

结构塑性动力响应实验研究的简要综述^{*}

赵亚溥

中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室, 北京 100080

方 竞

余同希

北京大学力学与工程科学系, 北京 100871

香港科技大学机械系, 香港九龙清水湾

摘 要 讨论和总结了结构塑性动力响应中的相似方法以及进行模化实验所应遵循的原则, 对冲击载荷下多种结构塑性动力响应的实验研究进行了简要综述。

关键词 结构, 冲击载荷, 塑性动力响应, 实验研究, 相似方法, 无量纲数, 相似准数

1 前 言

对于一个结构物而言, 突加载荷可以由一个固体的撞击引起的, 也可以是由液体或气体波动所施加的。前者习惯上称之为撞击载荷, 而后者则称之为冲击载荷。在研究结构物的动力行为时, 可以不管载荷是怎样施加的, 都称之为冲击载荷^[1] (impulsive loading)。关于结构塑性动力响应和失效的研究进展可参阅近期的有关综述 [2 ~ 4]。本文主要总结有关结构塑性动力响应的实验研究工作。

2 结构塑性动力响应中的相似方法初步

人们总是希望实验室中的模型实验尽可能得到广泛应用, 为此要用到相似分析。在理论分析和实验设计中, 确定可能的无量纲量数目跟构成这些无量纲组合量的有量纲量数目之间的关系, 对发展相似方法具有极其重要的作用。这里给出模型实验中两个常用术语的定义: 第一个是“拷贝 (replica) 模型^[5]”, 它是指和原型 (prototype) 既完全几何相似又材料完全相同的物理模型 (model); 第二个术语是“不同材料的模化 (dissimilar material modeling)”, 它是指和原型完全几何相似但材料不同的模型^[5]。本文将前一种模型实验简称为“拷贝模化实验”, 后一种则相应称为“不同材料的模化实验”。一般地, 要进行塑性动力学的模型实验要满足如下相似条件: (1) 几何相似; (2) 运动相似; (3) 动力相似; (4) 本构相似。前面 3 个相似条件很容易理解, 关于本构相似将在本节中进行专门介绍。

* 国家自然科学基金重点资助项目

首先用两个例子来给出结构塑性动力响应中的若干常用无量纲数。如图 1 所示，一根受冲击载荷（初速为 V_0 ）作用的固支理想弹塑性梁，其弹塑性动力响应的函数关系式可以表示为

$$W_f = F(E, \sigma_y, \rho, V_0, H, B, L, \nu) \quad (1)$$

式中 W_f 为梁中点的最大挠度， E 和 σ_y 分别为梁的弹性模量和屈服极限， ρ 为梁的密度， H 、 B 和 L 分别为梁高、宽和梁的半长， ν 为材料的泊松比。根据 定理，式 (1) 可进一步表示为

$$W_f/H = f(V_0^2/\sigma_y, V_0^2/E, H/L, B/L, \nu) \quad (2)$$

上式中 $dn = V_0^2/\sigma_y$ 和 $Ca = V_0^2/E$ 都是冲击动力学中重要的无量纲数或相似准数 (similarity parameter)，它们分别被称为“Johnson 的损伤数^[3]”和“Cauchy 数”。损伤数是发生严重塑性变形区应变量级的度量，从表达形式来看，它是载荷惯性力和材料流动应力的比值，而 Ca 数则是载荷速度和材料中特征弹性波速之比的平方，也就是 Mach 数的平方， Ca 数同时也是裂纹传播动力学中的一个重要相似准数^[6]。在模型实验中，如果满足几何相似（包括梁的几何尺寸之比 H/L 和 B/L 以及边界条件相同）和材料相同的话，相同的 dn 数和 Ca 数下将得到相同的 W_f/H 。这也就是上面所说的拷贝模化实验。关于 dn 数在结构塑性动力失效中的应用，可参阅文献 [3]。 dn 数是给定冲击速度载荷作用下结构塑性动力响应和失效中一个非常重要的相似准数，它在冲击动力学中的作用相当于流体力学 N - S 方程中的 Re 数。当 dn 很大时，运动趋于流体，当它很小时，运动趋于固体。

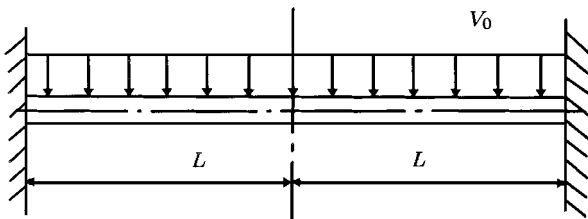


图 1 受冲击载荷作用的固支梁

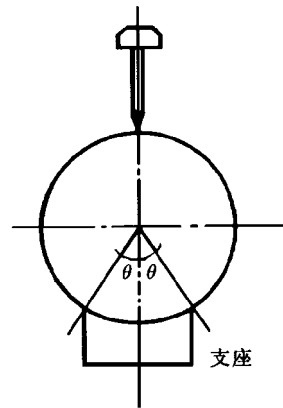


图 2 落锤作用下的受弧形支座支承的薄壁圆环

如图 2 所示，落锤作用下受弧形支座支承的理想刚塑性薄壁圆环^[7~9]，其动力行为可表示为

$$D_f = F(M, H, g, \rho, \sigma_y, B, h, R, \theta) \quad (3)$$

上式中， H 和 M 分别为落锤的落高和质量， g 为重力加速度， h 、 B 、 R 分别为圆环的厚、宽和半径， ρ 为圆环的密度， θ 为弧形支座的角。根据 定理，上式可进一步表示为

$$D_f/R = f(2RhB/M, 2gH/\sigma_y, h/R, B/R, H/R, \theta) \quad (4)$$

上式右端第一个无量纲量表示圆环和落锤的质量之比, $2gH/\sigma_y$ 也是一个在落锤实验中重要的相似准数^[5], 其实该数就是 dn 数的不同表示形式, H/R 和 σ_y 则是反映几何相似的无量纲量, D_f/R 表示圆环在撞击点方向上的残余变形和环的半径之比. 在组合无量纲量时可以存在不止一种选择方案, 例如还可组合出反映落锤输入能量和圆环承载能力之比的相似准数^[9], MgH/M_p , 式中 M_p 为塑性极限弯矩. 事实上, 只有对所研究的问题进行了透彻的量纲分析并找到起控制作用的相似准数以后, 才能在实验中有的放矢, 在数值计算中作出合理和正确的判断, 选准控制参量.

再如 Duwez 等于 1950 年所研究过的无限长梁在中心点受到恒速为 V_0 的集中力作用时的线弹性、弹性线性强化、理想弹塑性的动力响应问题^[10]. 由于问题本身是一个自相似 (self-similar, 又称为自模拟) 问题, 所以他们给出的解析解是通过采用 Boussinesq 于 1885 年所建议的自相似变换后得到的, 该变换可以表示为

$$\text{荷速} \quad \frac{w(x,t)}{V_0 t} = \text{载荷} \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{m}{EI}} \frac{x^2}{t} \right] \quad (5)$$

式中 $w(x,t)$ 为梁横坐标为 x 位置处在 t 时刻的位移, m 为单位梁长的质量, 其量纲为 $[ML^{-1}]$, EI 为梁的刚度, 量纲为 $[ML^3T^{-2}]$, f 为一无量纲函数. 注意本文中的式 (5) 和文 [10] 中略为不同, 原文自相似变换中的函数 f 为一量纲为速度的函数. 例如, 对于线弹性动力学问题, 该问题的精确解为

$$\frac{w}{V_0 t} = 1 - 2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \frac{x^2}{t} \left[\int_0^{\frac{d_0}{\sqrt{EI}}} \frac{d_0}{\sqrt{EI}} d + \sqrt{\sin} \right] \quad (6)$$

式中 $\frac{1}{4} \sqrt{\frac{m}{EI}} \frac{x^2}{t}$ 为一无量纲量. 应该说 Duwez 等在该文中所采用的方法是经典的, 具有丰富的物理内涵, 该解是弹塑性动力学中应用相似方法非常成功的一个范例. 这类自相似解都是既无特征时间又无特征长度条件下爆炸和冲击动力学问题中所非常罕见的精确解. Duwez 等还采用软钢和铜试件进行了冲击速度为 30.6m/s 的实验. 实验和理论分析符合得不很好的原因是多方面的, 如弹性和塑性波在支承处的反射, 以及忽略了扭转和剪切效应等.

