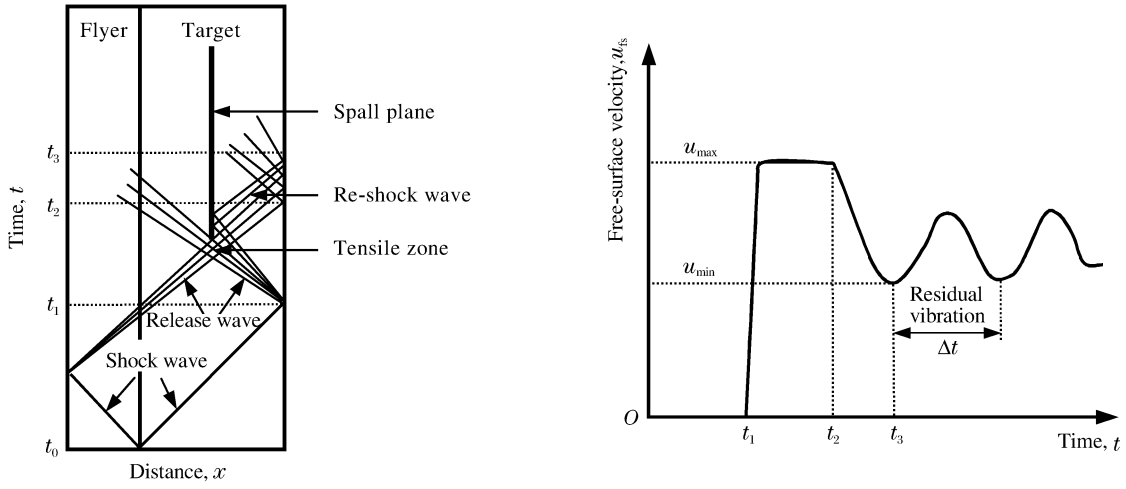
实验,据此引入了两个损伤特征物理量,即:聚集临界损伤度(D_1)和断裂临界损伤度(D_f),分别表征微孔洞之间发生聚集的临界点和微孔洞聚集后期诱发灾变式断裂时的临界点。通过实验与数值模拟,初步验证了可以将上述两个特征临界损伤度视为一种用于表征材料拉伸型动态断裂性质的材料物性常数。

理论上的认识和发展得益于近年来实验测试技术的进步,其中 VISAR(激光速度干涉仪)技术起到了重要的作用。目前利用 VISAR 测量冲击加载试件的自由面速度剖面来获取层裂破坏的过程信息,已经成为人们研究层裂问题的一项重要实验手段,在国内外许多实验室甚至成为研究层裂问题的标准方法,检验和判断理论模型或数值模拟的结果,都是基于与自由面速度波剖面的比较。毋庸置疑,自由面速度剖面测量技术给层裂破坏研究带来了繁荣和发展,为解读层裂过程的物理力学问题提供了丰富的信息。但是,鉴于自由面速度剖面测量中隐含的一些固有缺点,使解读出的层裂特性存在一定的局限性,甚至可能误导理论分析。笔者注意到美国 Los Alamos 和 Livermore 等国家实验室正在发展其它的探测技术,包括质子照相[14]、X 光照相[15]、同步辐射三维成像[16]等,同时基于冲击加载后回收样品的金相分析技术,也重新得到了重视。各种技术的综合应用,无疑可以给层裂问题的研究提供更全面的信息,使我们对层裂问题的理解和认识更加逼近事件的本质。本文基于作者对层裂问题的理解和相关文献,就自由面速度剖面解读层裂问题的局限性提出一些看法,供相关研究者参考。

2 自由面速度剖面解读层裂问题的几点商榷

2.1 是间接测量,不是直接测量

图 1(a)是自由面速度剖面测量层裂破坏的实验原理示意图。在 t_0 时刻,飞片撞击靶板,在飞片和靶板中各自同时产生一个冲击波,当冲击波到达飞片或者靶板的自由面时,都会被反射形成稀疏波。两束稀疏波在靶板中相遇,产生拉伸应力,如果拉伸应力脉冲足够强,经过一定的孕育时间,层裂将会发生。材料发生层裂后,新的内表面会改变后续波的传播使之成为压缩波,该压缩波居留在层裂片内,往返反射直至最后衰弱。上述层裂过程,如果采用 VISAR 技术在靶板的后自由面上测量自由面运动的速度历史,通常可以得到图 1(b)所示特征的自由面速度剖面,即:冲击波到达靶板自由面的时刻(t_1),自由面速度突然增加达到加载平台值 u_{max};当从飞片中传入的稀疏波穿越靶板到达后自由面时(t_2),自由面速度开始下降;当层裂发生后,由于后续稀疏波在层裂面被反射成为压缩波,自由面速度从最低点 u_{min} 又重新回跳(t_3);此后居留压缩波在层裂片内部往复反射,在自由面速度剖面上形成周期性振荡。



