

冲击波物理

经福谦

(中国科学院西南流体物理研究所)

冲击波物理和静高压物理是同属高压物理学学科的两个主要组成部分。冲击波物理是研究在冲击波作用下物质性、态的一门科学,它的研究对象大多是固体材料。

我们知道,物质在高压下的压缩特性一般有 $(\partial^2 p / \partial v^2)_s > 0$ 的性质(式中 p 为压力, v 为比容, S 为比熵),因而一个脉冲加载过程在受压材料中产生的波,在其传播过程中最终将形成一个陡峭的波阵面,见图 1 所示。这个陡峭阵面(在 $t \geq t_3$ 时刻)称为冲击波。它把被研究物质分成两个区域:波阵面之前的是未受冲

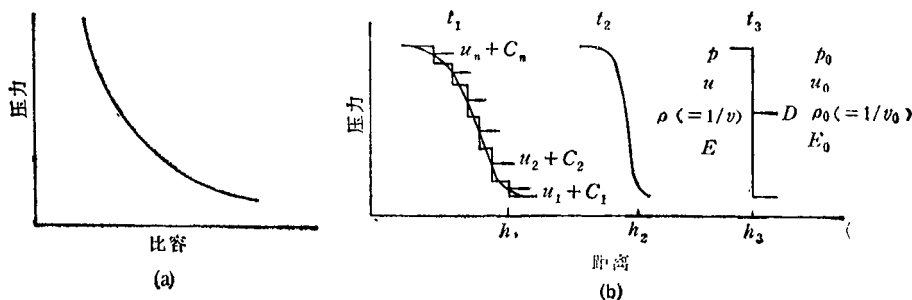


图 1 冲击波的形成条件及其演化过程
(a)具有 $(\partial^2 p / \partial v^2)_s > 0$ 性质的 $p-v$ 线; (b)冲击波在试件中的演化过程(t 为时间, $t_1 < t_2 < t_3$; h 为试件中的位置, $h_1 < h_2 < h_3$)

击压缩作用的物质,波阵面之后的是受到冲击压缩作用的物质。冲击波物理研究的就是在最后一区域内所发生的物理现象。在这个区域中,受压物质中的运动图象十分复杂,并且将引起相应的物理的、化学的和力学的性质变化。

由冲击波技术产生的极端条件,可以概括为高压状态、高速过程和高温状态。从当前的技术发展水平看,由它产生的压力范围约为 1GPa—10TPa,通过卸载过程的相互作用还可使受压物质达到负压区域。高速过程大致有三重含义:一是由于高速压缩过程是绝热的,故加载中将自动地伴随有温升,其值可高达 10^2 — 10^6 K;二是材料的应变速率很高,其值可达 10^6 — 10^9 s $^{-1}$;三是卸载过程也很快,因而可以产生高速淬火效应,材料的冷却速度可达 10^7 — 10^9 K · s $^{-1}$ 。正是由于冲击波技术所造成极端条件

的这些特点,因而在冲击波物理研究中受压物质将表现出比静高压研究中更为独特的一系列响应特性。

动态加载技术是进行冲击波物理研究必备的前提,其技术内容的介绍可参见文献[1]。

二

受压物质的宏观表现可分为变形和破裂两大类。在变形中,有体积变形(受压时为压缩,负压时为拉伸)和形状变形(切应变)两种,后者是由于在冲击波阵面处存在剪切力引起的。当由卸载过程产生的负压达到材料动态抗拉强度时,或者由于剪切应力达到材料动态抗剪强度时,材料便会发生破裂。

体积变形将直接导致受压物质内分子或原

子间距的变化,导致能带变化,最终将引起一系列的物性变化. 对这种变形的宏观响应特性的研究,通常归之于物态方程及本构关系的研究,从这方面的测量数据出发,又可以进一步分析出在高压缩比下原子或分子间相互作用势的信息. 受压物质内的能量状态变化,有时会导致相转变,其中的一些亚稳态结构,也可能在伴随卸载过程的高速冷却条件下保存下来. 对于二元或多元物质系统,在冲击波条件下还可能发生特异的化学反应过程. 在变形过程中发生的加热、剪切、颗粒摩擦及转动等作用下,还可使微观尺度上的原子或分子团间发生相对运动,其结果是在这个物质层次上发生结构变化,如出现位错及其运动、孪晶、重结晶及化学反应等过程,并由此引起材料性质的改变. 动态断裂研究在民用工业及军事应用中都有重要的意义,但本文不拟对它作介绍.