为了说明相似方法和量纲分析在结构动力响应实验结果分析中的有效性, 下面举一例说明. Baker 等^[5]曾就冲击载荷作用下悬臂梁的动力响应问题做过实验, 载荷是这样加的, 即悬臂梁固定在可以沿光滑轨道自由下滑的重物块上, 重物块滑行一段高度后导杆和弹簧相撞, 悬臂梁继续在惯性力作用下发生永久塑性变形, 原型梁的材料为 1015/1018 号钢, 模型为牌号 5052-0 的铝材. 模型和原型在各个对应几何尺寸上的相似比为 2, 两组梁的最终残余形状是相似的. 图 3 给出的是模型和原型实验“最终挠度-落高”的实验结果, 该有量纲的实验结果不能说明模型和原型的任何对应关系. 但是, 如果仅仅是将图 3 的结果无量纲化, 情况将发生奇妙的变化, 图 4 是用无量纲量 w/L 和 $2gH/\sigma_y$ 表示. 这里 L , ρ , σ_y 分别表示梁长、密度和屈服应力. 图 4 表明模型和原型的实验在对应的无量纲量的关系式给出相同的结果, 当然实验中冲击速度较低, 材料的应变率效应可以忽略不计. 通过这个例子可以说明, 量纲分析和相似方法在模化中起着很基本的作用, 应该说在现在所有的实验中都应该使用相似方法和量纲分析这一重要手段^[5].

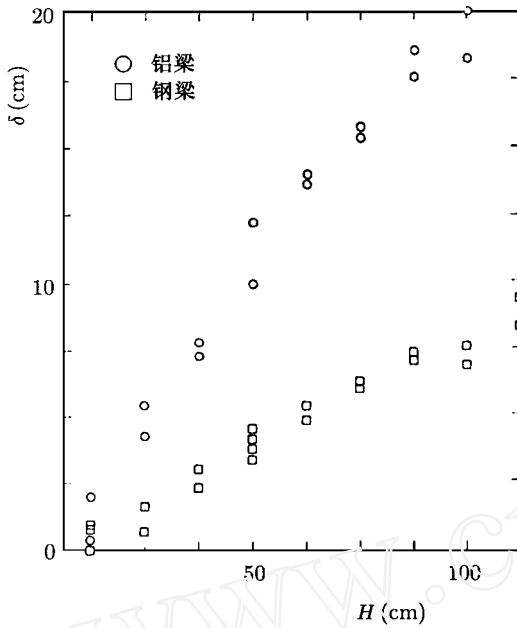


图3 关于最终挠度 - 落高的实验结果

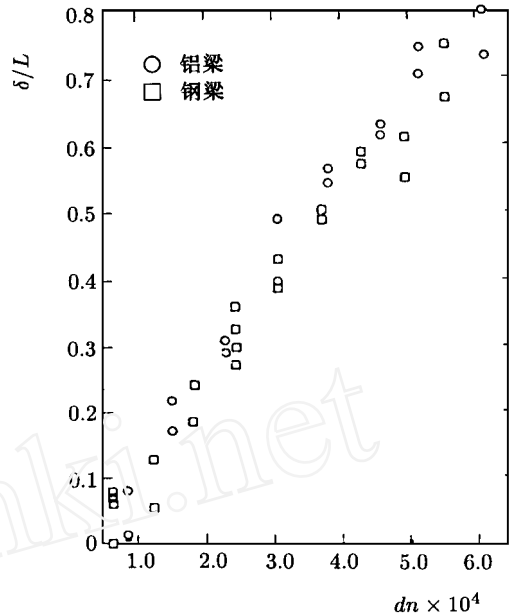


图4 无量纲化 $\delta/L - 2gH/y$ 的结果

Johnson 等^[11]发展了高速冲击中的不同材料模化实验方法. 他们利用粘土材料 (plasticine) 代替原型中的高强度合金钢材料模拟了长杆弹的穿甲过程. 粘土、橡皮泥和石蜡等非金属材料屈服极限低, 流动性好, 靶板中间还可以配上不同颜色, 便于观察材料变形的流动和破坏情况, 再加上成本低容易加工等因素, 所以这种模拟具有重要价值. 北京理工大学的研究组^[12]也用橡皮泥和石蜡进行过类似实验. 当然除了几何相似的因素外, 在模拟中要得到相似的现象, 其重要的前提之一是必须满足模型和原型的 dn 数相等, 这样对模型中的撞击速度可以进行选择. 事实上, 由于

$$m V_m^2 / y_m = p V_p^2 / y_p \quad (7)$$

上式中下标 m 和 p 分别表示模型和原型, 在材料确定后, 各自的密度和屈服极限都将随之确定, 那么在已知原型撞击速度 V_p 的情况下, 可以得到模型 (粘土、橡皮泥或石蜡) 的模拟撞击速度 V_m .

在不同材料的模化实验中, 一个重要概念就是“本构相似”, 它是指模型和原形材料有同调的本构性质和同调的应力 - 应变曲线 (homologous constitutive properties and homologous stress - strain curves). 换句话说, 就是有相同的无量纲本构关系, 即相同的 δ/E - 或 δ/y - 关系式. 图 5 给出的是一个本构相似的例子^[5], 即退火后的黄铜和退火后的铝本构相似.

另外应该指出的是, 当结构的动力失效包含有断裂发生时, 相似准数中还必将有 Irwin 数 I_r 在内, 关于该数的介绍可以参阅文献 [6, 13, 14]. 此时, 将存在明显的“尺寸效应 (scale effect)”. 为了说明该问题, 这里仅举一例说明. Wilson 在对玻璃受子弹撞击下的断裂问题进行实验研究时^[15], 提出该问题的控制参量有如下几个: (1) 子弹的质量 m 和冲击速

度 V ；(2) 玻璃的泊松比 ν 、玻璃试件的特征尺寸 L 、弹性模量 E 、密度 ρ 、发生断裂的临界应力 σ_c 和裂纹扩展的临界能量释放率 G_c ，以及裂纹扩展的长度 L_c 等。根据 π 定理，Wilson 给出的 6 个相似准数为

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{m}{L^3}, & 2 &= \frac{EL^3}{mV^2}, & 3 &= \\ 4 &= \frac{m^2 V^4}{G_c^2 L^5}, & 5 &= \frac{G_c}{\sigma_c L_c}, & 6 &= \frac{\sqrt{EG_c}}{\sigma_c \sqrt{L_c}} \end{aligned} \quad (8)$$