(a) Distance-time relationship (b) Free-surface velocity profile

图 1 测量层裂破坏的实验原理及自由面速度剖面特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of free-surface velocity profile measurement for dynamic tensile spall

在目前的大多数文献中,都是基于图 1(b)所示的自由面速度剖面特征来讨论层裂问题的,例如计算层裂强度、层裂片厚度等。在理论模型和数值模拟的讨论中,也是通过与自由面速度波剖面的振荡特征(周期、幅度)进行比较,确定损伤演化模型的物理参数。然而,必须注意到,自由面速度剖面测量给出的层裂破坏过程是间接信息,而不是直接信息。因为层裂破坏面位于样品的内部而不在自由面上,当携带层裂信息的速度波剖面在由断裂面向自由面传播的过程中,由于波与孔洞、杂质等缺陷的相互作用可能会发生畸变,引入一些非层裂因素的信息,所以在自由面上观察到的速度剖面有可能没有真实地反映层裂面的实际状态。其次,从因果关系上看,依据自由面速度剖面来求解层裂问题,这完全是一种逆问题求解,获得的解并不是唯一的,所以用它确定的理论模型和数值模拟参数,也许并没有真实地反映层裂过程的物理本质。

基于这样的考虑,笔者推荐在解读层裂破坏的物理模型上,要兼顾波与孔洞、杂质的相互作用问题,尽量扣除非层裂因素的影响。这方面的工作有一些文献可以参考,例如 Grady 在文献[17]中基于准谐子振动理论提出了缺陷的声波散射机制,给出了相应的理论计算方法。Grady 认为在冲击波穿越非均质介质的过程中,介质中的缺陷(不均匀质点、孔洞)对波具有散射作用,使波能量耗散,导致形成波的非线性效应。孙锦山等人[18]基于一维两相流模型研究了“颗粒材料中的致密波结构”,认为在冲击波压缩下,材料内部孔穴闭合和颗粒材料挤压会形成致密波,文章讨论了致密波结构与冲击波压力和材料初始孔隙度等因素的关系,给出了相关的理论计算公式。

2.2　如何计算层裂强度?

作为工程上一个非常关心的问题,层裂强度被赋予了重要的意义,人们试图通过层裂强度这个物理量来表征材料在高应变率下的抗拉伸能力。基于此,从最早期的文献,直到现在的大量工作,都是以测量材料的层裂强度为目的。然而,目前文献中关于如何计算层裂强度却众说纷纭,其中最通用的一种方法,就是依据自由面速度波剖面,按照 Novikov 1967 年在声学近似条件下提出的层裂强度(σ_s)计算公式[19]

$$\sigma_s = \frac{1}{2}\rho_0 c_b \Delta u \tag{1}$$

式中:ρ_0 和 c_b 分别为材料的初始密度和体波声速,Δu 是自由面速度剖面的最大值与第一次反射时自由面速度最小值之差(见图 1(b),$\Delta u = u_{max} - u_{min}$)。

考虑到弹塑性变形的影响,Stepanov 等人 1977 年对方程(1)作了如下修正[20]

$$\sigma_s = \rho_0 c_l \Delta u \frac{1}{1 + c_l/c_b} \tag{2}$$

式中:c_l 是材料的纵波声速。

1980 年,Romanchenko 等人考虑了层裂片厚度的影响,对计算公式(2)又作了如下修正[21]

$$\sigma_s = \rho_0 c_l \Delta u \frac{1}{1 + c_l/c_b} + \frac{h_{sp}}{2}\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{c_b} + \frac{1}{c_l}\right) \tag{3}$$

式中:h_{sp}为层裂片厚度,$\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}t$ 为拉伸应力率。其根据是:在层裂发生之后,在反射压缩波从层裂面传播到自由面的过程中,波形要发生改变,强度要衰减,从而导致计算出的层裂强度偏小。

