文章编号：1000-5773(2013)02-0153-09

动态拉伸断裂的物理判据研究*

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实验室，四川绵阳　621900）

摘要：介绍了动态拉伸断裂“物理判据”的基本内涵，基本思想，实验依据和实验验证。基于对动态拉伸断裂细微观物理机制和过程特征的认识，建立了损伤度函数模型和逾渗软化函数，提出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)，描述了断裂事件由缓慢演化过渡到特征临界状态、再到灾变断裂的演化规律。该物理判据是动态拉伸断裂的一种物理约束，表征了材料失效破坏与损伤演化的内禀特性，为预测复杂加载应力和复杂几何构型的动态拉伸断裂问题提供了可能性。

关键词：拉伸断裂；损伤演化；物理判据

中图分类号：O521.2；O347.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

材料强度的实验和理论研究是一个很独特和奇妙的研究主题，它的命题很简单，但是问题很复杂[1]。材料强度在物理学、力学、材料科学、地球科学中具有广泛的研究基础和应用。俞茂宏于2004年在《力学进展》中撰文“强度理论百年总结”[1]，认为自1900年著名的Mohr-Coulomb强度理论开始，材料强度的实验和理论研究迄今历经了百年历史，甚至可以追溯到更早，例如：Vinci(1452年～1519年)认为铁丝的强度与它的长度有关系；Galilei（1564年～1642年）认为，当临界力达到一定值时，材料发生破坏。

强冲击载荷作用下材料的强度与断裂是武器物理和武器工程中关注的重要基础问题，重点研究“两类动态断裂”，即壳体的膨胀断裂和层裂[2]。自20世纪70年代末起，在经福谦院士的带领下，中国工程物理研究院流体物理研究所围绕“两类动态断裂”问题开展了深入系统的研究工作，完成了包括“金属动态延性破坏的损伤度函数模型”、“延性金属动态拉伸断裂及其临界损伤度”，及“内爆加载下钢圆管的变形、损伤及层裂”等课题研究，对损伤断裂的演化过程和物理机理获得了诸多认识，促进了物理建模、实验数据解读和计算机模拟预测等工作，同时也培养了一批实验和理论兼备的青年学子。

本文概述了经福谦院士及其课题组在损伤断裂方面的研究工作，从中反映他在该领域近30年的研究思想、研究内容和主要研究成果。

2　物理判据之基本内涵

层裂是“两类动态断裂”的一个重要问题。层裂作为冲击载荷作用下材料动态拉伸断裂的一种失效破坏形式，很早就为人们所了解。1914年Hopkinson[3]利用硝化棉炸药和一定厚度的软钢板进行接触爆炸，在钢板的背面首次观察到高速飞出的裂片，即层裂片。但是，早期的层裂研究主要侧重于“力学判据”的建立，例如：以“层裂强度”为基础的最大拉伸应力判据[4]，以及拉伸应力率判据[5]和拉伸应力梯度

* **收稿日期**：2013-03-13

基金项目：国防基础科研计划资助项目(B1520110003)；中国工程物理研究院科学技术基金重点项目(2011A0201002)

作者简介：贺红亮(1963—)，男，研究员，博士生导师，主要从事高压材料科学与力学研究. E-mail：honglianghe@caep.ac.cn

判据[6]等。然而,大量实验结果表明,层裂强度不是一个材料特性参数,它是变化的,在不同的冲击波加载条件下,甚至不同的试件几何构型中,层裂强度的数值并不相同。因此,这样的"力学判据"很难应用于预测像武器系统那样的复杂应力加载和复杂几何构型的层裂破坏问题。

自 20 世纪 60 年代末以来,很多学者致力于"物理判据"的建立,试图从物理学的范畴来研究层裂破坏问题,其中 1972 年 Davison 和 Stevens[7]基于连续介质理论提出的"损伤度"概念是层裂认识上的重要突破。根据"损伤度"的物理思想,层裂是由于材料内部微细观结构的演变,引起微损伤成核、长大以及贯通,最后导致材料发生灾变式断裂的一种损伤演化过程。在"损伤度"物理概念的基础上,层裂研究相关的实验方法、物理建模以及数值模拟都获得了长足发展,代表性的研究成果可以参阅 Meyers[8]、Curran[9]、Kanel[10]、Tonks[11]和 Antoun[12]等人或研究小组的文章和综述。国内白以龙[13]、陈大年[14]、李永池[15]、黄筑平[16]等人也对层裂的微细观损伤演化进行了深入研究,取得了许多新的认识。