本文针对该问题还可以给出另外 6 个无量纲组合量：

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{m}{L^3}, & 2 &= \frac{V^2}{E}, & 3 &= \\ 4 &= \frac{L_c}{L}, & 5 &= \frac{\sigma_c}{E}, & 6 &= \frac{\sigma_c \sqrt{L_c}}{\sqrt{EG_c}} \end{aligned} \quad (9)$$

其中相似准数 π_1 表示子弹质量和玻璃试件特征质量之比； π_2 为 Ca 数，代表子弹撞击速度和玻璃中特征弹性波速之比的平方； π_6 为 Ir 数。当

然，6 个无量纲量的组合还可以有其它多种选择。如何选择无量纲组合量要看所要研究的内容，例如要研究子弹动能和玻璃试件中所能储存的特征弹性性能之比对玻璃断裂的影响时，可以选择式 (8) 中的 π_2 作为一个必选的相似准数；若要研究玻璃断裂时应变能级对该问题的影响时，则可以选择式 (9) 中的 π_5 作为一个必选的相似准数。

有关量纲分析在各个学科中的重要性，这里只引用剑桥大学 G. I. Barenblatt 教授的一句话，他指出^[16]：“通过使用量纲分析，研究者总是能够获得具有极深刻意义的结果，有时甚至能改变科学的全部分支。从 Newton 到 Fourier 再到 Maxwell、Rayleigh 和 Kolmogorov，这些科学大师们的工作都和量纲分析有关，在这些结果中，湍流中著名的 Kolmogorov - Obukhov 理论便是一个明证”。Barenblatt 还在该专著的前言中指出：“量纲分析是简单的，甚至是很平凡的 (trivial)，...但事实上越是平凡的事情，就越是不平凡的。”

塑性动力响应中有关尺度律 (scaling law) 的研究是近年来的一个热点问题，有关这方面的论述正逐渐增多，应该说透彻的量纲分析是进行这方面研究的第一步。例如图 1 所示情形，其无量纲关系式由 (2) 式表示，当相似准数 π_1 和 π_2 足够小（或者说和结构材料的承载能力相比，冲击速度足够小时）到可以忽略时，(2) 式此时可以近似表达为

$$W_f/H = f(H/L, B/L, \dots) \quad (10)$$

从上式可以看出，此时几何相似尺度率将近似成立。但如果 dn 数和 Ca 数大到不再可以忽略（特别是伴有断裂发生时），几何相似尺度率将不再成立。文 [17] 的有关实验结果也证明了这一点。

应该特别指出的是，本节所给出的几个示例仅仅是简单构件，对于实际复杂构件受冲击

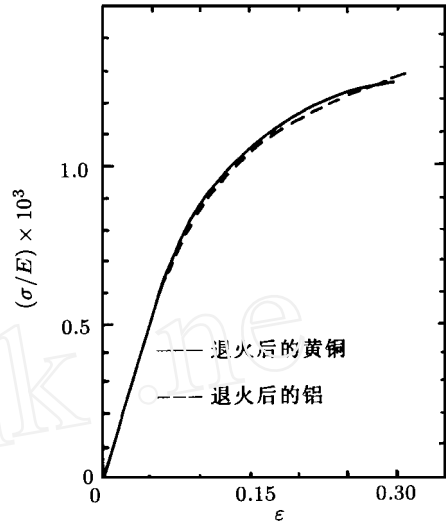


图 5 退火后的黄铜和退火后的铝本构相似示意图

载荷作用下的模型实验，量纲分析必将发挥更显著的指导作用。

3 有关梁塑性动力响应的实验研究

在结构的塑性动力实验中，一般有下列几种常见施加动载荷的手段：

冲击波加载^[18]；

片状炸药的接触爆炸加载^[19]；

重物坠落，其中最为普遍的形式是落锤^[8,9]，也可以是轻气炮驱动下试件沿导架加速运动，然后试件被突然阻止，试件在惯性下发生塑性变形^[20,21]；

子弹撞击加载^[22]；

Hopkinson 杆施加脉冲波（参阅 [23] 中所给出的若干例子）；

电磁加载^[24]；

先给试件一个初始挠度，然后突然释放^[25]。

一般在结构塑性动力响应的实验中，需要使用超动态应变仪、光电位移计和高速摄影机来记录材料和结构的动力响应的过程。对梁而言，支承方式不外乎有下列几种，即（1）悬臂；（2）简支轴向可移（无轴力）；（3）简支轴向不可移（有轴力）；（4）固支轴向可移；（5）固支轴向不可移；和（6）空中自由。

梁的塑性动力实验研究的有关工作可参阅本文表 1 的大致汇总。由于篇幅所限，这里不再逐一评论，只对作者认为较重要的问题进行阐述。对某一实验感兴趣的读者可参考所列文献。

1955 年 Pakes 首先从理论和实验两方面研究了悬臂直梁在自由端受到一个刚性物体撞击的问题^[26]，如图 6 所示。针对该问题（理想刚塑性模型），本文可以给出如下函数关系式

$$= F(M, V_0, m, y, L, B, H) \quad (11)$$

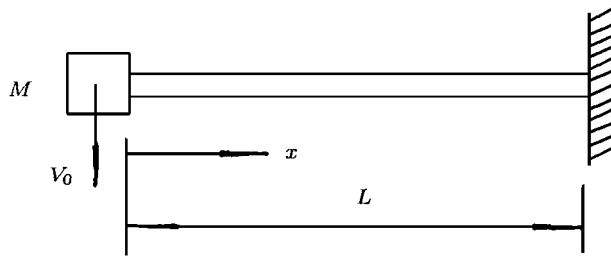


图 6 端部受刚性物块撞击的悬臂直梁

式中 y 为梁受打击端的最终位移， M 和 V_0 分别为刚性物体的质量和撞击速度， m 和 y 分别为梁的质量和塑性屈服应力， L 、 H 和 B 则分别为梁长和梁截面的高和宽。由 定理，式 (11) 可以表示为如下无量纲形式

$$y/L = f(M/m, K_0/M_p, B/L, H/L) \quad (12)$$

表 1 有关梁的塑性动力响应实验一览表

类型	作者及文献号	年份	材 料	加载情况	其 它
悬 臂 梁	Parkes ^[26]	1955	软 钢	重物下落和子弹	等截面
	Mentel ^[20]	1958	软 钢	惯性加载	等截面
	Bodner 等 ^[32]	1962	软钢和铝合金	惯性加载	等截面
	Bodner 等 ^[33]	1963	铝合金	接触爆炸	212F 和 400F
	Al - Hassani 等 ^[34]	1970	铝	电磁加载	等截面
	Al - Hassani 等 ^[35]	1973	铝合金	电磁加载	变截面
	Petroski 等 ^[36]	1985	铝	梁下落撞刚性物	含缺口
	Hashmi 等 ^[37]	1986	铝	电磁加载	变截面
	Shu 等 ^[18]	1992	铝合金	冲击波	斜冲击
张铁光等 ^[38]	1989	铝合金	尖头或平头子弹	圆弧曲梁	
铰 支 或 固 支 梁	Parkes ^[39]	1958	软 钢	重物下落	固支轴向可移
	Humphreys ^[40]	1965	钢	爆炸载荷	固支轴向不可移
	Florence 等 ^[41]	1965	铝合金、冷轧钢	接触爆炸	固支轴向可移
	Symonds 等 ^[42]	1972	软 钢	接触爆炸	固 支
	Forrestal 等 ^[43]	1977	钢	正弦分布载荷	两端铰支
	Reid 等 ^[44]	1984	钢	V 型头重物下落	液体中固支
	Nonaka ^[45]	1967	铝合金、软钢	接触爆炸	固支、非等直梁
	Wegner 等 ^[46]	1985	方管状钢梁	接触爆炸	筒 支
	赵隆茂等 ^[47]	1993	铝合金方管	子弹撞击	筒支或固支
	Li 等 ^[48]	1991	硬 铝	子弹撞击	固支, 异常现象
Kolsky 等 ^[25]	1991	铝合金	施加初始位移	固支, 异常现象	
杨嘉陵等 ^[49]	1992	低碳钢	飞射物	固支含缺口	
自由 梁	Woodward 等 ^[50]	1986	钢	突加速度	含缺口
	Yu 等 ^[51]	1996	钢	飞射物	等截面
格排	Jones 等 ^[52]	1991	钢或铝合金	重物下落	正交固支

