

# 工程科学前沿的拓荒者 —— 郑哲敏

戴兰宏<sup>†</sup>

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

**摘 要** 郑哲敏先生是著名力学家, 我国爆炸力学的奠基人和开拓者, 2012 年度国家最高科学技术奖获得者. 本文回顾了郑哲敏先生在过去 60 多年中非常丰富的科研活动, 特别是他在爆炸加工、地下核爆、爆炸排淤、冲破甲、煤与瓦斯突出、水合物开采、水弹性动力学、材料力学行为等方面的杰出学术贡献. 这些工作闪耀着鲜明的工程科学特点, 即着眼国家重大需求, 从错综复杂的问题中概括提炼关键物理因素, 创新理论, 进而指导实践. 郑哲敏先生的科学贡献和学术思想, 对于力学学科发展, 有着重要的现实意义和参考价值.

**关键词** 力学, 爆炸力学, 应用力学, 工程科学

**中图分类号:** O383, O389 **文献标识码:** A **DOI:** 10.6052/1000-0992-13-033

## 1 引 言

科学和技术塑造了今天的世界. 在 19 世纪前的大多数历史条件下, 科学和技术一直是处于要么若即若离, 要么完全分离的状态向前发展. 然而, 19 世纪中后期在德国、美国等工业发达国家同时兴起的第二次工业革命极大地促进了科学与技术的紧密结合, 并于 19 与 20 世纪之交催生了介于自然科学和工程技术中间层次的科学——工程科学 (也称技术科学). 在这一时期, 经典力学发展已相对成熟, 应用力学成为工程科学最早的成员, 与工程科学领域其他分支学科一起, 在 20 世纪促成了航空航天、原子能等近代工程技术的涌现和成熟, 并在推动生产技术和自然科学基础理论发展方面发挥重要作用 (钱学森 1948, 1957, 郑哲敏 1995, 2001).

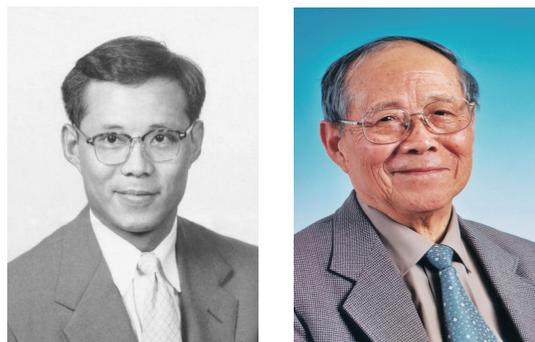


图 1 郑哲敏先生 (左图为 1955 年离美绕道欧洲回国前; 右图为近照)

作为工程科学发展典范的应用力学, 起源于 20 世纪初的德国哥廷根大学, 代表人物是克莱因和普朗特. 20 世纪初, 哥廷根大学的数学领袖, 高斯、狄利克雷和黎曼的继承者克莱因因深切感悟到纯理论研究与实际应用的脱节已严重阻

收稿日期: 2013-05-20

<sup>†</sup> E-mail: lhdai@lnm.imech.ac.cn

引用格式: 戴兰宏. 工程科学前沿的拓荒者 —— 郑哲敏. 力学进展, 2013, 43(3): 265-294 (Dai LH. A pioneer in the frontier of engineering science—Zhe-Min Zheng. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(3): 265-294)

碍自然科学与技术进步,决心打破这一桎梏。他从汉诺威工业大学请来因提出边界层理论而崭露头角的普朗特,成立了应用数学与力学研究所,开辟理论与实际结合的道路,创建了应用力学学派。在他们的领导下,哥廷根大学应用力学学派人才辈出。普朗特培养了冯·卡门、铁摩辛柯、普拉格等一批国际知名的力学大师。1930年冯·卡门被密立根聘请到美国加州理工学院任职,将应用力学带到美国并发扬光大。在20世纪30~50年代,钱学森、郭永怀、林家翘、钱伟长等一批当时的青年才俊、后来的力学大师先后来到加州理工学院求学或工作,在冯·卡门的指导下着力开拓应用力学学科的前沿及应用的疆土,尤其在航空航天技术方面取得了突破性进展,为人类进入空间时代奠定了科学基础。

20世纪40年代,饱受日本军国主义侵略蹂躏的旧中国满目疮痍,大批有志青年,远渡重洋,负笈求学,寻求科学救国。1948年,郑哲敏先生清华大学毕业留校做钱伟长教授的助教一年后,经清华大学、北平地区、华北区和全国四级选拔,脱颖而出成为东亚唯一的一名“国际扶轮社国际奖学金”获得者。年轻的郑哲敏先生抱有同样的科学救国理想,于同年8月远赴美国加州理工学院求学,主攻应用力学。学习一年顺利获得硕士学位后,转入钱学森先生门下继续攻读博士学位。在加州理工学院这个国际应用力学和工程科学研究的新中心,他跟瑞尼(W.D.Rannie)研究Benard胞格现象时,领会到量纲分析方法的技巧与实质。他还有机会聆听到冯·卡门(von Kármán)、泰勒(G. I. Taylor)、冯·诺伊曼(J. von Neumann)等大师的报告。耳濡目染和多方面实践使郑哲敏先生对以克莱因、普朗特、冯·卡门、钱学森为代表的近代应用力学学派的精髓有切身体验(洪友士2006)。应用力学学派的特色在于着眼重大的实际问题,强调理论与实际、数理科学与应用科学的密切结合,善于从错综复杂的自然现

象、科学实验结果和工程技术实践中概括提炼关键的物理因素,建立力学模型和数学分析,创新理论,进而指导实践。

1952年6月郑哲敏先生获得博士学位后,立即着手准备回国参加新中国的建设。但由于受到美国政府的阻挠,直到1955年2月才在历经5个多月辗转欧洲的长途旅程后回到阔别6年多的祖国。回国前,他的导师钱学森嘱咐他,回去后一定要致力研究国家实际需求的问题。回国后,他加入了钱伟长先生在中国科学院数学所创立的力学研究室。1955年10月,钱学森先生回国。郑哲敏先生随即投入到钱学森先生创建中国科学院力学研究所的工作。1956年1月,中国科学院力学研究所成立,郑哲敏成为力学所首批科研人员,从此展开以祖国的经济与国防建设为主线的丰富的应用力学和工程科学实践活动。

建所之初,郑哲敏先生被任命为弹性力学组组长,研究大型结构抗震(郑哲敏1957)、输水管道振动等水弹性问题(郑哲敏1958a, 1958b)。从1959年开始至60年代初,郑哲敏先生阐明了爆炸成形的机理和模型律,解决了大型火箭重要部件的加工难题。钱学森先生对此高度重视,并命名了一门新的力学分支学科——爆炸力学。紧接着,在地下核爆炸效应的研究中,郑哲敏先生与合作者一起提出了流体弹塑性体模型。该模型将爆炸冲击荷载作用下岩石,视作兼有流体、固体特性的介质,并给出统一的方程来描述运动规律,堪称爆炸力学的学科标志,可以准确预测地下核试验压力衰减规律和空腔的大小,为我国首次地下核爆当量预报做出了贡献。在破甲机理研究方面,他开创性地建立了破甲相似律、流体弹塑性侵彻理论、破甲弹高速射流的稳定性理论。这些工作为我国相关武器的设计与效应评估提供了崭新的力学基础。郑哲敏先生还开辟了爆炸复合、煤与瓦斯突出、爆

炸处理水下软基等关键技术领域的研究,解决了重大工程建设中的核心难题,得到了广泛的应用.此外,在材料力学的研究中,他探讨了非局部断裂理论,创造性地提出了硬度表征的能量标度理论,并被国际同行以其与合作者的姓氏命名为 C-C 方法.郑哲敏先生作为中国力学学科建设与发展的组织者和领导者,从 20 世纪 70 年代起长期主持力学学科发展规划的制定,为不同时期力学的发展确立了方向和重点;他在中国倡导建立了众多新的力学分支学科,如热弹性力学、水弹性力学、环境力学、材料力学、工艺力学、灾害力学、海洋工程力学等;他作为中国力学界在国际上的代表,先后担任国际力学界最高学术机构国际理论与应用联合会 (IUTAM) 理事、IUTAM 大会委员会委员,并于 2004 年当选为 IUTAM 八位执委之一.由于他的贡献,极大提高了中国力学在国际上的地位,并与力学届同仁共同努力促成成功申办在北京召开第 23 届国际理论与应用力学大会 (ICTAM) 和建立了北京国际理论与应用力学研究中心.

60 多年来,郑哲敏先生取得了一系列重大成果,先后获得国家计委、经委、科委“新产品、新技术、新材料、新工艺”展览大会一等奖、中国科学院重大科技成果奖、国家自然科学基金二等奖两项、国家科技进步二等奖、陈嘉庚技术科学奖、何梁何利科学与技术进步奖等重要奖项.郑哲敏先生先后被选为中国科学院院士 (1980)、美国国家工程院外籍院士 (1993) 和中国工程院院士 (1994).鉴于为我国科技事业所做出的杰出贡献,郑哲敏先生荣获 2012 年度国家最高科学技术奖.

郑哲敏先生 60 余年的应用力学和工程科学实践具有惊人的广度和深度,取得的学术成就十分丰富,相关工作已收录在《郑哲敏文集》(郑哲敏, 2004). 本文仅通过其中几个典型工作的简要回顾,来展现他作为应用力学大师的工程科学思想,以及他真挚浓烈的爱国情怀、务

实创新的科学精神和高尚的人格魅力.

## 2 水弹性动力学

1952 年,郑哲敏在加州理工学院获博士学位后第一项独立的工作是关于大型输水管振动,这是一个大型工程运行中出现的实际问题,同时也是当时水弹性动力学领域关注的前沿课题.水弹性动力学是力学中一个重要的研究领域,它主要关注弹性结构与液体的流固耦合作用,这种耦合作用广泛存在于海洋与船舶工程、输液管道工程、石油化学工程、水利水电工程、核能工程等军民工业领域中.随着现代高强度材料的使用和工业制造技术的进步,上述领域的工业装备不断朝着大尺度、轻薄、大跨度等方向发展,这就使得结构弹性变形和液体流动的相互作用变得越发重要.

郑哲敏对壳、板、梁与液体相互作用的水弹性动力学问题开展了系统性研究 (Cheng 1952, 1957, 郑哲敏 1958a, 1958b, 郑哲敏、马宗魁 1959). 在实际工程中发现,某些情况下输液管道会发生壳体模态的振动,即,管壁有变形,管道横截面不再保持圆形 (如图 2 所示). 这一现象用当时的管道弯曲模态振动分析方法难以解释.为此,郑哲敏开创性地研究了等间隔圆环支撑、无限长大型输水管壳体模态下的水弹性自由振动问题 (Cheng 1952, 1957, 郑哲敏 1958b), 这一工作不仅从理论上成功解释了输液管壳体模态振动现象,揭示了管内液体与弹性薄壳水弹性相互作用机理,建立了输液管道流固耦合分析方法以及固有振动本征值、不稳定振动和临界流速的确定方法;而且所建议采用的措施可以有效解决实际中出现的这种管道振动问题.郑哲敏在研究输水管道水弹性动力学问题时,考虑管中输送液体为不可压无黏流体,其非定常速度势满足 Laplace 方程;管道结构采用 Donnell 圆柱薄壳理论;考虑到结构、流场和支撑条件具有周期性,郑哲敏将结构位

移、流场速度势和压力用傅里叶级数表达; 进而联合求解液体-柱壳水弹性振动的边值问题, 获得了决定自由振动本征频率的频率方程式

$$\sum_{q=-\infty}^{\infty} F_{m,q+k/N} = 0, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

$$N = 1, 2, \dots$$

其中

$$F_{m,n/N} = \left\{ \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left[ \left( \frac{n\pi}{Nl} \right)^2 + \frac{m^2}{R^2} \right]^2 + \frac{Eh}{R^2} \frac{(n\pi/Nl)^4}{\left[ (n\pi/Nl)^2 + m^2/R^2 \right]^2} + \frac{\sigma_0 h m^2}{R^2} - \rho h (\omega^2 + \beta_{m,n/N}) \right\}^{-1}$$

$$\beta_{m,n/N} = \frac{\gamma R}{\rho h} \left( \omega + \frac{n\pi}{Nl} U \right)^2 \cdot \frac{I_m(n\pi R/Nl)}{(n\pi R/Nl) I'_m(n\pi R/Nl)}$$

通过对频率方程式根的特性随管内液体流速变化关系的讨论, 给出了发生不稳定振动的临界流速表达式

$$U_{m,cr}^2 = \frac{1}{3\pi(1-\nu^2)} \cdot \frac{\pi R/2l I'_m(\pi R/2l)}{I_m(\pi R/2l)} \cdot \frac{Eh^3 l}{\gamma R^3} \Omega_{m,\pi R/2l}^2 \quad (2)$$

其中

$$\Omega_{m,\zeta}^2 = (\zeta^2 + m^2)^2 + 12(1-\nu^2) \frac{R^2}{h^2} \frac{\zeta^4}{[\zeta^2 + m^2]^2} + 12(1-\nu^2) \frac{\sigma_0 R^2}{Eh^2} m^2$$

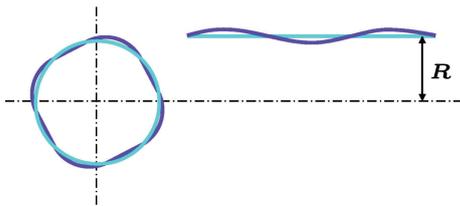


图 2 管壁的变形 (郑哲敏 1958b)

郑哲敏还研究了不可压无黏流体在由无限长弹性薄板和固壁所围空间中流动的水弹性动

力学问题 (Cheng 1957, 郑哲敏 1958a). 通过联立弹性薄板方程和 Laplace 方程, 并将板的挠度、流场速度势和压力用傅里叶级数表达, 求解了液体-薄板耦合振动的边值问题 (图 3), 获得了决定自由振动本征频率的频率方程式

$$\sum_{q=-\infty}^{\infty} F_{q+s/N} = 0, \quad T_{s/N} \neq 0 \quad (3)$$

其中,

$$F_{n/N} = F_{n/N}(\omega) = \left[ B \left( \frac{n}{N} \right)^4 \frac{\pi^4}{l^4} - \rho h \omega^2 - \frac{\gamma l}{\pi(n/N)} \left( \omega + \frac{\pi U n}{l N} \right)^2 \cdot \coth \left( \frac{\pi h n}{l N} \right) \right]^{-1}$$

进而郑哲敏给出了发生不稳定振动的临界流速表达式

$$U^2 = \frac{1}{\gamma} B \left( \frac{\pi}{2l} \right)^3 \tanh \frac{\pi H}{2l} \quad (4)$$

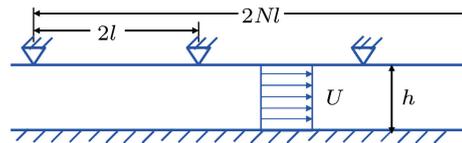


图 3 平板、液体和支撑示意图 (郑哲敏 1958a)

此外, 针对黄河刘家峡水库的论证和设计任务, 为了定量估算蓄水水库的水坝振动, 郑哲敏研究了水体-水坝的水弹性自由振动问题. 这一工作不仅建立了基于特征函数展开的悬臂梁-液体耦合振动准确分析方法, 而且还提出了基于能量观点的 Rayleigh 型方法和小参数法两种近似计算方法 (郑哲敏、马宗魁 1959).