与"力学判据"不同,"物理判据"试图从材料内部的微细观结构演化程度来判断材料的失效破坏状态,因此为科学地预测复杂加载应力和复杂几何构型的层裂问题提供了可能性。然而,真正作为一种可以使用的"物理判据",在层裂破坏研究中还需要回答两个重要的基本问题:(1) 对于给定的试件材料,是否存在一个普适的物理量或判据,它表征的是材料损伤的内禀特性,而与外界载荷条件无关;(2) 考虑到武器结构通常是非平面几何构型,那么,从简单平面样品层裂实验得到的物理判据是否也适用于预测非平面几何构型的动态层裂问题。

针对这两个基本问题,经福谦院士致力于层裂破坏"物理判据"的建立和研究。1992 年,他的学生封加波博士在学位论文中提出了金属动态延性破坏的损伤度函数模型[17],建立了损伤度函数演化方程。之后,在王永刚博士的研究工作中又提出了两个损伤特征物理量[18],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。经过对不同加载应力幅度、不同拉伸应变率和不同试件构型(平面/柱面)等实验验证,初步表明:上述两个特征临界损伤度可以视为一种表征材料拉伸型动态断裂性质的内禀物理量,对延性金属动态拉伸断裂行为具有较好的描述和预测能力,为构建"物理判据"提供了重要的认知基础。

3 物理判据之基本思想和实验依据

3.1 成核、长大、贯通

如图 1 所示,材料在动态拉伸作用下是如何断裂的?基于损伤演化的概念[7]和 NAG 模型[10],延性金属材料的层裂包含微孔洞的成核、长大、贯通(连通或聚集)等主要物理力学过程。

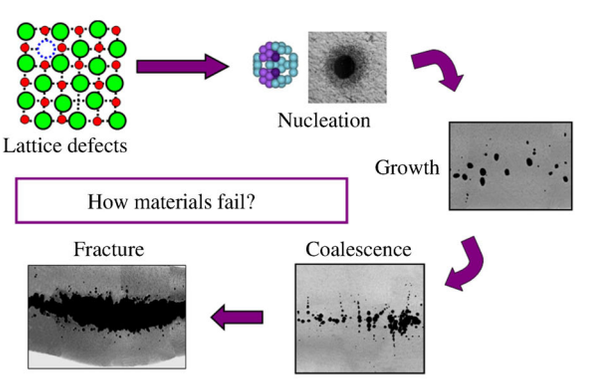


图 1 动态拉伸断裂主要物理过程(成核、长大和贯通)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the main dynamic process in tensile fracture: Nucleation, growth and coalescence

微孔洞的成核是损伤演化过程中的第一个阶段。在延性金属材料中,微孔洞主要成核于缺陷、第二相粒子、杂质、晶界处及沉淀物处。通常认为,这些潜在的成核点在应力作用下会产生应力集中,出现塑性流动局部化,从而促成微孔洞的成核。然而,从微观尺度的观点来看,微孔洞的成核过程目前还没有得到完全的理解。

微孔洞的长大是成核过程的延续,是延性材料损伤演化过程中的一个重要阶段。微孔洞的长大机制主要有扩散机制和塑性流动机制两种。一旦孔洞形成,孔洞周围随即发生高度局部化的塑性流动,并引起局部的温升,周围基体材料的塑性变形供给了孔洞长大需要的能量。孔洞长大过程的影响因素有惯性效应、温度效应和黏性效应等。目前

孔洞增长的研究主要集中在与宏观力学量的联系上，这对于建立连续介质损伤断裂模型有直接作用，但是对于获得孔洞增长与宏观力学状态量关系的物理机制还不够，需要进一步理解。

微孔洞的连通是损伤从细观尺度到宏观破坏的最后阶段，也是人们认识最少的一个阶段。如果孔洞之间的距离足够近，它们将结合在一起形成微裂纹，这个过程不断累积，在微裂纹密度足够高的区域，最终导致材料完全失效，即宏观断裂。这个阶段的现象和物理机制十分复杂。

为了深入认识微孔洞的成核、长大和贯通的物理机制，课题组开展了系列微细观的实验和计算模拟。以面心立方(fcc)体系的铜、铝金属为例，罗晋等[19]开展了单晶铜在动态加载下孔洞增长的分子动力学研究，祝文军等[20]研究了单晶铜的不同晶体取向对纳米孔洞生长的影响，邓小良等[21]讨论了冲击加载下孔洞贯通的微观机理，崔新林等[22]分析了冲击加载下铝中孔洞长大的微观机理，祁美兰等[23]进行了动态冲击下纯铝中微损伤演化的计算研究，王永刚等[24]基于单孔洞近似对高纯铝层裂开展了数值模拟分析。这些研究理解了孔洞生长的位错机制，了解了影响孔洞长大的主要因素，为把握损伤演化的物理图像和机制提供了新认识。

3.2　两个损伤特征物理量

Curran 等人的 NAG 模型[10]提出了近 40 年，但是使用的人很少，究其原因，其中之一是 NAG 模型仅给出了孔洞生长的基本模型，对于孔洞生长的过程没有细致分析，尤其是后期的贯通阶段，孔洞如何生长、怎么描述，都是缺乏的。

