

爆炸力学及其工程应用进展

张 凯

一、引言

爆炸是自然界中经常发生的一种物理与化学的过程,在爆炸过程中,以极高的速度释放出能量。爆炸产物对周围介质作功,产生破坏作用,如破坏弹体形成杀伤破片,爆破矿山抛掷土石,在介质中形成冲击波、应力波等。爆炸的主要特征是在爆炸中心周围的介质中产生压力突跃,这种压力上升前沿只有几个微秒。

爆炸力学学科就是要从定性、定量两方面来描述爆炸过程的力学,这是一门边缘性学科,它涉及爆轰物理学,其内容包括炸药的化学反应特征,炸药的爆轰过程及爆轰参数的理论与工程计算方法等;爆炸气体力学,其内容包括爆炸产物在其形成的特定流场中各个参量:压力场、密度场的计算。介质材料对爆炸作用的响应,即材料在冲击加载下的力学与物理性能的研究,如应变的局部化,即绝热剪切带;再结晶;超塑性;空穴压溃;断裂;相变;微观裂缝;界面现象等现象研究。它把固体力学(包括弹性与塑性力学),气体力学,应力波理论,材料的性态(材料学科)都耦合在一起了。而且其变形都是有限变形,是非线性的,因而难度很高,从事这门学科研究的人要有较为广阔的知识面。

由于爆炸作用的特点是在介质中产生压力突跃,如何来描述这种突跃现象在介质中传播是这一学科研究的起点。

1889年, P. H. Hugoniot 发表他的著名的
著作系大连理工大学教授

可在电离层内产生一些顺地磁场方向排列的条纹结构。研究这些过程对于我们理解等离子体物理的一些基本问题,特别是等离子体与波之间,波与波之间的线性及非线性相互作用有极大的帮助。

电离层的人工加热使电离层从观测对象变成了实验对象,从而开辟了一个等离子体物理学的户外实验室。这个实验室实际上是没有边界的,因而避免了边界条件的影响等复杂因素。

长波通讯仅是电离层的人工加热的可能应用之一。在通讯方面,这一技术还可用来进行超高频波段的远距离散射通讯。这一通讯方法有很好的保密性。

电离层人工加热研究尚可用于空间太阳能电站。这样的发电站很早就设想过了,随着航天飞机的成功,这一方案越来越接近于现实。这样的空间电站拥有几

Hugoniot 关系式:

$$e' - e = \frac{1}{2}(p + p')(v' - v) \quad (1)$$

其中 e' , p' , v' 和 e , p , v 是激波间断点前后的内能, 压力和比容。用(1)式来解决运动传播中的间断性以来, 爆炸力学就真正走上理论发展的道路, 把关系式(1)用到具有反应的流体上是 J. Crussard 的功绩, 在这个世纪初把激波与爆炸波的物理现象以及把 Hugoniot 与 Crussard 的工作联系起来是 Jouguet 的功绩, 他建立了 H 线上的临界点(即爆轰的极小值与爆燃的极大值), 创立了维持爆轰的 C-J 条件。随后, 1944 年 Weyl 提出击波层厚度的概念, 以及 1971 年由 Chère 提出的爆轰波面层概念。

高速变形力学是爆炸力学的中心理论研究课题, 炸药释放出来的能量高度集中, 产生的压力达数万至数十万个大气压(核爆炸将达到百万以上), 而作用时间只有几微秒到几十微秒, 因而材料在炸药爆炸作用下所产生的变形都在短时间内完成, 变形具有高应变率的特征, 可以说, 一切高速变形都伴随有高应变率, 大塑性应变, 材料在高应变率下有很多特殊性质。近 40 年来, 通过精心设计的各种不同类型的高速变形的材料力学实验, 得到了一些比较确切可信的关于材料本构关系的实验结果和实验现象。如霍布金生压杆装置, 轻气炮装置都是目前国际上通用的在实验室中用来研究高速变形力学的有效工具。

平方公里到几十平方公里的采光面积, 可发出强大的电力, 而不耗费任何地球资源, 也不会造成污染。它唯一的待解决的技术难题是: 它只能用强大的微波束向地球表面输送能量。而这微波束在通过电离层时会产生什么暂时和长远的作用, 此问题只能在电离层人工加热实验中予以研究。