式中相似准数 $\lambda_1 = M/m$ 表示重物和梁二者的质量比, 相似准数 $\lambda_2 = K_0/M_p$ 为撞击物的初始动能和梁的塑性极限弯矩之比, 即 $K_0 = MV_0^2/2$, $M_p = \gamma B H^2/4$, 另外两个相似准数则表示梁的几何参数之比. 例如对于一种极限情况 $\lambda_1 \gg 1$, Parkes 给出的理论解是

$$\delta / L = K_0 / M_p \quad (13)$$

Pakes 问题的实验和理论研究都表明, 重物和梁的质量比对梁的最终位移有很大的影响, 在动能相同的条件下, 一般梁的最终挠度随该比值的增加而增加, 实验和理论的对比如表明, 理论的预测值要比实验值大. 自 Pakes 之后, 人们发现把悬臂梁受端部撞击的问题弄清楚对于求解复杂结构的动力响应问题助益很大, 因此在研究各种因素对结构动力响应的影响时, 往往都从 Pakes 问题做起. 正如王仁在 [1] 中所指出的, 为了校核理论分析的近似性, 最好做悬臂梁的实验, 它的优点较多: (1) 易于实现端条件; (2) 自由端的变形较大, 易于测量; (3) 轴力的影响小; (4) 易于做理论分析.

3.1 有关刚塑性理论和应变率效应问题

在结构塑性动力响应的理论分析中, 常用的一个重要理想化是在求解强动载荷作用下的结构动力响应时, 把结构假定为由理想刚塑性材料制成的, 这样做不仅忽略了材料的弹性,

而且也忽略了材料的应变率效应和应变强化、软化效应等。这样做的背景和依据是，被考察的结构在强动载荷作用下通常要经历相当大的塑性变形，因而外载所做的功绝大部分转化为塑性变形能从而被消耗掉，只有很小一部分转化为弹性变形能。在这种重要的理想化前提下，结构的理想刚塑性动力响应从 50 年代起取得了一系列成果^[1~44,27~31]。从表 1 中还可以看到有若干关于含缺口梁的塑性动力响应和失效的实验工作^[36,49,50]。他们的有关工作表明，在梁的缺口处有明显的应变集中现象，这主要表现在缺口处有明显的转角突变，形成高曲率区，这说明在缺口处形成塑性铰不仅是理论上关于描述大塑性应变区的一种理想化模型，而且在实验中确实能观察得到。正如 Woodward 和 Baxter 所指出的^[50]，含缺口的梁的确是应用刚塑性模型的一种理想情况。

Bodner 和 Symonds (1962) 采用软钢和铝合金针对 Parkes 问题进行了实验和理论研究^[32]，他们指出，实验所得到的一个最重要的结论是理想刚塑性的理论只是一种一级近似理论，只有在特定范围内（如输入能量和最大弹性能之比不太小时）才是合理的。另外一个结论是，笼统用平均应变率因子对屈服应力和最终变形进行修正由于会引起很大误差，所以不宜作为一种普遍方法推广。

为了研究应变率效应对悬臂梁动力响应的影响，而且考虑到在温度较高时金属的屈服应力对应变率更为敏感，Bodner 等 (1963) 在 212F 和 400F 下对铝合金悬臂梁进行了冲击实验，实验结果表明^[33]，在上述温度下的实验结果和计及应变率效应的理论相符合，但未计及应变率效应的刚塑性理论差别极大。至于怎样在复杂应力状态下考虑应变率的影响，直到现在还是一个不清楚的问题，还没有非常令人信服的关系可用来进行理论分析。

Parkes (1958) 针对两端固支在跨间任意位置承受重物撞击问题进行了理论和实验研究^[39]。他在实验中采用多种不同的金属材料，固支端不能转动但允许有轴向位移，实验和理论的对比发现，当重物和梁的质量比很大时两者较为符合，但当重物和梁的质量比较小时实验和理论的结果相差较大，对此应计及应变率效应。为了和 Symonds 和 Mental (1958) 关于承受均布载荷作用下梁的塑性动力响应的著名理论模型^[53]相对比，Humphreys (1965) 对钢质两端固支轴向不可移梁在爆炸载荷作用下进行了实验研究，结果表明^[40]，Symonds 和 Mental (1958) 所给出模型的结果要比相应的实验值高出 20% ~ 30%，因此他们的模型实际上可以说是一个一级近似理论，只有当最大位移小于梁的厚度的量级时才较为和实验符合。在同一年，Florence 和 Firth (1965) 发表了他们关于两端铰支或固支（都为轴向无约束）承受均布冲击载荷时的实验研究工作，实验中所用材料为铝合金及冷轧钢，大量实验数据表明^[41]，以前对应问题的理想刚塑性小变形理论分析为合理的一级近似理论。

为了说明考虑应变率效应对应变率敏感材料梁动力响应的影响，图 7 给出了有关理论和实验的对比。图中实验材料为软钢，实线是由计及有限变形效应时的理想刚塑性模型的解，虚线是考虑到应变率效应时的结果。理论和实验对比表明^[42]，对于应变率敏感材料考虑应变率效应是重要的。应该指出的是，图 7 的横坐标是损伤数和几何相似准数的一个组合无量纲数。

通过以上关于悬臂梁和铰支、固支梁的几例实验和理论研究的对比足以表明，理想刚塑性小变形理论只是一个一级近似理论，对于软钢等应变率敏感材料还应计及应变率效应。在常温下，铝合金为典型的应变率不敏感材料，但应该注意的是，铝合金在高温下则对应变率

很敏感.

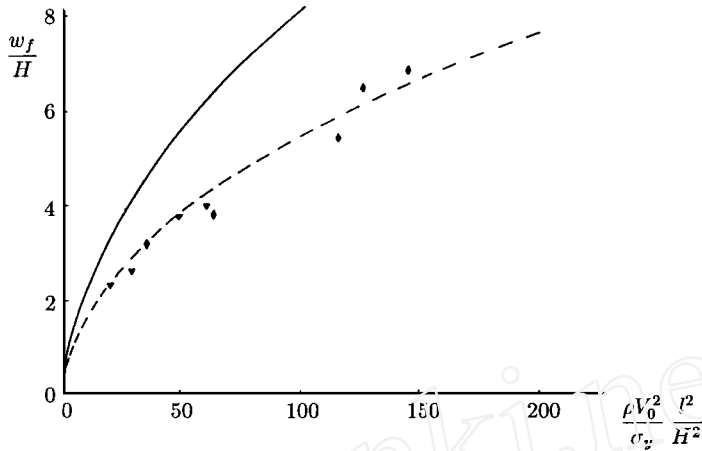


图7 理论和有关实验的对比

3.2 弹性、强化和软化效应

关于弹性效应对结构塑性动力响应的影响，这里首先要提及的是梁动力响应中的异常现象¹⁾。该现象已被证实是弹性效应和几何大变形效应的共同产物。这一现象首先是 Symonds 和余同希在研究轴向不可移的简支理想弹塑性梁在横向均布载荷作用下的动力响应时发现的^[54]。李庆明、赵隆茂和杨桂通（1991）对固支硬铝梁进行了钢质圆柱形子弹冲击实验，实验中发现了异常现象，这说明异常现象不仅发生在均布载荷情况，而且在集中冲击载荷时也能发生^[48]。也在 1991 年，著名已故学者 Kolsky 等发表了他们关于梁异常现象的实验研究工作^[25]，该实验中的冲击载荷是这样加的，即先给梁一个初始挠度，然后突然释放，在 36 个试件中有 2 个出现了异常现象。这两个实验说明，在特定的条件下当结构承受冲击载荷作用时，异常现象是有可能发生的。