在分析前人实验方法和模型的基础上，课题组提出了一种“自由面速度与样品回收”联合测量的研究方法，其中解决的关键问题是：建立了一套既能进行自由面速度测量，又能兼顾样品“软回收”的实验装置和技术，解决了“测量不能回收，回收不能测量”的矛盾。利用在同一发实验中的自由面速度剖面和样品微损伤统计，联合界定宏观动态响应与微结构损伤演化之间的对应关系，系统地认识延性金属动态拉伸破坏的损伤演化规律，尤其是对损伤演化后期到断裂灾变之前的断裂行为获得深入的物理认识。

以高纯铝为例，课题组开展了系列实验和计算分析，提出并引入了“拉伸冲量”的概念和定义，在不同加载应力的自由面速度剖面测量中，定义样品经受的拉伸冲量为拉伸应力与拉伸时间的乘积。在回收的样品中，采用微孔洞统计的计数方法，获得损伤分布和最大损伤度的数值。实验结果如图 2 所示，给出了高纯铝最大损伤度(D_{max})随拉伸冲量(Q)的变化关系[25-26]。

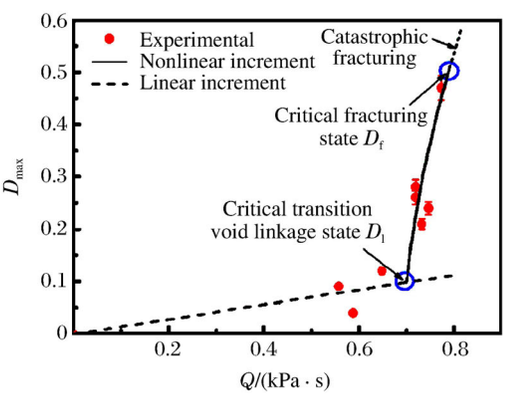


图 2　高纯铝层裂实验中，损伤演化的两种不同增长模式和临界转变[25-26]

Fig. 2　Schematic diagram of two-stage damage evolution and critical transition, measured by the spallation of high-purity aluminum[25-26]

图 2 给出的损伤演化规律与 NAG 模型有很大不同，充分反映了拉伸型动态损伤演化的物理特征，即：损伤演化存在两种显著不同的增长模式，初始损伤期的线性增长模式和后期损伤的幂指数增长模式，两种模式的过渡具有明显的临界特征。在此认识的基础上，课题组将损伤演化的全过程，通过图 3 给予了全新的诠释，提出了两个损伤特征物理量[18]，即聚集临界损伤度(D_l)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。如图 3 所示，从初始损伤(D_0)开始，损伤以线性方式增长，直到聚集临界损伤度(D_l)；然后呈现快速增长模式，以非线性、幂指数方式，直到断裂临界损伤度(D_f)；之后的损伤演化发展是一种灾变形式，速度非常快，以至目前常规的测试方法和样品回收都无法“观测”或者“冻结”该过程的损伤演化，最终材料发生断裂，损伤度增长到 $D=1.0$。

3.3　损伤度函数模型和逾渗软化函数

在封加波博士的论文[17,27]中，建立了延性金属动态拉伸断裂的损伤度函数模型，简要说明如下。

假设一受损伤材料的宏观微元体积为 V_m，从细观的层次上看，微元 V_m 中含有大量的具有一定尺寸分布的微损伤(微孔洞)，这个微损伤系统的演化特征需要用统计来描述。在理想微损伤系统的确定性扩展模型近似下，此微损伤系统可由一维相空间$\{V_m\}$描述，记 $n(V,t,\sigma)$为一维相空间中数密度函数，即 $n(V,t,\sigma)\mathrm{d}V$表示 t 时刻微元 V_m 中体积在 $V\sim V+\mathrm{d}V$ 范围内的孔洞数。材料的损伤采用宏观损伤函数度量，定义一般形式的损伤度函数为