纵观技术进步的历史, 凡一项技术发生根本性变革的时候, 其进步的原因一般不是原有工艺的改进, 而是新的原理的应用, 新的技术路线的采用。从螺旋桨飞机到喷气机, 从电子管到晶体管, 都是如此。而用于潜艇指挥的长波通讯的新方法的提出, 又进一步证实了这一论断。技术上的这些革命性的变革孕育于物理学的思想之中, 而技术的进步又推动了物理学的进展。

对于金属材料来讲,在高速变形下,呈现出很多重要实验现象。例如:

1) 屈服点现象: 在高速加载试验机上,做恒应力试验,发现屈服点比静载下提高,而且屈服现象滞后发生。

2) 流动应力随应变率升高大幅度提高,但随温度升高而降低,流动应力随应变率而变化,是高速变形下材料力学性质研究的一个中心课题,它牵涉到材料整个本构关系的构成。一般来讲,近似地存在一个应变力—应变—应变率的曲面,而与应变历史和应变率历史无关,从而构成一个 $f(\sigma, \epsilon_p, \dot{\epsilon}_p) = 0$ 的曲面,但高速变形中的应变率历史效应仍然为实验所确认。

3) 弹性前驱波,增量波: 在一维实验的波动实验中,若应力超过弹性强度,一般出现双波结构,即有二个波阵面,一个是弹性波,一个是塑性波,弹性波的速度一般大于塑性波波速,常称该弹性波为弹性前驱波。一维弹性波应该以屈服强度 σ_y 的幅值和弹性波速 $c_e = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 传布。而一维应变实验中的弹性前驱波将

以恒定速度 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$ 和幅值

$$\sigma_{HE} = \frac{1-\nu}{1+2\nu} \sigma_y$$

传布,一般称它为 Hugoniot 弹性限。更精确实验发现,弹性前驱波的幅值在传布中并不恒定。

另外,当材料已处于塑性状态,材料再受到一荷载增量,于是就有一个新的扰动在材料中传布,这个增量波的波速是以弹性波速传布的,亦即瞬态变形的反应仍是弹性的。

4) 有效应变、非线性效应与热耦合现象: 对于动态载荷(如炸药与高速碰撞),每平方米 10 万公斤负荷是很普遍的,因而 10% 的体积压缩是常见的,在一维应变时,相当于 10% 的轴向应变,这就远远超出了材料的屈服强度,因此,变形也一定是有限变形,有限变形必然造成非线性的本构关系,产生非线性效应。同时,有限变形的应变能必有部分转化为热,部分转化为结构永久变形的势能。G. I. Taylor 在五十年代就认为有 90% 的塑性应变能将转化为热,其余转化为永久变形的势能,这说明,高速有限变形下,热耦合的问题是很突出的。材料在有限变形下的本构关系必须考虑热耦合的问题。

5) 质点速度和击波速度的线性关系: 在高速平板碰撞实验中,出现了定常击波,此时材料可被认为是流体状态,剪应力已无关紧要,应力状态完全各向同性了,此时质点速度与击波速度之间存在:

$$u_p = c_0 + \lambda u_b \quad (2)$$

u_b ——击波速度, u_p ——质点速度, c_0, λ 为材料常数。这个结果几乎所有的密实材料都遵守这个实验结

果。根据这个结果及动量守恒定律可以推出材料的 Hugoniot 方程:

$$P_H = \rho_0 \frac{c_0^2 \left(1 - \frac{v}{v_0}\right)}{\left[1 - \lambda \left(1 - \frac{v}{v_0}\right)\right]^2} \quad (3)$$

P_H ——击波压力, ρ_0 ——初始密度, v ——比容。当 $P_H \rightarrow 0$ 时,相当于声波, $\therefore c_0$ 相当于声速; $P_H \rightarrow \infty$, 则 $v = v_0 \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)$, 若 $\lambda = 1.5$, 则 $v = \frac{v_0}{3}$, 说明 λ 越大, 极限压缩越小, $\therefore \lambda$ 表明极限压缩。R. G. McQueen 和 S. P. Warsh 在 1960 年就提出了 28 种材料的 c_0 与 λ 值的实验结果及其相应的测试方法。

二、材料的本构关系与状态方程:

