

科技动态

从IMPACT' 87看冲击力学的发展 动向——会议述评*

王礼立

(宁波大学, 中国科技大学)

国际冲击载荷和材料动态行为学术会议(简称IMPACT' 87)于1987年5月18日至22日在西德不来梅市举行。会议由西德弗朗霍夫学会应用材料研究所(IFAM), 法国国立南特大学高等机械工程学院(ENSM)和西德金属学会(DGM)联合主办。发起单位还有美国金属学会, 西德材料试验协会, 法国冶金学会, 英国金属学会, 日本金属学会, 美国冶金学会和西德炼铁者协会等。参加会议的有来自法、西德、美、英、日本、意大利、芬兰、瑞典、苏联、波兰、保加利亚和中国等二十多个国家和地区的代表共225人。我国有2名代表参加。

会上共发表论文141篇, 分列6个专题: 动态断裂现象(27篇), 材料性能和行为(52篇), 剪切带现象(16篇), 变形机制(11篇), 高速成型过程(16篇)和冲击波效应(17篇)。其中有六篇特邀报告:

- (1) Shockey, D. A. (美国斯坦福SRI研究所), 动态断裂的新进展及尚待解决的问题;
- (2) Harding, J. (英国牛津大学), 高应变率下的材料性能;
- (3) Dormeval, R. (法国原子能委员会), 绝热剪切现象;
- (4) Chiem, C. Y. (法国国立南特大学高等机械工程学院), 材料在高应变率下与宏观塑性有关的微观结构的动态效应;
- (5) Bodner, S. R. (以色列工学院), 高应变率下的材料(本构)模型;
- (6) Standhammer, K. (美国 Los Alamos 国家实验室), 冲击波效应和冶金参数。

应该指出, 这次学术会议是这一领域第一次在西德举行的国际会议, 东道主颇为自豪; 而且这次会议主要由西德和法国学者推动和联合主办, 会议主席由西德IFAM的 Kunze, Hans. D. 教授和法国ENSM的 Chiem C. Y. (詹致远) 教授担任, 显示出西德和法国近年来在这一领域研究工作的发展势头, 确实引人注目, 值得我们从中吸取有益经验。

由于冲击载荷和材料动态力学性能的研究既涉及军事的和民用的广泛工程技术的应用背景, 又涉及多学科、交叉学科的研究, 多年来一直受到各国物理学界、力学界、材料学界和工程界的广泛重视。本次国际会议旨在推动各方面专家学者就这一领域的最新进展和尚待解决的前沿课题进行广泛交流和讨论。重点是高速变形机制及其模型, 冲击力学和材料动态行为, 动态破坏准则及其数值模拟等, 特别强调宏观研究和微观研究相结合, 基础研究和应用技术相联系。加上这次到会的西方著名学者相当多, 因此确是一次高水平的国际学术会议。从会议所发表的论文, 可以看到国际学术界在这一研究领域的动向。就作者的感受, 以下几点是值得注意的。

一、材料在高应变率下的动态力学行为和变形机制的研究

自三十五年前引入分离式霍布金森生压杆(SHPB)技术以来, 已开展了大量工作, 确认材料的

*本文主要内容曾于1987年8月7日在全国第二届高速冲击动力学学术会议上报告。

屈服、流动和断裂都有明显的应变率效应。从这次会议上有关这方面论文所占比重最大(约3/7)可以看出,其重要性和活跃性继续得到保持;但另一方面,研究的侧重点也已有所变化,主要表现在:

1. 不仅继续重视对应变率效应作深入的研究,而且已更多地注意到应变率历史效应的研究。各种“应变率跳跃试验”的结果表明,材料的力学行为不仅依赖于应变率,还依赖于应变率历史。这一现象不仅对于解决各种实际工程技术问题,而且对于材料本构关系理论的发展有深远意义。人们知道,在弹性理论范畴内,应力只依赖于应变,而与应变历史无关;发展到塑性理论,计及了应变历史的影响,但忽略了应变率的影响;发展到粘弹性、粘塑性或粘弹塑性理论,则计及了应变率效应,但认为流变应力依赖于现时的应变率,而与应变率的历史无关。现有的一些时率相关本构理论几乎都是以这一假定为前提的。现在应该计及应变率历史效应,势必引起本构理论的发展进入到一个新阶段。

