

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0415

爆炸/冲击动力学学习研究中的若干疑惑*

王礼立

(宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在爆炸/冲击动力学的学习研究过程中,“疑惑”是创新的前奏。本文中,与大家分享了我所经历的若干实例,包括:静力学平衡条件可以用于波传播分析吗?满足屈服条件($\sigma_{\text{eff}}=Y$)就一定进入塑性了吗?ZWT 方程的黏弹性松弛时间 θ_1 和 θ_2 为什么互相无关?有质量就有惯性吗?材料动态本构响应要考虑惯性效应吗?层裂是材料动态响应问题还是结构动态响应?塑性铰分析与波传播分析有相通的内在联系吗?

关键词: 爆炸/冲击动力学;应力波;材料本构关系;疑惑;创新

中图分类号: O347 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Some doubts in studying explosion/impact dynamics

WANG Lili

(Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University,
Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: In the learning and research process of explosion/impact dynamics, “doubt” is the prelude of innovation. Several examples of my experiences are shared here, including as follows. Can statics equilibrium conditions be used for wave propagation analysis? Must satisfy the yield condition ($\sigma_{\text{eff}} = Y$) be in plastic state? Why are the viscoelastic relaxation times θ_1 and θ_2 in the ZWT equation independent of each other? Is there inertia where there is mass? Should inertial effect be considered in the dynamic constitutive response of materials? Is spalling a problem of material dynamic response or structural dynamic response? Is there any inherent relation between plastic hinge analysis and wave propagation analysis?

Keywords: explosion/impact dynamics; stress wave; material constitutive relation; doubt; innovation

自 1981 年创刊,《爆炸与冲击》走过了不平凡的 40 年。40 年,就人生而言诚可谓不惑之年,而就期刊而言则尚可谓青春靓丽、朝气蓬勃。《爆炸与冲击》作为我国力学园地的一枝新秀,即使以异军突起相夸,也不为过。

爆炸与冲击学科所面临的是一系列新兴的跨学科或边缘学科研究,这迫使我们必须如饥似渴地加倍学习,怠惰就会落后,落后就会屈辱地挨打。爆炸与冲击学科面临的大量研究没有现成的答案,惟有靠我们去突破创新,只模仿不创新就会落后,落后就会屈辱地挨打。唯有在学习和创新的紧密结合中,才能出新成果,出高水平人才。

从 20 世纪 60 年代开始,我有幸加入爆炸与冲击学科的研究和教学行列,80 年代随《爆炸与冲击》一起成长。如今已年届耄耋,回顾往事,感到从学习走向创新的过程中,疑惑是创新的前奏,是我要感谢的启蒙老师。

在学习研究爆炸与冲击学科的过程中,我遇到过很多疑惑,略举数例:在分析爆炸与冲击相关的动力学问题时可以同时采用静力学平衡条件吗?满足屈服条件($\sigma_{\text{eff}}=Y$)就一定进入塑性了吗?ZWT 方程的黏弹性松弛时间 θ_1 和 θ_2 为什么互相无关?有质量就有惯性吗?绝热剪切失效要不要考虑惯性效应?

* 收稿日期: 2020-11-11

第一作者: 王礼立(1934—),男,教授,博士生导师, wanglili@nbu.edu.cn

层裂是材料动态响应问题还是结构动态响应? 基于塑性铰的结构塑性动力学分析与波传播分析有什么相通的内在联系?

值此庆贺《爆炸与冲击》创刊 40 周年之际, 和大家分享我在这方面的感受。

1 在分析动力学问题时可以同时采用静力学平衡条件吗?

弦在斜向冲击下的弹塑性波传播是一个弹塑性纵波与横波相耦合的复杂问题, Рахматулин等^[1-2]最早对这个问题作了奠基性的研究。如图 1 所示, 横波波阵面以折断点的形式传播, 表现为质点速度矢量 v 的强间断; 弹塑性纵波则在折断点两侧的弦中传播, 等同于杆中一维弹塑性纵波的传播。于是, 弦中张力/应变扰动由纵波传播, 而横波只引起弦的形状改变, 但两者通过波速关系相耦合。纵波波速为:

$$c_1 = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{T - T_0}{\varepsilon - \varepsilon_0}} \quad \text{强间断}, \quad c_1 = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{dT}{d\varepsilon}} \quad \text{弱间断} \quad (1a)$$

横波波速为:

$$c_h = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{T}{1 + \varepsilon}}, \quad T = T_1 = T_2, \quad \varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (1b)$$

式中: ρ_0 为弦的初始密度, T_0 、 ε_0 为初始张力、应变, 其他符号如图 1 所示。

对于直弦受突加恒值斜向点冲击的情况(见图 2), 问题的复杂性在于需要区别两种不同的冲击类型^[1-3]: (1) 冲击物与弦之间没有相对滑动, 称为无滑动冲击, 冲击点是驻定的强间断面; (2) 冲击物与弦之间发生相对滑动, 称为滑动冲击, 冲击点是运动的强间断面。