前面提到的在冲击负荷下材料塑性变形的一些宏观力学实验现象,用一数学形式来描述材料的塑性变形参数之间规律就是材料的本构关系,本构关系是对材料性质的描述,不同的材料有不同的本构模型。国际上有众多的研究工作者都在从事这方面研究。介质的宏观力学性质的变化无一不是和一定的微观结构的变化联系在一起。当然,微观结构变化的力学性质是宏观介质力学性质的物理基础。金属塑性变形的微观结构可能是位错 (dislocation) 运动。根据位错理论提出的高速变形下的本构模型如: Armstrong 和 Zerilli 在 1988 年提出的模型:

$$\sigma = c_1 + c_2 \exp(c_3 + c_4 \ln \dot{\epsilon}^*) T + c_5 v^{\beta^*}$$

另外,也有纯粹从经验关系式提出的,如 Johnson-Cook 模型,他们的经验关系式为:

$$\sigma = [A + B \epsilon^n][1 + c \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}]$$

作为 Von-Mises 流动应力,其中 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, T^* 相应温度。

又如 Livermore 的 HEMPDS 程序经常采用以下模型:

$$Y = [Y_0(1 + \beta \epsilon_{eq}^p)] [1 + b_p \bar{v}^{\frac{1}{3}} - h(T - 300)]$$

其中 Y ——流动应力, ϵ_{eq} ——当量型性应变, p ——压力, $\bar{v} = \frac{\rho_0}{\rho}$ 相对体积, T ——温度。

近几年来,大型计算机的利用和大型计算程序的发展,使得能相当精确程度下模拟复杂结构与变形问题,特别是包括大变形的问題。这样,使得根据材料的物理机制提出的模型更具有很大的生命力,因为可通过计算能拟合模型中的各个待定系数,使模型更正确符合于实验结果。

对很高的应力率和应变率的情况下,对击波后面产生的压缩态的测量表明,它是热力学平衡态,也就是说热力学平衡态能在 10^{-7} 秒或更短时间内建立,在这样条件下,用状态方程来描述波后的平衡态是合理的。因为状态方程反映的是介质在热力学平衡态下热力学参量间的关系,但是,诸如速率性质的量,诸如 $\dot{\epsilon}$,

历史记忆性质等都不是状态量,因而不可能概括在状态方程之中。可是,在最大主应力方向,若该主应力 $\sigma_x \geq (10 \sim 100) \text{ kbar}$,或更高压力时,此时最小主应力为 $\sigma_x - Y$ (Y —屈服应力),由于金属的 Y 很小,于是这种应力范围就很接近于静水压力状态,这样力学变数就可以由应力张量 σ_{ij} 简化为静水压力 p ,而几何变数由应变张量 ϵ_{ij} 减化为体积变数 V ,在 p, V 变量下,用状态方程来描述就极为简明,特别是在一维应变状态下,体积变形功相当大,且热—功耦合,温度起重要作用,用状态方程来描写就非常有实际意义的了。在四、五十年代,大量固体状态方程就是在这背景下开展起来的。

作为等温方程的状态方程如:

Birch 方程:

$$p = \frac{1}{2} K_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2K_0} - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2K_0'} \right];$$

K_0 —压缩模量。

Murnaghan 方程:
$$p = A \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right].$$

在爆炸力学中用得最广泛,最适用的是 Mie-Grüneisen 方程,它是基于量子力学中的线性谐振子模型的高压固体状态方程。即:

$$p - p_t = \frac{\gamma}{V} (E - E_K)$$

其中 γ —Grüneisen 系数, p_K, E_K —冷压力与冷内能。

另外,描述炸药本身尚有诸多状态方程,这在计算炸药爆轰后,爆轰产物流场中各力学量计算起着决定作用。

三、爆炸力学的工程应用:

爆炸力学是一门密切联系工程应用的一门学科,就目前开展的工程应用来说,大致有:

1) 爆炸灾害的防止;在大型粮库与港口粮食输送中往往出现粮食粉尘,煤粉加工厂中的煤粉尘,各种植物纤维粉尘,如亚麻厂,棉织厂中纤维粉尘,当粉尘累积到一定浓度时候会产生爆炸,造成巨大灾害,无论在国内外,造成粉尘爆炸的事故是屡见不鲜的。研究粉尘爆炸中的起爆浓度临界点,粉尘爆炸机理,就是爆炸力学的一个重要应用。目前我国已在北京理工大学建立了防止爆炸灾害的国家重点实验室,正在着手研究粉尘爆炸的机理的实验研究。