2. 不仅继续重视应变率 $<10^3$ /秒量级下材料行为的研究,而且开始更重视更高应变率,即应变率高达 $10^4 \sim 10^5$ /秒量级下材料行为的研究。这是因为已经发现在更高应变率下,流变应力的速率敏感性有明显的增加,从而使人怀疑这是否意味着速率控制机理发生了变化。近年来流行的一个观点认为这时发生了由热激活机制向位错拖曳机制的转变。这次会议上有好几篇论文报导了这方面的研究结果。西德Jahn等根据应变率为 $10^3 \sim 5 \cdot 10^3$ /秒范围内的动态膨胀环试验结果的分析,认为几种机制同时起作用。英国Burstow等对铝合金7075-T73在室温至 300°C ,及应变率 $10^3 \sim 10^5$ /秒范围内所作的试验则未发现由热激活机制向位错拖曳机制转变的任何象征。美国Los Alamos的Follansbee的研究结果认为铜在应变率超过 10^4 /秒时仍由热激活机制控制;至于应变率敏感性发生变化乃由于材料结构演化所引起的。根据他提出的计及变形过程中结构演化以及相应的应变率敏感性变化的理论所作的预示,能和Clifton的实验结果相一致。西德的Meyer等对钢在温度为 $373 \sim 173^\circ\text{K}$ 、应变率直到 $4 \cdot 10^3$ /秒下的试验结果也表明仍由热激活机制控制。日本Nojima对纯铁、碳钢和合金钢等在应变率为 $10^{-4} \sim 4 \cdot 10^4$ /秒范围内所作的试验表明,引入一个广义化的热激活方程

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(-\Delta G/kT) \quad (1)$$

$$\Delta G = H_0 [1 - (\sigma^*/\sigma_m^*)^q]$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为应变率, σ^* 为应力的热分量, σ_m^* 为 0°K 时的 σ^* , k 为波尔兹曼常数, T 为绝热温度,而 $\dot{\epsilon}_0$ 、 p 、 q 均为材料常数($0 < p < 1$, $1 \leq q < 2$),则可说明全部试验结果,包括可以解释过去引来作为拖曳机制的例子Campbell和Ferguson的数据。从上述这些论文的研究结果看,人们对热激活机制在新的更深入认识的基础上又认为可适用于更高应变率。当然也不排斥同时有其他机制共存。在此也还应指出,类似于式(1)的广义热激活方程,其实早已由Davidson和Lindholm^[11]以及本文作者^[12]先后作过系统的讨论。

3. 不仅继续重视对金属材料的研究,而且随着复合材料和工程陶瓷等新材料的开发应用,对这些新材料的高速冲击性能的研究也日益增加。人们都知道,复合材料在航空航天飞行器中的应用,获得快速发展。但在发挥其比强度高优越性的同时,害怕其耐冲击性能差。而且有关金属高速变形的研究经验和结论往往不一定能直接推广到复合材料,必须对复合材料直接进行研究。有些研究结果常常出乎人们预料。例如英国牛津大学Harding等对复合材料在SHPB装置上进行的研究表明,玻璃纤维增强复合材料比碳纤维增强复合材料有更明显的应变率效应,其基体能承受更广泛的开裂,从而在破坏前能吸收更多能量。因此碳/玻璃杂交复合层压板,由于玻璃纤维增强层可改进冲击性能,其综合性能既优于全玻璃纤维增强的,也优于全碳纤维增强的复合材料。

4. 不仅继续开展压缩或扭转状态下材料高速变形特性的研究, 而且大量开展了高速拉伸和高应变率复合载荷条件下材料特性的研究。与准静态下以拉伸试验为最常规的基本试验不同, 在必须计及应力波效应的高应变率试验中, 压缩试验或扭转(剪切)试验是最常采用的形式, 因为高速拉伸试验需要克服或解决的试验技术问题较多。但是对材料的高速拉伸直至断裂的透彻了解又十分重要, 近年来已促进了这方面研究的进展。其中, 日本河田幸三(Kozo Kawata)教授领导下所开展的工作是值得注意的。根据高速拉伸时测得的总伸长变形 ϵ_T , 单位体积的吸收能量 E_{ab} 和峰值应力 σ_p , Kawata等曾提出视材料不同可以分别出现冲击脆化、冲击韧化、或既不脆化又不韧化等多种情况, 而不一定在冲击载荷下材料只会脆化。Kawata等这次会议上的另一篇论文表明, 对于奥氏体不锈钢, 随镍含量的增加, 虽然在准静态试验下其 ϵ_T 和 E_{ab} 均下降, 但在 10^3 /秒的高应变率下, 其 ϵ_T 和 E_{ab} 均增加。这类现象显然是值得重视的, 虽然其机理还需进一步深入研究。至于高应变率复合载荷条件下材料性能的研究, 其意义虽是显而易见的, 但由于试验技术的复杂和困难, 尚处于初步阶段。