1. 高压物态方程和本构关系

用冲击波方法测量材料的高压物态方程,是通过测出被研究材料的 $p-v$ 线 (Hugoniot 线),然后再用理论模型拟合出该材料的物态方程. 这里所说的高压,其意是指加载压力高于该材料动态屈服强度 7—8 倍的压力,因为此时受压物质的性质在一级近似下可用流体模型描述. 从本世纪四十年代末发展起来的测定固体材料 Hugoniot 线的技术以来,已经测出了并报道了几乎是周期表上全部元素及若干化合物的 Hugoniot 数据^[2,3].

用固体材料 Hugoniot 线分析高压下原子或分子间相互作用势的一种方法是:从许多材料的几百 GPa 下的实测结果发现,其击波速度 D 与粒子速度 u 之间存在着线性关系,即

$$D = C_0 + \lambda u, \quad (1)$$

式中 C_0, λ 为材料常数. 可以证明, C_0 就是该材料的零压体积声速,从而赋予它以明确的物理意义. 另一方面,在相应压力范围内固体材料的原子间相互作用势通常可以用等效的 Born-Meyer 势描述,即有

$$E_x = 3a \frac{v_0}{b} \exp[b(1 - x^{1/3})] - 3Kv_0x^{1/3}, \quad (2)$$

$$p_x = ax^{-2/3} \exp[b(1 - x^{1/3})] - Kx^{-1/3}, \quad (3)$$

式中 E_x 为冷能, p_x 为冷压 $x = v/v_0$ (v_0 为初始比容), a, b, K 为材料常数. 由此看出,用 Hugoniot 数据分析原子间相互作用势的方法,实际上可归结为从实测的 C_0, λ 等参数求出 a, b, K 等参数. 在 $a \approx K$ 的条件下,可以导出它们之间的关系^[4]

$$C_0 = \left[\frac{av_0}{3} (b - 2) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{12} \frac{18 - 6b - b^2}{2b}. \quad (5)$$

图 2 是这种分析结果的一个示例. 从图上看,象许多物性参数一样,排斥势因子 b 和引力势因子 a 均随原子序数(横坐标)呈周期性变化.

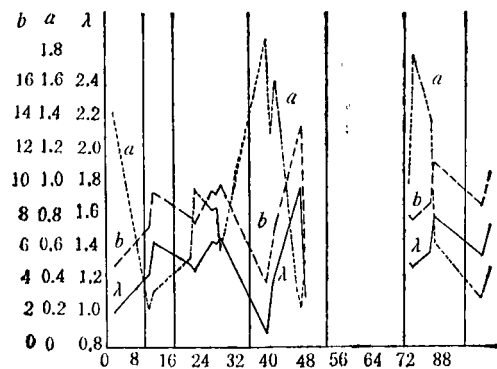


图 2

在高压物态方程研究中,当前除了要对尚未研究过的材料进行数据测定外,面临的一个重要问题是向更高的压力区扩延. 由于核炸药技术的新近进展,目前已使进行此种研究成为可能. 这方面的一个研究课题是:确定用量子统计法得到的理论物态方程适用压力范围的下边界. 例如,从 Аврорин 等在 10—20 TPa 压力范围内的测量结果表明^[5](见图 3),即使在这么高的压力下,实测结果均与量子统计模型计算结果(用实线表示)有明显偏离,它反映了在该压力区内原子壳层结构影响的存在. 图中 H_2O 实测数据与统计模型计算结果的重合,被认为仅属由于温度效应补偿结果的一次“巧合”.

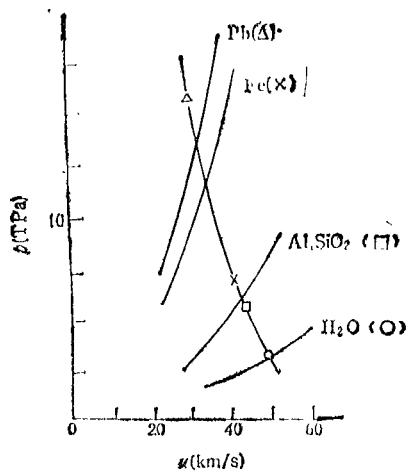


图 3

在较低压力下, 受压材料的行为不再适于用流体模型描述, 它的弹性及速率效应等性质将显现出来. 描述这一条件下材料宏观响应特性的函数表达式称为本构关系. 这个条件下的冲击波波形与图 1 所示的有很大差别 (见图 4).