瓦斯突出问题,在煤矿中也是很突出的问题,它也是爆炸力学所研究的内容。

2) 土岩爆破: 岩石爆破,大型石灰石矿山开采爆破: 一般在筑路,开挖山洞,隧道,地基都要求爆破,在大型石山爆破中,往往是挖出爆破坑道,然后用几十吨,甚至上百吨炸药爆炸。在这些爆破中关键问题是正确的药量计算问题。最基本的理论基础是成坑与药

量之间的关系式,与地震波的超压传播公式,目前都有相应的理论与实验相结合的公式可以参考应用。在这些应用中,为了减少挖掘量,发展有光面爆破技术,即爆破后未爆破地方即为所需岩壁,不再需要化大量人工去挖掘。采用有时差的爆破药包排列可以达到定向抛土的目的,定向爆破筑坝就是利用这个原理来设计的。陆上与水下的爆破开沟,海底的爆炸排淤,亦属于这类技术。在有些情况下,要求爆破不允许有飞石产生,或在室内进行爆破,或超近距离爆破,例如作者曾在大连某地,在输油管道的正下方 20 厘米地方爆破岩石,在爆破上方的输油管丝毫未受损伤。爆破开采大理石要求爆破后大理石的裂缝正好按予设计地方产生。所有以上这些技术,关键在于正确设计合适药量与炮孔位置。

3) 爆破拆除: 利用爆破方法破坏结构的某一局部,然后利用结构的重力倾到力矩使结构向某一预定方向倾倒,这就是爆破拆除所依据的原理。正确设计药孔距离与每孔药量可以使梁、柱完全断折,并无大的飞石产生是爆破拆除中的主要技术所在。从学术意义上讲,爆破拆除是反结构力学的问题。

4) 爆炸加工技术: 爆炸加工技术包括: 爆炸成形,爆炸硬化,爆炸切割,爆炸焊接,爆炸烧结。如果说,爆炸成形是爆炸加工领域中的第一代技术,爆炸焊接是第二代技术的话,则爆炸烧结将是爆炸加工中的第三代新技术。现分别介绍如下:

爆炸成形: 爆炸成形技术,已有近百年历史了,早在 1898 年英国就取得了爆炸成形的第一个专利,那是利用爆炸成形制作自行车车架的金属管。但直到本世纪 50 年代中期才由于航空工业发展的需要而获得较大发展,现在爆炸成形已经可以完成多样的工艺加工。以爆炸封头为例,爆炸成形的方法是: 爆炸前先割好一块圆形的金属板,放在中空的圆形模具上,在金属平板上沿模具的内圆圈铺一圈油毡,与金属板一起构成一个临时的圆筒容器,再向里面灌满水,然后把药包放在水中合适地方进行引爆,爆炸后,水中形成冲击波,当冲击波的波阵面到达金属板面时,板在高压作用下迅速产生塑性变形,最后变成所需封头,冲击波起着阳模作用。对于小型零件,可以在水池中完成,但在这种情况,成形内腔必需抽真空。

爆炸硬化:

高锰钢的表面经过爆炸以后,表面硬度会有很大提高,矿山用铲齿如果采用爆炸硬化处理,将能大幅度提高寿命。经过硬化处理后的铁轨道叉其寿命将比不经过硬化处理的提高数倍。

爆炸切割:

利用圆锥聚能效应可以在靶板上打眼,军事上用的穿甲弹就是利用这个原理制成的。利用线型聚能效应可以用来切割钢板,这种线型爆炸切割器在民用上

1992年6月14日中央人民广播电台

《科技·知识·生活》综合栏目评论:

《现代物理知识》是一份优秀现代物理高级科普刊物

被中国物理学会评为优秀期刊的《现代物理知识》杂志,创刊四年多来,一直受到许多物理学家的关怀和支持,取得了长足的发展.最近,王淦昌、谢希德和赵忠贤等新老学部委员称赞

这本刊物信息量大,及时反映物理学最新动态,内容生动活泼,通俗易懂,对于丰富读者的物理学知识,增进现代物理学发展情况的了解大有帮助,是一份优秀的现代物理高级科普读物.

有广泛用途.例如一个巨大的钢结构,要拆解它时,可以采用爆炸切割方法先将其整体放倒,然后再用人工局部拆解.不然,工人将只能在高空用氧乙炔焰逐一地切割,无异是既困难又危险.作者曾用爆炸切割方法拆解沉入海底的巨大钢船和沉入海底的钢筋混凝土沉箱.