Yu, Yang 和 Reid 最近发表了他们关于自由梁受冲击载荷作用下的理论和实验工作。他们的研究表明^[51]，受强动载荷作用的自由梁中的塑性弯曲波和由梁自由端反射回的弹性弯曲波的相互干涉（interference）对确定自由梁的变形模式起到非常重要的作用。外载的输入能量将转化为三部分，即（1）梁的刚体运动的动能；（2）塑性耗散能；和（3）弹性变形能。理想刚塑性模型过高地估计了塑性耗散部分，而简单的“梁 - 弹簧”模型则过低地估计了塑性耗散部分。

强化效应无需再做专门介绍。结构动力响应中的软化分为两种：（1）材料软化；（2）由于结构截面变化所引进的结构软化。在考虑强化软化效应的管道甩动的理论和实验研究中，Reid 和余同希等指出^[55]，合理地计入梁的弹性后，强化和软化的影响将集中于最大弯矩的区域，关于这方面工作的详细综述可以参阅文献 [4, 55]。

国内赵隆茂等（1993）对子弹撞击时的方管铝合金梁的动力响应进行了实验研究^[47]，实验表明，由于涉及到薄壁件的屈曲、响应和失效耦合等问题，其较处的局部变形较实心构

1) Symonds 和余同希在研究轴向不可移的简支理想弹塑性梁在横向均布脉冲作用下的动力响应时发现，对于强度处于某一范围的矩形脉冲，梁的最终挠度会落到与加载方向相反的一侧

件复杂得多，而且由方管局部变形而引起的变形软化效应将减小梁的动力承载能力。其实验还表明，在分析中还应考虑弹性效应。

4 有关薄板塑性动力响应的实验研究

Nurick 和 Martin 已在 1989 年专门对板在冲击载荷下塑性动力响应的有关实验研究进行了综述^[56]，关于 1989 年前的有关板的实验工作可参阅该文献。为避免重复，这里只对 1989 年后的有关板的实验工作进行评述。

工程中大量采用加筋板结构。关于加筋板结构的振动、屈曲等方面的文献已屡见不鲜，而关于冲击载荷下加筋板结构的塑性动力响应理论、数值与实验的研究近年来也得到了广泛的注意。其中，文献 [57, 58] 从实验上研究了 T 字梁单向和十字交叉型增强矩形固支钢板（所谓 DRES 板）在爆炸载荷作用下的动力响应问题，相应的理论分析和数值计算可参阅文献 [59]。

国内刘土光等（1994）对受爆炸载荷作用的十字交叉加筋固支钢板进行了实验及理论研究，他们的实验表明^[60]，当加筋相对刚度值小于 3 时，固支加筋方板结构的变形模式为一“四坡顶形”机构，而当上述值大于 3 时，其变形模式则为 4 个“四坡顶形”变形机构。

关于板和壳受飞行弹丸撞击后的动力响应和穿甲方面的实验和理论研究，还可参阅 Corbett 等最近的有关综述^[61]。

5 有关圆环（管）和环（管）系塑性动力响应的实验研究

有关这方面的实验研究工作汇总于表 2，供参考。这里也不准备对这些工作进行逐篇评述，只就一些笔者感兴趣的工作予以评述。

表 2 圆环（管）塑性动力响应实验一览表

作者及文献号}	年份	材 料	载荷情况	支承或其它
Hashmi 等 ^[21]	1972	铅	自由下落，子弹冲击或雷管起爆	下落到尖劈或刚性平面
Reddy ^[62]	1978	低碳钢	平板撞击	置于刚性平面
Calladine 等 ^[63]	1984	低碳钢	落 锤	置于刚性平面
Silva - Gomes 等 ^[64]	1978	铝管材	惯性下重物下落	多圆环串联
Reid 等 ^[65]	1983	黄铜或钢	重物加载	多圆环串联，远端固定
Reddy 等 ^[66]	1991	软钢或黄铜	子 弹	同上，但远端自由
赵亚溥等 ^[3,7,8]	1993	铝合金	落 锤	完整或含缺口环，圆弧支座支承
Veillete 等 ^[67]	1988	软 钢	落 锤	置于刚性平面，两根交叉杆增强

Calladine 和 England（1984）对低碳钢圆环等进行了冲击实验，他们的实验表明，圆环是一种对冲击速度不敏感的能量吸收元件，也就是说在相同的冲击动能条件下，改变落锤的质量和速度，圆环的最终变形相差不大。

关于笔者对受弧形支座支承完整和含缺口圆环的动力响应和失效问题的研究工作，可参阅文献 [3, 4, 7 ~ 9, 68]，这里不再赘述。

在工程实际应用中，圆环或圆管常常是成组而不是单个地被应用。相应地有几篇文献报道过有关串联式圆环在撞击载荷下的实验及理论分析。所谓串联式是指尺寸相同的若干圆环（或圆管）排成一直列，相互之间可以点焊连接，也可以间隔以平板。其中 Silva - Gomes 等

(1978) 研究了一端悬挂另一端受拉伸冲击载荷作用的串联式圆环的动力响应问题^[64]。环的材料为薄壁铝管材, 实验中得到的高速摄影照片表明, 塑性屈服在临近环中的传播是以塑性波的形式进行的, 利用理想刚塑性模型, 他们得出这样一个结论, 即波在环中的传播速度 c_p 仅和环塑性极限弯矩 M_p 和单个环的质量 m 之比有关, 事实上本文可以通过量纲分析定性地对该问题进行简单分析, 因为有如下函数关系式

$$c_p = F(M_p, m, R, H) \quad (14)$$

式中 R 和 H 分别为单个环的半径和壁厚, $[c_p] = [L T^{-1}]$, $[M_p] = [ML^2 T^{-2}]$, $[m] = [M]$, $[R] = [H] = [L]$ 。因此根据 定理, (14) 式进一步写为:

$$c_p / \sqrt{M_p / m} = f(R / H) \quad (15)$$

对于尺寸确定的串联圆环系, 从量纲分析可以得到塑性屈服在环中的传播速度为

$$c_p = \text{const} \sqrt{M_p / m} \quad (16)$$

由刚塑性理论模型分析得到式 (16) 的系数值为 $\sqrt{8}$ 。通过这一个例子, 想再一次强调的是, 量纲分析不但可以对于结构的塑性动力响应的模型实验及其实验结果分析具有指导意义, 而且对于有关理论分析也必将大有益处。

Reid 等对一端承受冲击载荷 (另一端为固支或自由) 的串联式圆环的动力响应也进行了实验研究, 指出环的变形和其中传播的结构冲击波 (structural shock wave) 有很大关系^[65, 66], 还讨论了固支端 (或自由端) 反射回的压缩或拉伸冲击波对环系变形的影响, 另外还讨论了圆环之间放置间隔平板对环系动力响应的影响。