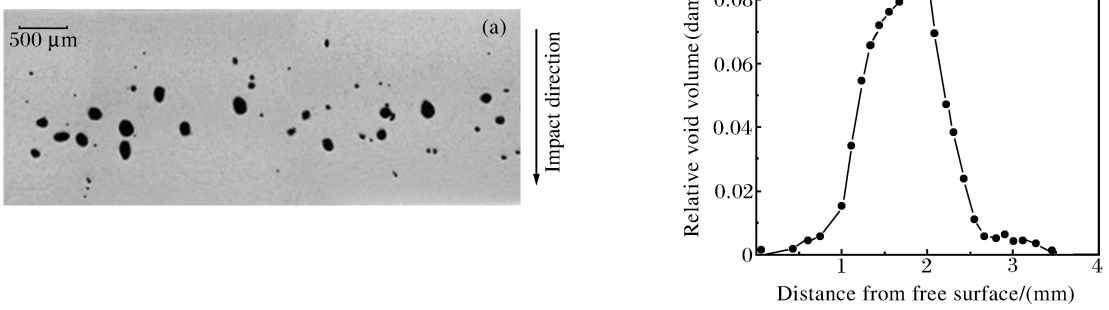
以上提到的 3 种(也许还有更多)层裂强度计算公式,文献[13]中分别用它们计算了 20 钢的层裂强度。不同计算方法所得结果之间的分散性较大,其中由公式(3)计算出的层裂强度比公式(1)的计算结果高出了约 30%。从定性上分析,可以认为,公式(1)过于简化,而公式(3)考虑了弹塑性变形和层裂片厚度对层裂强度的影响,因此计算结果更接近真实情况。但是,对此问题的认识远未结束,仍需要进一步深入,文献[22]的分析给我们提供了一个很好的启示。

文献[22]中通过数值计算方法,对 HR-2 钢和 45 钢等材料,基于损伤度函数模型对层裂过程进行了数值模拟,将数值计算的自由面速度剖面与实验测量的自由面速度剖面进行对比,当两者最大程度地符合后,确认了计算参数和计算方法。文献[22]中计算了样品材料所有网格单元的应力历史,并把断裂

面处材料经受过的最大拉伸应力取作层裂强度的计算值，称为 $\sigma_{s,cal}$。作为对比，将从实验测量的自由面速度剖面，按照上述公式计算的层裂强度作为层裂强度的实验值，称为 $\sigma_{s,exp}$。文献[22]发现，这样两组层裂强度的数值差别非常大，即：$\sigma_{s,exp}$ 远低于 $\sigma_{s,cal}$，相差幅度甚至可达约 2 倍。例如：HR-2 钢从实验测量的自由面剖面计算得到的层裂强度约为 3.7 GPa，而数值计算给出的结果约为 8 GPa，即使考虑了弹塑性变形和层裂片厚度对层裂强度的影响，这种差异也在 1.5 倍左右。为什么从自由面剖面上解读的层裂强度会如此低？是数值计算结果不可信，还是层裂强度计算公式有偏失？

笔者认为，诚然数值计算方法和计算参数还需要完善，但是在目前的层裂强度计算公式中均存在一项重要的遗漏，就是没有考虑损伤介质对波剖面传播的影响。正如在上节中所谈到的，实验测量的自由面速度剖面不是直接信息，而是从层裂破坏面经过受损伤介质传播到达自由面的，因此在这个过程中速度波剖面的衰减或者畸变等变化就是不可忽视的重要因素。基于此，采用自由面速度剖面求解层裂强度时，如何修正这种变化，是还原问题的关键。要理清楚这个问题，首先需要对样品介质的损伤状态、损伤分布建立起一个定量的认识，近期祁美兰等人[23]的工作给我们提供了一些借鉴。

祁美兰等人[23]设计了一种专用实验装置，在同一发实验中可以兼顾测量样品的自由面速度剖面和软回收受损伤的样品，并对事后样品的损伤分布进行了定量统计，以此来联合界定样品损伤演化、分布的特征。较之他人的工作，祁美兰等人弥补了“测量不能回收，回收不能测量”的不足，即：以往的许多研究者在实验中仅使用了自由面速度剖面测量装置，但不能有效回收受冲击后的样品；而其它的实验装置则是可以回收受冲击样品，但不能同时测量自由面速度剖面。图 2(a)是 4 mm 厚高纯铝样品经过 2 mm 厚高纯铝飞片 219.7 m/s 速度撞击后，软回收样品的截面金相图；图 2(b)是受损伤样品的损伤分布定量统计[23]。从图 2 中可以看到，层裂样品内部的损伤分布非常复杂，局域效应非常明显，不同区间的损伤状态差异很大，因此很难在层裂强度的计算公式中简单地修正损伤效应的影响。