爆炸焊接:

爆炸焊接的方法是美国 L. R. Carl 在 1944 年首先提出来的,他在一次炸药爆炸试验中偶然发现有两片直径约 1 英寸,厚度为 0.035 英寸的黄铜圆薄片,由于受到突然冲击而被焊接在一起.于是他便提出了利用炸药和超声波技术把各种不同金属焊接起来的研究设想.几年之后,美国的 V. Philipchuk 第一次把爆炸焊接技术引入到工业工程上.此后,英,前苏,德,捷,日本等国也相继展开了对这门新工艺的开拓与研究,目前这门学科已相当成熟,专著“爆炸焊接原理及其工程应用”(邵丙瑾、张凯著)已在 1987 年出版,在该书中详尽地叙述了爆炸焊接的原理、与有关理论.工程上应用较广的爆炸焊接有以下几种:

复板焊接:即在金属母板上焊上另一种金属平板,如把不锈钢板,铜板,钛板、铝板等焊到普通钢板上,焊接板幅可达 2×8 米²,复板厚度从 1~20mm 不等.

金属管的外包或内包焊接:即在某种材料的内壁或外表面上,焊上另一种材料的薄金属管如钢管与钛管,钛管与紫铜管等.

不同材料或同种材料的相对焊接:管子的直径一般可从几十毫米到几百毫米,这种焊接方法也适用于板与板的对接情况,不过这种焊接只能是搭接焊.

管与管板焊接:主要用于大型热交换器的焊接,其次由于个别管子损坏而漏水,也可通过爆炸焊方法把该管堵塞.

超多层复合爆炸焊:可把多层同种或异种金属薄板焊接在一起.作者曾将长 1.2 米,宽 90mm 的 16 层紫铜板(每层 1mm)在其两端 250mm 长地方复合在一起,而中间不焊制成一个特种大电流软电缆.还将 200 层、厚 0.025mm 的非晶态薄箔焊成一块平板等,且焊接后仍保持非晶态.

爆炸烧结:

爆炸烧结是利用激波将粉末材料一次烧结成棒状,管状,平板形状试件,这目前已成为国际上爆炸力学领域最热门的研究课题.激波通过金属粉末一般为 $2\mu\text{s}$ 时间,首先使粉末压实,挤紧,在这过程中,粉末颗粒间产生摩擦,绝热塑性剪切与微射流,这样,大量塑性畸变功就转变为热量,由于这个过程很快,导热过程可以忽略,热就沉积到粉末颗粒的表面上,使颗粒表面薄层产生熔化,熔化的表层相对于颗粒厚度是个小量,于是激波通过之后,表层热量就迅速向中部低温处导热,这个冷却速度可达到 $10^9 \sim 10^{10} \text{ }^\circ\text{C/s}$ 量级,这样快的冷却速度,使得表层的熔化区出现微晶或非晶状态,从而减少甚至完全避免中间化合物的形成,于是可以使界面获得优异的性质,爆炸烧结非晶态粉末就是利用这个特点.爆炸烧结可以得到比常规烧结方法得到的有更高的密度,如常规烧结纯 SiC 陶瓷,密度很难超过 95% 理论密度,而爆炸烧结可得到 97% 以上.

5) 特种爆炸技术:材料中通过激波以后,可以使材料产生相变,如石墨中通过一定强度的击波后,可以使石墨转变为金刚石.激波可以使六方晶氮化硼(NB)转变为立方 BN,而立方氮化硼的硬度与金刚石差不多,是一种很优异的超硬材料.根据这个原理可以用爆炸方法来生产人造金刚石与立方氮化硼.

激波还可以促进化学反应,活化粉末.当采用爆炸烧结熔点与硬度高的陶瓷粉末时,如 SiC 粉末,如加入适当量的 Si, B, Ti 粉末时,在它们之间会发生有放热反应的化学反应,由反应产生的热量帮助 SiC 粉末的烧结,从而可降低压力,避免产生裂缝.粉末经过爆炸处理后,内部位错密度增高,增加了活化程度,从而可在较低压力下进行烧结.