像蜂窝材料一样, 在平面内紧密排列的许多圆环可以看成是一种多胞结构。圆环在平面上的排列形式主要有正方形排列 (SP) 和六角形密排 (HCP) 两种, 当使用同样尺寸的圆环时, HCP 系统的平均承载能力约为 SP 系统的 2 倍。另外, 英国 UMIST 的研究工作表明, 木材的动力行为同圆环系统、蜂窝材料有很多相似之处。这方面工作的启示是, 一方面要尽量利用我们对人造结构 (圆环系统、蜂窝等) 的知识来认识木材等自然材料的力学行为, 另一方面也要从对自然材料的深入了解中获得启发, 去设计和开发更先进的人造材料^[55]。

6 其它类型结构塑性动力响应的实验工作

随着高强材料的不断出现, 圆拱、刚架和旋转壳已经逐渐变成常见的工程结构形式。20 年来这类结构的动力行为问题引起了普遍注意。这类问题往往是几何非线性和物理非线性的, 解析解一般很难得到, 因此实验研究和数值计算就显得格外重要。

Bodner 和 Symonds (1979) 为了检验计及应变率效应在内的两种近似方法 (位移上限定理和模态近似方法) 在计算结构发生大变形时的有效性, 对低碳钢和钛质框架进行了均布和集中冲击载荷的实验研究, 实验结果和近似方法得到的估计结果对比表明, 二者符合得较好^[69]。周青、余同希和黄筑平 (1989) 对子弹冲击下的软钢直角刚架进行了实验研究, 并给出了模态解^[70]。文献 [71 ~ 79] 研究了各类框型、拱型和扁球壳承受不同类型冲击载荷作用下的塑性动力响应问题。其中文献 [78] 对 45 号钢圆柱子弹在刚架跨中点的冲击实验

表明，在动力响应中弹性部分占很大比重，采用刚塑性分析会高估结构的永久变形。对铝合金圆拱的冲击实验表明，拱的动力响应主要以弯曲变形为主，轴向变形可以忽略。

文献 [63] 除了对圆环进行了撞击实验外，还对如图 8 所示的结构进行了冲击实验。该结构由两块预弯成一定角度的软钢片组成，两片之间的夹角为 4° ，和圆环（第一类型结构，即对冲击速度不敏感）不同，该结构（被称为第二类型结构）对冲击速度敏感。这类结构的一个重要特征是，在输入冲击能量一定的情况下，高的冲击速度对应的是较小的最终变形。Tam 和 Calladine (1991) 进而对第二类结构的实验表明^[80]，该结构的动力响应分为两相，第一相里在试件中产生了很大的轴向力，这就象两个坚实物体的相撞，两物体相互压缩并消耗一定能量，第一相中撞击能量的消耗和撞击物及试件的质量比有关，所以说在第一相中惯性效应起主宰作用；第二相的能量主要消耗在塑性铰的相对转动上，因此在该相中对应变率更为敏感（为了比较惯性和应变率效应的影响，在实验中他们分别采用了钢和铝试件）。最近，Karagiozova 和 Jones 应用计及惯性和材料的应变率效应的简单弹塑性模型对 Tam 和 Calladine (1991) 的模型进行了分析，得到了 II 类结构包括弹性卸载和塑性重加载在内的整个和时间相关的变形过程^[81]。苏先樾、余同希和 Reid 则应用弹塑性结构模型处理了该类结构不同部分的加、卸载历史，得到了撞击力随时间变化的完整图像，结论是在结构参数相同的情况下，即使不计及应变率效应，动态峰值载荷也比准静态峰值载荷要高出一倍左右。因此，峰值载荷的这一明显差异体现出的是结构的惯性效应。根据这一结果，他们建议将第二类结构改称“惯性敏感结构”^[82]。和图 8 的结构相类似，Grzebieta 和 Murray (1986) 对含有一初始缺陷的钢板（如图 9 所示， 2° ）的能量吸收能力进行了实验研究^[83]，分析了惯性效应和应变率效应的影响。

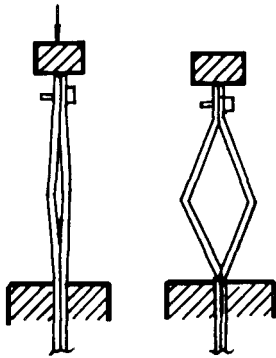


图 8 惯性敏感结构示意图

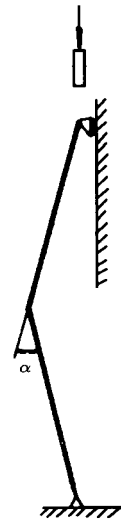


图 9 含初始缺陷的钢板的动力行为实验

7 结束语

本文和笔者的文献 [3] 在内容上有所不同，文献 [3] 侧重面在结构的塑性动力失效上，而本文则旨在论述结构塑性动力响应有关实验研究的一些进展情况。本文首先论述了量纲分析和相似方法在结构塑性动力响应中的应用，介绍了进行模型实验所应遵循的一些原

则,总结了理论分析和实验中常用的一些无量纲数,并强调了这些相似准数在理论分析和实验研究中的重要作用.指出,量纲分析和相似方法将在复杂结构的塑性动力失效研究中发挥应有的重要指导作用,这些指导作用将体现在设计模化实验(特别是有关尺度率的实验)、对实验结果进行深入分析、选准控制参量以及发现新的失效机理等方面.

由于考虑到塑性动力响应中一般考虑两种理想化载荷:(1)给定结构初速;(2)矩形脉冲载荷.对应于前一种载荷常用的无量纲相似准数为Johnson的损伤数,对于上述第二种载荷而言,损伤数可以由外载所施加冲量的形式给出.事实上,设外载施加的矩形脉冲载荷的单位冲量为 I 时(对梁而言是单位长度、对板和壳而言是单位中面面积),设梁、板或壳厚为 h 时,则有下列关系式

$$dn = \frac{I^2}{y H^2} \quad (17)$$

应该指出的是,上述只有当载荷值充分大且载荷时间趋于零时才有意义^[30].另外,本文还指出当结构的塑性动力响应实验有材料的断裂发生时,就必然出现一个新的相似准数,这就是本文在第二节中所提到的 I_r 数, Jones多次强调了研究动力响应实验中发生“断裂的韧-脆转变”的重要性(如可参阅[28]),最近赵亚溥(1996)指出,事实上正是相似准数 I_r 数表征了断裂的韧脆转变^[6, 84],也就是说当裂纹顶端的塑性区尺寸和含裂纹结构的特征尺寸之比达到某一临界值时,断裂形式将发生韧脆转变.

另外,还简要总结了有关冲击载荷下梁、板、环等构件塑性动力响应的实验研究进展.