郑哲敏基于特征函数展开, 准确求解了悬臂梁-液体耦合作用下的自由振动本征值问题, 获得下列方程组

$$\gamma (\omega_{0i}^2 - \omega^2) A_i - \frac{4\rho\omega^2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} B_{jn} \cdot B_{in} D_j A_j = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

上述联立方程组行列式等于 0 的条件即是决定本征频率的方程。除准确方法外, 郑哲敏还提出了两种近似方法: (1) 考虑到该系统最大动能等于最大势能, 郑哲敏给出了最低频率的 Rayleigh 型计算方法; (2) 在蓄水对自由振动影响不大的情况下, 郑哲敏提出了一种小参数方法, 给出了可直接计算流体对各阶自振频率影响的公式

$$\lambda \cong \lambda_0 + \varepsilon \lambda_1 = \lambda_{0i} \left\{ 1 - \frac{1}{D_i} \frac{h\rho}{\gamma\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot \left[ \int_0^1 Y_i \cos \frac{(2n+1)\pi\eta}{2} d\eta \right]^2 \right\} \quad (6)$$

该方法比前一种近似方法更适用于较高模态下的振动。

20 世纪 80 年代, 郑哲敏根据国内的实际需要和国外的发展态势, 将水弹性动力学向海洋工程推进, 提出重点解决海洋油气开发中若干国际前沿的科学技术问题, 同时在中国科学院力学研究所组织海洋工程科学和技术的研究队伍, 创建中国科学院海洋工程科学技术研究中心, 主攻海洋油气开采平台等关键力学问题的研究。90 年代后, 郑哲敏组织并领导中国科学院力学所与中国海洋石油总公司的战略合作, 致力我国海洋油气工程关键技术的联合攻关, 推进我国海洋油气工程技术的发展。

### 3 爆炸加工

爆炸加工通常是以炸药为能源, 利用炸药爆炸产生的瞬时高压对可塑性金属、陶瓷、粉末等材料进行形状、合成、改性等的加工技术。爆炸加工技术包括爆炸成形、爆炸复合(焊接)、爆炸合成、爆炸压实、爆炸硬化等。由于炸药爆炸是瞬态高速和高压过程, 所以爆炸加工与液压、冲压等常规方法相比, 具有压力大, 变形速度大等特点, 往往具有不可替代的作用, 因此在航空航天、国防、石油化工、船舶等领域得到了广泛的应用。自 20 世纪 50 年代起, 郑哲

敏带领中国科学院力学研究所的研究小组围绕爆炸成形、爆炸焊接、爆炸硬化等爆炸加工方法的工艺、机理、控制参数等基本问题展开了深入的研究, 取得了系统性的研究成果, 这里主要介绍郑哲敏在爆炸成形和爆炸复合领域的研究工作。

#### 3.1 爆炸成形

爆炸成形是利用爆炸物质在爆炸瞬间释放出巨大的化学能对金属板料进行加工的高能率成形方法。实际上, 人们认识到可以利用炸药爆炸释放能量进行金属成形加工已有一百多年历史。1888 年, 美国化学家查理斯·穆罗 (Munroe 1888a) 利用火药棉接触爆炸在金属表面压印出复杂的图案, 是人类早期从事爆炸成形的实例之一。其后的半个多世纪里, 爆炸成形的研究相当的沉寂, 原因在于缺乏实际需求的驱动。然而, 20 世纪 50 年代, 宇航、原子能等新兴工业的涌现对金属成形加工的需求, 给爆炸成形研究与应用一个巨大推动。这些领域往往要求加工许多形状复杂的零部件, 生产批量小, 精度要求高, 传统的机械加工难以胜任。爆炸成形因具有压力大、变形速度快、加工时间短、能量范围方便可调、成本低等突出特点, 在这些领域显示出独特优势。因此, 美国、英法、俄罗斯等工业发达国家纷纷开展爆炸成形工作 (Ezra 1973)。而在 20 世纪 50 年代, 我国国防工业处于起步阶段, 导弹和火箭一些关键零部件的成形加工面临挑战。50 年代末、60 年代初, 钱学森先生、郭永怀先生十分重视爆炸理论与技术的研究, 在创建不久的中国科学院力学研究所组建了专门研究室, 瞄准国家急需, 主攻爆炸成形等相关问题, 并将这一任务交给了郑哲敏。本征上看, 金属板料水下爆炸成形主要涉及 3 个相互关联的方面: (1) 炸药释放的能量在传压介质(如水)中的传播及其与金属板料的相互作用规律; (2) 金属板料在爆炸冲击波作用下的

成形机理及模型律; (3) 适于生产应用的成形工艺或技术. 1961 年起, 郑哲敏及其领导的小组通过系统的实验研究、理论分析与计算在这几方面取得了突出进展 (郑哲敏 1962a, 1962b, 郑哲敏等 1962, 郑哲敏等 1981). 主要包括: 发展了水下爆炸空化理论, 阐明了金属板料爆炸成形机理; 提出了爆炸成形几何相似律和能量准则; 发明了分块拼装的惯性模等爆炸成形技术并用于导弹喷管等关键部件的成形加工.

爆炸成形是通过传压介质水将炸药爆炸形成的冲击波突然加载到金属板料上, 使其产生高速塑性变形而得以实现的. 根据冯·卡门的塑性波理论 (von Kármán & Duwez P 1950), 金属塑性变形存在一个临界速度, 超过这个临界速度, 金属材料几乎无宏观塑性, 呈现准脆性断裂. Wood (1967) 发现, 在低于临界速度的范围内, 提高变形速度将增大金属材料的延性. 因此, 金属爆炸成形一般应控制在此速度范围内进行. 郑哲敏及其领导的爆炸成形组系统地开展了不同炸药量、不同板料尺寸的爆炸成形实验研究. 郑哲敏先生仔细考察了平板在水中爆炸波作用下的变形过程, 敏锐地察觉到平板在变形时先后经历两次急剧的加速, 即成形过程曲线呈现明显的“二次加速”或“二次加载”现象 (郑哲敏等 1962, 范良藻、孟珊 1964). 国外的学者也发现过类似的现象 (Snay 1956, Cole 1960), 可以说, “二次加速”是水下爆炸成形中的典型现象, 但当时国际上对“二次加速”现象形成的物理图像尚不清楚. 水下爆炸成形过程中存在两种形式的载荷: 炸药爆炸引起的冲击波和爆炸产物形成的高压所引起的高速水流作用. 冲击波与金属薄板或薄壳相互作用在水中引起的空化的产生、发展、消亡是爆炸成形最突出的特点. 理解这些特点也是揭示“二次加速”现象成因和爆炸成形机理的基础. 为此, 郑哲敏 (1962b) 以水中冲击波入射金属平板问题着手, 基于声学理论, 建立了空化形成、演化、

消亡的基本方程和空化形成前后金属板料变形的解析表达. 分析发现 (郑哲敏 1962a): 当板料受冲击波作用开始加速变形运动时, 将向水中发射稀疏波使板料附近水的压力下降; 当下降到一定的负压时, 因水不能承受拉应力而产生空化 (cavitation), 并迅速形成空化区. 空化区被拉断的水, 像固体材料应力波作用下的层裂或崩落 (spallation) 一样 (白以龙 1992), 不断地向外“投掷”冲击到板料上, 并在板料和空化区之间形成一层质量不断增加的附加水, 同时在空化区和爆炸产物 (爆炸气团) 之间形成高速膨胀的水球. 随着附加水和水球质量的不断增加, 空化区不断减小, 从而在某时刻, 空化区完全消失. 当空化区消失时, 高速运动的水球和附着附加水的板料发生碰撞导致金属板料的突然加速, 这就是爆炸成形实验观察到的“二次加速”现象的形成机理 (郑哲敏 1962a).

模型试验是处理复杂科学与工程问题的有效方法之一 (郑哲敏、谈庆明 1996, 谈庆明 2005). 对于爆炸成形问题, 实验室小尺度的模型试验是深入探究成形机理、确定成形工艺条件和参数的重要手段, 其核心是求取实用的模型律. 时任力学所所长的钱学森先生就非常重视模型律的研究和应用. 郑哲敏 (1962a) 通过对爆炸成形系统各部分主要影响因素的剖析, 提炼出反映药包相对尺寸、金属板料相对变形阻力等 8 个影响成形效果的相似参数. 如这些相似参数保持不变, 金属板料、传压介质和炸药爆轰产物运动的所有特征都是相似的. 郑哲敏 (1962a) 发现, 在不考虑应变率等时效因素情况下, 爆炸板料的无量纲成形位移  $y/L$  满足如下的几何相似律

$$\frac{y}{L} = f\left(\frac{1}{L}\left(\frac{W}{\rho_B}\right)^{1/3}, \frac{\delta}{L}, \frac{h}{L}\right) \quad (7)$$

其中,  $W$  是炸药量,  $\rho_B$  是炸药密度. 可以看出, 金属板料成形位移仅与药包相对尺寸

$(W/\rho_B)^{1/3}/L$ 、板料几何尺寸比  $\delta/L$ 、药包相对位置  $h/L$  相关。

利用这个几何相似律，原则上便可利用小尺寸试验来模拟大构件的爆炸成形效果。但是郑哲敏从工程实际出发，谋求一个更简便的准则来指导生产。

基于对爆炸成形机理的认识，他觉察到爆炸成形系统中能量传输与分配是个关键。通过对爆炸成形实验数据的整理和细致的计算分析，发现板料在有模成型变形量一定的条件下，所需的炸药量近似地同板料的厚度成正比。对于薄板情况，薄膜应力远大于弯曲应力，总变形能一定也同厚度成正比。因此，药量与厚度成正比实际上表示炸药能量与板料总的变形能成正比。同时，大量的爆炸成形实验结果均表明，薄板成形时炸药能量利用率的确相差不多，可以看成是一个定值。基于这些考虑，郑哲敏提出了简便实用且具有明确物理内涵的能量准则。对于有模成形，能量准则可表示为 (郑哲敏 1962a, 1981)

$$\frac{W}{\sigma_s \delta L^2} = C \quad (8)$$

其中， $W$  为药量， $\sigma_s$ ， $\delta$ ， $L$  分别为金属板料的屈服强度、厚度和长度， $C$  为常数。显见，如果知道板料的屈服强度  $\sigma_s$ ，只要用一种尺寸、一种厚度的板料进行模型试验便可确定常数  $C$ 。因此，非常方便好用。这个准则也可通俗地称为“2-4-8”准则。如板料尺寸  $L$  不变，厚度放大 1 倍，就需 2 倍药量；如果板料厚度  $\delta$  不变，板料尺寸  $L$  放大 1 倍，就需 4 倍药量；如果板料厚度  $\delta$  和尺寸  $L$  都放大 1 倍，需 8 倍药量。郑哲敏及其爆炸成形小组，通过水下爆炸环境下的薄壳变形分析计算 (郑哲敏等 1962) 和多种类型的爆炸成形实验系统地验证了所提出的包括能量准则在内的爆炸成形模型律 (郑哲敏 1962a, 1981)。

郑哲敏及爆炸成形小组在成形机理和模型律方面取得的成果在相关产业部门迅速推广。

但新的实践又提出了新的问题，突出的是大型零件成形所遇到的模具强度问题。因为，按几何相似律，重量与其尺寸的三次方成比例，如果零件的尺寸超过两米，一炉钢也浇注不了一个模具。但如何解决大型零件成形模具的制造问题仍面临极大的困难。郑哲敏 (1962a, 1981) 基于对爆炸成形物理过程及控制规律的深入认识，知道毛料的成形时间和模具开始运动的时间可以相差好几个数量级，于是提出用分块拼装的模具代替传统的整体铸造模具的巧妙想法。这样，靠模具的惯性使毛料在爆炸作用下，在足够短的时间内顺利贴模成形，成形后零件的精度可以得到保证。当毛料充分成形以后，具有很大质量和惯性的模具才开始运动并散开。这项被称为惯性模的技术很快用于火箭大型封头等零件爆炸成形上去，效果极佳。此后，人们不仅把这项技术应用于大型零件，而且应用于通过一次爆炸，同时实现成形、开孔、卷边等多种工艺。

### 3.2 爆炸复合

爆炸复合也称爆炸焊接，是一种利用爆炸产生的高压使两种或多种金属高速碰撞而结合在一起的一种特殊的焊接技术。1944 年，卡尔 (Carl 1944) 首次报道了两块铜片在炸药爆炸作用下的固相焊接现象。1959 年，美国的菲力普杰克 (Philipchuk 1959) 首先注意到爆炸复合的商业价值，随后各国学者经过不断地探索研究逐渐将其推向广泛的工业应用 (Crossland 1982, 郑哲敏等 1981, Findik 2011)。

爆炸复合的效果主要取决于爆炸复合界面特征。研究发现，在一定条件下，金属复板和基板高速碰撞射流将在复合界面留下周期性的波形图案，而小波幅的波状界面往往具有高的结合强度。波状界面不仅攸关爆炸复合的质量，同时它也是一种界面动力学失稳现象。因此，波状界面的研究一直是金属爆炸复合的中心课题。

自 20 世纪 50 年代 Allen 等 (1954) 首次在圆柱钢弹斜撞击薄铅板实验中发现波状结合面以来, 各国学者就波状界面的形成机理开展了大量的研究, 形成多种界面波理论或假说, 主要有 Abrahamson(1961) 及 Bahrani 等 (1968) 的复板流侵彻机理、Hunt(1968) 及 Robinson(1975) 的 Kelvin-Helmholtz(K-H) 流体动力学失稳机理、Cowan 等 (1871) 和 Kowalick 等 (1871) 的 von Kármán 涡街机理. 这些以流体动力学理论为基础的界面波理论, 难以满意解释观察的实验现象. 例如, K-H 流体动力学失稳机理难以解释对称爆炸复合所观测的界面波现象, 原因在于对称爆炸复合并不存在平行于撞击面的速度差. von Kármán 涡街界面波理论认为, 当速度不太高时, 流体黏性的抑制涡状界面波的形成, 只有当速度达到一定值时, 才会产生旋涡波, 而完全的旋涡形成至少需 3 个波长的距离. 但这种假说也与实验结果产生矛盾, 实际上碰撞点之后的压力脉冲更可能在一个波长的距离内迅速衰减.

忽略材料强度效应的流体动力学界面波理论不能合理解释金属爆炸复合的界面波现象. 郑哲敏认为, 在可出现波状界面的速度范围内, 材料强度与材料黏性比较, 材料强度是主要因素, 此时应按流体弹塑性模型思想来理解, 爆炸复合界面波是复板和基板两个流体弹塑性体碰撞诱导的界面动力学失稳现象 (Cheng 1986a, 1986b, 1991, Cheng & Li 1986, Cheng & Tan 1989). 对于图 4 所示的对称碰撞问题, 根据量纲分析, 界面波比波长 (波长  $\lambda$  与复板厚度  $H$  比) 满足如下关系

$$\frac{\lambda}{H} = f\left(\frac{\rho V^2}{2Y}, \frac{VH}{\nu_s}, \beta\right) \quad (9)$$

从表达式看, 比波长与 3 个无量纲数相关: 反映惯性与强度之比的损伤数  $\rho V^2/2Y$ , 反映惯性与黏性之比的雷诺数  $Re = VH/\nu_s$ , 碰撞角  $\beta$ . 这里,  $V$  是碰撞速度,  $\rho, Y, \nu_s$  分别为材料的密度、

屈服强度和运动黏度或黏性扩散系数. 为了考查损伤数和雷诺数的作用, 在郑哲敏指导下, 力学所爆炸力学室张登霞等 (1984) 进行了 3 种对称爆炸复合试验: 几何放大试验、变强度试验和变碰撞角试验. 变强度和几何放大试验结果分别如图 5 和图 6 所示. 变强度的试验结果显示, 界面比波长与损伤数存在很强的关联, 而几何放大试验结果显示, 几何相似律存在, 界面比波长与包含黏性效应的雷诺数关系不大. 这表明, 反映材料强度效应的损伤数是关键的相似参数, 黏性效应是次要的.