$$D_m(t,\sigma)=\int_0^{\infty} n(V,t,\sigma)V^m\mathrm{d}V \tag{1}$$

考虑 $m=1$ 的情况，定义损伤度函数 $D(x,t,\sigma)$为

$$D(x,t,\sigma)=V_V(x,t,\sigma)/V(x,t,\sigma) \tag{2}$$

其中

$$V_V(x,t,\sigma)=\int_0^{\infty} n(V,t,\sigma)V\mathrm{d}V \tag{3}$$

可见，$V_V(x,t,\sigma)$为微孔洞的总体效应，而损伤度函数实质上是孔洞的相对体积，表征了 t 时刻在 x 位置处材料受损伤的程度。

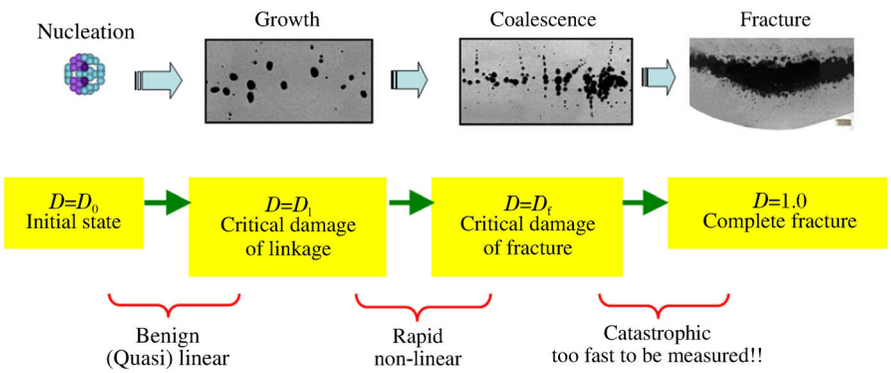


图 3 损伤演化的全过程示意图(损伤从初始状态($D=D_0$)，以线性方式缓慢增长到聚集临界损伤度($D=D_l$)，然后以非线性、幂指数方式快速增长，直到断裂临界损伤度($D=D_f$)。最后过渡到完全断裂($D=1.0$)是一种灾变演化，速度非常快，目前仍无法“观测”或者“冻结”该过程的损伤演化)

Fig. 3 Schematic diagram of the damage evolution (Damage slowly increases in a linear manner from the initial state ($D=D_0$) to the void linkage state ($D=D_l$), then changes to a nonlinear growth and rapidly approaches to the critical fracturing state ($D=D_f$), and a final step catastrophically leads to the complete fracture state ($D=1.0$))

对于一维理想微损伤系统，白以龙等[13]给出的演化方程为

$$\frac{\partial n}{\partial t}+\frac{\partial(n\dot{V})}{\partial V}=n_N \tag{4}$$

式中：$\dot{V}$ 是微孔洞的扩展速率，n_N 是微孔洞的成核率。根据(3)式和(4)式得

$$\frac{\partial V_V}{\partial t}=\int_0^{\infty} V\frac{\partial n}{\partial t}\,\mathrm{d}V=-\int_0^{\infty} V\frac{\partial(n\dot{V})}{\partial V}\mathrm{d}V+\int_0^{\infty} Vn_N\mathrm{d}V \tag{5}$$

把 Griffith-Orowan 裂纹扩展的能量观点应用于微孔洞长大的动力学过程，在忽略孔洞成核效应和基体材料不可压近似条件下，封加波给出的损伤度函数演化方程为[17,27]

$$\frac{\partial D}{\partial t}=\frac{(1-D)D(\sigma_s^2-\sigma_0^2)}{4B\lambda/(3c)} \tag{6}$$

式中：σ_s 为基体材料在拉伸状态下的应力，σ_0 为孔洞长大的阈值应力，B 为基体材料的体模量，λ 为表面功，c 为基体介质的体积声速。

(6)式的损伤演化方程给出了微损伤随时间渐变的演化过程，但是没有涉及损伤度发展后期微孔洞聚集的物理过程。当损伤度发展到一定程度，微孔洞之间将发生强烈的聚集效应，导致损伤度发展速率突然增大，以致材料发生灾变式断裂。从物理本质上讲，微孔洞之间的相互作用是通过微孔洞周围介质的塑性变形区交互作用实现的，微孔洞的聚集使材料本构特性软化能力加强，微孔洞的聚集过程虽然发生在一瞬间，但对整个动态拉伸断裂过程的细致描述的影响是非常重要的。

针对微孔洞聚集引起的材料软化问题，王永刚[18]通过逾渗理论提出了一个软化函数，称为逾渗软化函数。在材料损伤演化过程中，损伤度 D 模拟于逾渗理论中的占据率 P。基于材料承受应力和材料强度随损伤度快速增长而快速下降的规律，构建了逾渗软化函数(Percolation-Softening Function，简写为 P-S 函数)，简记为 F_{PS}，用于描述损伤度发展后期由于微孔洞聚集而导致材料快速软化的过程，即

$$F_{PS}(D)=1-\theta(D)=\begin{cases}1 & D<D_l\\ 1-k(D/D_l-1)^{\beta} & \beta>0,D_f\geqslant D\geqslant D_l\end{cases} \tag{7}$$