5. 加强了宏观研究和微观研究的结合。例如关于材料流变应力的应变率相关性, 在进行宏观实验研究的同时, 不少学者加强了微观观察研究。如Haque在 $10^{-4} \sim 10^4$ /秒的应变率范围内研究高纯铜的应变率效应, 通过微观观察发现在高应变率下可观察到机械孪晶, 而在低应变率下则未观察到, 表明高应变率下流变应力的提高明显地与孪晶形成有关。日本东京大学小林昭(Kobayashi, A)教授与本文作者的合作研究也表明, 对于经不同热处理的锆合金Zircaloy-4, 应变率敏感性的强弱明显地依赖于微观结构的孪晶密度。另一个例子是关于材料在冲击载荷下层裂强度的研究。美国Los Alamos实验室的Zurek和Frantz在研究铜的层裂强度时, 通过微观观察发现晶粒尺寸虽然对动态应力应变曲线无明显影响, 但对层裂强度有明显影响, 晶粒尺度大的层裂强度低。还发现商品铜的层裂强度高于高纯铜(含铜0.9999)是由于前者的断裂成核于非金属质点而后者则沿晶粒边界断裂, 这是第一次发现晶界层裂机制。

二、动态断裂方面的研究

当前看来以高速加载下裂纹体的断裂问题为热点。过去高应变率下的断裂, 以研究非裂纹体的动态断裂强度如抗拉强度或层裂强度等为主; 而裂纹体的断裂, 则以研究准静载荷下裂纹失稳扩展或起裂等为主, 特别就我国的情况而言。这次国际会议上则有相当多的论文讨论高速加载下稳定裂纹的行为(包括在动载下裂尖动态应力强度因子随时间变化的研究等), 以及裂纹在应力波作用下的起裂准则。也有一部份论文涉及传播中的动裂纹的特性, 以及动裂纹的突然止裂问题。其中, 值得注意的有以下几点:

1. 在高速冲击载荷下, 特别对于大尺寸的试件或结构物, 裂纹的起裂往往发生在动载荷到达其峰值载荷之前。这时必须了解应力波和裂纹的相互作用, 在此基础上确定动应力强度因子 $K(t)$ 或 $J(t)$ 。有关静载下断裂力学的分析结果不再适用, 也不能简单地把静载荷代之以随时间变化的动载荷 $\sigma(t)$ 就认为静态断裂力学的现成结果就可推广到冲击载荷下了(这实际上是一种准静态处理), 对此, 西德Böhme用焦散法对于应力波和裂纹相互作用下裂尖载荷特性的实验研究, 给出了很好的说明, 强调了必须计及应力波传播效应。

2. 从材料特性方面来说, 关键是研究冲击载荷下, 计及应变率 $\dot{\epsilon}$ 效应或应力强度因子率 \dot{K} 效应的动态断裂韧性, 首先是对应于裂纹起裂的临界特性参数 K_{IIc} 或 J_{IIc} 。其值一般低于静态断裂韧性。从会议所发表的论文看, 目前所采用的实验技术主要有两大类: (1) 霍布金生压杆型的方法。试件可以采用带环状裂纹的拉伸圆试件或楔形加载紧凑拉伸试件, 除此以外, 日本Yokoyama和Kishida在对分离式霍布金生压杆试验装置的输出杆修改设计后, 可进行三点弯曲试验。不论采用哪种试件,

都不难由有限元计算或简化公式法等确定冲击加载过程中的 $K(t)$ 或 $J(t)$ 。剩下的关键问题是确定裂纹起裂时刻 t_f , 有的研究者根据应变片实测信号来判定, 如Yokoyama等; 有的研究者则采用扫描电镜作断口分析, 如Stroppe等。(2) 焦散法和高速摄影技术相结合。焦散法在静态断裂力学的应力强度因子和材料断裂韧性的研究中已广泛应用并获得成功。与高速摄影机或多闪光照相相机相配合, 就为冲击载荷下动态断裂的研究闯出了一条路子。当然, 由于材料应力-光学常数的应变率相关性, 焦散法本身当应用于高应变率情况下时, 也需作些相应的修正。除上述两类方法外, 激光干涉应变(或位移)计的应用; 以及试件表面布以微细网格(50 μ ~250 μ), 其变形过程由带显微镜的超高速变象管摄影机加以记录的方法, 在会议论文中也有所报导, 值得注意。