爆炸消除焊缝残余应力:

一切残余应力的消除过程,也就是弹性应变消失的过程,而塑性应变的产生就能起到降低弹性应变的目的.爆炸法消除残余应力是通过爆炸载荷的作用下,产生应力波,应力波在板内进行多次复杂的反复加载、卸载过程,产生塑性变形,来消除残余应力.作者

(下转第 20 页)

(续前)

二 实验工作的重要性

丁肇中

编者按:

丁肇中,物理学家。1936年1月27日生于美国密歇根州安阿伯。这里发表的一篇短文,是从丁先生1974年在瑞典皇家科学院所举行的颁发诺贝尔物理学奖隆重仪式上讲演中摘出的。所说之言,语重心长;所谈之理,言简意赅。我们不应该忘记这样的真理:自然科学理论离不开实验基础。

我是在旧中国长大的,因此想借这个机会向在发展中国家的青年们强调实验工作的重要性。中国有一句古话:“劳心者治人,劳力者治于人。”这种落后的思想,对在发展中国家的青年们有很大害处。由于这种思想,很多在发展中国家的学生们都倾向于理论的研究,而避免实验工作。事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别是物理学,它是从实验中产生的。我希望由于我这次得奖,能够唤起在发展中国家的学生们的兴趣,而注意实验工作的重要性。

三 发展与体验新理论

(法) P. 朗之万

编者按:

朗之万(Paul Langevin),法国物理学家,1872年1月23日生于巴黎,他发展了布朗运动的涨落理论,提出了磁子的概念,独立获得质量和能量关系式,制造了最早的声纳,率先支持L. V. 德布罗意的物质波理论,是中国物理学会第一名名誉会员,这里选择的一段话,曾在1931年发表。时隔60年,重温朗之万的肺腑之言,也许对于今天的学者认识现代物理理论与实验的发展关系有所补益。

2. 光致发光获得迄今所报道的最短波长

由于多孔硅发光的波长与硅柱直径有关,当发光波长进入绿光范围时,硅柱孔径已很细,极易坍塌,使得更细的量子线结构很难实现。迄今国外文献所发表的光致发光谱其中心波长最短约为530nm(在蓝绿光区域),他们对多孔硅进行特殊处理后,获得了坚韧性很好的样品,光致发光中心波长小于500nm(蓝光),这在国际上还未见到报道。

现代物理百家短文

洁清



必须放弃许多旧的习惯和概念。必须在理解上和想象上尽最大的努力,才可以发展或随时体会那些研究家们为解释新观察到的事实而提出的越来越大胆的新理论;我们感觉到很难按照现代物理学所呈现的宇宙形式来锻炼我们的思想,我们的思想需要不断创造出一些新的解释方法,以免落后于实验科学的惊人的进步。

四 物理研究三要素

王淦昌

编者按:

王淦昌,中国物理学家。这里发表的短文,是从王老1992年在《科学》杂志发表的文章中节选出来的。标题为编者所加。

我建议的实验(编者注:指“关于探测中微子的一个建议(一文)”)终于获得了成功。这个实验是外国人做出来的,很可惜,也很遗憾。不是在中国由我们自己做出来。但是我想,物理学的研究工作,除了钻研纯理论和做实验两个方面,还有第三个方面,那就是归纳、分析和判断杂志上所发表的实验方法、数据和结论。这种工作是为理论工作搭桥,是推动实验工作前进的。我也曾这样对我的学生们说过,在抗战时期,我们国家很穷,物质条件很困难,我们要钻研前沿问题,缺乏必要的

设备条件,只能做这种搭桥的工作,我在这段时期做的一些工作,就是这种搭桥工作。

· 物理学家谈物理学家 ·

爱因斯坦谈牛顿

方村

爱因斯坦始终对物理前辈尊重和称赞。他对牛顿的评价就能说明这一点。他说:“在他以前和以后,都还没有人能像他那样地决定着西方的思想、研究和实践的方向。”“命运使他在人类理智的历史转折点”。

(上接第18页)

曾在国内某厂的长12米,直径2.2米的压力容器上进行应用,可消除焊缝残余应力的60~90%。

爆炸技术的应用并无固定的领域,有时可解决其它常规方法无法解决的难题,如作者曾在大庆油田为位于地下600~1000米的采油套管的变形与错断进行爆炸整形与复位,取得了优异的效果;问题在于巧妙地利用激波在介质中的作用效果来达到预想的目的。