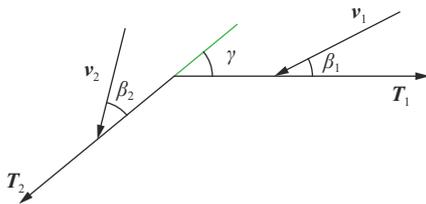


图 1 强间断横波在弦中的传播

Fig. 1 A strong discontinuous transverse wave propagating in a string

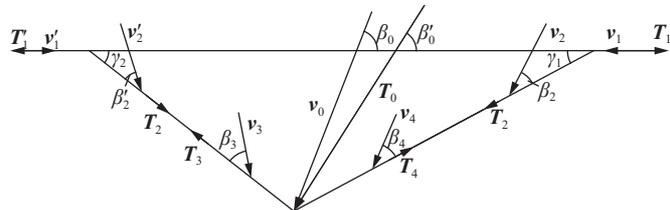


图 2 无限长直弦的突加恒速斜向点冲击

Fig. 2 An infinite straight string subjected to abrupt constant-velocity oblique point-impact

这时, 根据跨过各个间断面(包括冲击点间断面)上的动力学条件、运动学条件和本构关系, 共可以列出 20 个方程, 其中包含 21 个未知量, 还需要加 1 个冲击点处的物理方程, 从而可以组成 21 个方程, 解出 21 个未知量。对于无滑动冲击, 相当于求解半无限长的直弦受突加恒值斜向冲击的问题, 由于冲击点处的边界条件是确定的, 因而是定解的。但对于滑动冲击, 所处理的是一个变边界问题, 外载荷作用的边界本身是待定的, 需要补充 1 个表征滑动冲击特征的物理方程。

Рахматулин^[1]最早研究了这个问题, 采用了机械工程中绳索绕滑轮的 Euler 公式:

$$T_4 - \rho_0 u_s^2 = e^{\mu(\gamma_1 + \gamma_2)} (T_3 - \rho_0 u_s^2) \quad (2)$$

式中: μ 为静摩擦因数, u_s 为绳索绕滑轮的切向速度, 其他符号如图 2 所示。仔细分析一下可知, 此式是由静力平衡条件导出的。

疑惑在于, 静力平衡准则可用于动力学问题吗? 由应力波传播的基本理论知^[4], 答案显然是否定的! 对此, 我们提出: 当外载荷 T_0 的切向分量足以克服动摩擦力时, 才发生滑动冲击^[5]。即滑动冲击的临界条件为(见图 2), T_0 和弦法线方向之间的夹角 φ 等于动摩擦角 φ_f ($\varphi_f = \arctan f$, f 为动摩擦因数):

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2} - \beta'_0 = \varphi_f = \arctan f \quad (3)$$

补充这个方程后,问题就可正确求解了。值得特别怀念的是,文献 [5] 由当时的《力学学报》主编郭永怀先生审定刊发,成为我第一篇发表的有关塑性波的研究论文。

类似的、不无惋惜的是, Tan 等运用激波理论来分析泡沫材料动态力学行为的论文^[6]本是一篇好文章,疑惑却出现了:在文中采用了准静态孤立系统中的能量守恒条件,从而导出的激波形成的临界速度公式是错误的。我们利用跨过激波的能量守恒条件即 Rankine-Hugoniot 关系,建立了正确的第一临界速度和第二临界速度^[7-8]。这类把习惯的准静态分析与动态的波传播分析相混淆而导致错误的教训,实在值得引以为戒。

2 满足屈服条件 ($\sigma_{\text{eff}}=Y$) 就一定进入塑性了吗?

众所周知,经典塑性力学中的 von Mises 屈服条件为:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} = Y \quad (4)$$

式中: σ_{eff} 为基于应力偏量第二不变量 J_2 的等效应力, Y 为单轴应力下的屈服应力。

在弹塑性波的分析或计算中,是否一旦满足屈服条件式(4),也就进入塑性了呢?

如图 3 所示,以杆中一维弹塑性加载波的传播为例,由应力波理论知^[4],弹性波波速 c_0 和塑性波波速 c_p 分别为:

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}, \quad c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_p} \quad (5)$$

式中: ρ_0 为材料初始密度, E 为杨氏弹性模量, $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_p$ 为塑性段应力应变曲线斜率。

一般地,有 $E \geq \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_p$ (见图 3(b)), 从而有 $c_0 > c_p$, 因而在先行的弹性波区和后随的塑性波区之间存在一个恒值区 ($\sigma=Y$) (见图 3(a))。疑惑在于:如果沿用屈服条件式(4),则此恒值区已进入塑性;但按照波传播分析,塑性波尚未到达,此恒值区仍处于弹性状态,塑性波的波阵面才是物理上的弹塑性界面。