(a) Observed damage on the cross section (b) Statistic distribution of the damage within target

图 2 高纯铝样品未完全层裂时内部损伤分布：样品靶厚 4 mm，飞片厚 2 mm，撞击速度 219.7 m/s

Fig. 2 Tensile spall of high purity aluminum: target 4 mm, flyer 2 mm, impact velocity 219.7 m/s

鉴于这样的困难，笔者在此推荐两种可能的思路。思路之一是基于数值计算，分析速度波剖面的衰减和畸变效应。在上节讨论的基础上，分析波与孔洞相互作用的散射机制、能量耗散的非线性效应等，从理论上获得定量解析。对此，类似祁美兰等人的实验工作，提供了在同一发实验中的自由面速度剖面信号和受损伤样品的损伤分布信息，将为理论上分析速度波剖面与损伤介质的相互作用提供重要的实验依据。思路之二是基于实验测量建立定标方法。借助超声波探测原理，对图 2(a)所示的受损伤样品进行超声波衰减测量，建立衰减幅度与损伤状态的经验定标关系。采用类似方法，Liu 和 Ahrens[24]曾经对经受冲击波作用后的损伤岩石(辉长岩)，测量了纵波声速在不同损伤度样品中的幅度衰减，得到了衰减系数 α_p 与损伤度 D_p 的定标关系，如下式

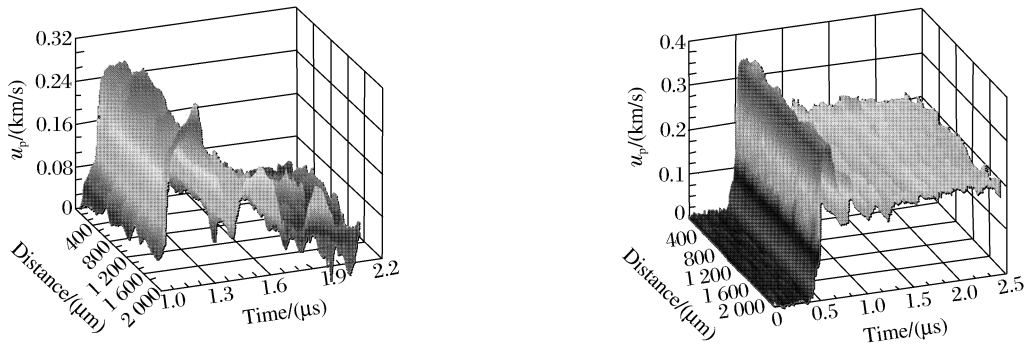
$$\alpha_p = 1.1 + 28.2 D_p \tag{4}$$

这种简单的定标关系,不妨在研究层裂问题时可以借鉴。

2.3　单点测量与多点测量

现今在实验上测量层裂样品的自由面速度剖面时,大多采用 VISAR 测量,而且是基于对样品表面的某一点进行测量,简称单点测量,这样测量到的结果有很大的局限性。依照测量探头的激光会聚光斑,该测量点的几何范围通常是在百微米尺度,因此即使是常规的密实金属材料,由于内部晶粒度的尺寸、取向,以及夹杂、孔洞等因素的影响,在不同区域点上测量的自由面速度剖面都将有明显的差异。2001 年,Sandia 实验室的 Chhabildas 等人[25]利用线 VISAR 测量了金属钽的层裂破坏,充分证实了这种不均匀性的影响。他们的结果如图 3 所示,在样品表面中央 2 mm 长度区间内,线 VISAR 显示出在不同位置点上,自由面速度剖面存在显著差别。这种差别在层裂破坏的临界应力附近(见图 3(a))尤其明显;随着冲击波加载应力的增加,差别会逐渐缩少,但依然存在(见图 3(b))。文献[25]中给出金属钽的平均层裂强度约为 6.3 GPa,图 3(a)和图 3(b)的冲击波加载应力分别是 7.5 GPa 和 11 GPa。