在实验研究的基础上, 郑哲敏和谈庆明 (Cheng & Tan 1989) 提出了基于流体弹塑性体思想的新的界面波理论. 爆炸复合时, 在再入射

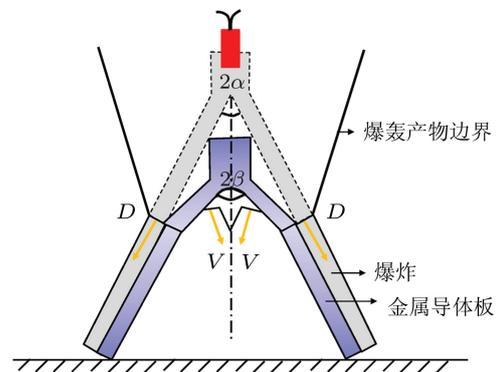


图 4 对称爆炸焊接示意

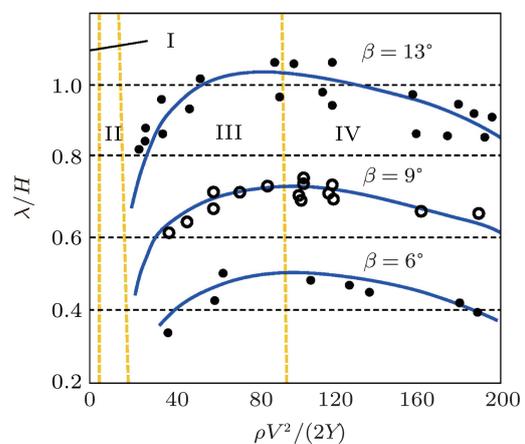


图 5 低碳钢对称爆炸界面波比波长  $\lambda/H$  随损伤数  $\rho V^2/(2Y)$  的变化曲线

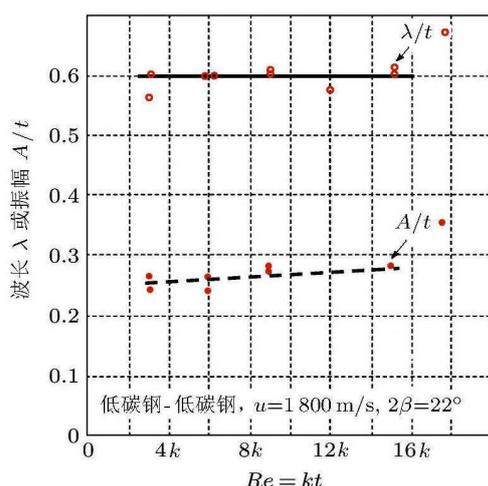


图 6 爆炸界面波比波长及振幅随雷诺数变化曲线

流起始处, 介质压力、速度高度不均匀, 应变率也很大. 有理由假定, 绝热剪切带将在再入射流表面形成一薄层, 在此薄层处将出现流体-固体的滑动. 此外, 沿驻点指向下游方向, 存在一个从流体向固体转变的过渡区, 流-固转变可由反映惯性与强度之比的损伤数表征. 基于这些观察, 郑哲敏和谈庆明提出如下界面波波长公式 (Cheng & Tan 1989)

$$\frac{\lambda}{H} = A_0 \frac{2\pi U_x}{\Omega U_0} \sin^2 \beta/2 \quad (10)$$

其中,  $U_x$  是经典射流碰撞理论确定的射流中心线上流动冻结发生点的流速,  $\Omega$  和  $A_0$  为常数,  $U_0$  为炸药爆炸在飞板上产生的主射流的速度. 可以看出, 材料性能的影响包含在  $U_x/U_0$  的关系中. 不可压流体动力学理论中,  $U_0$  和  $U_x$  关系可有 Bernoulli 方程确定. 前苏联学者 Utkin 等基于不可压理想平行流的 Helmholtz 流体动力学失稳, 得到的界面波长表达为  $\lambda/H = 128 \sin^2(\beta/2)$ . 可以看出, 这个表达不包含任何材料性能相关参数, 对所有材料预测的结果都一样, 显然与实验结果不符. 基于流体弹塑性体动力学的理论, 需考虑材料的强度效应, 并假定损伤数达到某临界值时, 即  $\rho V^2/(2Y) = C$ , 发

生流-固转变. 此时,  $U_0$  和  $U_x$  满足如下关系 (Cheng 1986a, 1991)

$$U_x/U_0 = \{1 - C/[\rho V^2/(2Y)]\}^{1/2} \quad (11)$$

郑哲敏 (Cheng 1986a) 还进一步考虑了可压缩性的影响, 认为卡门-钱近似适用, 此时,  $U_x/U$  可表达为

$$U_x/U = (W_c/W_0) \left\{ \sqrt{1 - M_0^2[1 - (U_c/U_0)^2]} + \sqrt{1 - M_0^2} \right\} / \left( 1 + \sqrt{1 - M_0^2} \right) \quad (12)$$

其中,  $W_c/W_0 = U_x/U_0$ ,  $M_0^2 = U_0^2/c_0^2$ ,  $c_0$  是材料声速. 进一步, 郑哲敏、李国豪等 (Cheng & Li 1986) 进行了多种金属的爆炸焊接实验, 结果显示, 考虑强度和可压缩性修正的界面波新理论与实验结果符合很好.

#### 4 地下核爆与流体弹塑性模型

流体弹塑性模型是郑哲敏和解伯民 (1965) 在 20 世纪 60 年代中期研究我国地下核爆炸效应时提出的, 这是描述介质在爆炸冲击载荷作用下动态响应的基本力学模型, 也是爆炸力学作为力学分支学科形成的标志之一 (Cheng 1991).

20 世纪 60 年代初, 为了冲破美国的核威胁, 我国加快了核武器的研制步伐, 并积极筹备进行地下核爆炸试验. 当时, 一个亟需解决的问题是对地下核爆炸威力 TNT 当量进行有效预报. 在圆满完成相关部门委托的核爆空中压力波标定任务后, 郑哲敏又接受国防科工委委托承担地下核爆当量预报这一重要任务. 事实上, 解决地下核爆炸威力预报问题的核心是如何来准确描述爆室空腔周围岩石或者土壤介质在爆炸载荷作用过程中的变形与破坏规律 (Butkovich 1965). 众所周知, 自然界中物质的存在形式主要有固体和流体 (液体和气体) 两类. 区分两者的主要标志是构成原子 (或分子) 的运动能

力, 流体原子能在较大范围自由运动, 而固体原子只能在其平衡位置附近做微小振动. 当然, 也可用松弛时间或承受剪切变形的能力来区分固体和流体. 但是, 所谓固体和流体是一个相对概念, 随着外部条件 (或环境) 变化, 介质可以发生固-液间的转化. 在地下核爆炸过程中, 爆室空腔周围岩石介质的流-固状态界限变得模糊 (Johnson 1959). 例如, 在核爆初始时刻, 瞬时极端高温高压足以使近场的岩石介质液化甚至汽化, 或者经受的压力远高于岩石的强度, 但是远场的岩石介质仍处于固体状态. 此外, 即使是在同一空间点, 介质状态也将随着核爆炸的时间演化不断从液体向固体转变. 这种介质状态的时空演化复杂性使得对地下核爆的当量预报遇到了前所未有的挑战. 核心科学问题是正确描述爆波的形成、结构与演化, 正确预报爆炸空腔的大小.

当时, 美国采用的是加州大学 Nuckolls 在 1959 年提出的 UNEC (underground nuclear explosion code) 模型 (Nuckolls 1959), 用于对地下核试验 (比如 Rainier 试验) 的当量预报. UNEC 本质上是一个分区模型, 爆炸冲击载荷被分解为冲击波压力 (球应力) 和剪应力 (偏应力) 两部分, 然后通过引入一系列临界条件, 将空腔周围介质在时空上分成气体区、压碎塑性区、破裂区和弹性区进行单独计算; 前 3 个区由压力主控, 而弹性区由剪应力主控. 通过对地下核爆过程物理图像分析, 郑哲敏指出 Nuckolls 将地下核爆按上述 4 个区域划分基本是合理的, 然而破碎区和压碎区使用的介质模型是不合理的 (郑哲敏、解伯民 1965). 受 von Kármán 在 1911 年研究岩石在围压下流动破坏现象 (von Kármán 1911) 的启发, 郑哲敏意识到岩石介质的静水应力响应 (流体性质) 和偏应力响应 (固体性质) 应该是互相依赖的; UNEC 模型未能体现这种依赖性, 因此无法准确体现介质状态从流体到固体的连续转变. 通过对

地下核爆演变物理过程的剖析, 郑哲敏和解伯民 (1965) 提出了一个新的地下核爆炸力学模型——流体弹塑性模型, 将空腔周围的介质当作兼有流体性质和固体性质的流体弹塑性体. 在地下核爆过程中, 介质状态取决于一个重要的无量纲参量——比强度  $Y/P$ , 其中  $Y$  是介质的特征强度,  $P$  是冲击波特征压力. 当比强度较小, 即特征压力远大于介质特征强度时, 介质近似于流体; 当比强度较大时, 可简化为固体; 但当比强度在一定范围内变化时, 介质必须考虑为流体弹塑性体.

郑哲敏提出的流体弹塑性模型虽然仍将核爆后介质分成: 汽化区、液化区、压碎区、破裂区和弹性区 (见图 7) 进行研究, 但是对介质力学行为在整个空间和时间上进行了统一描述. 他将介质的应力张量分解为静水应力和偏应力部分, 其中, 静水应力由高压状态方程控制, 用于描述介质的流体性质; 而固体性质服从偏应力和静水应力共同控制的弹塑性本构方程. 对于一维球对称条件, 采用拉格朗日坐标系, 流体弹塑性模型的基本方程可以概括为:

连续方程

$$\frac{\partial R}{\partial r} = \frac{\rho_0 r^2}{\rho R^2} \quad (13)$$

动量方程

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho R^2}{\rho_0 r^2} \left( \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{4}{3} \frac{\partial \tau}{\partial r} \right) + \frac{4\tau}{R} = 0 \quad (14)$$

能量方程

$$\frac{\partial e_T}{\partial t} = \frac{\partial e_v}{\partial t} + \frac{\partial e_s}{\partial t} = \frac{P}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{4}{3} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (15)$$

体积变化状态方程

$$P = f(e_v, \rho) \quad (16)$$

固体本构方程

弹性加载

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) = \frac{G}{\rho} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial t} \right) \quad (17)$$

流动应力

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} (Y + \alpha th\beta P) \quad (18)$$

塑性流动 (Prandtl-Reuss 方程)

$$\frac{\partial \gamma^p}{\partial t} = d\lambda \cdot \frac{\rho}{\rho_0} (Y + \alpha th\beta P) \quad (19)$$

加卸载迟滞修正

$$\tau = -G_1 \gamma, \begin{cases} -\frac{\partial \gamma}{\partial t} > 0, \tau > 0 \\ -\frac{\partial \gamma}{\partial t} < 0, \tau < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\tau = -G_2 \gamma, \begin{cases} -\frac{\partial \gamma}{\partial t} < 0, \tau > 0 \\ -\frac{\partial \gamma}{\partial t} > 0, \tau < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$G_2 > G_1 \quad (22)$$

可以看出,与传统流体动力学模型相比,流体弹塑性模型通过引入压力影响的固体本构方程来描述介质的固体弹塑性行为;与经典固体力学模型相比,又通过在能量方程中考虑压缩功和引入流体状态方程来体现介质的流体性质.此外,郑哲敏等(1967a)还对破裂区和压碎区内的裂纹效应进行了专门研究,对模型进行了修正.通过发展相关有限差分方法,可运用这个模型进行数值计算,从而获得地下核爆炸过程中空腔形成机理以及冲击波在周围介质

中的传播规律(郑哲敏等 1967a, 1967b, 1969).相关计算结果为我国 1969 年首次地下核试验的当量预报作出了重要贡献.

流体弹塑性模型奠定了作为新兴的爆炸力学学科的理论基础,直接促进了爆炸力学的发展.类似于最早的刚体、虎克定律所描述的弹性体等等,流体弹塑性模型中定义的流体弹塑性体在连续介质力学范畴代表了一种新型介质本构.该本构能够反映介质所具有的固体性质与流体性质的紧密耦合以及时空连续变化的天然特征,可统一表征介质状态从低压固体到高压气体的爆炸与冲击响应行为.需要指出的是,几乎在同一时期,美国加州大学的 Wilkins(1964)也独立提出了一个类似的模型.目前,流体弹塑性模型已被广泛应用于爆炸力学相关的各个领域,成为地下核爆、金属化学爆炸、穿破甲机理、钻地爆破弹问题、超高速撞击等问题的重要工具(谈庆明 2005).

## 5 爆炸排淤

由于黄河、长江、珠江等巨型多沙河流的注入,淤泥质海岸在我国有着广泛的分布.淤泥强度低,承载能力差,因此海岸工程中软弱地基的处理,长期以来为我国筑港技术界所普遍关注.20 世纪 80 年代,常用的水下软基处理技术主要有排水固结法和置换法.排水固结法通过在软基土体内打设砂井或者排水板等形成预埋井点排水管网,在加载的条件下加快淤泥层的排水固结从而改善淤泥的强度,消除工后沉降.这种方法需要消耗大量的砂,且工期较长,形成的海堤断面比较大.置换法,通过将基底以下一定范围内的软弱地基层挖去,然后以质地坚硬、强度较高、性能稳定、具有抗侵蚀性的砂、碎石或者开山石等材料分层充填,同时以人工或者机械的方法分层压、夯、振动,使之达到要求的密实度,成为良好的人工地基.置换法一般换填深度有限,如果部分清淤,残留淤泥会

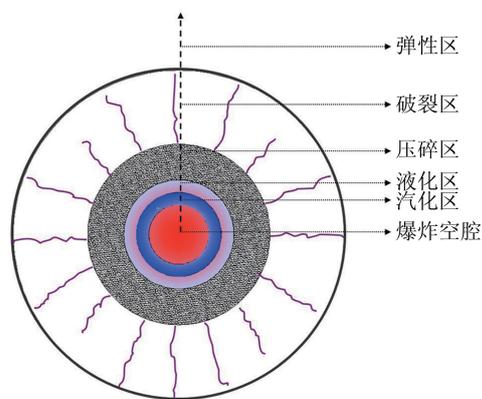


图 7 地下核爆炸过程中爆室空腔周围介质的分区示意图

影响海堤的稳定和变形,同时还存在工期长、造价高等不足.美国和前苏联在 20 世纪五六十年代,报道了一些用“toe-shooting method”处理海堤的堤脚或修筑抛石防护堤的实例 (DuPont 1954, 伊万诺夫 1988),但此方法远未得到普及,文献也仅限于对施工方法的简单描述和工程的简单报道,并未进行机理性的研究和工程性试验研究,因此只能提供思路而无法从中获得工程设计和施工的指导.

1984 年,连云港拟修建一条当时全国最长的海堤——连云港西大堤,长 6700 m,拟建场地水深 3.0~3.5 m,淤泥厚 6~8 m,流塑状态,十字板抗剪强度低,灵敏度高.建设单位和设计单位在选择海堤施工方法时遇到了难题,直接抛石筑堤,建成后海堤不稳定;采用清淤法,施工难度大,成本高;采用抛石强夯置换法,处理深度不够.为了寻找一种合适的海堤施工方法,郑哲敏带领中科院力学所、连云港建港指挥部等单位组成的科研组,经过 4 年多的联合攻关,提出用爆炸的方法修建海堤,并取得成功.在此基础上,他们发展了一大类以炸药为能源的爆炸处理水下海淤软基的新方法,并在实践中发展了爆炸排淤填石、爆夯和堤下爆炸挤淤等 3 种施工方法.

爆炸排淤填石法 (张建华等 1989) 主要是利用药包在堤前淤泥中爆炸形成爆炸空腔,堤头堆石体在强大的爆炸压力和振动,以及堆石体重力的联合作用下,形成“石舌”,滑向爆坑,从而达到抛石置换淤泥的目的 (图 8).爆夯法中,炸药起爆后,在爆炸载荷作用下,石块之间引起错位,使空隙率减少,同时爆炸作用使整个堆石体向淤泥中运动,将淤泥冲堆石体外泥面挤出.爆炸能量主要用于侧向挤淤.堤下爆炸挤淤法中,炸药引爆后,爆炸压力将淤泥从堆石体的淤泥面挤出,随后堆石体在重力作用下落至被挤出淤泥的空间.

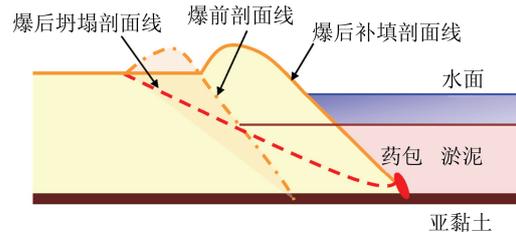


图 8 爆炸排淤填石法过程示意图

为了使爆炸处理海淤软基成为工程上通用的一种施工方法,郑哲敏还通过理论分析,结合机理性的模型实验和大型工程试验,对爆炸条件下淤泥的力学性质、淤泥中爆炸的鼓包运动规律,爆炸排淤填石、爆夯和堤下爆炸挤淤等 3 种爆炸清淤方法的机理、爆炸清淤方法中的模型律等进行了研究,为爆炸清淤法的工程普及提供了坚实的理论基础和强有力的技术保障 (郑哲敏、杨振声 1989).