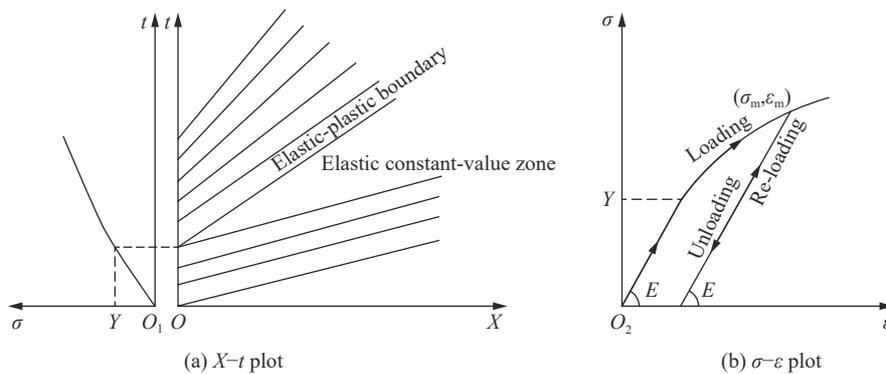


图 3 杆中一维弹塑性加载波的传播

Fig. 3 One-dimensional elastic-plastic wave propagating in a bar

这意味着式(4)只适用于经典塑性静力学,而不适用于以应力波传播为特征的塑性动力学。问题出在哪儿呢?在塑性静力学分析中,人们关注的主要是应力应变曲线本身,而在塑性波分析中,应力应变曲线的斜率具有更重要的意义,是它决定了波速(见式(5))。由图 3(b)可见,屈服点(或后继屈服点)恰好是曲线斜率的奇点(斜率的间断点),应力波波速在该点具有多值性。因此,式(4)在塑性动力学中只是必要条件,而不是充要条件。

从屈服点处斜率奇性(波速奇性)出发,动态屈服条件的双变量准则应为^[9-11]:

$$\sigma_{\text{eff}} = Y, \quad \begin{cases} \frac{\partial|\sigma^{\text{pl}}|}{\partial t} > 0 & \sigma \text{ 和 } v \text{ 的一阶偏导数间断的一阶边界} \\ \frac{\partial^2|\sigma^{\text{pl}}|}{\partial t^2} > 0 & \sigma \text{ 和 } v \text{ 的二阶偏导数间断的二阶边界} \end{cases} \quad (6)$$

对于后继屈服点 σ_m (见图 3(b)), 只需以 σ_m 代替上式中的 Y 即可。

正是从弹塑性加卸载时波速奇性这个基本奇性出发, 我们进一步发展了弹塑性边界传播速度基本规律的系统性研究^[9,12-14]。国际非线性应力波理论权威、《Applied Mechanics Reviews》副主编 Ting(丁启财)^[15]曾专门撰文详细介绍这个成果, 指出: “这是一个出众的结果”。

3 ZWT 方程的黏弹性松弛时间 θ_1 和 θ_2 为什么互相无关?

工程适用的非线性黏弹性本构关系, 一直是非线性黏弹性波理论发展的瓶颈。唐志平等^[16]、王礼立等^[17-18]在理论上从 Green-Revlin 多重积分方程出发, 在实验上通过对各种典型工程塑料(如环氧树脂、有机玻璃 PMMA、聚碳酸酯 PC、尼龙 PA、ABS、PBT、PP/PA 共混塑料等)的实验研究, 发现在准静载荷到冲击载荷的广阔应变率范围, 即在应变率范围为 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 时, 高聚物的非线性黏弹性本构行为可以令人满意地由如下非线性黏弹性本构关系(朱-王-唐方程, ZWT 方程)描述:

$$\sigma = f_e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (7a)$$

$$f_e(\varepsilon) = E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 \quad (7b)$$

$$f_e(\varepsilon) = \sigma_m \left[1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{(m\varepsilon)^i}{i}\right) \right] \quad (7c)$$

式中: $f_e(\varepsilon)$ 为非线性弹性平衡响应的描述, 用式(7b)描述时 E_0 、 α 和 β 为对应的弹性常数^[16], 用式(7c)描述时 σ_m 为 $\varepsilon \rightarrow \infty$ 时 $f_e(\varepsilon)$ 的渐近最大值, m 为 E_0 和 σ_m 的比, 而正整数 n 为表征 $f_e(\varepsilon)$ 初始线性度的材料参数^[19]; 第 1 个积分项描述低应变率下的黏弹性响应, E_1 和 θ_1 分别为所对应的 Maxwell 单元 I 的弹性常数和松弛时间; 第 2 个积分项描述高应变率下的黏弹性响应, E_2 和 θ_2 则分别为所对应的 Maxwell 单元 II 的弹性常数和松弛时间。实验表明, θ_1 通常为 $10 \sim 10^2 \text{ s}$ 量级, 而 θ_2 通常为 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ s}$ 量级, 两者相差约 6 个量级。他们分别对低应变率响应和高应变率响应负责, 互不相关。ZWT 方程虽然是我们提出的, 但在心中同样有过一个疑惑, 为什么 θ_1 和 θ_2 互相无关? 这个疑惑激励我们作更深入的探索。

进一步的研究表明^[20], 每个 Maxwell 单元的松弛时间 θ_i 存在一个有效影响应变率范围(见图 4), 约占 4.5 个量级, 称为有效影响域(effect influence domain, EID)。所以不难理解, θ_1 对低应变率响应负责, 而 θ_2 对高应变率响应负责。并且, θ_1 和 θ_2 将各自在自己的有效影响域范围发挥作用, 两者相差大约 6 个量级, 互相独立无关。这样, 在 $1 \sim 10^2 \text{ s}$ 时间尺度的准静加载条件下, 具有松弛时间 θ_2 为 $1 \sim 10^2 \mu\text{s}$ 的高频 Maxwell 单元从准静加载开始就已经完全松弛了。反之, 在 $1 \sim 10^2 \mu\text{s}$ 时间尺度的冲击加载条件下, 具有松弛时间 θ_1 为 $10 \sim 10^2 \text{ s}$ 的低频 Maxwell 单元将无足够的时间来松弛(直到加载结束); 这时, 低频 Maxwell 单元化为弹性常数为 E_1 的简单弹簧。