3. 从所试验的材料来说, 不仅涉及金属和聚合物, 还已涉及结构陶瓷和复合材料, 包括高分子基和金属基的复合材料。对于陶瓷材料 Alumina, 不仅研究了室温下的动态断裂特性, 还研究了高达1500 $^{\circ}$ C高温下的特性。另一点值得注意的是, 对于高强度钢, 发现动态断裂与在裂纹扩展前已形成的绝热剪切带密切相关。

三、剪切带即剪切变形局部集中带的研究

这次作为一个独立的专题来讨论, 足见其重要性及其在当前冲击力学研究中的地位。绝热剪切带的研究已有四十年以上的历史, 而近十年来取得了迅速的发展。从本次会议所发表的论文来看, 有以下几点值得注意:

1. 作为材料的一种失稳现象, 剪切带形成和发展的机理以及临界条件是人们最关心的。为建立失稳准则, 过去Zener和Hollomon, 以及随后如Cwilver等从均匀塑性变形的模型出发, 以达到最大应力为失稳临界条件, 提出了临界应变型的准则。Clifton, 以及白以龙等采用经典的线性化理论, 以扰动的增长率远大于均匀应变率为失稳条件, 提出了类似准则。这次会议上, 法国Molinari等则提出了一个非线性的相对扰动法来建立剪切带形成的失稳准则, 这一新进展是值得注意的。不足之处是这一分析仍在临界应变型准则的范畴内。会上的其他论文也都仍把问题局限在单控制变量准则, 即或者是临界应变型准则, 如美国的Giovannola的观点; 或者是临界应变率型的准则, 如法国(原波兰)的Klepaczko等的观点。但事实上, 我们有关剪切带形成和发展的理论分析和实验研究都已表明, 应变率和应变两者都对剪切带的形成有重要影响。一个合理的失稳准则在环境温度恒定时, 应是一个双变量准则^[3]。

2. 剪切带内部的显微组织一直是人们所关心的。钢中的白色剪切带过去常作为“相变带”的典型例子; 而且认为有些材料只呈现“相变带”, 另一些材料则只呈现“形变带”。这次, 美国Meyers的研究结果表明, 4340钢中的白色剪切带, 并无相变的迹象, 带和基体也无明显的边界; 而对于商业纯钛, 发现剪切带的显微结构系由小的形变孪晶所组成, 带和基体有清晰的边界。另一方面, 美国的Giovannola对4340钢的实验研究则表明, 剪切带的形成和发展包含两个阶段: 当局部应变为0.13时形成“形变带”, 而当局部应变约为1时形成“相变带”。看来关于剪切带的显微组织, 特别是随剪切带的发展其显微组织的变化, 还需作进一步的深入研究。顺便指出, 我们对 β 钛合金的绝热剪切过程的研究曾已表明, 绝热剪切在一般的情况下是一个由形变带向相变带发展, 直至裂纹沿剪切带传播而导致破坏的过程^[4]。

3. 随着电子计算机在材料研究中愈来愈起重要作用, 对剪切带进行数值模拟的研究也取得迅速进展。例如, 美国Sandia的Lipkin等采用DYNA 3D三维有限元程序作了数值模拟, 在本构模型中引入了一个能反映材料回复过程的状态变量, 从而可模拟出绝热条件下流变应力的热软化。美国的Meyers用有限元程序计算绝热剪切带尖端部附近的应力、应变分布, 成功地模拟了在绝热变形条件下剪切带会扩展传播, 而在等温变形条件下则不会。应该指出, 数值模拟中的一个关键问题是

建立一个正确的本构模型。在这方面,波兰的Perzyna提出的模型是值得注意的,首先他对带和基体分别取不同的本构模型,即对剪切带取弹-粘塑性模型,而基体取无粘性的弹塑性模型;其次对剪切带区引入了微空洞(或微裂纹)的密度和尺寸两个内变量,提出了相应的演化方程。这样剪切带内的弹-粘塑性变形过程计及了微损伤的发展过程。