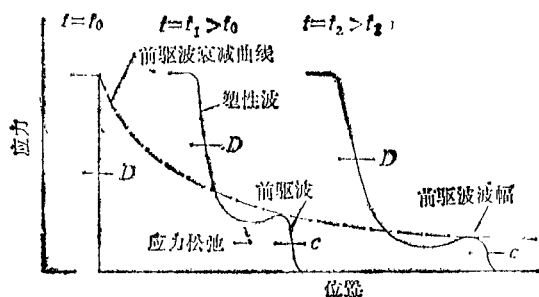


图 4 弹性前驱波的波幅衰减和应力松弛

本构方程的一般函数表示式可以写成

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \dot{\sigma}, T, \dots), \quad (6)$$

式中 σ 为应力, ϵ 为应变, T 为温度, 符号“ $\dot{\cdot}$ ”代表对时间取导数, 它代表与速率效应相关的项. 函数 f 的形式随材料性质而异, 可以通过对实验数据用拟合方法得到. 实际上, 速率相关项代表了一种耗散机制, 其系数通常用粘度 η 这一宏观力学参量表示. 目前有多种测定材料粘度的方法, 例如张万甲等曾用层裂片法测得铝的 $\eta = 6.6 \times 10^4 \text{Pa} \cdot \text{s}^{61}$, 张树华等用微扰击波阵面法测得铝的 $\eta = 5 \times 10^4 \text{Pa} \cdot \text{s}^{12}$.

物理

2. 冲击相变和冲击波化学

研究在冲击波作用下发生相变, 最成功的例子是铁在 13GPa 下由 BCC 结构向 HCP 结构的转变. 这是一个一阶相变. 冲击相变的一个重要问题是相变过程必须在冲击波的持续加压时间内完成, 其值约为 $1\mu\text{s}$, 否则就不可能在冲击加载条件下实现相转变的发生. 除铁以外, 目前已在铁合金, 多种岩石和矿物, 铋、锗等许多材料的研究中, 发现了这种在冲击波作用下的相转变现象.

结构型冲击相变效应在工业应用和基础研究中具有重要的意义. 工业应用中最重要成就是石墨—金刚石相变, 即人造金刚石. 它的相变压力在 10—100 GPa 之间, 确切数值取决于石墨的初始装填密度. 回收到的金刚石粉是多晶结构, 颗粒直径约为 10—100 μm , 微晶的直径约为 10^3\AA . 近年来在学术研究中最令人感兴趣的课题之一是人造金属氢. 金属氢是一种超导材料, 理论预测它可在 200 GPa 下制成, 实验上则是试图通过对固态氢加压方法获得, 而这么高的压力用动态加载技术是较易实现的. 另一类重要课题是, 利用冲击波高压法获得用通常方法难以得到的、具有特异功能的亚稳相结构. 从理论上讲, 有许多材料只要做成某种特定的结构, 就可以提高其某方面的性能, 这种特定结构的获得, 可以利用冲击过程的快速淬火特性, 使处于高温高压亚稳相中的原子还没有扩散到其平衡态结构之前就将该原子的位置“固定”下来的办法实现. 例如, 王文魁等^[7]曾利用高速飞片撞击技术将具有 Ti_3P 结构的 Nb_3Si , 通过冲击加载 ($p > 62 \text{GPa}$) 获得 $T_c = 18 \text{K}$ 的超导相材料, 他分析后认为, 这个新超导相材料很可能是 A15 型 Nb_3Si .

以上说的也是一种广义的化学变化的结果. 实际上, 对许多无机材料和有机材料, 都可以在冲击波作用下发生一些用其他方法难以获得的化学反应及其产物. 因此, 对这一类研究课题, 有人统称之为冲击波化学.

1) 张树华的私人通信.