图 3 所示的结果可以称为是一种多点测量,即在 2 mm 长度区间内同时测量了许多不同位置点的自由面速度剖面,据文献[25]介绍,其空间分辨率为 50 μm。由此可见,传统方法上仅依赖于单点测量的自由面速度波剖面来评价层裂状态的指标,是值得商榷的,尤其是在某些研究中过分追求绝对精确度,是值得讨论的。西方有句谚语“上帝是在掷骰子”,对于层裂问题,采用概率评估或者置信度评估,也许更符合真实情况。最近,美国 Los Alamos 的 Hanson 等人[26]提出采用概率分析来评估 Taylor 杆碰撞实验的做法,也许给我们提供了一些思路。Taylor 杆碰撞实验经常用于研究高应力和高应变率下的材料行为,典型的实验结果包括测量 Taylor 杆最初和最终的变形半径或者长度,由此来定标 Johnson-Cook 本构模型中的材料参数。Hanson 等人采用蒙特卡罗(Monte Carlo)计算,分析了 Johnson-Cook 本构模型中材料参数的不确定度对 Taylor 杆碰撞实验的影响,以及模型预测实验结果的置信度。



(a) Shock loading stress 7.5 GPa　　(b) Shock loading stress 11 GPa

图 3　采用线 VISAR 测量的钽样品表面不同位置处的自由面速度剖面(引自文献[25])

Fig. 3　Space-time free-surface velocity history of tantalum measured by line VISAR(cited from Ref. [25])

基于这种置信度评估方法,对于层裂问题,笔者提出如图 4 所示的研究设想:假设存在一系列影响层裂破坏的因素(λ_1,λ_2,λ_3,…),例如晶粒度、夹杂、孔洞等,这些因素各自都有一定的概率分布(如正态分布);由于这些因素的影响,层裂破坏(ψ)也是表现为某种概率分布。合理的物理模型应该是联系这种因果关系的重要桥梁,通过它可以回答在给定条件下发生某一层裂破坏的概率是多少,或者说预测某一实验结果的置信度是多少。为了做到这一步,急需发展多点测量技术以及多因素评估方法。

2.4　其它问题

限于篇幅,本文不再展开讨论自由面速度剖面测量中的其它相关问题,这些问题包括:(1) 只能探测单次层裂,不能探测多次层裂;(2) 有时无法识别部分层裂与完全层裂;(3) 不能探测材料内部的损伤演化过程,等等。对于这些问题简单说明如下。在多次层裂存在的状况下,目前的 VISAR 测量方法

无法判断出多次层裂。最近,McCluskey 等人[27]提出一种利用 Asay 窗测量多次层裂的方法,也许能为我们提供借鉴。其次,通过自由面速度剖面的信息有时无法识别部分层裂与完全层裂。对于这个问题,Hixson 等人[28]在 1999 年就曾经指出,以 U-Nb 合金为例,在 4.25 GPa 和 5.50 GPa 冲击波加载应力下,均观测到自由面速度剖面有清晰的层裂回跳信号,反映出材料已经发生了完全层裂,但是通过对回收样品的解剖观察,在 4.25 GPa 压力下加载的样品仅仅是内部发生了局部损伤,材料并没有宏观分离,即:只是发生了部分层裂。类似的结果很多,因此以自由面速度是否有回跳信号作为层裂现象的判断依据,是不全面的。另外,自由面的测量结果只能给出样品受冲击波作用后的外观表现状态,它不是一种内部透视诊断(如 X 光照相),因此它也不能给出材料内部的损伤演化过程。

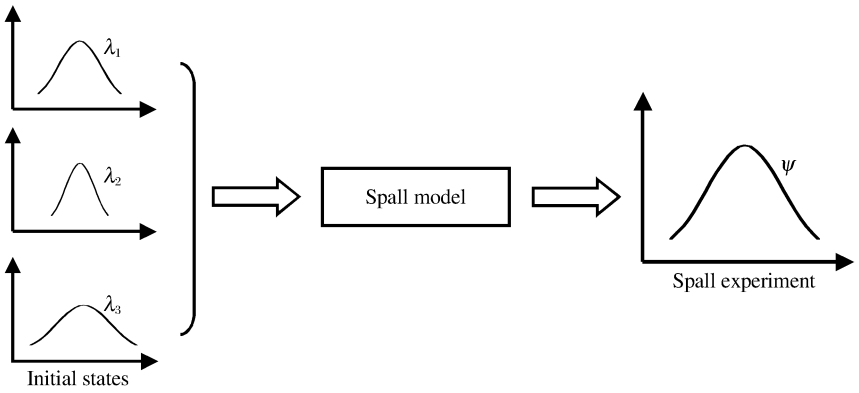


图 4 采用概率分析评估层裂破坏的一种建议(λ_1,λ_2,λ_3…为一系列影响层裂的初始因素,Ψ 为层裂破坏的概率分布,两者之间需要一种基于概率评估的层裂物理模型)