边界条件为

$$F_{PS}(D)=0,\quad D=D_f \tag{8}$$

式中：D_l 和 D_f 分别是图 3 中提出的两个损伤特征物理量。方程(7)的物理意义是：当损伤度 D 达到 D_l 时，微孔洞开始聚集，损伤演化速率突然增大，材料强度的软化速率也相应地加快，故 D_l 定义为微孔洞聚集临界损伤度，用它表征微孔洞之间开始聚集的临界点；D_f 则是由于微损伤聚集导致发生灾变式断裂时的临界点，定义为断裂临界损伤度。β 为逾渗特性相关的材料参数，根据三维分子动力学模拟结果和三维逾渗理论的结果，β 取值为 0.4；系数 k 表征 $F_{PS}(D)$ 的下降(软化)速率，即微孔洞聚集引起的损伤材料中应力和强度软化的速率。模型中有 3 个待定参数 D_l、D_f 和 k，根据边界条件，只有两个参数需要实验确定。例如，通过实验的自由面速度波形和损伤统计可以确定其中的 D_l 和 k。当取 $D_l=0.2$，k 分别为 1.0、0.8、0.6 时，$F_{PS}(D)$ 随 D 的变化曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看到，当 $D\leqslant D_l$ 时，损伤 $F_{PS}(D)=1$，演化主要是微孔洞独立长大阶段的贡献，这个阶段不考虑微孔洞聚集及其对材料软化的影响；当 $D_l<D<D_f$ 时，$0<F_{PS}(D)<1$，损伤演化考虑微孔洞聚集的贡献，对材料软化的影响十分明显；当 $D=D_f$ 时，$F_{PS}(D)=0$，在物理过程上可以理解为发生了灾变式的宏观断裂。

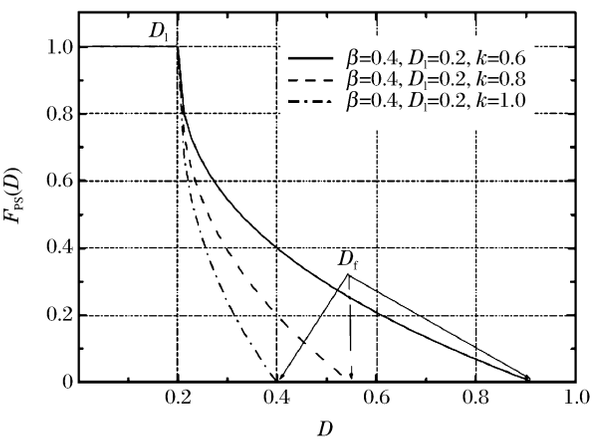


图 4　方程(7)逾渗软化函数 $F_{PS}(D)$ 随参数 β 和 k 的变化关系示意图[18,28]

Fig. 4　Schematic diagram of Eq. (7), that $F_{PS}(D)$ with the variation of β, and k[18,28]

方程(6)和方程(7)是本文中研究动态拉伸断裂之物理判据的主体，该判据在微细观层面上具有明确的损伤演化思想，在宏观层面上反映了损伤演化的主要特征，对损伤断裂的描述具有清晰的物理图像和明确的物理意义，是经福谦院士学术思想的一个重要体现。

3.4　物理判据的实验验证

验证一：高纯铝平板层裂实验。通过自由面速度测量和回收样品损伤统计，联合确定出微孔洞聚集临界损伤度 D_l 和断裂临界损伤度 D_f 分别为 0.11 和 0.51。在动态拉伸应力作用下，高纯铝内部的微损伤成核、长大表现为：当 $D<0.11$ 时，微孔洞孤立地长大，损伤度虽有增长，但微孔洞之间不发生聚集，损伤演化较缓慢；但是随着损伤度的进一步增长，当 $0.11<D<0.51$ 时，微孔洞开始相互聚集，材料内部的损伤迅速增大；微孔洞之间发生聚集以后，损伤度的演化速率将突然变大，进入一个损伤度快速发展的新阶段，当 $D>0.51$ 时，材料发生灾变式失稳断裂。这种损伤演化规律在计算模拟和实验结果中都得到了很好的验证。图 5 是两组高纯铝平板碰撞实验的对比结果。Shot 4 是未断裂样品，实验测