参 考 文 献

- 1 王仁. 在冲击载荷作用下结构塑性分析近况. 中国力学学会第一次极限分析及塑性理论学术讨论会论文选集, 北京: 科学出版社, 1965. 1 ~ 22
- 2 杨嘉陵, 余同希, 王仁. 结构塑性动力响应当前的研究进展和难点. 力学进展, 1993, 23 (1): 23 ~ 33
- 3 赵亚溥, 余同希, 方竞. 关于结构塑性动力失效若干问题的研究进展. 力学进展, 1995, 25 (4): 549 ~ 561
- 4 余同希, 陈裕泽, 赵亚溥. 结构在强冲击载荷下的动力失效. 现代力学与科技进步——庆祝中国力学学会成立40周年大会论文集, 北京: 1997
- 5 Baker W E, Westine P S. Similarity Methods in Engineering Dynamics. Hayden Book Company, 1973
- 6 赵亚溥. 冲击载荷作用下裂纹动态起始问题的研究. 中国科学院力学研究所博士后出站报告, 1996年8月
- 7 赵亚溥. 冲击载荷下结构塑性动力响应与失效的若干问题研究. 北京大学力学系博士论文, 1994年5月
- 8 Zhao Y P (赵亚溥), Fang J (方竞), Yu T X (余同希). Experimental and theoretical investigations into notched circular rings under impact loading. *DYMAT Journal*, 1995, 2: 135 ~ 142
- 9 Zhao Yr-Pu, Fang J. Experimental investigation into the dynamic behavior of circular rings with arc-shaped supports. *Int J Pres Ves & Piping*, 1995, 62: 83 ~ 85
- 10 Duwez P E, Clark D S, Bohnenblust H F. The behavior of long beams under impact loading. *ASME J Appl Mech*, 1950, 17: 27 ~ 44
- 11 Johnson W, et al., Mechanics of high speed impact at normal incidence between plasticine long rods and plates. *J Mech Phys Solids*, 1981, 29: 413 ~ 445
- 12 马晓青, 周兰庭, 隋树元. 用橡皮泥模拟高速碰撞的实验研究. 兵工学报, 1989: 50 ~ 54
- 13 赵亚溥. 断裂力学中的相似方法及尺度率. 力学与实践, 1995, 17: 11 ~ 16, 80
- 14 赵亚溥. 断裂力学中的相似方法. 力学进展 (已录用待发表)
- 15 Wilson J F. Similitude experiments on projectile-induced fracture of monolithic glass. *Int J Impact Engng*, 1996, 18: 417 ~ 424
- 16 Barenblatt G I. Dimensional Analysis. Gordon and Breach Science Publishers, 1989
- 17 Wen H M, Jones N, Experimental investigation of the scaling laws for metal plates struck by large masses. *Int J Impact Engng*, 1993, 13: 485 ~ 505
- 18 Shu D, Stronge W J, Yu T X. Oblique impact at the tip of a cantilever. *Int J Impact Engng*, 1992, 12: 37 ~ 47

- 19 Menkes S B, Opat H J. Broken beams. *Exp Mech*, 1993, 13: 480 ~ 486
- 20 Mentel T J. The plastic deformation due to impact of a cantilever beam with an attached tip mass. *ASME J Appl Mech*, 1985, 25: 515 ~ 524
- 21 Hashmi S J, Al-Hassani S T S, Johnson W. Dynamic plastic deformation of rings under impulsive load. *Int J Mech Sci*, 1972, 14: 823 ~ 841
- 22 Fang J, Zhao Y P, Qi J. On interaction of flexural wave with edge cracks of cantilever beam under impact load. Proc of 1993 SEM "50th Anniv." Spring Conf on Exp Mech, 1993. 786 ~ 795
- 23 赵亚溥. 裂纹动态起始问题的研究进展. *力学进展*, 1996, 26: 362 ~ 378
- 24 Al-Hassani S T S, Hashmi M S J. Large-deformation response of deep circular arches to radial magnetomotive forces. *J Mech Eng Sci*, 1978, 20: 335 ~ 343
- 25 Kolsky H, Rush P, Symonds P S. Some experimental observations of anomalous response of fully clamped beams. *Int J Impact Engng*, 1991, 11: 445 ~ 456
- 26 Pakes E W. The permanent deformation of a cantilever struck transversely at its tip. *Proc R Soc, Series A*, 1955, 228: 462
- 27 杨桂通, 熊祝华. 塑性动力学. 北京: 清华大学出版社, 1984
- 28 Jones N. Structural impact. Cambridge University Press: 1989. 中文版: 诺曼·琼斯. 结构冲击 (蒋平译). 成都: 四川教育出版社, 1994
- 29 Stronge W J, Yu T X. Dynamic Models for Structural Plasticity, Springer-Verlag, London: 1993
- 30 Zhao Y P, Yu T X, Fang J. Large dynamic plastic deflection of a simply supported beam subjected to rectangular pressure pulse. *Archive of Applied Mechanics*, 1994, 64: 223 ~ 232
- 31 Zhao Ya-Pu, Yu T X, Fang J. Saturation impulses for dynamically loaded structures with finite deflections, *Structural Engineering and Mechanics*, 1995, 3: 583 ~ 592
- 32 Bodner S R, Symonds P S. Experimental and theoretical investigation of the plastic deformation of cantilever beams subjected to impulsive loading. *ASME J Appl Mech*, 1962, 29 (4): 719 ~ 728
- 33 Bodner S R, Spiers W G. Dynamic plasticity experiments on aluminum cantilever beams at elevated temperature. *J Mech Phys Solids*, 1963, 11: 65 ~ 77
- 34 Al-Hassani S T S, Johnson W. The magnetomotive loading of cantilevers, beams and frames. *Int J Mech Sci*, 1970, 12: 711 ~ 722
- 35 Al-Hassani S T S, Johnson W, Vickers G W. Dynamically loaded variable thickness cantilevers using a magnetomotive impulse. *Int J Mech Sci*, 1973, 15: 987 ~ 992
- 36 Petroski H J, Verma A. Plastic response of cantilevers with stable cracks. *ASCE J Eng Mech*, 1985, 111 (7): 839 ~ 853
- 37 Hashmi M S, Al-Hassani S T S. Large deformation response of tapering cross-section cantilevers to impulsive tip load: Experiments and theoretical solution using numerical technique. Applied Solid Mechanics-1. Tooth A S, Spence J eds, Elsevier Applied Science Publishers, 1986: 223 ~ 224
- 38 张铁光等. 端部受冲击作用的悬臂曲梁的实验研究. *固体力学学报*, 1989: 24 ~ 33
- 39 Parkes E W. The permanent deformation of an encastre beam struck transversely at any point in its span. *Proc of the Institution of Civil Engineers*, 1958, 10: 277 ~ 303
- 40 Humphreys J S. Plastic deformation of impulsively loaded straight clamped beams. *ASME J Appl Mech*, 1965, 32: 7 ~ 10
- 41 Florence A L, Firth R D. Rigid-plastic beams under uniformly distributed impulses. *ASME J Appl Mech*, 1965, 32: 481 ~ 488
- 42 Symonds P S, Jones N. Impulsive loading of fully clamped beams with finite plastic deflections and strain-rate sensitivity. *Int J Mech Sci*, 1972, 14: 49 ~ 69
- 43 Forrestal M J, Wesenberg D L. Elastic-plastic response of simply supported 1018 steel beams to impulse loads, *ASME J Appl Mech*, 1977, 44: 779 ~ 780
- 44 Reid S R, Hendry S R. Response of fluid-backed metal beams to central impact. in: Elsevier Applied Science Publishers, Structural Impact and Crashworthiness Vol. 2, Morton J ed, 1984: 411 ~ 426
- 45 Nonaka T. Some interaction effects in a problem of plastic beam dynamics, part 1: Interaction analysis of rigid, perfectly plastic beam; part 2: Analysis of a structure as a system of one degree of freedom; part 3: Experimental study. *ASME J Appl Mech*, 1967, 34: 623 ~ 643
- 46 Wegener R B, Martin J B. Predictions of permanent deformation of impulsively loaded simply supported square tube steel beam. *Int J Mech Sci*, 1985, 27: 55 ~ 69
- 47 赵隆茂, 李庆明, 杨桂通. 方管铝合金梁受子弹撞击时动力响应的实验研究. *爆炸与冲击*, 1993, 13: 313 ~ 319
- 48 Li Q M, Zhao L M, Yang G T. Experimental results on the counter-intuitive behavior of thin clamped beam subjected to projectile impact. *Int J Impact Engng*, 1991, 11: 341 ~ 348