Fig. 4 Diagram of the conceptual process for evaluating the spall experiment. The initial states indicate a number of factors (λ_1,λ_2,λ_3,…) that influence the spall experiment. These factors distributed in a normal distribution, which results in a spall behavior in a normal distribution too. A physical spall model is essential to bridge the initial states and the spall experiment, which explains the spallation behavior in statistic.

3 结 束 语

针对自由面速度剖面解读层裂问题存在的局限性进行了详细阐述。首先,因为层裂面位于样品内部,而通过自由面速度剖面测量结果反推层裂信息,是一种逆问题求解,得到的解并不唯一。其次,层裂强度常被人们用来表征材料在高应变率下的抗拉伸能力,但是在目前的层裂强度计算公式中没有充分考虑损伤介质对波剖面传播的影响,导致层裂强度的计算值差异较大。另外,传统的单点测量结果有很大的局限性,这是因为在不同区域点上测量的自由面速度剖面存在明显的差异,对于层裂问题,采用概率评估或者置信度评估,将更符合真实情况。最后,对于自由面速度剖面测量的其它问题也作了简单说明。为了正确认识层裂的物理、力学过程,尤其是材料内部损伤对解读层裂问题的影响,必须发展更多的实验探测和诊断技术。

本文根据作者在宁波大学的学术报告补充整理而成,感谢王礼立教授和陈大年教授给予的详细讨论。感谢祁美兰博士在文章整理过程中所给予的帮助。工作得到了张兴钤院士、经福谦院士的支持。

References:

[1] Meyers M A, Aimone C T. Dynamic Fracture (Spalling) of Metals [J]. Progress in Materials Science, 1983, 28: 1-96.

[2] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic Failure of Solid [J]. Phys Rep, 1987, 147(5&6): 253-388.

[3] Rinehart J S. Some Quantitative Data Bearing on the Scabbing of Metals under Explosive Attack [J]. J Appl Phys, 1951,22:555.

[4] Bread B R, Mader C L, Venable D. Technique for the Determination of Dynamic-Tensile-Strength Characteristics [J]. J Appl Phys,1967,38(8):3271-3275.

[5] Tuler F R, Butcher B M. A Criterion for the Time Dependence of Dynamic Fracture [J]. Int J Fract Mech,1968,4(4):431-437.

[6] Davison L, Stevens A L. Continuum Measures of Spall Damage [J]. J Appl Phys,1972,43(3):988-994.

[7] Bai Y, Han W, Bai J. A Statistical Evolution Equation of Micro-Damage and Its Application [A]//McDowell D L. Applications of Continuum Damage Mechanics to Fatigue and Fracture, ASTM STP 1315 [C]. [s. l.]: American Society for Testing and Materials,1997:150-162.

[8] Bai J, Xia M F, Ke F J. Properties of the Statistical Damage Evolution Equation and Its Numerical Simulation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,1999,31(1):38-48. (in Chinese)
白　洁,夏蒙棼,柯孚久,等. 损伤统计演化方程的性质和数值模拟 [J]. 力学学报,1999,31(1):38-48.

[9] Strachan A, Cagin T, Goddard W A Ⅲ. Critical Behavior in Spallation Failure of Metals [J]. Phys Rev B,2001,63:060103.

[10] Seppälä E T, Belak J, Rudd R E. Onset of Void Coalescence during Dynamic Fracture of Ductile Metals [J]. Phys Rev Lett,2004,93:245503.

[11] Seppälä E T, Belak J, Rudd R E. Effect of Stress Triaxiality on Void Growth in Dynamic Fracture of Metals: A Molecular Dynamic Study [J]. Phys Rev B,2004,69:134101.

[12] Wang Y G, He H L, Wang L L, et al. Time-Resolved Dynamic Tensile Spallation of Pure Aluminum under Laser Irradiation [J]. J Appl Phys,2006,100:033511.