以前, 我在英国剑桥大学 Cavendish 实验室从事研究期间, 有一位多年从事高聚物动态力学响应的研究人员和我讨论, 为什么不能用常规的振动法获得高聚物高应变率下的材料本构关系? 我就用图 4 的有效影响域说明, 这就像中国的歇后语——铁路警察各管一段, 获得了他的赞赏。

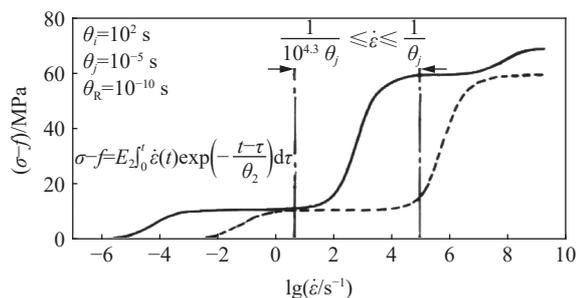


图 4 松弛时间的有效影响阈

Fig. 4 The effect influence domain of a relaxation time

进一步的研究还表明,既然任意 θ_i 存在一个有效影响域,约 4.5 个量级的应变率(或时间)范围,因此就黏弹性波的传播而言,也存在一个由高应变率松弛时间 θ_2 占统治地位的有效传播时间 $t_{\text{eff}}=\theta_2$ 或有效传播距离 $X_{\text{eff}}=c_s\theta_2$ ^[21]。超出此有效传播时间或有效传播距离占统治地位的区域, θ_2 不再发挥显著的影响作用。不论对研究黏弹性波的传播特性(正问题),还是由黏弹性波传播的实测波形反推材料本构关系(反问题),这都有直接的指导意义。

4 有质量就有惯性对吗? 绝热剪切失效要不要考虑惯性效应?

曾经与一位国际知名学者讨论,高应变率下材料的绝热剪切(热黏塑性失稳)要不要考虑惯性效应,我认为对于材料动态响应需要考虑的是应变率效应而不是惯性效应,他则认为应该考虑惯性效应,原则性理由是有质量就有惯性。当时的学术讨论虽然没有取得共识,但有益的交流给我留下了一个疑惑,有质量就有惯性普遍成立吗?

不妨设想一个简单的情况,在爆炸/冲击载荷下,Hooke 定理需要增加惯性项吗? 答案显然是否定的。那么关于有质量就有惯性问题的争议点出在哪儿呢? 其实问题出在从概念上混淆了结构响应与材料响应^[22-23]。的确,早期的力学研究者限于当时的历史条件,常常对结构响应与材料响应不加区分,无形中一直会影响后来者。例如,有关材料力学的教材可以追溯到 20 世纪 30 年代 Timoshenko 的著名经典著作《Strength of materials》^[24]。而实际上,只有小部分内容涉及材料的力学性质和强度(材料响应),大部分内容主要讲授代表性结构元件(杆、轴、梁等)受力时的应力-应变分析(结构响应)。结构响应与材料响应的关系可以通过强度准则关系式来讨论。强度准则一般可概括为:

$$\Sigma \leq \Sigma_c \quad (8)$$

式(8)将力学特征量 Σ 和材料特征量 Σ_c 相联系: Σ 属于结构响应,要依靠力学家对结构力学场进行分析得到(但在力学分析中要依赖材料本构关系); Σ_c 属于材料响应,要依靠材料学家对材料进行实验研究确定(但在材料试验中要依赖力学分析)。强度准则建立了结构响应和材料响应之间的联系,两者既有区别又相耦合。

由此可见,就结构响应而言,通过动量守恒方程,有质量就有惯性是成立的;但就材料响应而言,不涉及动量守恒方程,有质量就有惯性就不成立,需要考虑的是应变率效应。文献[4]和文献[25-26]正是就这两方面分别展开讨论,并在后者中,格外强调了结构响应与材料响应的区别和联系。

还应该指出,对于绝热剪切问题,可以分别从结构响应角度和从材料响应角度进行研究。从宏观的连续力学出发,在结构响应研究中,结构中凡满足绝热剪切准则的区域形成宏观的绝热剪切区(不是显微观察到的绝热剪切带!),就像结构中凡满足屈服准则的区域是宏观的塑性区(不是显微观察到的塑性滑移带!),爆炸/冲击载荷下的这类研究当然计及惯性效应(应力波效应)。至于在宏观力学的材料响应研究中,主要研究绝热剪切的宏观失稳准则,这类研究则不需要计及惯性效应,而应该计及应变率效应。

5 层裂是材料动态响应问题还是结构动态响应问题?