对于无机材料,冲击压缩过程好象是一个超级混合器^[8]——生成并激活各种缺陷,将晶粒粉碎、磨细,增强材料中的物质传递,并在高温高压条件下进行化学反应,生成新的物质。由于冲击波的粉碎与磨细能力比普通方法的强得多,因而增大了参与反应物的接触面积,由于在一次冲击加载过程中原子迁移距离可达 $10\mu\text{m}$ 量级(比普通方法约大四个量级)等等,所有这些因素都起到了增强化学反应速率的效果。例如,用冲击波方法已经生成了用一般化学方法难以获得的 CrO , BSb 等材料。特别应该说明的是,无论 Cu 和 S 是什么样的初始配比,都可以通过电爆炸冲击的方法得到相同的 $\text{Cu}_{1.96}\text{S}$ 化合物,这是用普通的化学方法无法做到的。顺便指出, $\text{Cu}_{1.96}\text{S}$ 恰好与地球上一种矿物的分子式相同,它是一种最稳定的硫化铜,在自然界分布很广。因此有人认为,冲击波无机化学也是一种模拟地球和其他行星自然演化过程的好方法。

对于有机材料,由冲击波作用诱导起化学反应的过程是^[9]:冲击波在很短的时间内(在小于波阵面厚度的 ns 内)激活分子,但此时的状态是非平衡态,表现为分子振动能的局域增强。在局域增强时间小于分子振动能向平衡态过渡的完成时间之前,如果沉积在某些键上的能量足够大,这些键就会断开。由以上过程生成了有机自由基(原子团),它在击波阵面上发生物质运动,并产生化学反应。冲击波有机化学及常规有机化学的反应过程有很大差异。迄今还发现存在着冲击加载下无触媒的许多单体的聚合作用。例如,在热平衡条件下,脂肪化合物碳-碳键能是 330kJ/mol ,芳香化合物的是 485kJ/mol 。但是在冲击条件下,在 $1.1\text{—}4.0\text{GPa}$ 下脂肪化合物的碳键还没有断开,而在 $1.1\text{—}1.5\text{GPa}$ 时芳香化合物的碳键就断开了。这是由于在冲击加载下特有的局域能量沉积效应引起的,因为芳香化合物的分子振动弛豫时间是 10^{-10}s ,而脂肪化合物的是 10^{-13}s 。在冲击波作用下,有机材料也会发生其特有的置换、聚合、异构化等化学反应。例如,对四氢呋喃,用

冲击方法得到的聚合物的结构式是 $(-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{O}-)_n$,其熔点温度约 500°C ;而用通常触媒(SbCl_5)方法得到聚合物的结构式是 $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$,其熔点温度为 $42\text{—}45^\circ\text{C}$ 。又如,对于通常难以聚合的材料四氯乙烯,也可以在冲击波作用下合成聚合物,其结构式为 $(-\text{Cl}_2\text{C}-\text{CCl}_2-)_n$ 。

总之,冲击波化学的研究,对新材料研制是一项很有意义的工作。另外,苏联的科学工作者还曾用冲击波方法模拟研究过地球演化过程中原始生物聚合物的形成问题。

3. 冲击波改性及爆炸加工

在冲击波作用还不足以生成以上所说的化学反应,即不发生晶体点阵结构改变或生成新物质时,冲击波仍会使材料的细观结构发生变化。

从冲击加载后回收到的样品分析,冲击作用要发生明显的硬化效果,这是由于冲击波作用下生成的缺陷(如位错)及其发展和运动的结果。这一效应称为冲击硬化,也可以统称为一种冲击改性。