四、高速成型过程

这一专题方面,除了部份论文涉及材料的高速加工如高速切削和成型等外,相当多的论文内容实际上集中于侵彻问题,一般既涉及“靶板”,也涉及“弹”。其中美国Adeli等有关土的侵彻的研究,其应用背景既与工业用钻土冲击器的研制有关,又与钻地武器的研制有关。文中提出了一个当缺乏广泛的地质技术数据时特别有用的新的土壤侵彻公式。此外,在愈来愈多地采用大型计算机和编码程序对侵彻问题作数值分析的同时,会议中有两篇论文也应引起重视。一篇是美国的Segletes和Zukas的文章,采用IBMPC/XY微机对侵彻和波传播问题进行数值模拟。另一篇是以色列的Ravid, Bodner和Holzman的文章,提出了一个高速(>1000 m/s)弹-靶撞击时的二维近似解析解,其物理图象比较清楚。因此,在数值分析中如何利用微机,以及在发展数值模拟的同时如何继续发展近似解析解,也是我们不应忽视的。

五、冲击波效应

这一专题方面,近年来侧重点也发生了变化。其中引人注目的有以下三方面:一是有关波传播过程中由曲面或材料界面的几何特性所引起的波的聚焦现象和相应的破坏问题的研究相当活跃。如西德的Ballmann等提出了一个计算分析方法,可用于线弹性波,非线性弹性波,和弹-粘塑性波,日本Nakagawa等讨论了粘弹性和弹-粘塑性板上,由于半圆形边界反射造成的聚焦。其次是有关注击波对粉末材料进行压缩或固化,即利用冲击波的高温高压特性来研制、生产新材料的“冲击压实”新技术的研究,也吸引了人们的兴趣。美国Lawrence Livermore实验室的Wilkins等指出,技术成功与否的关键之一是在粉末材料中产生正确的压力-时间历史,提出用计算机模拟分析方法正确设计爆炸装置,以实现这一目标。英国的Blazynski等则强调并讨论了反射波在冲击压实中的重要影响。最后,有关强激光冲击载荷引起的冲击效应的研究,虽然只有一篇论文,由于其在军事新技术上的应用背景,十分值得重视。法国的Hallouin等的这篇论文报导了强激光冲击载荷在铁中所引起的微结构转变。实验研究中采用的强激光脉冲的强度为 10^{13} 到 10^{15} w/cm²,历时0.5~25毫微秒,聚焦在靶板表面的斑点直径为50~90微米。

这次国际会议历时五天。虽然分了六个专题,但并不按专题分组开会。全部论文,不论是口头宣读或论文展出,全都面向全体代表,以利于促进互相了解和交流。这一经验也是值得我们考虑的。

参 考 文 献

- [1] Davidson, D. L., Mechanical Properties at High Rates of Strain. Institute of Physics, (1971), London, 124.
- [2] Wang, L. L., *Jour. Engrg. Materials Tech.*, 6 (1984), 331.
- [3] Wang Lili, *Proc. Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects*, Science Press Beijing China (1986), 546.
- [4] Wang Lili, Lu Weixian, Hu Shisheng, Tang Zhiping, *IUTAM Symp. on Macro- and Micro-Mechanics of High-Velocity Deformation and Fracture*, Tokyo, (1985).

THE TRENDS OF IMPACT MECHANICS VIEWED FROM IMPACT' 87

Wang Lili

(Ning Bo University, China Science and
Technology University)

ABSTRACT A review and commentary on the International Conference on Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials (IMPACT' 87) held in Bremen on May 18-22, 1987 is given in this paper.

简 讯

控爆拆除80m高砖结构烟囱

一九八八年元月五日下午四时,西南流体物理研究所采用定向倒塌的控爆技术,成功地拆除了成都市热电厂的2[#]烟囱。

该烟囱高80m,主体由100[#]红砖砌成。在标高14m以下呈六角形,为0.99~1.80m变厚度筒壁,内含烟道、集灰漏斗和出灰口等复杂的砖混结构。根部内接圆直径10.80m,上端直径5.24m,平时上端最大摆动幅度12cm。

设计倾倒方向背后紧邻电厂的主机房,距正在运行的6[#]风机21.5m,相距45m处为80m高的1[#]烟囱,在其周围还有许多其它设施不允许受到损坏。因此本次爆破对倒塌方向,爆破引起的地震,塌落震动和飞石的限制,必须作到万无一失。

爆后,倾倒方向与设计的偏差值小于一度,倾倒线上的堆渣长55m,横向飞散为±11m,爆破飞石飞出距离小于15m,爆破和塌落振动很小,整个施爆过程对电厂设备及运转造成任何影响

(陆景德供稿)