层裂(spalling 或 scabbing)是爆炸与冲击载荷下特有的动态破坏现象。层裂研究中的一个核心问题是:在满足什么样的定量临界条件下发生层裂,即层裂准则(spalling criterion)的研究。Rinehart 最早提出最大拉应力瞬时层裂准则^[27]:

$$\sigma \geq \sigma_c \quad (9)$$

式中: σ_c 为表征材料抗动态断裂性能的材料常数,称为动态断裂强度。这个准则在形式上是静强度理论中的最大正应力准则在动态情况下的推广。按照这个思路,层裂是材料动态响应问题。疑惑在于,层裂的发生离不开卸载波的相互作用,而应力波的相互作用则是结构动态响应问题。层裂到底是材料动态响应问题还是结构动态响应问题呢?

我们来看一下研究层裂破坏的一维应变平板撞击实验(见图 5)^[25-26]。当飞片在气炮驱动下以高速

撞击静止的靶板时(见图 5(a)), 在界面产生两个压缩波系, 分别左行和右行传入飞片和靶板, 其波传播时程图如图 5(b) 所示(这里已忽略强度较低的以虚线表示的弹性前驱波)。一旦两个压缩激波分别达到飞片和靶板的自由表面, 就会卸载反射成以扇面形传播的稀疏波系。当这两波系在靶板(试样)内部距离背面某个位置 h_s 处迎面相遇, 会产生一个高应变率、高幅值的拉伸应力区。一旦满足某个材料动态拉伸破坏准则, 该位置处材料发生层裂破坏。在实验过程中, 通常测量试样背面的质点速度 u 随时间 t 的变化, 如图 5(c) 所示。人们常利用 $u-t$ 曲线上的回跳驼峰, 来研究层裂是否发生、所包含的损伤演化信息及相应的层裂准则。

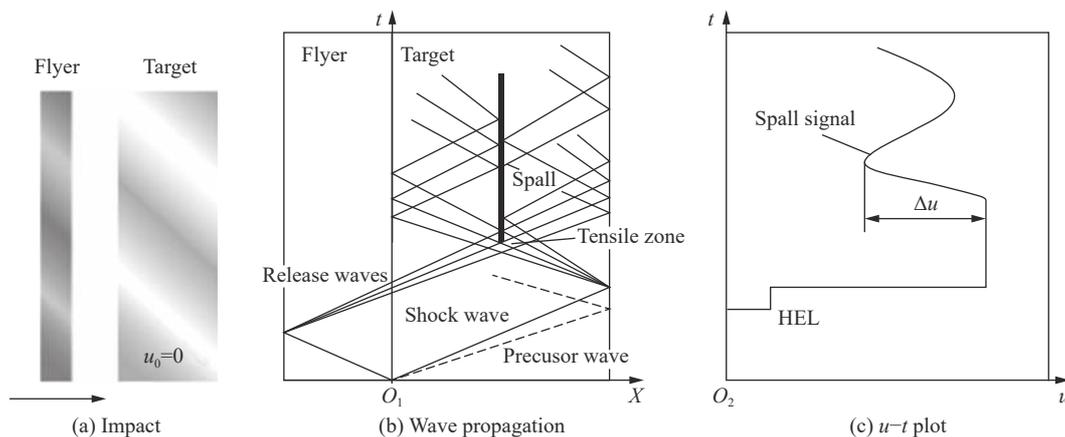


图 5 层裂的平板撞击实验示意图

Fig. 5 Schematic of the plate impact experiment for spalling

由此可见, 层裂既离不开卸载波的反射和相互作用过程(在这点上, 表现为在结构物中发生的结构动态响应), 又必须满足某个材料破坏准则(在这点上, 表现为在层裂质点处发生的材料动态响应)。因此, 层裂既不是单纯的材料动态响应, 也不是单纯的结构动态响应, 而是两者相耦合的响应。

其实, 在材料动态破坏的其他研究中, 如裂纹动力学和动态碎裂等, 一旦破坏的发生发展涉及试件结构中的波传播, 或破坏以局域化的形式出现在试件结构中, 都不再是单纯的材料动态响应问题, 而必须计及相耦合的结构动态响应, 这使问题大大复杂化。

6 基于塑性铰的结构塑性动力学分析与波传播分析有什么相通的内在联系?

梁中塑性弯曲波的分析一般涉及弯矩 M -转角速度 ω 扰动传播($M-\omega$ 波)和剪力 Q -横向速度 v 扰动传播($Q-v$ 波)之间的互相耦合, 这使问题变得十分复杂。作为一种有效的近似处理, Lee 等^[28] 在以下基本假设下发展了梁的刚塑性动态分析: (1) 弹性应变 ϵ_e 与塑性应变 ϵ_p 相比可近似忽略($\epsilon_p \gg \epsilon_e$), 弹塑性梁简化为刚塑性梁; (2) 当 $|M|=M_0$ (理想塑性弯矩) 时, 曲率 κ 可无限增大, 形成塑性铰; (3) 当 $|M| < M_0$ 时, 梁以刚体运动(忽略弹性弯曲波)。于是, 问题归结为研究以塑性铰相联的各梁段的刚体运动, 这使问题的处理大大简化。

疑惑在于: 塑性铰模型与弹塑性弯曲波理论在什么条件下一致? 塑性铰作为塑性变形集中的强间断面, 是否必须满足应力波间断面上的动力学条件和运动学条件?