冲击波压力对回收样品的强度影响很明显,一般规律是冲击强度(H)随冲击压力而增加,但在达到某一饱和值之后,冲击强度又会随冲击压力的增加而减小(见图5所示),其原因

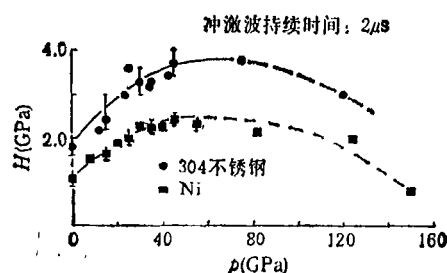


图 5

是由于冲击温升及绝热剪切带的加温软化作用超过了压力强化作用引起的。另一方面,冲击波作用的持续时间对硬化效果也有重要的影响,见图6所示。

另一类冲击改性是利用在冲击波作用下材

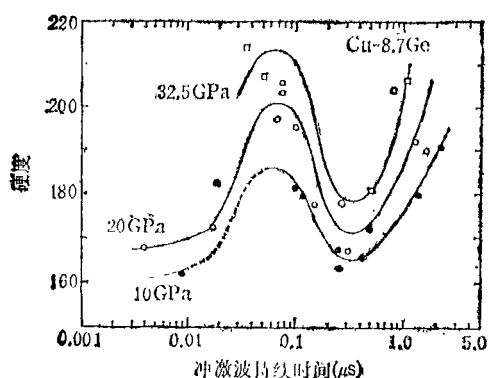


图 6

料的择优取向效应。例如，美国利弗摩尔国家实验室 (LLNL) 的科学工作者曾对 Nb 做过冲击试验，压力范围是 60—120GPa，结果发现，冲击过程的择优取向效应明显地改变了它的微观结构——初始样品由大晶粒组成，且无特定的取向，但冲击后样品是细长形结晶，其取向与冲击波阵面方向平行，而且 Nb 的超导温度无明显变化。这种各向异性的晶粒结构正是人们预期的优质磁性材料应具有的结构型式。沿着这个方向继续研究下去，或许会对新型 Nb-Fe-B 超级永磁材料的制备工艺研究有所裨益。

爆炸加工有多方面的内容，主要有爆炸压实，爆炸焊接(复合)，爆炸成形等^[40]。

爆炸压实实际上是一种用于粉末冶金的冲击波技术。冲击波首先从各粉末颗粒的接触点处传入。该点压力要比从 Hugoniot 线上的估值大得多，又由于各个粉末颗粒的取向不同，以及各个颗粒的弹性各向异性及颗粒间存在的间隙等效应，造成了在颗粒边界及间隙的局部区域处出现复杂的波的和物质的相互作用，造成了冲击波能量的局域增强沉积效应。其结果是，仅在粉末颗粒表面上出现高温熔化层，这时又由于冲击波的平均加压作用，便造成了对粉末的压实成形效果。应该说明，在颗粒表面出现高温熔化层时，颗粒内部的冲击温升是很小的，因而压制品的性能可基本保持与原始粉末的相同，这是冲击压实技术的重要优点。冲击压实技术多数用于难熔金属，但近年来对陶瓷粉末

压实的应用也日趋广泛起来。

爆炸焊接的最大特点，是可以把熔点、热膨胀及硬度有很大差别的金属焊接起来，这是其他焊接技术难以做到的。爆炸焊接时，将炸药敷在一层金属板上，炸药引爆后，驱动该金属板与另一块金属板实现推进式的倾斜碰撞。碰撞处产生的高速粒子流将首先清除两块金属板表面上的氧化层，然后又在该碰撞点处产生的局部高温及高压作用下将两金属板焊接在一起。这种焊接属于一种冶金焊接，焊接强度可等于或优于母体的强度。

爆炸成形是一种利用爆炸形成的巨大压力使金属板材成形的技术，它特别适用于复杂形状及大工件(最大可重达几吨，长、宽达数米，厚达十几厘米)的成形。

三

冲击波物理是从本世纪五十年代发展起来的一门学科，它的发展使人们得以遨游在瞬发式的高压、高温及高速等极端条件的环境中，深化对客观物质世界的认识，并从这一认识出发，进一步提高人们改造世界的能力。

到目前为止，它的研究成果已对固体物理、地球物理、爆炸物理及天体物理等邻近学科的学术研究工作提供了许多有用的资料，而且也在许多实际应用中，如人工合成新材料，爆炸加工，冲击改性及军事应用等方面取得了多方面的成果。它的发展是很快的。可以预期，在我国开展这方面的研究工作，无疑会对四化建设起重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 经福谦，物理，15-5(1986)，305.
- [2] S. P. Marsh, LASL Shock Hugoniot Data, University of California Press, (1980).
- [3] M. Van Thiel, UCRL-50108 (Vol. 1, 2).
- [4] Yang Xuihui and Jing Fuqian, Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects, Science Press, (1986), 809.
- [5] E. H. Аврорин и др., Письма в ЖЭТФ, 31 (1980), 727.
- [6] Zhang Wanjia et al, See [4], 809.

(下转第 500 页)