他们发现,在爆炸条件下 (应变率在  $10^3 \sim 10^4 \cdot s^{-1}$ ),相对于冲击波压力,淤泥的黏性力可以忽略,因此淤泥中的冲击波传播规律与水中类似:淤泥中冲击波传播满足几何相似律;淤泥中的冲击波速也与水中的相近,但冲击压力峰值比水中的低.郑哲敏还阐明了爆炸清淤方法的机理.以爆炸排淤填石方法为例,当埋在堤前淤泥内的炸药引爆后,在淤泥中有冲击波传播,与此同时爆炸气体在淤泥内膨胀做功,可在淤泥内形成空腔,以致成为爆坑,压力迅速降低.而堆石体的前沿,在爆炸载荷的作用下,提高了压力,在空腔与爆坑之间形成了压力差和重力位势差.在堆石体孔隙中的水和淤泥,在压力差和位势差的作用下,形成泥石流,将石块带入并流向空腔和爆坑内.同时爆坑另一侧的淤泥和水,由于同样载荷的原因,也向爆坑中运动,在某一时刻与“石舌”相撞而阻止“石舌”继续运动,直至“石舌”运动停止.这就是“石舌”运动和停止的原因.在大厚度淤泥的工程实践中,当炸药埋深达不到要求时,起爆后,爆坑底

部尚有一层淤泥, 石舌和抛石体可能不落底. 但是爆炸排淤填石法是一个堤头反复循环和两侧的爆炸, 爆炸能量可引起堆石体下地基的振动, 从而将一部分淤泥从侧向挤出, 使堆石体落底.

郑哲敏提出, 爆夯、堤下爆炸挤淤法都可以认为是爆炸初期的冲击波效应为主的, 而爆炸排淤填石法则可以认为包含在时间上分离的两个阶段, 即形成爆破漏斗的初期阶段和堆石体坍塌滑落的后续阶段. 在初期运动的漏斗形成过程中, 黏性力和重力的影响一般可忽略, 几何相似律成立, 因此

$$D/W = f((Q/\rho_e)^{1/3}/W, n_1, n_2, n_3, \dots) \quad (23)$$

其中,  $D$  是反映漏斗大小的进尺量,  $Q$  是总药量,  $\rho_e$  是装药密度,  $W$  是药包中心到地面的最小距离, 即最小抵抗线,  $n_1, n_2, n_3, \dots$  等是反映水深、泥深、堤宽、石层宽度等的无量纲几何参数.

在运动后期, 考虑到堤头堆石方量很大且与药包之间保持较远的距离, 假设堤头部分在重力作用下运动, 其初始几何状态是在堤头前部有一个几何相似的漏斗, 初始速度为 0. 同时, 继续忽略黏性力, 并假设石体和土体为塑性体, 其剪切流动应力正比于正应力. 于是, 单位宽度上非平衡的推动力和变形阻力正比于  $gW^2$ ; 在重力作用下的运动时间正比于  $\sqrt{W/g}$ ; 另外, 参与运动的总质量正比于  $W^2$ . 因此, 根据牛顿第二定律, 堤头塌落的特征长度, 若以石舌长度  $P$  表征, 则有

$$P \propto W \quad (24)$$

因此, 在重力作用下的后期运动, 也服从几何相似律. 既然前期和后期都满足几何相似律, 那么整个过程都是几何相似的, 式 (23) 对于爆炸填石清淤的后期也是适用的, 该式又可以表达为药量公式

$$Q = W^3 \cdot g(D/W, n_1, n_2, n_3, \dots) \quad (25)$$

因此, 在几何相似条件下 (即  $D/W, n_1, n_2, n_3, \dots$  均为常数), 总药量与最小抵抗线的立方成正比. 此外, 如果炸药能量的利用率不随几何尺寸而变化, 即变形功正比于药量, 则有

$$D \propto Q^{1/3} \quad (26)$$

上式表明, 进尺量与总药量的立方根成正比. 这个关系也称为能量准则.

以上研究直接推动了爆炸清淤法的工程普及. 大量的工程实践表明, 爆炸法适用于各种类型的海工建筑淤泥地基的处理, 工程造价低, 施工简单, 具有良好的经济效益, 因此受到了业主、设计单位、施工单位的青睐, 广泛应用于港口、防波堤、海堤、围垦、水利水电等水工工程的淤泥质软基处理, 以及铁路、公路、机场、核电站、LNG 等其他各类工程的软基处理.

## 6 破甲机理

破甲弹是以具有内衬金属罩空腔的聚能装药爆炸后形成的高速金属射流摧毁坦克等装甲目标 (图 9). 空腔装药的聚能效应在 19 世纪末被人们所发现 (von Foerster 1883, Munroe 1888b), 在第二次世界大战期间得到广泛应用, 主要用于反坦克武器 (Meyers 1994). 破甲弹射流侵彻的理论研究始于二战期间, 最具代表性的射流侵彻理论是由 G. I. Taylor 和 G. Birkhoff 等于 20 世纪 40 年代建立的不可压流体理论 (Taylor 1943, Birkhoff et al. 1948). Taylor 等巧妙地利用不可压流体力学中的 Bernoulli 方程, 建立了射流侵彻深度与射流长度之比和射流与靶板密度比之间的简明而重要的关系, 成为了二战后期及战后 20~30 年破甲弹设计的主要理论依据. 但是, Taylor 的流体理论存在明显的局限性. 该理论指出侵彻深度主要取决于材料的密度, 如果射流和靶板密度相同, 理论预

测的侵彻深度应该与射流长度相等. 二战以后, 装甲材料的研究取得很大进展, 高强度金属、陶瓷等材料的研制成功和应用, 大大增强了装甲防御破甲弹的能力, 材料强度也起着重要的作用, “矛”与“盾”的关系发生了显著变化. 于是, 人们对侵彻机理有了一些新的思考, 试图探索密度之外其他可能的影响因素, 包括 Eichelberger(1956)、Aleksievskii(1966)、Tate(1967)等在 Taylor 不可压流体模型基础上引进材料屈服强度或硬度修正的尝试. 但是, 总体看, 这些工作是经验和试探性的, 没有建立较为完善的理论模型, 多数属于从工程角度提出的一些修正方法 (郑哲敏 1973a).

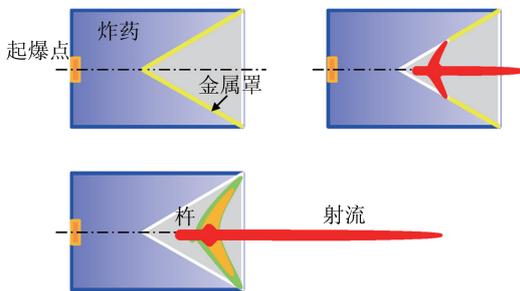


图 9 聚能射流示意图

20 世纪 60 年代末, 我国的破甲弹、穿甲弹等反坦克武器水平与欧美、苏联等军事强国有相当差距. 1969 年 3 月苏联入侵珍宝岛引发中苏珍宝岛战役. 在这次战役中, 苏联出动了高强度装甲的 T-62 坦克, 当时我军装备的主要反坦克武器, 如 75 mm 无后坐力炮、85 mm 加农炮和 56 式火箭筒等, 都无法有效地击穿苏联的 T-62 的正面装甲. 因此, 迫切需要发展更为完善的破甲射流侵彻理论以提高破甲弹威力. 在此前后的时间, 相关的兵器产业部门走访力学所寻求合作. 在此背景下, 郑哲敏决定开展破甲机理和模型律的研究, 一方面是应对苏联可能发动的坦克入侵; 另一方面, 在核爆当量预测研究任务中所建立的流体弹塑性体模型为突破当时国际流行的破甲机理奠定了理论储备, 且已成

功应用于穿甲模型律研究. 于是, 从 70 年代初开始, 郑哲敏及其领导的爆炸力学研究团队与相关兵器部门合作, 通过理论分析、模型与现场实验研究, 系统地建立了破甲射流侵彻的流体弹塑性理论 (郑哲敏 1973a, 1973b, 1980, 1981, 郑哲敏、高举贤等 1974, 郑哲敏、谈庆明 1977), 阐明了破甲过程的机理, 建立了定量、可靠和实用的计算公式, 为我国破甲弹等武器设计、制造提供了崭新理论基础. 郑哲敏在破甲机理方面的研究成果丰富, 这里仅主要介绍以下几方面的工作: (1) 射流侵彻模型律; (2) 射流准定常侵彻的线性律; (3) 准定常侵彻阶段侵彻速度与射流速度关系; (4) 射流稳定性的控制机理.

### 6.1 聚能射流侵彻模型律

破甲弹射流侵彻过程涉及众多可能的影响因素, 破甲机理研究的主要任务是澄清这些可能因素的影响程度和规律, 最直接的办法是利用聚能射流装置进行 1:1 实物实验. 然而, 实物实验周期长、消耗大. 因此, 研究射流侵彻过程的模型律, 用以指导模型实验十分必要. 郑哲敏从聚能装药、隔板、金属药形罩、射流侵彻靶板几个方面分别分析可能的影响参量, 通过量纲分析, 获得了破甲射流形成阶段的 12 个相似参数和射流侵彻阶段 14 个相似参数. 在相似参数相等的情况下, 模型实验的结果便可放大用于实际情况. 进一步, 如果模型实验中不改变炸药、药形罩、隔板、靶板材料, 那么那些表征材料性能的相似参数就会自动满足. 在此情况下, 射流侵彻深度  $P$  将满足如下的几何相似律

$$\frac{P}{\delta} = f\left(\frac{(W/\rho_e)^{1/3}}{\delta}, \frac{L_b}{\delta}, \frac{H}{\delta}, \frac{L_t}{\delta}, \phi\right) \quad (27)$$

其中,  $(W/\rho_e)^{1/3}$  为炸药的特征尺寸、 $\delta$  为药形罩的厚度、 $\phi$  为药形罩的锥角、 $H$  为炸高、 $L_b$  为隔板特征尺寸、 $L_t$  为靶板特征尺寸. 对于射流参数, 同样可以得到相应的几何相似律. 为了验证上述破甲射流侵彻相似律, 郑哲敏、高举贤等

用装药半径为 40, 50, 80 mm 的 3 种试验弹垂直侵彻厚钢靶, 证实了侵彻深度满足几何相似律, 相对误差小于 1%(郑哲敏、高举贤 1974).

射流侵彻过程几何相似律的建立, 为研究工作提供了一个经济有效的手段. 根据模型律, 就可以在实验室中做模拟试验, 并按模型律把所得实验结果推广应用到实际生产中去. 做模拟试验, 还可以对破甲机理进行深入细致的研究. 此外, 模型律也可帮助我们分析整理实验数据, 更好地从中找出相应的规律.

## 6.2 准定常侵彻的线性律

射流和靶板接触后的侵彻过程分为开坑和准定常侵彻两个阶段. 对于高强度靶板的侵彻, 这两个阶段哪一个是侵彻的主控阶段? 如果能够分辨出“主”“次”, 就能简化问题的分析, 以利于突击核心问题. 郑哲敏和谈庆明 (1977) 通过准定常侵彻的理论分析建立了最大穿深与炸高之间的线性律, 进一步与实验的比对, 证实了准定常侵彻起主控作用.

对于破甲射流侵彻, 侵彻速度  $V$  与射流速度  $V_j$  之间一般存在一个确定的关系  $V = V(V_j)$ , 在射流材料一定的条件下, 这个关系只取决于靶板材料的性质. 假定侵彻为准定常, 郑哲敏 (1981) 根据侵彻曲线的定义、射流的初速分布、侵彻的初始条件和几何关系, 得到了如下以  $V_j$  为参变量的侵彻曲线 (简称  $p-t$  曲线):

$$t(V_j) = e^{-F(V_j)} \int_{V_{j0}}^{V_j} e^{+F(V_j)} \frac{dx_0/dV_j}{V_j - V} dV_j \quad (28)$$

$$x(V_j) = -x_0(V_j) + u_j e^{-F(V_j)}.$$

$$\int_{V_{j0}}^{V_j} e^{F(V_j)} \frac{dx_0/dV_j}{V_j - V} dV_j \quad (29)$$

其中  $F(V_j) = \int_{V_{j0}}^{V_j} dV_j/(V_j - V)$ . 由此可得最大穿深为

$$P = -x_0(V_{jL}) + V_{jL} e^{-F(V_{jL})} \frac{dx_0/dV_j}{V_j - V} dV_j, \quad V_{jL} \geq V_j^* \quad (30)$$

$$P = -x_0(V_j^*) + V_j^* e^{-F(V_j^*)}.$$

$$\int_{V_{j0}}^{V_j^*} e^{F(V_j)} \frac{dx_0/dV_j}{V_j - V} dV_j,$$

$$V_{jL} \leq V_j^*, \quad V_{j0} > V_j^* \quad (31)$$

在此基础上, 得到了最大穿深  $P_m$  与炸高  $H$  之间存在如下线性律

$$\frac{dP_m}{dH} = \frac{V_{jL}}{V_{j0}} e^{-F(V_{jL})} - 1 \quad (32)$$

值得注意的是, 这个线性律不需以不可压流体假设为前提, 是准定常侵彻中一个普适的规律. 如果实验中穿深与炸高的线性律存在, 则可以认为在  $V$  和  $V_j$  之间存在着一个与炸高无关, 即与射流速度分布无关的关系  $V = V(V_j)$ . 这个关系, 从极限角度看, 就是准定常侵彻关系. 实验结果证明, 在连续射流的条件下, 最大穿深和炸高的确存在线性关系. 这样, 郑哲敏揭示了破甲弹射流侵彻的一个重要规律: 在射流保持连续条件下, 穿深随炸高的增加而线性增加, 称为线性律. 线性律成立的原因是由于射流的长度大, 质量分布比较均匀, 而且靶板的强度比较高 (郑哲敏、谈庆明 1977). 这表明在侵彻过程中, 准定常侵彻是占主导地位的, 以致非定常效应可以忽略不计. 线性律的存在也表明了, 在研究破甲机理时, 应该着重研究准定常侵彻, 其中准定常侵彻  $V-V_j$  关系是关键.

## 6.3 流体弹塑性侵彻理论

Taylor 等的定常不可压流体侵彻理论, 虽然概念清晰、表达简明, 许多研究者都发现其存在固有的局限性. 为了进一步考察 Taylor 流体理论的局限性, 郑哲敏等 (1977) 进行了两种强度的装甲钢 (45 钢, 屈服强度为 0.6 GPa; 603 钢, 屈服强度为 1.0 GPa) 的垂直侵彻实验, 将实验获得的侵彻速度  $V$  和射流速度  $V_j$  数据与 Taylor 流体理论 ( $V/V_j = 1/(1 + \sqrt{\rho_t/\rho_j})$ ) 预测的结果进行比对, 结果如图 10 所示. 从图中对

比可以看出, 当射流速度在 4 km/s 以上, 这时射流动压 ( $\rho_f V_j^2/2$ ) 远高于靶板强度, 忽略材料强度效应的 Taylor 不可压流体模型 (如图 11 所示) 预测与理论符合很好. 然而, 当射流速度低于 4 km/s, 不可压流体模型与实验结果存在明显偏差. 郑哲敏通过分析指出, 在射流与靶板开始接触时, 即开漏斗 (开坑) 的阶段, 压力可达 200 万大气压, 温度可达 5000 K, 在这种情况下, 可以用可压缩流体理论进行分析, 而材料强度对侵彻速度的影响可忽略不计, 增加靶板的强度对于这个阶段的抗侵彻能力没有太大作用; 而在射流侵彻后期的准定常侵彻阶段, 孔

径随侵彻深度缓慢变化, 这个阶段, 强度效应起重要作用. 最大穿深和炸高的线性律已表明准定常阶段在射流侵彻过程中起主控作用. 因此, 准定常侵彻新理论的建立必须能计及材料强度效应.

侵彻问题最为核心的是建立侵彻速度与射流速度之间关系, 即  $V-V_j$  关系.