以相对简单的梁的横向冲击为例来讨论, 其动态失效一般有 3 种基本模式: 大挠度失效(Mode I), 拉伸撕裂失效(Mode II)和横向剪切失效(Mode III)。对于横向剪切失效(Mode III), 以前都采纳 Nonaka^[29] 的解。他基于理想刚塑性模型, 引入了塑性剪切铰。然而, 剪切铰作为强间断面, 跨过剪切铰的横向剪力间断 $[Q]$ 、横向质点速度间断 $[v]$ 和剪应变间断 $[\gamma]$ 之间应满足动力学条件和运动学条件^[4]:

$$[Q] = \mp m \dot{\xi} [v] \quad (10a)$$

$$[v] = \mp \xi [\dot{\gamma}] \quad (10b)$$

式中: m 为梁的线密度, $v = \dot{w} = \partial w / \partial t$, $\gamma = \partial w / \partial X$, $\dot{\xi} = d\xi / dt$ 为剪切铰沿梁中性轴的传播速度。由式(10)可知, 剪切铰传播速度为:

$$\dot{\xi} = \sqrt{\frac{1}{m} \frac{[Q]}{[\gamma]}} \quad (10c)$$

疑惑在于: Nonaka^[29] 的理想刚塑性模型将导致 $\dot{\xi} = 0$, 即对应于驻定塑性铰; 而且, 按运动学条件(10b), 剪应变间断 $[\gamma] \neq 0$ 时却给出 $[v] = 0$, 从而违反了断面上运动学条件(位移连续条件)。

我们基于 Q - γ 的线性硬化模型 ($Q = Q_0 + G_p \gamma$), 得出移行剪切铰解^[30], 剪切铰传播速度 $\dot{\xi} = c_Q = \sqrt{G_p / m}$ (G_p 为 Q - γ 曲线的塑性线性硬化模量), 分析结果汇总如图 6 所示。

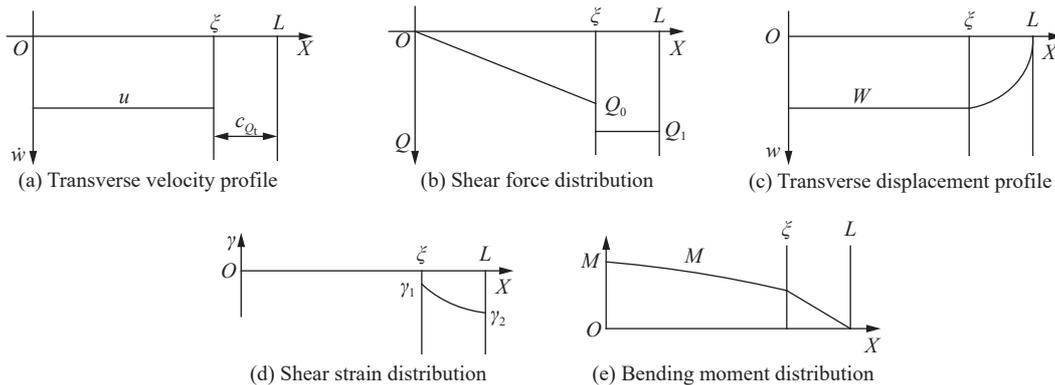


图 6 简支梁在冲击加载下的横向速度剖面、剪力分布、横向位移剖面、剪切应变分布和、弯矩分布

Fig. 6 Simply supported beam subjected to impulsive loading: transverse velocity profile, shear force distribution, transverse displacement profile, shear strain distribution, bending moment distribution

上述移行剪切铰解, 同时满足强间断上动力学条件和运动学条件。由此可见, 理想塑性模型对波传播是不适用的。同时还发现, Nonaka 解是移行剪切铰解当移行剪切铰传播的距离 L_s 相对于梁半跨 L 小得可忽略时的近似解。Nonaka 肯定了我们的工作, 并在分析 1993 年纽约世贸中心爆炸案中的钢支架破坏^[31]时, 直接引用了我们的论文。

上述移行剪切铰解, 给出了梁在横向冲击载荷作用下有以下 3 种可能的剪切失效模式。(1) 横向大挠度模式: 当横向位移 w_f 超过规定的临界横向位移 w_c ($w_f \geq w_c$) 时失效; (2) 横向剪切变形模式: 当最大剪切应变 γ_s 超过规定临界剪切应变 γ_c ($\gamma_s \geq \gamma_c$) 时失效; (3) 绝热剪切模式: 当满足绝热剪切准则时失效^[32-33]。其中, 梁的绝热剪切失效模式是一种新提出的失效模式。从此, 其他人把这个失效模式称为梁的第 4 种失效模式 (Mode IV)^[34-35]。

7 结 语

根据以上讨论, 我的主要体会可以归纳为以下几点。

(1) 人们容易以静力平衡的惯性思维来看问题, 当以此来处理波传播问题时, 就会导致差错, 应引以为戒。

(2) 人们容易把关注停留在应力应变曲线本身, 但在处理波传播问题时, 还应更多关注会决定波速的应力应变曲线斜率, 特别是斜率奇点如屈服点、卸载点和后继屈服点等。这个奇性决定了弹塑性/加卸载边界的传播规律。也正由此, 经典屈服条件式(4)只是动态屈服的必要条件, 应代之以双变量动态屈服条件式(6)。