量的自由面速度剖面和回收样品的损伤分布表明，计算结果与实验结果的符合性很好。Shot 2 是完全断裂样品，自由面速度剖面的回跳和振荡，都能较好地模拟。

验证二：20 钢柱壳层裂实验。首先基于一维应变平面层裂实验及其模型计算，确定了 20 钢的损伤参数，然后将参数应用于 20 钢柱壳层裂实验的数值计算，与李雪梅等人[28]的实验结果进行了对比。图 6 显示了滑移爆轰波与钢柱壳的相互作用和压力分布云图，管内斜击波到达内壁自由面之后将反射一个稀疏波，该反射稀疏波与由爆轰产物传入钢管中的稀疏波相互作用之后，将在钢管中产生拉伸应力区，损伤度开始增长，经过一段时间后，柱壳发生层裂。随着爆轰波向上传播，层裂区也向上发展。李雪梅等[28]对软回收钢管的层裂面形貌进行了分析，发现无论是在层裂片的断口还是在残余壳体的断口，均可看到许多凹凸不平的毛刺，层裂面非常粗糙，部分区域还存在“藕断丝连”的现象。图 6 给出了钢柱壳发生层裂后的网格变形图，数值计算得到的层裂面也很不光滑，与实验结果一致，其内在原因是：钢管内的拉伸应力区范围比较宽，从而使微损伤在较大范围内萌生、演化并发展，最后许多微损伤相互贯通，导致了层裂面比较粗糙。对于 4.3 mm 的药厚，计算得到的初始层裂片平均厚度为 3.0 mm，实验值为 2.8 mm；对于 3.3 mm 的药厚，计算得到的初始层裂片平均厚度为 2.6 mm，实验值为 2.3 mm。其网格变形图中还显示出，在主层裂面之后的局部区域出现了二次层裂，在实验回收样品中也发现了二次层裂的迹象。以上计算结果与实验结果都是比较吻合的。

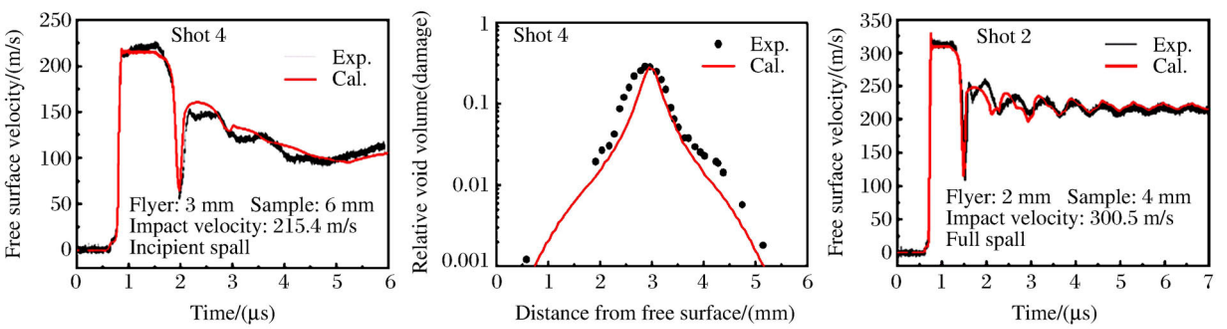


图 5 高纯铝平板层裂实验与计算对比结果[25-26]

Fig. 5 Comparison of experiment and simulation for spallation of high-purity aluminum plate impact[25-26]

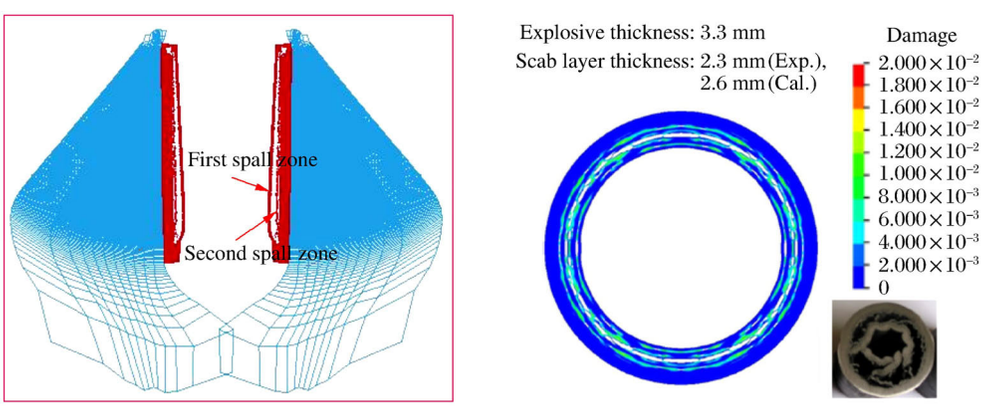


图 6 20 钢柱壳层裂实验与计算对比结果[18,29]

Fig. 6 Comparison of experiment and simulation for spallation of cylindrical steel tube loaded by the detonation[18,29]

目前的实验结果，主要包括自由面速度剖面和相应的损伤度分布，都在一定程度上检验了本文物理判据的普适性，而且经由一维应变平面层裂实验确定的损伤参数，也适用于描述柱壳构形复杂应力环境

下的动态拉伸断裂问题,初步证实了 D_1 和 D_f 两个损伤特征物理量可以当作材料断裂特性的内禀参数,用于描述复杂构型和复杂应力条件下材料动态拉伸断裂的行为。为了应用方便,最近王永刚将损伤度函数模型、逾渗软化函数和两个损伤特征物理量(D_1、D_f)耦合在一起,统称为 Critical Damage Evolution (CDE) 模型,研究结果发表在 Mechanics of Materials[29] 杂志。