- 49 杨嘉陵, 余同希, 张元. 含缺陷的固支梁受冲击载荷作用的实验研究. *爆炸与冲击*, 1992, 12: 22 ~ 29
- 50 Woodward R L, Baxter B J. Experiments on the impact bending of continuous and notched steel beams. *Int J Impact Engng*, 1986, 4: 57 ~ 68
- 51 Yu T X, Yang J L, Reid S R. Dynamic behaviour of elastic-plastic free-free beams subjected to impulsive loading. *Int J Solids Structures*, 1996, 33: 2659 ~ 2680
- 52 Jones N, Liu T G, Zheng J J, Shen W Q. Clamped beam grillages struck transversely by a mass at the centre. *Int J Impact Engng*, 1991, 11: 379 ~ 399
- 53 Symonds P S, Mental T. Impulsive loading of plastic beams with axial constraints. *J Mech Phy Solids*, 1958, 6: 186
- 54 Symonds P S, Yu T X. Counterintuitive behavior in a problem of elastic-plastic beam dynamics. *ASME J Appl Mech*, 1985, 52: 517 ~ 522
- 55 余同希, 陈大年, 杨嘉陵. UMIST 对冲击和爆炸的力学问题的研究. 见: 余同希主编, 英国应用力学前沿研究课题选介. 北京: 科学出版社, 1996
- 56 Nurick G N, Martin J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-A review, part 2: experimental studies. *Int J Impact Engng*, 1989, 8: 171 ~ 186
- 57 Houlston R, Slater J E. Structural response of panels subjected to shock loading. *55th Shock & Vibration Bull*, part 2, 1985: 149 ~ 163
- 58 Slater J E, et al. Air blast studies on naval steel panels: final report, task DMEM-53, Defence Research Establishment Suffield Report No. 505, Ralston, Alberta, Canada: 1990
- 59 Schubak R B, et al. Rigid-plastic modelling of blast-loaded stiffened plates- Part 1: one-way stiffened plates; Part 2: partial end fixity, rate effects and two-way stiffened plates. *Int J Mech Sci*, 1993, 35: 289 ~ 324
- 60 刘土光, 胡要武, 郑际嘉. 固支加筋方板在爆炸载荷作用下的刚塑性动力响应分析. *爆炸与冲击*, 1994, 14: 55 ~ 65
- 61 Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review. *Int J Impact Engng*, 1996, 18: 141 ~ 230
- 62 Reddy T Y. Ph D Thesis, University of Cambridge, England, 1978
- 63 Calladine C R, England R W. Strain-rate and inertia effects in the collapse of two types of energy-absorbing structure. *Int J Mech Sci*, 1984, 26: 689 ~ 701
- 64 Silva-Gomes J F, Al-Hassani S T S, Johnson W. The plastic extension of a chain of rings due to an axial impact load. *Int J Mech Sci*, 1978, 20: 529 ~ 538
- 65 Reid S R, Reddy T Y. Experimental investigation of inertia effects in one-dimensional metal ring systems subjected to end impact-I. Fixed-ended systems. *Int J Impact Engng*, 1983, 1: 85 ~ 106
- 66 Reddy T Y, Reid S R, Barr B. Experimental investigation of inertia effects in one-dimensional metal ring systems subjected to end impact-II. Free-ended systems. *Int J Impact Engng*, 1991, 11: 463 ~ 480
- 67 Veillette G R, Carney III J F. Collapse of braced tubes under impact loads. *Int J Impact Engng*, 1988, 7: 125 ~ 138
- 68 Zhao Ya-Pu, Fang J, Yu T X. Notch sensitivity of circular rings subjected to impact loading. *Int J Pres Ves & Piping*, 1996, 67: 257 ~ 261
- 69 Bodner S R, Symonds P S. Experiments on dynamic plastic loading of frames. *Int J Solids Structures*, 1979, 15: 1 ~ 13
- 70 周青, 余同希, 黄筑平. 直角刚架在撞击作用下的塑性大变形响应. *爆炸与冲击*, 1989, 9: 120 ~ 129
- 71 Hashmi S J, Al-Hassani S T S, Johnson W. Large deflexion elastic-plastic response of certain structures to impulsive loading: Numerical solution and experimental results. *Int J Mech Sci*, 1972, 14: 843 ~ 860
- 72 Hashmi S J, Al-Hassani S T S. Large deflexion response of square frames to distributed impulsive loading. *Int J Mech Sci*, 1975, 17: 513 ~ 523
- 73 Lindberg B, Pedersen B. Plastic deformation of impact loaded frames. *Int J Impact Engng*, 1987, 6: 101 ~ 108
- 74 Ishiyama S I, et al. Impact response of thin-walled plane frame structures. *Int J Impact Engng*, 1983, 1: 227 ~ 247
- 75 Ishiyama S I, et al. Impact response of thin-walled frame structures. *Int J Impact Engng*, 1988, 7: 197 ~ 212
- 76 Cheung M C, Babcock Jr C D. Stability of a clamped shallow arch subjected to impulsive loading. *AIAA Journal*, 1970, 8: 1434 ~ 1439
- 77 Al-Hassani S T S, Hashmi S J. Large-deformation response of deep circular arches to radial magnetomotive forces. *J Mech Eng Sci*, 1978, 20: 335 ~ 343
- 78 杨桂通. 结构在冲击载荷下的实验研究. *力学学报*, 1990, 22: 374 ~ 379
- 79 李庆明, 赵隆茂. 固支浅圆拱在子弹撞击下的实验研究. *爆炸与冲击*, 1991, 11: 238 ~ 243
- 80 Tam L L, Calladine C R. Inertia and strain-rate effects in a simple plate-structure under impact loading. *Int J Impact Engng*, 1991, 11: 349 ~ 377
- 81 Karagiozova D, Jones N. A note on the inertia and strain-rate effects in the Tam and Calladine model. *Int J Impact Engng*,

- 1995, 16: 637 ~ 649
- 82 Su X Y (苏先樾), Yu T X, Reid S R. Inertia-sensitive impact energy-absorbing structures, part I: effects of inertia and elasticity; Part II: effects of strain rate. *Int J Impact Engng*, 1995, 16: 651 ~ 689
- 83 Grzebieta R H, Murray N W. Energy absorption of an initially imperfect strut subjected to an impact load. *Int J Impact Engng*, 1986, 4: 147 ~ 159
- 84 Zhao Ya-Pu. Irwin number and ductile-brittle fracture transition. *International Journal of Fracture*, 1996, 75: R17 ~ R21

A BRIEF SURVEY ON THE EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC PLASTIC RESPONSE OF STRUCTURES

Zhao Yapu

Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Fan Jing

Department of Mechanics and Engineering Sciences, Peking University, Beijing 10087

Yu Tongxi (T. X. Yu)

Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology,
Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong

Abstract This paper firstly discusses and summarizes the similarity methods in the dynamic plastic response of structures and the principles that relevant modeling experiments should obey. Then a brief survey is presented on the advances of the experimental studies on the dynamic plastic response of various structures loaded impulsively.

Key words structure, impulsive loading, dynamic plastic response, experimental study; similarity method, nondimensional number (similarity parameter)