为了考虑强度效应, 郑哲敏建立了不可压流体-理想刚塑性射流侵彻模型. 假定材料服从理想刚塑性模型, 其屈服强度  $Y$  随压力  $P$  和温度  $T$  的变化满足如下关系 (郑哲敏 1973a, 1973b, 1980, 1981, 郑哲敏, 高举贤等 1974, 郑哲敏, 谈庆明 1977)

$$Y = Y_0(1 + \alpha p)F(T/T_M(P)) \quad (33)$$

其中,  $Y_0$  为高应变率下的屈服强度,  $F$  是相对温度的函数,  $T_M$  为压力依赖的熔点, 由下式表征

$$T_M(P) = T_{M0}(1 + \gamma P)^\omega \quad (34)$$

其中,  $\gamma$  和  $\omega$  为材料系数. 材料模型 (33)、(34) 连同质量守恒、运动方程、能量方程和塑性流动规则, 就构成了流体弹塑性侵彻理论的基本方程组. 郑哲敏以不可压流体解的速度场作为零阶近似, 然后进行强度影响的修正. 对于平面射流侵彻靶板问题, 研究了温度、压力对侵彻深度的影响, 发现强度的温度依赖性对侵彻深度影响不大, 而是强度的压力依赖性对侵彻深度影响较大. 如果只考虑强度的压力依赖性, 此时, 侵彻速度与射流速度之间的  $V-V_j$  理论关系为 (郑哲敏、谈庆明 1977)

$$\frac{1}{2}\rho_t V^2 = \frac{\rho_j(V_j - V)^2/2 - \sigma_p e^{-\mu_0} + (1 - e^{-\mu_0})/\alpha}{e^{-\mu_0} \left[ (1 - \bar{q}_p^2) + 2 \int_0^{\bar{q}_p} \bar{q} \cdot e^\mu d\bar{q} \right]} \quad (35)$$

基于流体弹塑性平面射流分析得到的  $V-V_j$  理论关系, 郑哲敏又提出了轴对称射流侵彻问题

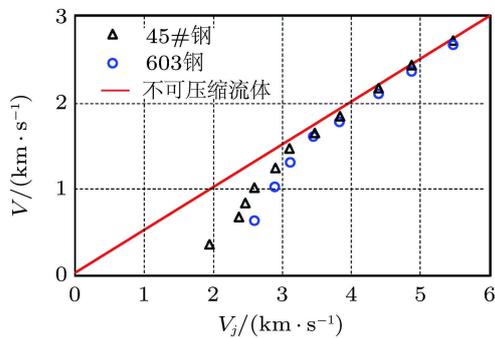


图 10 侵彻速度  $V$  与射流速度  $V_j$  关系

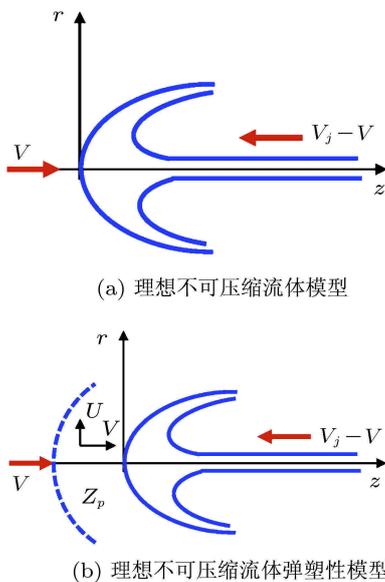


图 11 射流侵彻的流体弹塑性模型

的  $V-V_j$  关系

$$\frac{1}{2}\rho_j(V_j - V)^2 = \frac{1}{2}\rho_t V^2 + \frac{1}{2}\rho_j V_j^{*2} + \frac{1}{2}\sqrt{\rho_t \rho_j} \alpha K^{1/2} V_j^* \quad (36)$$

其中,  $V_j^*$  为临界射流速度. 基于上述  $V-V_j$  关系获得的侵彻曲线的计算结果在整个侵彻阶段都与实验结果吻合得很好, 基本上完整地解决了定常侵彻的机理问题.

流体弹塑性射流侵彻模型 (如图 11) 的研究结果表明, 射流、靶板的强度和密度是影响准定常侵彻阶段侵彻能力的关键因素, 提高装甲抗侵彻能力的途径是提高  $Y_0$ ,  $\alpha$  和  $\gamma\omega$  并降低  $Y_0/\rho c_v T_{M0}$ , 而提高靶板的高温强度并不能提高其抗侵彻能力.

#### 6.4 聚能射流稳定性

根据 Taylor 的准定常射流侵彻理论, 聚能射流侵彻深度近似等于射流的长度. 大量实验表明, 破甲弹形成的高速金属射流飞行过程中, 就在不同的部位发生颈缩失稳, 继而被拉断, 原来连续完整的射流拉断成许多小段. 颈缩, 特别是拉断后的射流严重丧失侵彻能力. 因此, 研究聚能射流颈缩失稳和拉断的规律, 揭示这一现象的影响因素和背后控制的物理机制尤为重要. 射流稳定性与破裂涉及多种非线性耦合作用的物理机制. 一般液体射流的射流稳定性问题的研究可以追溯到 18 世纪后期 Rayleigh 的经典工作, 射流的失稳断裂源于表面张力驱动的 Rayleigh-Plateau 不稳定性 (Rayleigh 1879). 射流的断裂时间由表征表面张力和射流惯性竞争的 Weber 数控制, 表面张力驱动失稳, 惯性抑制失稳 (Eggers 1997). 破甲弹金属射流与液体射流有显著不同. 通常, 破甲弹聚能射流飞行过程中, 头部速度高达 8~10 km/s, 尾部 1~2 km/s, 存在很大的速度梯度, 从而在射流轴向造成很大的拉伸, 而液体射流一般不考虑拉伸效应的影响. 此外, 聚能射流本身的强度效应、高速飞

行过程中的气动效应等也都可能耦合进来协同影响射流的失稳断裂. 显然, 控制聚能射流失稳破裂的物理机制势必与液体射流有所不同. 那么, 这个机制到底是什么呢? 这个问题逐渐引起人们重视, 20 世纪 70 年代以前主要是一些实验方面工作, 对射流失稳断裂机制还相当模糊. 70 年代中期, 郑哲敏 (1977, 1981) 在前期研究破甲弹射流侵彻过程中认识到了这一问题的重要工程及理论价值, 并通过量纲分析和扰动失稳分析, 获得了聚能射流失稳判据、颈缩与断裂时间, 揭示了低速段射流失稳断裂的由强度控制, 高速段的失稳断裂则源于高速空气的扰动, 从而完美地解决了聚能射流的失稳断裂问题, 为破甲弹设计提供理论依据. 同一时期, 美国学者周培基 (Zhou 1977) 利用扰动分析和数值模拟也给出射流低速段的失稳主因是射流的强度效应, 但未阐明高速段的影响机制.

实际上, 聚能射流失稳过程十分复杂, 涉及的因素除了射流的强度、惯性之外, 在高速段还有外界空气动力影响. 聚能射流速度呈现头部大尾部小的特征, 飞行中处于拉伸变形状态. 如果由于射流表面压力分布存在的扰动使射流的某个截面有所减小, 那么它将继续减小下去直至拉断, 这是高速段射流失稳断裂的一个基本原因. 对于低速段的拉断失稳, 郑哲敏 (1981) 巧妙地引入表征射流初始直径和速度梯度 (应变率) 组合影响的“面积冲量”  $\Omega = d_0^2/(d\varepsilon/dt)$ , 通过量纲分析, 得到了射流颈缩和拉断的位置和时间表达, 其中拉断的时间由下式给出

$$t_b = C(\psi)(\Omega\rho_j/Y)^{1/3} \quad (37)$$

其中,  $C(\psi)$  是仅与断面收缩率  $\psi$  相关的射流截面常数. 对于真实射流,  $\Omega$  是  $V_j$  的函数, 这个函数可由试验测定. 由此式不难发现, 影响控制低速段射流断裂的因素是材料强度与惯性. 通过对射流颈缩及断裂位置分别进行预测, 郑哲敏发现该理论结果与射流低速段 ( $V_j < 5$  km/s)

的试验结果符合得非常好 (如图 12 所示), 从而揭示了在低速段, 射流失稳是材料强度与惯性相互竞争的结果. 为了定量揭示射流失稳断裂的影响机制, 郑哲敏进一步建立了二维理论模型, 分别对低速段和高速段进行了扰动分析.

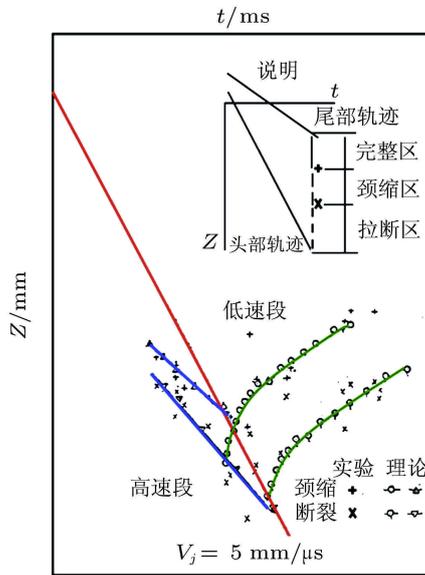


图 12 聚能射流颈缩和拉断的发展

在低速段, 假定射流速度沿轴线线性分布、强度不随应变硬化和应变率变化, 考虑射流变形与表面张力引起的系统能量变化, 郑哲敏基于动力学的普遍原理——哈密顿原理, 建立了二维射流稳定性的基本方程

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - \frac{1}{8\tau^3} - \frac{\partial^4 \zeta}{\partial \xi^2 \partial \tau^2} + \frac{3}{8\tau^4} \frac{\partial^3 \zeta}{\partial \xi^2 \partial \tau} - \left( \frac{3}{4} \frac{1}{\tau^6} - \frac{1}{\tau^2} - \frac{\Gamma}{\tau^{3/2}} \right) \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{8\tau^6} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial \xi^4} + \frac{\Gamma}{\tau^{9/2}} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial \xi^4} = 0 \quad (38)$$

式中包含 3 个重要的无量纲变量:  $\xi = V_j / \sqrt{Y/\rho_j}$  和  $\tau = (t^* + t) / (\Omega \rho_j / Y)^{1/3}$  分别为反映射流强度和惯性竞争的无量纲速度和时间;  $\Gamma = T(\rho_j / Y \Omega^2)^{1/6} / 2Y$  为表征射流表面张力  $T$  与其强度、惯性竞争的无量纲量. 代入典型射流数据分析发现,  $\Gamma$  是个介于  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  间的小量. 这说明, 与强度和惯性  $Y$  相比, 表

面张力的影响可以忽略. 设定扰动形式的解为  $\zeta = A(\tau) e^{in\xi}$ , 利用微分方程 WKB 分析方法, 寻求扰动失稳增长最快模式. 基此, 郑哲敏获得了如下射流失稳的准则 (郑哲敏 1981)

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \sqrt{P_n(\xi)} d\xi = \alpha \quad (39)$$

其中,  $P_n(\xi)$  是包含表征强度与惯性竞争的无量纲时间  $\tau$  的复杂表达,  $\alpha$  是一个需由实验确定的经验常数, 对于颈缩失稳和刚刚拉断两种情况, 取不同的数值. 利用实验数据, 由式 (39) 计算  $\alpha$ . 对于速度较低的射流发现, 所得的  $\alpha$  值作为  $e$  的指数是一个大数, 从而很好地说明其所表征的强度驱动失稳效应是低速射流失稳断裂的主导因素.

对于高速段, 空气对射流表面的压力效应将不可忽略, 郑哲敏 (1981) 将该空气动力学影响因素考虑到射流系统的哈密顿方程中, 采用类似于低速段的扰动分析, 得到高速段射流出现颈缩失稳或拉断的时间为

$$t = t^* \left\{ \frac{1}{[1 - \beta(\Omega/V_j)]^2} - 1 \right\} \quad (40)$$

式中,

$$\beta = \frac{\alpha}{m} \sqrt{\frac{\rho_j}{2\rho_0}} \frac{1}{c^{1/2} t^{*2}}$$

$m = ka_0$  ( $k$  为常数),  $c$  是空气声速,  $\rho_0$  是未扰动空气的密度. 可以发现, 不同于低速段, 高速段射流失稳的主要驱动力不再是材料的强度, 而是空气动压. 也就是说, 高速段射流表面空气动压与射流惯性的相互竞争决定了射流是否发生失稳, 而低速段失稳则取决于强度与惯性的竞争. 通过选择适当的  $\beta$ , 可以有效地预测高速段的试验结果 (如图 12 所示).

根据上述理论分析结果, 从抑制射流失稳破断的角度, 郑哲敏对破甲弹药形罩材料设计指明了方向, 即药形罩材料要有足够高的声速、充分的延展性、高的密度和低的强度. 实际

上,我国破甲弹药形罩材料的选取也正是基于上述原则进行的。

## 7 煤与瓦斯突出

煤与瓦斯突出是一种复杂的矿井瓦斯动力现象,也是威胁煤矿安全生产的一个严重灾害问题。自从 1834 年,在法国鲁阿雷煤田伊萨克矿井发生了世界上第一次煤与瓦斯突出开始,到目前为止,据报道已经大约有 18 个国家有煤与瓦斯突出发生,其中,中国、法国、俄罗斯、波兰、日本 5 个国家的突出情况最为严重。我国煤年产量居世界第一位,能源结构以煤为主。自 1950 年发生有记载的第一次煤与瓦斯突出现象以来,随着采掘深度不断增加,地应力和瓦斯压力不断增大,导致我国突出事故日益频发,严重威胁着工人的生命安全和煤炭生产。由于影响煤与瓦斯突出的主要因素中,煤岩物理力学性质比较复杂,煤岩破坏具有多样性,瓦斯赋存和运移过程十分复杂,这导致对于突出的原因、过程等很不清楚。由于问题的复杂性,世界上主要产煤国虽然进行了长期的研究,但突出的机制仍然是没有解决的难题。

郑哲敏从 20 世纪 80 年代初,开始组织煤与瓦斯突出问题的研究(郑哲敏 1982a)。他从力学角度,通过量纲分析方法,首先详细分析了要解决煤与瓦斯突出问题而必须说明的 4 个问题:(1)煤与瓦斯是怎样启动的;(2)形成煤与瓦斯突出的能量来源;(3)为何突出的瓦斯远多于突出的煤本身所含有的瓦斯;(4)煤与瓦斯突出为何停止。通过分析,他指出煤层中赋存的瓦斯是大型突出所需能量的主要提供者,突出煤层中瓦斯内能要比煤体的弹性潜能大 1~3 个量级,同时得到了控制该问题的 11 个无量纲参数,其中 5 个无量纲参数组成了发生瓦斯突出的临界判据

$$f(\sigma/p, p_g/p, \Omega/t, K\kappa, \phi_c) = 0 \quad (41)$$

式中,  $p$  是煤层中的静水压力,  $\sigma/p$  是无量纲的

煤的侧压强度,  $p_g/p$  是无量纲的瓦斯压力,  $\Omega/t$  是无量纲的煤层初始爆破半径,  $K\kappa$  是无量纲的煤的单位体积应变能,  $\phi_c$  是摩擦系数。这个判据揭示,在其他条件不变的情况下,  $\sigma/p$  低于一定的值就要发生突出;或者,如果其他条件不变,  $\Omega/t$  超过一定的值,也要发生突出。考虑到  $p_g$  与  $p$  相比只起次要作用,郑哲敏还得到了突出强度的一般表达式

$$\frac{R}{\Omega} = g\left(\frac{\sigma}{p}, \frac{\Omega}{t}, K\kappa, \phi_c\right) \quad (42)$$

式中,  $R$  是突出区空腔的平均半径。

郑哲敏及研究团队在 1987 至 1989 年连续发表文章(丁晓良等 1989),从室内突出模拟实验和理论分析两方面考察煤在瓦斯渗流作用的破坏及其扩展机制。他们从一维和二维的突出模拟实验发现,煤体的破坏以薄片状多层开裂的方式向煤体内部扩展(图 13);当初始瓦斯超压较高时,破坏扩展过程随着时间演化趋于某种稳态,破坏前沿发生恒速  $V_f$  推进的自持突出,破坏片具有一定的特征厚度  $\Delta z$ 。进一步的分析与实验表明,这个推进速度和特征厚度由突出前沿附近的瓦斯渗流和煤体抗拉强度决定。特别重要的是,在一维条件下,他们揭示出瓦斯突出的一个线性律,即破坏片的特征速度和特征厚度的乘积与参数组合  $k(p_g - \sigma)/(\varepsilon\mu)$  成线性关系,即

$$V_f \cdot \Delta z = \frac{k}{\varepsilon\mu} (p_g - \sigma) \quad (43)$$

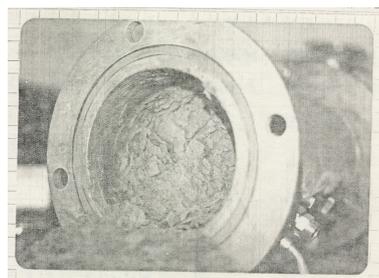


图 13 试验中瓦斯突出后的照片

式中,  $k$  是渗流系数,  $\varepsilon$  是煤层孔隙率,  $\mu$  是瓦斯黏性系数,  $p_g - \sigma$  是瓦斯压力与煤体抗拉强度之差, 在实际中,  $p_g - \sigma \approx p_g$ . 在实验中还发现存在两个临界压力, 将煤层在突然卸载条件下的响应分为 3 种类型: 无破坏模式, 煤层中只有渗流; 层裂模式, 即在界面附近一段煤被破坏层裂, 破坏区长度随压力而增加; 突出模式, 即破坏发展到流化, 形成煤粉和瓦斯的两相流 (陈力 1989).