4　物理判据研究之展望

高强动载荷下,金属材料的断裂失效是力学、物理学、材料科学的综合性课题。长期以来,由于对动态拉伸断裂的演化图像和物理过程缺乏深刻、系统的认识,因此在实验数据解读、理论模型建立和计算机模拟预测等方面均遇到了极大的困难。目前仍然缺少具有穿透力和足够时空分辨能力的 X 射线或高能粒子的测量诊断工具,是动态损伤断裂研究的一个技术瓶颈。未来,发展多种诊断技术相结合的实验方法是损伤断裂研究的突破口,目前虽不能很快建成原位、实时、时空分辨的动态诊断技术,但要探索从零维、一维到二维、三维的测量技术(即点到线、线到面、面到空间),发展从表面或窗口测量深入到材料内部空间的测量技术。目前可用的技术有:线 VISAR、多点 DPS、小角度散射(SAXS)、工业 CT 和孔洞统计方法等,以及材料分析手段,如扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)、透射电子显微镜(TEM)、X 射线衍射(XRD)分析等,将来更是可与同步辐射光源结合进行实验。预测材料强度、损伤和断裂,需要实验和建模的协同,期望最终能够对延性金属在冲击波高应变率下的损伤断裂行为进行预测,建立起对材料损伤引起的武器性能变化进行评估的能力。

5　结 束 语

经福谦院士长期致力于动态拉伸断裂的物理判据研究,本文是反映他一生学术研究的一个缩影,是编织的一份哀思以缅怀先生。从宏观、细观和微观的多尺度物理分析中,深入认识动态拉伸断裂失效的损伤演化机理,通过分解性实验和综合性验证实验,探讨建立具有充实物理内涵和能够预测延性金属材料动态损伤破坏的物理判据,仍然是损伤断裂研究拟回答的重要基础问题。近 10 年来,已有一批新的材料表征工具得到了应用,从现在到将来,已经进入 4 维时代(三维空间再加上时间分辨),有助于了解材料结构及演化的基本知识,这种发展将带来在空间和时间维度上实验和计算模拟的汇聚,回答“结构-加载-性能”的关系,设计和控制适合极端条件的材料。

感谢课题组的坚持与努力,感谢封加波、王永刚、祁美兰、李　平、祝文军、裴晓阳、胡昌明、范　端、罗　超、彭　辉、张友君、喻　寅、邓小良、罗　晋、崔新林的辛勤与创造。感谢陈大年、王礼立、周风华、罗胜年等教授的学术讨论。感谢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、国家自然科学基金、中国工程物理研究院科学技术发展基金、国防科技重点实验室基金和国防基础科研计划项目的资助。

References:

[1] Yu M H. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(4): 529-560. (in Chinese)
俞茂宏. 强度理论百年总结 [J]. 力学进展, 2004, 34(4): 529-560.

[2] Chen D N, Wang D S, Ma S H, et al. Two kinds of dynamic fracture[J]. Explosion and Shock Waves, 1987, 7(1): 27-33. (in Chinese)
陈大年, 王德生, 马松合, 等. 两类动态断裂 [J]. 爆炸与冲击, 1987, 7(1): 27-33.

[3] Hopkinson B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets [J]. Phil Trans Roy Soc, 1914, 213A(10): 437-456.

[4] Rinehart J S. Some quantitative data bearing on the scabbing of metals under explosive attack [J]. J Appl Phys, 1951, 22(5): 555-562.

[5] Whiteman P. Atomic weapons research establishment report, AWRESWAN-10/61 [R]. Aldermaston, UK: Part of Ministry of Defence, 1962.

[6] 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.

[7] Davison L, Stevens A L. Continuum measures of spall damage [J]. J Appl Phys, 1972, 43(3): 988-994.

[8] Meyers M A, Aimone C T. Dynamic fracture (spalling) of metals [J]. Prog Mater Sci, 1983, 28: 1-96.

[9] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solid [J]. Phys Rep, 1987, 147(5/6): 253-388.

[10] Kanel G I. Dynamic strength of materials [J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 1999, 22(11): 1011-1023.

[11] Tonks D L, Zurek A K, Thissell W R. Void coalescence model for ductile damage [C]//Shock Compression of Condensed Matter-2001. New York: American Institute of Physics, 2002: 611-614.

[12] Antoun T H, Seaman L, Curran D R, et al. Spall Fracture [M]. New York: Springer, 2003: 1-20.

[13] Bai Y L, Ke F J, Xia M F. Formulation of statistical evolution of microcracks in solids [J]. Chinese Journal of Theortical and Applied Mechanics, 1991, 23(3): 290-298. (in Chinese)
白以龙, 柯孚久, 夏蒙棼. 固体中微裂纹系统统计演化的基本描述 [J]. 力学学报, 1991, 23(3): 290-298.