(3) 人们容易以连续松弛谱的观点来研究黏弹性材料的动态本构特性, 其实分立的每一个松弛时间 θ_i 都存在一个约占 4.5 个量级的有效影响域和对应的有效传播距离和有效传播时间。正由此, 包含两个独立无关松弛时间的 ZWT 方程足以表征从准静态到冲击高应变率的材料动态响应, 更适合工程应用。

(4)人们容易混淆结构响应和材料响应。对于爆炸/冲击动力学问题,尤其应该强调两者的区分和联系。所谓有质量就有惯性,只在结构动态响应研究中成立;在材料动态响应研究中,此说不成立,而应该更多关注应变率响应。

(5)层裂这类动态失效,一方面离不开卸载波的反射和相互作用过程(结构动态响应),另一方面必须满足某个材料破坏准则(材料动态响应)。因此,凡是涉及波传播等结构动态响应的动态失效,都是两者相耦合的复杂响应。

(6)通过对 Nonaka 解的讨论可见,塑性铰分析中的塑性铰实际上可看作波传播分析中的间断面。但在理想刚塑性假定下,塑性铰传播速度将化为零(对应于驻定塑性铰),这类近似解会导致不能同时满足间断面上的动力学条件和运动学条件。引入塑性硬化假定,问题转化为移动塑性铰,将有利于同时满足间断面上的动力学条件和运动学条件,更加趋同于波传播分析。

在学习研究爆炸/冲击动力学过程中,我常常经历了很多疑惑→解惑→再疑惑→再解惑……的过程。学问学问,包含着学和问,问就意味着发生疑惑。每个疑惑的解答就是一次提高,甚至是新一轮的创新工作。我深深感谢独立思考中的疑惑对我的启发和挑战!希望在耄耋之年能继续保持学生般的好奇和疑惑,启发我们一起去深思求真、去迎接挑战、去创新前进!

参考文献:

- [1] РАХМАТУЛИН Х А. Косом ударе по гибкой нити с большими скоростями при наличии [J]. Прик Мат Мех, 1945, 9: 449-462.
- [2] РАХМАТУЛИН Х А, ДЕМЬЯНОВ Ю А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках [M]. Физматгиз, Москва, 1961.
- [3] КРИСТЕСКУ Н. О волнах нагрузки и разгрузки, возникающих при движении упругой или пластической нити [J]. Прик Мат Мех, 1954, 18(3): 257.
- [4] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [5] 王礼立. 柔性弦中弹塑性波的传播 [J]. 力学学报, 1964, 7(3): 228-240.
- [6] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II: “Shock” theory and comparison with experimental data and numerical models [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2206-2230. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.05.003.
- [7] WANG L L, YU T X. On the critical velocities for the propagation of a “steady-shock” wave in a bar made of cellular material [C] // Proceedings of International Symposium on Dynamic Energy Absorption (ISDEA 2012). Leshan, China, 2012.
- [8] WANG L L, YANG L M, DING Y Y. On the energy conservation and critical velocities for the propagation of a “steady-shock” wave in a bar made of cellular material [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, 29(3): 420-428. DOI: 10.1007/s10409-013-0024-3.
- [9] 王礼立, 朱兆祥, 虞吉林. 弹塑性平面波传播中弹塑性边界的间断性质 [J]. 爆炸与冲击, 1983, 3(1): 1-8.
WANG L L, ZHU Z X, YU J L. On discontinuous properties of elastic-plastic boundaries in elastic-plastic plane waves propagation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1983, 3(1): 1-8.
- [10] 王礼立. 冲击载荷下的材料动态失稳和动态屈服 [J]. 力学学报, 1989, 21(S1): 142-147.
WANG L L. The dynamic instability and dynamic yield of materials under impact loading [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1989, 21(S1): 142-147.
- [11] 王礼立. 塑性波、动态屈服准则和动态塑性本构关系 [C] // 固体力学进展及应用: 庆贺李敏华院士 90 华诞文集. 北京: 科学出版社, 2007: 20-28.
- [12] 虞吉林, 王礼立, 朱兆祥. 杆中弱间断弹塑性边界的传播速度 [J]. 科学通报, 1982, 27(5): 574-1214.
YU J L, WANG L L, ZHU Z X. Propagation velocity of elastic-plastic boundaries with weak discontinuities in a bar [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1982, 27(5): 574-1214.
- [13] 虞吉林, 王礼立, 朱兆祥. 杆中应力波传播过程中弹塑性边界的基本性质 [J]. 固体力学学报, 1982(3): 313-324.
YU J L, WANG L L, ZHU Z X. Basic properties of elastic-plastic boundaries in stress wave propagation in a bar [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1982(3): 313-324.
- [14] 虞吉林, 王礼立, 朱兆祥. 杆中弹塑性边界传播速度的确定 [J]. 固体力学学报, 1984, 5(1): 16-26.