在前期实验和理论分析基础上, 郑哲敏 (1993) 建立了关于两相介质的渗流破坏的模型, 揭示了突出的主要过程和特征. 他进一步对瓦斯突出过程中以及之后的煤粒与瓦斯两相流动过程进行了分析, 给出了各个运动阶段的两相压力、速度的解析表达, 并得到了煤中瓦斯特征渗流速度与煤的材料性质及煤层几何参数的显式表达

$$u_T = \frac{\tau_M l k}{A \varepsilon \mu} \quad (44)$$

式中,  $\tau_M$  是极限剪应力,  $l$  和  $A$  分别为煤层的特征长度和截面积.

## 8 天然气水合物开采

天然气水合物 (简称水合物) 被普遍认为是 21 世纪战略能源. 目前世界上已有 100 多处海域直接或间接发现了水合物 (Tréhu 2003). 我国分别在 2007 年和 2008 年在南海和祁连山冻土区获得水合物样品. 自 20 世纪 80 年代初, 世界上许多国家将水合物列入国家重点发展战略, 美国和日本已经分别制定了到 2015 和 2016 年进行商业开采的时间表, 我国自 1998 年开始水合物调查工作. 水合物是由固态水合物、孔隙水、孔隙气、岩土骨架等多相介质构成. 分解过程中涉及到相变和传热, 以及随着引起的渗流和地层变形, 其中传热、孔隙渗流、水合物相变特征时间相差几个量级, 故是具有多长时间尺度的问题, 较常规的岩土力学问题复杂得多.

2004 年, 在郑哲敏的倡导和带领下, 中科院力学研究所开始进行水合物的研究. 针对我国水合物勘探和开采研究远远落后于国际水平的现状 (George 2009), 提出了水合物研究的 3 个方向: (1) 天然气水合物勘探关键技术; (2) 天然气水合物开采原理与技术; (3) 含天然气水合物矿区的环境和灾害力学问题研究. 考虑到水合物引起的灾害不仅是水合物安全开采的保障, 而且是上部覆盖水合物层的油气田安全开采的保障, 他带领学生一起从基本实验开始进行这方面的研究.

当时国内外针对水合物分解引起的地质灾害, 基本还集中在已有与水合物相关的大规模海底滑坡地质调查和分析阶段, 对产生的机理理解和水合物分解引起的局部破坏分析很不够 (Driscoll 2000). 郑哲敏及团队不仅进行了小尺度模型实验, 而且在国内外首次开展了离心机实验以模拟大尺度情况, 系列研究了水合物分解导致地层滑塌和地层中管道稳定性的实验. 在实验中发现了深海油气开采和水合物开采具有严重威胁的新的地层破坏现象, 即水合物分解引起地层的分层和剧烈喷发现象 (图 14). 分析表明, 这两种灾害的产生是由于水合物分解引起的孔隙气压的累积和地层强度降低的耦合结果, 基于此提出了实用的临界条件 (张旭辉 2010, Zhang et al 2011).

由量纲分析发现, 水合物相变、热传导、渗流和应力波特征时间相差几个量级, 于是郑哲敏提出了将问题解耦的分析方法, 同时发现缓慢的热传导是水合物开采的核心问题, 于是又提出了一个新的开采方法: 机械-热效应的混合开采方法 (鲁晓兵等 2011). 其基本流程是: 地下挖掘  $\rightarrow$  粉碎  $\rightarrow$  传送  $\rightarrow$  混合 \ 分解 \ 分离 \ 回填  $\rightarrow$  颗粒流输送  $\rightarrow$  气体做功 (注海水)  $\rightarrow$  气体输送与收集. 即像采煤采矿一样通过机械设备挖掘水合物地层并将水合物粉碎成小颗



(a) 分解导致分层现象



(b) 水合物分解导致喷发现象

图 14 实验中发现的两种新现象

粒,然后在预先设计的水合物分解仓内实现较热海水的供给、小颗粒与海水的掺混、水合物分解、沉积物的分离回填、气体通过开采管道收集.这种方法将水合物沉积物转变成可以随流体流动的小颗粒,因此,既可借助海水与对流传热这个巨大的热源供给水合物分解的热量,又可将沉积物的回填恢复一定的地层强度,也避免水合物分解的气体从覆盖层的泄漏.上述混合开采方法的机理和可行性尚待进一步的研究.

## 9 材料力学行为

郑哲敏早在 20 世纪 50 年代末研究爆炸成形时就十分重视材料力学行为研究,当时他组建了载荷、材料性质和成形 3 个研究组,并担任材料性质组和成形组的组长.他在 1978 年的全国力学学科规划中便将材料力学性质列为 14 项重大课题的第 1 项.为了实现这个规划,1979

年在力学研究所建立了专门从事这项材料力学性能研究的研究室(第 16 室).接着,他又在中国科学院内,联合力学研究所、金属研究所、固体物理研究所、腐蚀和防护研究所等单位,发起和组织院内大协作,主持承担了中国科学院七五重大基础项目“材料的变形、损伤、断裂行为的机制及其力学理论”的研究.1982 年,郑哲敏发表了《连续介质力学与断裂》的论文,指出在断裂分析中存在一个被忽视的长度量并提出尺度效应必须包括到断裂理论中,这篇论文的学术观点引导了那个时期材料力学性能研究室的研究工作.实际上,固体材料变形与断裂的尺寸效应仍然是当前国际固体与材料力学行为研究的热点之一.1988 年 6 月在力学研究所成立了中国科学院非线性连续介质力学开放研究室(LNM),郑哲敏任首任主任,将固体材料的非线性力学性质设立为实验室 3 个中长期研究方向之一.从 1979 年的材料力学性质研究室到 1988 年创建的以材料非线性力学性质为主攻方向的 LNM 是一个重要推进.LNM 经过 20 余年的发展已成为数理领域优秀的国家重点实验室.20 世纪 90 年代,郑哲敏与郑仰泽合作系统建立了硬度表征的能量标度理论,为微纳尺度材料力学性能表征提供一条有效途径.

### 9.1 材料非局部断裂

20 世纪 70 年代末,由 Griffith(1921)开创,并经 Irwin(1951)、Orowan(1948)、Rice(1968)、Rice 和 Rosengren(1968)、Hutchinson(1968)等发展而形成的弹塑性断裂力学在阐明发生的一系列重大的低应力脆断灾难性事故原因、工程构件的安全设计、寿命评估等方面取得了巨大成功(杨卫 1995).同时,基于经典连续介质力学的断裂理论也面临一系列的挑战.突出的有,裂纹尖端场的物理图像尚不明朗,应力奇异性存在的合理性存在相当的争议.此外,经典的连续介质力学不考虑材料内部的特征尺度,其适用

条件为所研究现象的特征尺度远大于材料内部的特征尺度. 然而, 当这两个尺度相当时, 尺度效应将非常显著. 那么, 如何深入理解和表征这些物理现象需进一步探索.

1982 年, 郑哲敏 (1982b) 巧妙地运用量纲分析的方法, 揭示了将材料内部尺度引入经典连续介质力学对理解材料断裂机理的重要性. 结合 Griffith 的能量准则, 假设裂缝的扩展是弹性能向表面能的转化, 给出半长为  $l$  的裂纹在拉应力  $\sigma_0$  开始扩展的条件为  $f(\sigma_0^2/E, \nu, \gamma, l) = 0$ , 其中,  $E$  是杨氏模量,  $\nu$  是泊松比,  $\gamma$  是表面能. 进一步, 根据量纲分析, 得到了裂纹扩展时单位体积弹性应变能向表面能转化的基本关系

$$\pi(1-\nu^2)(\sigma_0^2/E) \cdot l = 2\gamma \quad (45)$$

显见, 体积弹性应变能向表面能转化存在一个特征尺度  $l$ . 郑哲敏指出, 真实材料都具有内部结构, 这个隐含的尺度代表材料内部的特征尺度. 运用 Eringen(1977) 的线弹性非局部理论, 郑哲敏探讨了对于线弹性材料这个长度的物理意义. 以线弹性单晶断裂问题为例, 引入晶格常数作为材料内部的特征尺度. 通过研究发现, 在考虑材料内部特征尺度的情况下, 裂纹尖端的应力奇异性将不再存在; 最大拉应力准则与 Griffith 的能量准则是完全一致的; 同时, 这一理论确定的内聚应力与由原子理论和实验预测的内聚应力符合良好. 这意味着, 材料内部特征尺度的引入将使宏观断裂具有更明确的微观物理图像, 同时使得挖掘更深层次的断裂机制成为可能.

对于弹塑性断裂, Orowan(1948) 提出把塑性功包括在表面能内, 则 Griffith 理论仍可适用, 从而将 Griffith 线弹性断裂理论推广到弹塑性范畴. 郑哲敏注意到, 塑性功是体积能, 它与表面能的量纲不同, 因此两者不能简单的相加. 并指出, 能把塑性功表示为表面能量纲的唯一可能是找到一个能表征材料内部结构的尺度. 若

想进一步阐明材料的断裂机理, 必须对经典弹塑性力学加以改进, 使其建立在一个能正确描述材料内部结构的本构关系上. 针对这一问题, 郑哲敏 (1982b) 以韧窝断裂为例, 引入二相粒子材料的内部尺度, 研究了裂纹尖端场及断裂韧性. 他揭示出裂纹端部存在两个特征区域, 分别表征塑性区  $A$  和断裂过程区  $B$  (如图 15 所示). 塑性区  $A$  的半径表示为

$$r_{pc} \approx \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 = \frac{E}{\sigma_y(1-\nu^2)} (C\varepsilon_u\delta + C'r_{pc}\bar{\varepsilon}) \quad (46)$$

式中,  $\delta$  是二相粒子间距,  $K_{IC}$  是 I 型断裂韧度,  $\sigma_y$  和  $\varepsilon_u$  分别为材料宏观屈服强度和应变,  $\bar{\varepsilon}$  是  $A$  区的平均塑性应变,  $C$  是与微空穴形成和复合的细观过程有关的常数,  $C'$  表示  $A$  区的大小. 由式 (46) 可知,  $r_{pc}$  正比于  $\delta$ , 即塑性区  $A$  的特征尺寸是由二相粒子间距  $\delta$  决定的. 从而阐明, 裂纹的扩展受控于和二相粒子等密切相关的裂纹顶端的细观过程, 而塑性区不过是过程区作用的一个间接表现.  $A, B$  两区的相对大小和分别消耗的能量取决于两个因素: 一是二相粒子导致的强度削弱是否显著; 二是裂纹尖端 (在裂纹起始扩展或稳定扩展时) 的尺度与  $\delta$  的相对大小. 若强度削弱显著, 裂纹尖端尺度小 (如与  $\delta$  同一个量级), 此时可忽略  $A$  区的影响, 将注意力集中在比较狭窄的  $B$  区, 而此时, 由于裂缝尖端的特征尺寸与  $\delta$  相当, 材料的非均匀性或内部尺度不可忽略. 若二相粒子对强度没有任何削弱, 那么经典弹塑性力学完全可用. 关于合金材料裂纹尖端的特征尺度, 郑哲敏提出对于韧窝断裂的情况, 这个尺度可能是两相粒子的间距; 而对于有塑性变形的解理断裂的情况, 这个尺度则可能是晶粒的尺寸. 该工作通过引入合金材料的内部尺度, 从细观层次揭示了宏观弹塑性断裂的物理实质, 同时也可作为尺

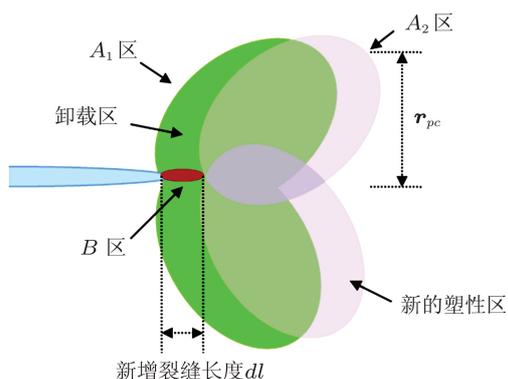


图 15 裂纹尖端场

度相关的非局部断裂理论发展提供线索。

鉴于经典连续介质力学描述断裂问题的不足,通过考虑材料微结构的影响,虞吉林与郑哲敏(1984)发展了一种非局部弹塑性连续体模型.考虑到原子间的长程作用力,应力与弹性应变之间用非局部关系描述.塑性应变则与平衡状态原子排列的永久性变化相对应,与总应变的历史相关.基于小变形、塑性形变理论,他们建立了幂硬化材料的非局部弹塑性本构关系和基本方程组,并用它来研究拉伸裂纹尖端附近的应力场.利用经典断裂力学中得到的拉伸型裂纹尖端 HRR 奇异解的结果,在一维简化下导出了小范围屈服时裂纹尖端附近最大拉应力的表达式

$$t_{\max} = A_n \sigma_y^{\frac{1-n}{1+n}} \left( \frac{JE}{b} \right)^{\frac{n}{1+n}} \quad (47)$$

式中,  $A_n$  为材料硬化指数  $n$  为相关的常数,  $\sigma_y$  为简单拉伸时的屈服应力,  $E$  为杨氏模量,  $b$  为晶格常数.由此进一步证明,经典断裂力学中的临界  $J$  积分准则可以从非局部弹塑性理论中的最大拉应力准则得到.该理论将断裂的宏观力学模型与微观物理机理有机的统一起来,其预测的裂纹尖端场的临界最大拉应力的量级与晶格内聚力相近,有助于更好地理解材料断裂过程中的微观物理机制.

## 9.2 纳米压入标度律

随着纳微尺度制造与加工技术的迅猛发展,迫切需要对微结构、小尺度局域材料力学性质进行定量表征与描述.一批小载荷高精度的力学测试技术与设备开始涌现.20世纪90年代初,引人瞩目的是两类以探测探头或压头与表面相互作用为特征的小尺度测试技术的兴起,即扫描探针显微技术与深度敏感的纳米压痕技术.不同于传统的宏观硬度与显微硬度压痕测试,深度敏感的压痕测试技术不需要通过残余压坑的大小或深度的繁琐测量来评估材料硬度值,而是借助于压头与试样表面接触过程的力学分析,根据实测的载荷-压入位移曲线计算接触面积的大小,定量给出材料的杨氏模量与硬度值.在这一领域,两位美国学者 Oliver 和 Pharr(1992) 基于 Sneddon 关于轴对称刚性压头弹性压入基本解,建立了一套纳米硬度的表征方法(称为 O-P 方法),迅速得到广泛应用,成为一种标准化的方法.然而,当压头周围的材料因弹塑性变形产生堆积隆起(pile-up)时,按 O-P 方法定义的接触深度将为负值,由此导致 O-P 方法失效.如用此方法,测得的硬度值偏高达 60%(Bolshakov & Pharr 1998).因此,人们迫切希望能够发展出一种新的方法,既能排除堆积隆起所引起显著的测量误差,又避免仍旧引入繁琐的压坑或接触面积的直接观测.这一具有极大挑战性的目标被 Oliver 和 Pharr 形象地比喻为深度探测压痕测试研究领域中的一个“圣杯”Holy Grail (Oliver & Pharr 2004).郑哲敏锐地关注到这一趋势,与郑仰泽合作独辟蹊径地从标度律和量纲分析角度入手,着力于深度探测压痕测量的基本力学机理问题.运用具有鲜明特色的量纲分析方法,深刻地揭示出硬度、杨氏模量与压入功之间的标度关系,由此提出全新的测量材料弹性模量与硬度的能量标度律方法 (Cheng & Cheng 1997, 1998, 2004).