[14] Chen D N, Yu Y Y, Yin Z H, et al. A new conceptual model to describe spallation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(2): 105-112. (in Chinese)
陈大年, 俞宇颖, 尹志华, 等. 一种新的概念性层裂模型 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(2): 105-112.

[15] Li Y C, Cao J D, Dong J, et al. Research of damage evolution equation and spallation criterion of 45# steel [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(2): 329-334. (in Chinese)
李永池, 曹结东, 董 杰, 等. 45# 钢的损伤演化方程和层裂准则研究 [J]. 力学季刊, 2006, 27(2): 329-334.

[16] Huang Z P, Yang L M, Pan K L. Dynamic damage and failure of materials [J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(4): 433-467. (in Chinese)
黄筑平, 杨黎明, 潘客麟. 材料的动态损伤和失效 [J]. 力学进展, 1993, 23(4): 433-467.

[17] Feng J B. Damage function models for the dynamic ductile fracture of metals [D]. Beijing: Beijing Science and Technology University, 1992. (in Chinese)
封加波. 金属动态延性破坏的损伤度函数模型 [D]. 北京: 北京理工大学, 1992.

[18] 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.

[19] Luo J, Zhu W J, Lin L B, et al. Molecular dynamics simulation of void growth in single crystal copper under uniaxial impacting [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(6): 2791-2798. (in Chinese)
罗 晋, 祝文军, 林理彬, 等. 单晶铜在动态加载下空洞增长的分子动力学研究 [J]. 物理学报, 2005, 54(6): 2791-2798.

[20] Zhu W J, Song Z F, Deng X, et al. Lattice orientation effect on the nanovoid growth in copper under shock loading [J]. Phys Rev B, 2007, 75: 024104.

[21] Deng X L, Zhu W J, Song Z F, et al. Microscopic mechanism of void coalescence under shock loading [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4772-4778. (in Chinese)
邓小良, 祝文军, 宋振飞, 等. 冲击加载下孔洞贯通的微观机理研究 [J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4772-4778.

[22] Cui X L, Li Y J, Zhu W J, et al. Micro-analysis of the void growth of aluminum under shock loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2009, 23(1): 37-41. (in Chinese)
崔新林, 李英骏, 祝文军, 等. 冲击加载下铝中孔洞长大的微观机理分析 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(1): 37-41.

[23] Qi M L, He H L, Wang Y G, et al. Simulation of micro void evolution in the pure aluminum under dynamic loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8): 133-135. (in Chinese)
祁美兰, 贺红亮, 王永刚, 等. 动态冲击下纯铝中微损伤演化的仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 133-135.

[24] Wang Y G, He H L, Wang L L, et al. Percolation description for the early stage of void coalescence during dynamic tensile fracture in ductile materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(2): 127-132. (in Chinese)
王永刚, 贺红亮, 王礼立, 等. 延性材料动态拉伸断裂早期连通过程的逾渗描述 [J]. 高压物理学报, 2006, 20(2): 127-132.

[25] 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.

[26] Qi M L, Luo C, He H L, et al. Damage property of incompletely spalled aluminum under shock wave loading [J]. J Appl Phys, 2012, 111(4): 043506.

[27] Feng J B, Jing F Q, Zhang G R. Dynamic ductile fragmentation and the damage function model [J]. J Appl Phys, 1997, 81(6): 2575-2578.

[28] Li X M, Jin X G, Li D H. The spall characteristics of cylindrical steel tube under inward explosion loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 107-111. (in Chinese)
李雪梅，金孝刚，李大红. 钢圆管在内爆加载下的层裂特性研究 [J]. 爆炸与冲击，2005，25(2)：107-111.

[29] Wang Y G, He H L, Wang L L. Critical damage evolution model for spall failure of ductile metals [J]. Mech Mater, 2013, 56: 131-141.

Physical Criterion of Dynamic Tensile Fracture

HE Hong-Liang

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

Abstract: A physical criterion of dynamic tensile fracture has been introduced, based on the knowledge of the micro-mechanism and the measurement of the damage evolution. The physical criterion has suggested two critical damage parameters, named as the critical void coalescence damage D_1 and the critical fracturing damage D_f. These two parameters are associated with a damage function model and a percolation-softening function, by which the fracture process is characterized as that the damage slowly increases in a linear manner from the initial state ($D=D_0$) to the void linkage state ($D=D_1$), then changes to a nonlinear growth and rapidly approaches to the critical fracturing state ($D=D_f$), while a final step catastrophically leads to the complete fracture state ($D=1.0$). Experimental measurements and numerical simulations for both of the plate impact and the cylindrical tube have verified that these two parameters (D_1 and D_f) physically constrain the dynamic tensile fracture and may be considered as the intrinsic material constant. Application of this physical criterion for the prediction of dynamic tensile fracture under intricate loading and for complex geometrical system has been discussed.

Key words: tensile fracture; damage evolution; physical criterion