- YU J L, WANG L L, ZHU Z X. Determination of propagation velocity of elastic-plastic boundaries in a bar [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1984, 5(1): 16–26.
- [15] TING T C T. Nonexistence of higher order discontinuities across elastic/plastic boundary in elastic-plastic wave propagation [C] // SIH G C, ISHLINSKY A J, MILEIKO S T, et al. *Plasticity and Failure Behavior of Solids*. Dordrecht: Springer, 1990: 115–136. DOI: [10.1007/978-94-009-1866-5_6](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1866-5_6).
- [16] 唐志平, 田兰桥, 朱兆祥, 等. 高应变率下环氧树脂的力学性能 [C] // 第二届全国爆炸力学会议论文集. 江苏扬州, 1981.
- [17] 王礼立, 施绍裘, 陈江瑛, 等. ZWT 非线性热粘弹性本构关系的研究与应用 [J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2000, 13(S1): 141–149.
- [18] WANG L L. Stress wave propagation for nonlinear viscoelastic polymeric materials at high strain rates [J]. *Journal of Mechanics*, 2003, 19(1): 177–183. DOI: [10.1017/S1727719100004184](https://doi.org/10.1017/S1727719100004184).
- [19] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则 [J]. *爆炸与冲击*, 1992, 12(4): 333–342.
- ZHOU F H, WANG L L, HU S S. A damage-modified nonlinear visco-elastic constitutive relation and failure criterion of PMMA at high strain-rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1992, 12(4): 333–342.
- [20] CHU C H, WANG L L, XU D B. A nonlinear thermo-viscoelastic constitutive equation for thermoset plastics at high strain rates [C] // *Proceedings of the International Conference on Nonlinear Mechanics*. Beijing: Science Press, 1985: 92–97.
- [21] WANG L L, HUANG D J, GAN S. Nonlinear viscoelastic constitutive relations and nonlinear viscoelastic wave propagation for polymers at high strain rates [C] // *Constitutive Relation in High/Very High Strain Rates*, IUTAM Symposia (International Union of Theoretical and Applied Mechanics). Tokyo: Springer-Verlag, 1996: 137–146. DOI: [10.1007/978-4-431-65947-1_16](https://doi.org/10.1007/978-4-431-65947-1_16).
- [22] 王礼立, 任辉启, 虞吉林, 等. 非线性应力波传播理论的发展及应用 [J]. *固体力学学报*, 2013, 34(3): 217–240. DOI: [10.3969/j.issn.0254-7805.2013.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-7805.2013.03.001).
- WANG L L, REN H Q, YU J L, et al. Development and application of the theory of nonlinear stress wave propagation [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 34(3): 217–240. DOI: [10.3969/j.issn.0254-7805.2013.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-7805.2013.03.001).
- [23] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 聊聊动态强度和损伤演化 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 169–179. DOI: [10.11883/1001-1455\(2017\)02-0169-11](https://doi.org/10.11883/1001-1455(2017)02-0169-11).
- WANG L L, HU S S, YANG L M, et al. Talk about dynamic strength and damage evolution [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 169–179. DOI: [10.11883/1001-1455\(2017\)02-0169-11](https://doi.org/10.11883/1001-1455(2017)02-0169-11).
- [24] TIMOSHENKO S. *Strength of materials* [M]. New York: Van Nostrand Company, 1930.
- [25] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. *材料动力学* [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.
- [26] WANG L L, YANG L M, DONG X L, et al. *Dynamics of materials: experiments, models and applications* [M]. London: Academic Press, 2019.
- [27] RINEHART J S. Some quantitative data bearing on the scabbing of metals under explosive attack [J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22(5): 555–560. DOI: [10.1063/1.1700005](https://doi.org/10.1063/1.1700005).
- [28] LEE E H, SYMONDS P S, PROVIDENCE R I. Large plastic deformations of beams under transverse impact [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1952, 19(3): 308–314.
- [29] NONAKA T. Some interaction effects in a problem of plastic beam dynamics. Part I: interaction analysis of a rigid, perfectly plastic beam [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1967, 34(3): 623–630. DOI: [10.1115/1.3607753](https://doi.org/10.1115/1.3607753).
- [30] WANG L L, JONES N. An analysis of the shear failure of rigid-linear hardening beams under impulsive loading [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1996, 12(4): 338–348. DOI: [10.1007/BF02487799](https://doi.org/10.1007/BF02487799).
- [31] NONAKA T. Shear failure of a steel member due to a blast [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(3): 231–238. DOI: [10.1016/S0734-743X\(99\)00158-X](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00158-X).
- [32] WANG L L. A criterion of thermo-viscoplastic instability for adiabatic shearing [C] // ZHENG Z M. *Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and its Effects*. Beijing: Science Press, 1986: 787–792.
- [33] 王礼立. 绝热剪切——材料在冲击载荷下的本构失稳 [C] // 王礼立, 余同希, 李永池. *冲击动力学进展*. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992: 3–33.
- [34] LI Q M, JONES N. Shear and adiabatic shear failures in an impulsively loaded fully clamped beam [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(6): 589–607. DOI: [10.1016/S0734-743X\(99\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00013-5).
- [35] CHEN X W, LI Q M, FAN S C. Initiation of adiabatic shear failure in a clamped circular plate struck by a blunt projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(7): 877–893. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2004.04.011](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.04.011).

(责任编辑 丁峰)