郑哲敏与郑仰泽 (Cheng & Cheng 1998) 针对圆锥或棱锥型压头 (如图 16 所示), 一般性地给出了, 压入加载与卸载过程中载荷力  $F$  与接触深度  $h_c$  等关键参量对材料力学性质参数与压头几何参数及压入位移  $h$  的依赖关系

$$\begin{aligned} F_{\text{loading}} &= Eh^2 \Pi_\alpha \left( \frac{Y}{E}, \nu, n, \theta \right) \\ F_{\text{unloading}} &= Eh^2 \Pi_\gamma \left( \frac{Y}{E}, \frac{h}{h_m}, \nu, n, \theta \right) \\ h_c &= h \Pi_\beta \left( \frac{Y}{E}, \nu, n, \theta \right) \end{aligned} \quad (48)$$

其中,  $E, Y, \nu, n$  分别为弹塑性材料的杨氏模量、屈服应力、泊松比、幂硬化指数,  $\theta$  为压头锥角. 式 (48) 从标度律和量纲分析的角度, 阐释了压入加载曲线对压入位移的二次方依赖关系, 系统深入地揭示了压痕加载-卸载曲线形状的规律特点, 提炼出压入过程中导致隆起现象发生的关键控制参数.

在此基础之上, 郑哲敏与郑仰泽 (Cheng & Cheng 1998) 基于量纲分析的有限元模拟, 系统地比对和检验了作为 Oliver-Pharr 方法核心的两个基本关系, 即接触面积  $A$ 、初始卸载斜率与材料弹性模量之间的关系式

$$S = \left. \frac{dF}{dh} \right|_{h=h_m} = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{E}{1-\nu^2} \sqrt{A} \quad (49)$$

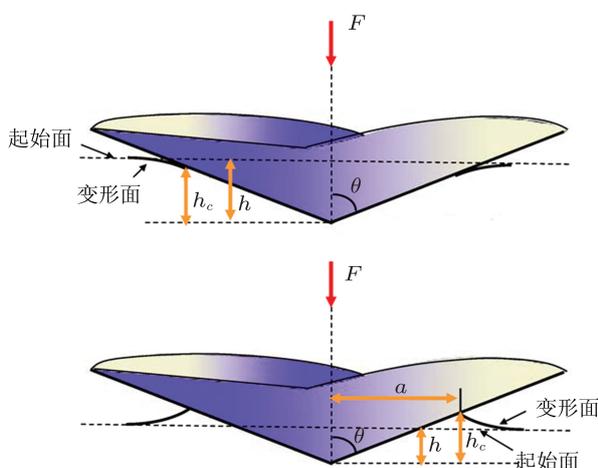


图 16 圆锥形压头压入过程示意图

以及对接触深度  $h_c$  的估计式

$$h_c = h_m - \xi \frac{F_m}{(dF/dh)_m} \quad (50)$$

他们的工作揭示出, 对弹塑性固体材料, 式 (49) 是一个普适的关系, 即使压头附近发生堆积隆起或凹陷,  $\beta$  仍近似保持为一常值. 而当堆积隆起发生时, 接触深度  $h_c$  的估计式 (50) 明显偏离真实接触深度, 导致对接触面积的低估和对硬度值的高估, 这一影响对弹-理想塑性材料尤为明显. 这一工作在材料参数空间检验和界定了 Oliver-Pharr 方法的适用范围.

他们进一步深入考察硬度  $H$ , 卸载功  $W_u$ , 压入功  $W_{\text{tot}}$  (见图 17(a)) 与材料性质参数的关联, 得到

$$\begin{aligned} \frac{H}{E} &= \frac{\cot^2 \theta}{\pi} \Pi_\delta \left( \frac{Y}{E}, \nu, n, \theta \right) \quad (51) \\ \frac{W_u}{W_{\text{tot}}} &= \frac{\int_{h_f}^{h_m} F_{\text{unloading}} dh}{\int_0^{h_m} F_{\text{loading}} dh} = \\ &= \Pi_\eta \left( \frac{Y}{E}, \nu, n, \theta \right) \quad (52) \end{aligned}$$

$H/E$  和  $W_u/W_{\text{tot}}$  均仅为材料参数与压头几何参数的函数, 深刻地揭示出二者之间存在内在的关联. 并由此发现压入能量标度关系, 即材料硬度与约化弹性模量  $E_r (\sim E/(1-\nu^2))$  之比与卸载功  $W_u$  与压入功  $W_{\text{tot}}$  之比之间存在近似的线性关系

$$\frac{H}{E_r} = \kappa \frac{W_u}{W_{\text{tot}}} \quad (53)$$

该关系经实验证实, 与多种材料实测结果相符 (杨荣等 2008), 如图 17(b) 所示. 这一标度规律对于理想塑性和强化塑性材料均适用, 是一个普适的关系式. 这一标度关系与由另一普适关系式 (49) 结合  $H = F/A$  得到的

$$\frac{H}{E_r^2} = \frac{4}{\pi} \frac{F}{S^2} \quad (54)$$

联立便可得到材料的硬度与弹性模量, 从而构

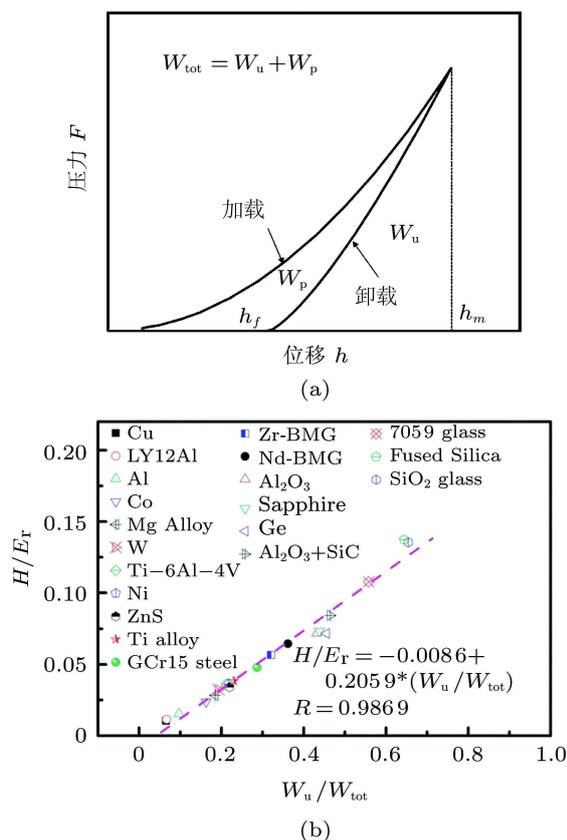


图 17 (a) 卸载功  $W_u$  与压入功  $W_{tot}$  的定义  
(b) 20 组实验数据表明 (杨荣等 2008), 硬度与弹性约化模量之比与卸载功  $W_u$  与压入功  $W_{tot}$  之比存在近似的线性关系

成了一种新的、更为可靠的材料性质的测定途径, 即基于能量标度律的压痕测试方法. 这一方法不需要直接涉及接触面积的计算, 从而避开了由压头周围隆起或凹陷等表面变形所引起的困难.

上述工作影响显著、应用广泛. 在国际上, 压入能量标度关系及其识别弹性模量和硬度的分析方法, 被按其与合作者的姓氏命名为 C-C 方法. 该方法被相关国家标准所采纳 (GB/T 22458—2008. 仪器化纳米压入试验方法通则). 相关结果被收录到国外专著 *Nanoindentation* (Fischer-Cripps 2002) 中, 单独作为一章 (Chapter 6. Scaling Relationships in Nanoindentation). 2004 年, 郑哲敏和郑仰泽在纳米压入方面的主

要工作受邀发表在 *Materials Science and Engineering R-Reports* 综述期刊上 (Cheng & Cheng 2004).

## 10 结束语

回首过去的 20 世纪, 作为工程科学发展典范的应用力学在推动科技进步和经济社会发展方面取得了辉煌的成就. 应用力学学派这种着眼重大实际需求、扎根深厚基础研究、强调理论与实际结合的工程科学思想值得弘扬光大. 力学是力与运动的科学, 它既是基础科学, 也是众多应用科学特别是工程技术的基础 (郑哲敏等 1995). 也就是说, 力学的发展需来自不断涌现的新的实际需求的刺激, 否则, 力学发展就显得缺乏活力. 但是, 过分强调力学双重属性的任何一面而忽视另一面, 都将影响力学发展的生命力. 应用力学百年发展的成功实践恰好说明这一点. 20 世纪初普朗特边界层理论的创立源于理论流体力学发展所提供的理论基础和来自人类动力飞行急需解决流动阻力的实际需求的刺激. 冯·卡门的高速空气动力学、钱学森的工程控制论与物理力学、郑哲敏的流体弹塑性理论无不体现了力学基础性与应用性的有机统一. 因此, 我们必须把力学当作科学长河中的一个统一和有生命的支流, 加以爱护, 并不断注入活力.

郑哲敏先生 60 余年的应用力学和工程科学实践以他感人的榜样向我们证明: 力学基础性与应用性之间不存在鸿沟, 力学与工程实际、力学与其他自然科学分支学科之间, 能够建立起丰满的结合体.

**致谢** 作者受《力学进展》樊菁主编邀约, 撰写此文, 庆贺郑哲敏先生荣获 2012 年度国家最高科学技术奖, 同时希望力学与相关领域的研究者, 更多地了解郑哲敏先生学术成就, 特别是他所倡导践行的工程科学思想. 成文过程中, 作者

与谈庆明研究员、樊菁研究员进行多次深入讨论并得到许多建设性意见. 郑哲敏先生、白以龙先生、段祝平研究员、梁乃刚研究员、黄晨光研究员、丁雁生研究员阅读本文初稿, 并给出许多宝贵建议. 作者还得到汪海英研究员、鲁晓兵研究员、曾晓辉研究员等有益的意见、讨论和帮助. 在此谨致谢意.

## 参 考 文 献

- Abrahamson G R. 1961. Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet. *ASME J. Appl. Mech.*, 28: 519.
- Aleseveskii V P. 1966. Penetration of a rod into a target at high velocity. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2: 99-106.
- Allen W A, Mapes J M, Wilson W G. 1954. An effect produced by oblique impact of a cylinder on a thin target. *J. Appl. Phys.*, 25: 675-676.
- Bahrani A S, Black T J, Crossland B. 1968. The mechanics of wave formation in explosive welding. *Proc. Roy. Soc. London, A*, 296: 123-136.
- 白以龙. 1992. 冲击载荷下材料的损伤和破坏. 见: 冲击动力学进展, 王礼立等编, 合肥: 中国科技大学出版社, 34-57 (Bai Y L. 1992. Damage and failure of materials under impact loading. in: *Advances in Impact Dynamics*, Wang L L et al ed. Hefei: China Science and Technology University Press, 34-57 (in Chinese))
- Birkhoff G, MacDougall D P, Pugh E M, Taylor G. 1948. Explosives with lined cavities. *J. Appl. Phys.*, 19: 563-582.
- Bolshakov A, Pharr G M. 1998. Influence of pile-up on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques. *J. Mater. Res.*, 13: 1049-1058.
- Butkovich T R. 1965. Calculation of the shock wave from an underground nuclear explosion in granite. *J. Geophys. Res.*, 70: 885-892.
- Carl L R. 1944. Brass weld, made by detonation impulse. *Metal. Prog.*, 46: 102-103.
- 陈力. 1989. 一维煤与瓦斯突出中破坏阵面恒稳推进的实验研究. [硕士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Chen L. 1989. Experimental research on steady advancing of failure front in one-dimensional coal and gas outburst. [Master Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- Cheng C M (郑哲敏). 1952. Analysis of pipe vibrations with internal fluid flow. A report submitted to the Byron-Jackson Pump. Co. at Los Angeles, California, January.
- Cheng C M. 1957. Problems in hydro-elasticity. in: *Proceedings of 9th International Congress of Applied Mechanics*, University of Bruxelles, Avenue Franklin Roosevelt, 7: 497-508.
- Cheng C M. 1986a. Mechanics of explosive welding, in: *Proceedings of the International Symposium on Intense Loadings and Its Effects*, Beijing, 848-853.
- Cheng C M. 1986b. Several problems in hydro-elastoplastic dynamics, in: *Proceedings of the international Symposium on Intense Loadings and Its Effects*, Beijing, 1-12.
- Cheng C M. 1991. On the study of explosion dynamics at the institute of mechanics. *Advances in Science of China*, 1: 81-106.
- Cheng C M, Li G H. 1986. Effects of strength and compressibility of materials on wave formation at interface in explosive welding. in: *Proceedings of the International Symposium on Intense Loadings and Its Effects*, Beijing, 524-529.
- Cheng C M, Tan Q M. 1989. Mechanism of wave formation at the interface in explosive welding. *Acta Mech. Sinica*, 5: 97-108.
- Cheng C M, Cheng Y T. 1997. On the initial unloading slope in indentation of elasto-plastic solids by an indenter with an axisymmetric smooth profile. *Appl. Phys. Lett.*, 71: 2623-2625.
- Cheng Y T, Cheng C M. 1998. Scaling approach to conical indentation in elastic-plastic solids with work hardening. *J. Appl. Phys.*, 84: 1284-1291.
- Cheng Y T, Cheng C M. 2004. Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements. *Mater. Sci. Eng. R*, 44: 91-149.
- Chou P C. 1977. The stability of shaped charge. *J. Appl. Phys.*, 48: 4187-4195.
- Cole P. 1960. 水下爆炸 (中译本). 北京: 国防科学出版社 (Cole P. 1960. *Underwater Explosion* (Chinese version), Beijing: National Defense Press (in Chinese))
- Cowan G R, Bergmann O R, Holtzman A H. 1871. Mechanism of bond zone wave formation in explosion clad metals. *Metall. Trans.*, 2: 3145-3155.
- Crossland B. 1982. *Explosive Welding of Metals and Its Applications*. Clarendon Press.
- 丁晓良, 俞善炳, 丁雁生, 寇绍全, 谈庆明, 郑哲敏. 1989. 煤在瓦斯渗流作用下持续破坏的机制. *中国科学 A*,