[13] Wang Y G. Dynamic Tensile Spall of Ductile Metal and Its Critical Damage Evolution Model [D]. Mianyang: CAEP,2006. (in Chinese)
王永刚. 延性金属动态拉伸断裂及其临界损伤度研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006.

[14] Holtkamp D B, Clark D A, Ferm E N, et al. A Survey of High Explosive-Induced Damage and Spall in Selected Metals Using Proton Radiography [A]//Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter-2003 [C]. New York: Melville,2004:477-482.

[15] Anderson W W, Cverna F, Hixson R S, et al. Phase Transition and Spall Behavior in β-Tin [A]//Shock Compression of Condensed Matter-1999 [C]. New York: Melville,2000:443-446.

[16] Bontaz-Carion J, Pellegrini Y P. X-Ray Microtomography Analysis of Dynamic Damage in Tantanlun [J]. Advanced Engineering Materials,2006,8(6):480-486.

[17] Grady D. Scattering as a Mechanism for Structured Shock Waves in Metals [J]. J Mech Phys Solids,1998,46(10):2017-2032.

[18] Sun J S, Zhu J S, Jia X R. An Analysis of Compaction Wave in Granular Material [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,1999,31(4):423-433. (in Chinese)
孙锦山,朱建士,贾祥瑞. 颗粒材料中致密波结构研究 [J]. 力学学报,1999,31(4):423-433.

[19] Novikov S A. Spall Strength of Materials under Shock Load [J]. J Appl Mech Tech Phys,1967,3:109-123. (in Russian)

[20] Stepanov G V, Romanchenko V I, Astanin V V. Experimental Determination of Failure Stresses under Spallation in Elastic-Plastic Waves [J]. Probl Strength,1977,8:96-120. (in Russian)

[21] Romanchenko V I, Stepanov G V. The Dependence of Critical Stress upon the Time Parameters of Load at Spalling in Copper, Aluminum, and Steel [J]. J Appl Mech Tech Phys,1980,21(4):141-157. (in Russian)

[22] Pei X Y. Two Dimensional Numerical Simulation of Dynamic Spallation of Steel Plate under Impact and Cylinder under Implosion with Damage Function Model [D]. Mianyang: CAEP,2005. (in Chinese)

裴晓阳. 损伤度函数模型用于碰撞和内爆加载下钢层裂的二维数值模拟研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2005.

[23] Qi M L. Critical Behavior in Dynamic Tensile Fracture of High Purity Aluminum [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
祁美兰. 高纯铝拉伸型动态破坏的临界行为研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2007.

[24] Liu C L, Ahrens J A. Stress Wave Attenuation in Shock-Damaged Rock [J]. J Geophys Res, 1997, 102(B3): 5243-5250.

[25] Chhabildas L C, Trott W M, Reinhart W D, et al. Incipient Spall Studies in Tantalum Microstructural Effects [A]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: Melville, 2002: 483-486.

[26] Hanson K M, Hemez F M. Uncertainty Quantification of Simulation Codes Based on Experimental Data [R]. LA-UR-03-0171, 2003.

[27] McCluskey C W, Wilke M D, Anderson W W, et al. Asay Window: A New Spall Diagnostic [J]. Rev Sci Instrum, 2006, 77: 113902.

[28] Hixson R S, Vorthman J E, Zurek A K, et al. Spall Response of U-Nb(6%) Alloy [A]//Shock Compression of Condensed Matter-1999 [C]. New York: Melville, 2000: 489-492.

Discussion on the Spallation Behavior Resolved by Free-Surface Velocity Profile

HE Hong-Liang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: A few questions on the spallation behavior resolved by the measurement of free-surface velocity profile have been discussed. Firstly, the way from the measured free-surface velocity profile to infer the dynamic damage behavior of the target is an "Inverse Problem" and the theoretical model and simulation parameters determined by such a solution maybe not represent the real physical nature of spall fracture inside the target. Secondly, how to calculate the spall strength? Due to the attenuation effect of micro-voids or damage on the wave propagation, the spall strength computed from the free-surface velocity profile is apparently lower than the tensile strength suffered by the shocked material. Thirdly, limitation of the traditional single-point measurement on the free-surface velocity profile is briefly reviewed. Given that the shocked target is inhomogeneous, the amplitude of the measured velocity profile is varied from point to point. According to these discussions, future research suggestions have been proposed in order to clearly understand the spallation behavior.

Key words: spall; damage; free-surface velocity profile