- 6: 600-607 (Ding Y L, Yu S B, Ding Y S, Kou S Q, Tan Q M, Zheng Z M. 1989. Continuous damage mechanism of coal under gas seepage. *China Science A*, 6: 600-607 (in Chinese))
- Driscoll N W, Weissel J K, Goff J A. 2000. Potential for large-scale submarine slope failure and tsunami generation along the U. S. mid-Atlantic coast. *Geology*, 28: 407-410.
- DuPont E I. 1954. Blasters Handbook. Sesquicentennial Edition Revised, Wilmington: E.I DuPont de Nemours & Compant (INC) Explosives Department, 374-375.
- Eggers J. 1997. Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows. *Rev. Mod. Phys.*, 69: 865-927.
- Eichelberger R J. 1956. Experimental test of the theory of penetration by metallic Jets. *J. Appl. Phys.*, 27: 63-68.
- Eringen A C. 1977. Continuum Mechanics at the Atomic Scale. *Crystal Lattice Defects*, 7: 109-130.
- Ezra A A. 1973. Principles and Practice of Explosive Metalworking. Industrial Newspaper Limited.
- 范良藻, 孟珊. 1964. 爆炸成形的成形过程. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Fan L Z, Meng S. 1964. Explosive forming process. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- Findik F. 2011. Recent developments in explosive welding, *Mater. Design*, 32: 1081-1093.
- Fischer-Cripps A C. 2002. Naointentation. Springer, New York.
- Galileo Galilei. 1638. Dialogue Concerning Two New Sciences, Elsevier.
- Moridis, G J, Collett T S, Boswell R, Kurihara M, Reagan M T, Koh C, Sloan E D. 2009. Towards production from gas hydrates: Current status, assessment of resources, and simulation-based evaluation of technology and potential. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 10: 745-771.
- Griffith A A. 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. A*, 221: 163-198.
- 洪友士. 2004. 郑哲敏先生主要经历与成就. 见: 应用力学进展, 北京: 科学出版社 (Hong Y S. 2004. The main experience and achievements of Zhe-Min Zheng. in: Advances in Applied Mechanics, Beijing: Science Press (in Chinese))
- Hunt J N. 1968. Wave formation in explosive welding. *Phil. Mag.*, 17: 669-680.
- Hutchinson J W. 1968. Singular behavior at the end of a tensile crack tip in a hardening material. *J. Mech. Phys. Solids*, 16: 13-31.
- Irwin G R. 1951. Analysis of stresses and strain near the end of a crack transversing a plate. *ASME J. Appl. Mech.*, 24: 361-364.
- Johnson G W. 1959. Some basic data on underground nuclear explosions, Lawrence Radiation Laboratory. UCRL-5675.
- Kowalick J, Hay D R. 1871. A mechanism of explosive bonding. *Metall. Trans.*, 2: 1955-1958.
- 鲁晓兵, 张旭辉, 郑哲敏, 刘乐乐. 2011. 机械 - 热水合物开采方法. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Lu X B, Zhang X H, Zheng Z M, Liu L L. 2011. Mechanical-thermal method of hydrate production. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- Meyers M A. 1994. Dynamic Behavior of Materials. John Willey & Sons, INC, New York.
- Munroe C E. 1888a. Modern explosives. *Scribners*, 5: 563-576.
- Munroe C E. 1888b. Wave-like effects produced by detonation of gun cotton. *Amer. J. Science*, 36: 48-50.
- Nuckolls J H. 1959. A computer calculation of Rainier (The first 100 milliseconds), Lawrence Radiation Laboratory, UCRL-5675.
- Oliver W C, Pharr G M. 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *J. Mater. Res.*, 7: 1564-1583.
- Oliver W C, Pharr G M. 2004. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology, *J. Mater. Res.*, 19: 3-20.
- Orowan E. 1948. Fracture and strength of solids, *Report of Progress in Physics*, 12: 185-232.
- Peng F J, Tan Q M, Cheng C M. 2000. Laboratory study on cracks in saturated sands. *Acta Mech. Sinica*, 16: 48-54.
- Philipchuk V. 1959. Explosive welding and forming open another door for industry, *Weld Engineering*, 44: 61-62.
- 钱学森. 1957. 论技术科学. 科学通报, 4: 97-104 (Qiang X S. 1957. On technical science. *Chinese Science Bulletin*, 4: 97-104 (in Chinese))
- Rayleigh L. 1879. On the capillary phenomenon of jets. *Proc. Roy. Soc. London*, 29: 71-97.
- Rice J R. 1968. A path independent integral and approximation analysis of strain concentration by notches and cracks, *ASME J. Appl. Mech.*, 35: 379-386.

- Rice J R, Rosengren G F. 1968. Plane strain deformation near a crack tip in power law hardening material, *J. Mech. Phys. Solids*, 16, 1-12.
- Robinson J L. 1975. Mechanics of wave formation in impact welding, *Phil. Mag.*, 31: 587-590.
- Snay H G. 1956. Hydrodynamics of underwater explosions. in: Symposium on Naval Hydrodynamics. (Sherman F S ed.), 325.
- 谈庆明. 2005. 量纲分析. 合肥: 中国科技大学出版社 (Tan Q M. 2005. Dimensional Analysis. Hefei: China Science and Technology University Press (in Chinese))
- Tate A. 1967. A theory for the deceleration of long rods after impact. *J. Mech. Phys. Solids*, 15: 387-399.
- Taylor G I. 1943. A formulation of Mr. Tuck's conception of munroe jets. in: Scientific Papers of G.I. Taylor (1963), New York, 358-362.
- Tréhu A M, Bohrmann G, Rack F R, Torres M E, et al. 2003. Explanatory notes. in: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, V.204.
- Tsien Hsue-Shen (钱学森). 1948. Engineering and engineering science. *J. Chin. Inst. Eng.*, 6: 1-14.
- von Foerster M. 1883. Experiments with Compressed Gun Cotton, Berlin, Germany: Mittler und Sohn.
- von Karman T. 1911. Festigkeitsversuch unter allseitigem druck, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 55: 1794-1757.
- von Karman T, Duwez P. 1950. The propagation of plastic deformation in solids, *J. Appl. Phys.*, 21: 987-994.
- Wilkins M L. 1964. Calculation of Elastic-Plastic Flow, in Methods in Computational Physics (B. Alder, S. Fernbach and M. Rotenberg), Academic Press, New York and London.
- Wood W W. 1967. Experimental mechanics at velocity extremes—very high strain rates, *Experimental Mechanics*, 7: 441-446.
- Yang R, Zhang T H, Jiang P, Bai Y L. 2008. Experimental verification and theoretical analysis of the relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation. *Appl. Phys. Lett.*, 92: 231906.
- 杨卫. 1995. 宏微观断裂力学. 北京: 国防工业出版社 (Yang W. 1995. Macroscopic and Microscopic Fracture Mechanics. Beijing: National Defense Industrial Press (in Chinese))
- 伊万诺夫. 1988. 亚黏土爆破压实. 北京: 水利水电爆破咨询部 (Ivanov. 1988. Clayey Soil Compaction by Blasting. Beijing: Consulting Department of Water Resources and Hydropower Blasting (in Chinese))
- 虞吉林, 郑哲敏. 1984. 一种非局部弹塑性连续体模型与裂纹尖端附近的应力分布. 力学学报, 16: 485-494 (YU J L, Zheng Z M. 1984. A model of nonlocal elastic-plastic continuum applied to the stress distribution near a crack tip. *Acta Mechanica Sinica*, 16: 485-494 (in Chinese))
- Zhang X H, Lu X B, Li Q P. 2011. Formation of layered fracture and outburst during gas hydrate dissociation. *J. Petro. Eng. Sci.*, 76: 212-216
- 张登霞, 李国豪、周之洪, 邵丙璜. 1984. 材料强度在爆炸焊接界面波形成中的作用. 力学学报, 16: 73-80 (Zhang D X, Li G H, Zhou Z H, Shao P H. 1984. (Effect of material strength on forming process of explosive welding interface wave. *Acta Mechanica Sinica*, 16: 73-80 (in Chinese))
- 张建华, 张亮, 顾道良. 1989. 爆炸排淤填石法实验研究. 第四届全国工程爆破会议报告 (Zhang J H, Zhang L, Gu D L. 1989. Experimental study on toe-shooting method. in: the 4th National Engineering Blasting Conference (in Chinese))
- 张旭辉. 2010. 水合物沉积层因水合物热分解引起的软化和破坏研究. [博士论文], 北京: 中国科学院力学研究所 (Zhang X H. 2010. Research on the softening and damage of hydrate deposit due to the thermal decomposition of hydrates. [PhD thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏. 1957. 关于工程地震的若干问题. 力学学报, 1: 337-349 (Zheng Z M. 1957. A review on engineering seismology. *Acta Mechanica Sinica*, 1: 337-349(in Chinese))
- 郑哲敏. 1958a. 平板在流体作用下的振动. 力学学报, 2: 11-16 (Zheng Z M. 1958a. Vibration of panel in the presence of a fluid. *Acta Mechanica Sinica*, 2:11-16(in Chinese))
- 郑哲敏. 1958b. 输水管的振动问题. 力学学报, 2: 100-111 (Zheng Z M. 1958b. Vibration of pipe line. *Acta Mechanica Sinica*, 2: 100-111(in Chinese))
- 郑哲敏, 马宗魁. 1959. 悬臂梁在一侧受有液体作用时的自由振动. 力学学报, 3: 111-119 (Zheng Z M, Ma Z K. 1959. Vibration of cantilever beam placed against water with free surface. *Acta Mechanica Sinica*, 3: 111-119(in Chinese))
- 郑哲敏, 孙同坤, 孙国芳. 1962. 球壳的变形计算和能量准则. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zheng Z M, Sun T K, Sun G F. 1962. Calculation and energy criterion of shell deformation. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏. 1962a. 爆炸成形模型律. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zheng Z M. 1962a. Scaling law

- of explosion forming. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏. 1962b. 水中击波入射平板时空化的形成及其作用. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zheng Z M. 1962b. Formation and effect of cavitation in shock wave intruding slab under water. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏, 解伯民. 1965. 关于地下爆炸计算模型的一个建议. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zheng Z M, Xie B M. 1965. A suggestion on the calculation model of underground explosion. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏, 解伯民, 刘育魁, 张德良. 1967a. 关于地下核爆炸理论计算的一个建议 (第 2 稿). [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zheng Z M, Xie B M, Liu Y K, Zhang D L. 1967a. A suggestion on the theoretical analysis of underground nuclear explosion (the 2th version). [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏, 解伯民, 刘育魁, 张德良. 1967b. 地下核爆炸力学效应 1967 年计算小结. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zheng Z M, Xie B M, Liu Y K, Zhang D L. 1967b. Brief summary of mechanical effect of underground nuclear explosion in 1967. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏, 解伯民, 刘育魁, 张德良. 1969. 地下核爆炸的流体弹塑性计算方案和若干结果. [研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zheng Z M, Xie B M, Liu Y K, Zhang D L. 1969. Hydro-elastoplasticity approach to analysing underground nuclear explosion and several results. [Research report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 郑哲敏. 1973a. 破甲初步分析及一些基础知识. 力学情报, 24: 36-74 (Zheng Z M. 1973a. Preliminary analysis and some basic theory on armor penetration. *Mechanical Intelligence*, 24: 36-74 (in Chinese))
- 郑哲敏. 1973b. 破甲初步分析及一些基础知识 (续). 力学情报, 4: 67-98 (Zheng Z M. 1973b. Preliminary analysis and some basic theory on armor penetration (continued). *Mechanical Intelligence*, 4: 67-98 (in Chinese))
- 郑哲敏, 高举贤, 谈庆明, 孙庚辰, 乔敏, 周一以. 1974. 聚能射流侵彻过程模型律. 力学, 1: 1-10 (Zheng Z M, Gao J X Tang Q M, Sun G C, Qiao M, Zhou Y Y. 1974. Scaling law in the penetration process of shaped charge jet. *Mechanics*, 1: 1-10 (in Chinese))
- 郑哲敏, 谈庆明. 1977. 破甲机理的力学分析与简化模型 (631 破甲机理课题研究进展报告). 科技参考资料, 6: 108-164 (Zheng Z M, Tan Q M. 1977. Mechanical analysis and simplified model of armor penetration mechanism (631 Research progress report of the armor penetration project). *Science and Technology Reference Material*, 6: 108-164 (in Chinese))
- 郑哲敏. 1980. 关于射流侵彻的几个问题, 兵工学报, 1: 13-22 (Zheng Z M. 1980. Several problems on jet penetration. *Acta Armamentarii*, 1: 13-22 (in Chinese))
- 郑哲敏. 1981. 聚能射流的稳定性问题. 爆炸与冲击, 1: 6-17 (Zheng Z M. 1981. Stability of jet produced by shaped charge. *Explosion and Shock Waves*, 1: 6-17 (in Chinese))
- 郑哲敏, 杨振声. 1981. 爆炸加工. 北京: 国防工业出版社 (Zheng Z M, Yang Z S. 1981. *Explosion Processing*. Beijing: National Defense Industry Press (in Chinese))
- 郑哲敏. 1982a. 从数量级和量纲分析看煤与瓦斯突出的机理. 见: 力学与生产建设, 北京: 北京大学出版社, 128-137 (Zheng Z M. 1982a. The mechanisms of coal and gas outburst from the and dimensional analysis. in: *Mechanics and Production Construction*. Beijing: Beijing University Press, 128-137 (in Chinese))
- 郑哲敏. 1982b. 连续介质力学与断裂. 力学进展, 12: 133-140 (Zheng Z M. 1982b. Continuum mechanics and fracture. *Advances in Mechanics*, 12: 133-140 (in Chinese))
- 郑哲敏, 杨振声, 金镠. 1989. 爆炸法处理水下海淤软基. 见: 郑哲敏文集. 北京: 科学出版社 (Zheng Z M, Yang Z S, Jin L. 1989. Dispose soft sea ooze base by blasting. *Collected Works of Zhe-Min Zheng*. Beijing: Science Press (in Chinese))
- 郑哲敏, 陈力, 丁雁生. 1993. 一维瓦斯突出破碎阵面的恒稳推进. 中国科学, 23: 377-384 (Zheng Z M, Chen L, Ding Y S. 1993. Steady advancing of fracture front in one-dimensional gas outburst. *Science China*, 23: 377-384 (in Chinese))
- 郑哲敏, 谈庆明. 1996. 相似理论与模化. 见:《中国机械工程手册》第 3 篇. 北京: 机械工业出版社 (Zheng Z M, Tan Q M. 1996. Similarity theory and model. in: *Chinese Mechanical Engineering Handbook*, Section 3. Beijing: China Machine Press (in Chinese))
- 郑哲敏. 1995. 谈谈应用力学. 力学与实践, 17: 1-4. (Zheng Z M. 1995. A talk about applied mechanics, *Mechanics and Aprctice*, 17: 1-4 (in Chinese))
- 郑哲敏, 周恒, 张涵信, 黄克智, 白以龙. 1995. 21 世纪初的力学发展趋势. 力学进展, 25: 433-441 (Zheng Z M, Zhou H, Zhang H X, Huang K Z, Bai Y L. 1995. Trends

- of development in mechanics in the early 21st century. *Advances in Mechanics*, 25: 433-441 (in Chinese))
- 郑哲敏. 2001. 学习钱学森先生技术科学思想的体会. 力学进展, 31: 484-488 (Zheng Z M. 2001. About the ideas of H S Tsien on technological sciences. *Advances in Mechanics*, 31: 484-488 (in Chinese))
- 郑哲敏. 2004. 郑哲敏文集. 北京: 科学出版社 (Zheng Z M. 2004. *Collected Works of Zhe-Min Zheng*. Beijing: Science Press (in Chinese))

(责任编辑: 樊 菁)

## A pioneer in the frontier of engineering science ——Zhe-Min Zheng

DAI Lanhong<sup>†</sup>

State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100190, China

**Abstract** Zhe-Min Zheng, as a famous mechanician, is the founder and pioneer of explosion mechanics in China. He won the State Preeminent Science and Technology Award of China in 2012. This paper reviews the abundant research activities of Zhe-Min Zheng over the past 60 years, especially his outstanding academic contributions in the areas of explosion processing, underground nuclear explosion, blasting push-out silt, armor penetration by shaped charge jet, coal and gas outburst, natural gas hydrate mining, hydro-elastic dynamics, material mechanical behavior, etc. These achievements are marked by distinct character of engineering science, that is, they are motivated from the national significant demands, and reached by refining the critical physical factors and innovative theories from complex issues, and providing useful guide to practice. The scientific contributions and academic thoughts of Zhe-Min Zheng have great practical significance and reference value for the development of mechanics.

**Keywords** mechanics, explosion mechanics, applied mechanics, engineering science



戴兰宏, 男, 1965 年 7 月生, 1996 年获中国科学院力学研究所固体力学专业博士学位, 1998 年在北京大学力学系完成博士后研究工作, 选聘进入中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室工作. 曾在哈佛大学、香港科技大学访问工作, 现任中国科学院力学研究所研究员、博士生导师、副所长; 兼任中国力学学会爆炸力学专业委员会副主任委员、固体力学专业委员会委员、中国复合材料学会常务理事等. 主要从事冲击动力学、新型材料力学行为、细观复合材料力学研究, 在非晶合金(金属玻璃)剪切带等方面取得重要进展, 2007 年获国家杰出青年基金.

<sup>†</sup> E-mail: lhdai@lnm.imech.ac.cn