

文章编号: 1000-5773(2005)02-0127-05

无钴合金钢的冲击响应实验研究*

桂毓林, 王彦平, 刘仓理, 孙承纬, 张克明

(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: 利用一级轻气炮作为加载手段, 研究了无钴合金钢在 3~20 GPa 压力区间的冲击响应特性。用激光干涉测速——VISAR 记录了双波结构的自由面速度剖面, 并利用常压下的弹性纵波速度近似替代低压冲击下的弹性先驱波速度, 确定了无钴合金钢的 Hugoniot 关系。根据自由面速度反映的层裂信息, 给出了无钴合金钢的 Hugoniot 弹性极限、层裂强度以及层裂片厚度等动态力学参数。

关键词: 冲击动力学; 无钴合金钢; Hugoniot; 层裂

中图分类号: O347.4 **文献标识码:** A

1 引 言

无钴合金钢是一种高强高韧钢, 一般作为攻击坚硬目标的侵彻弹或钻地弹弹体壳体用料。侵彻弹弹体在侵彻目标过程中主要受到冲击载荷的作用, 其壳体材料的冲击特性以及层裂强度直接关系到其侵彻能力和装药安定性的评估。侵彻体一般以 600~800 m/s 的速度侵彻目标, 在侵彻体内产生 10~20 GPa 的冲击压力, 研究材料在该压力区间的冲击响应特性和层裂现象是至关重要的。目前, 还没有文献报道该材料冲击响应方面的数据。

利用一级轻气炮作为加载手段, 使用激光干涉测速仪 VISAR^[1~3] 测量了无钴合金钢样品自由面速度剖面, 并用 PZT 压电陶瓷片测量弹性先驱波速度。但由 PZT 压电陶瓷片测量得到的弹性波速度分散性较大, 用材料常压下的弹性纵波速度近似替代弹性先驱波速度, 确定了 Hugoniot 关系。另外, 根据自由面速度剖面反映的层裂信息, 获得了 Hugoniot 弹性极限、层裂强度、应变率以及裂片厚度等动力学特性参数, 为侵彻弹的工程设计提供实验依据。

2 冲击响应实验

无钴合金钢经过热处理后具有非常高的屈服强度和断裂韧性, 本实验采用的热处理制度为: 首先在 920 °C 下正火, 然后在 860 °C 下淬火, 最后以 300 °C 回火。在低压冲击下, 材料的弹塑性特性对冲击波结构会产生明显的影响, 塑性冲击波速度只能通过测量自由面速度得到。测量样品自由面速度剖面是确定层裂的破坏应力更为常用的一种方法^[4,5]。

本实验采取飞片对称撞击法, 其中样品厚度为飞片厚度的 2 倍。当飞片撞击样品后, 在飞片和样品中分别产生压缩波 1 和 2, 波传播和相互作用的 $X-t$ 图像如图 1 所示。图中, C 代表压缩区, T 代表拉伸区。当压缩波 1 和 2 传播到自由面后, 将反射为压缩稀疏波, 这些波在区域 A 中相互作用, 产生一个拉伸应力。然后, 拉伸波 3 和 4 传播到样品的自由面, 并反射为压缩波。当拉伸区 T 的拉伸应力超过材料的层裂强度时, 样品将发生层裂现象^[6]。

实验样品设计为台阶式样品。样品表面上布置有 4 个光杆探针, 用来修正碰撞状态的平面性, 同时用以触发 PZT 压电陶瓷片和 VISAR。在样品的第一台阶处, 布置 4 个 PZT 压电陶瓷片, 在第二台阶

* 收稿日期: 2004-05-08; 修回日期: 2004-12-22

作者简介: 桂毓林(1973—), 男, 博士研究生。

的对应角度上也布置 4 个 PZT 压电陶瓷片,其中压电陶瓷片被自制的带有柱形槽的黄铜探针顶住。轻气炮实验装置示意图如图 2 所示。

共进行了 6 发 3~19 GPa 压力区间的轻气炮实验。采用单点双 VISAR 测试技术^[3]测量自由面速度,用低灵敏度条纹常数为 446 m/(s·fr)或 232 m/(s·fr)测量波上升前沿波形,用高灵敏度条纹常数为 100 m/(s·fr)测量发生层裂后的波形。由 VISAR 测得自由面速度历史图像如图 3 所示。图中,数字 1~6 表示不同冲击压力下样品自由面速度历史图像。从图 3 中,可以看出样品 1 曲线在自由面速度 708 m/s 左右出现新的波阵面,也就是相变波,经计算此处冲击压力为 13.6 GPa,表明样品 1 发生了冲击相变。另外,样品 6 未发生层裂,其余样品均发生了层裂。

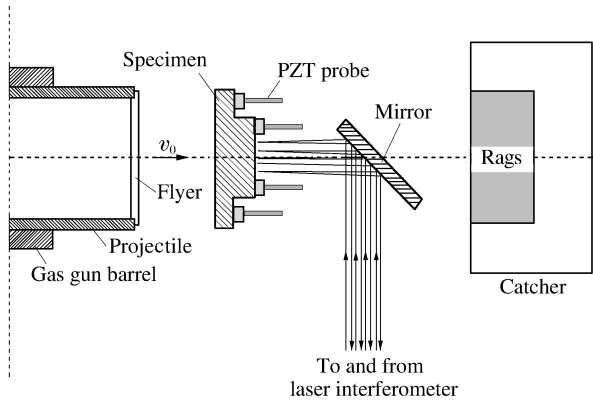


图 2 实验装置简图
Fig. 2 Schematic of the experimental configuration

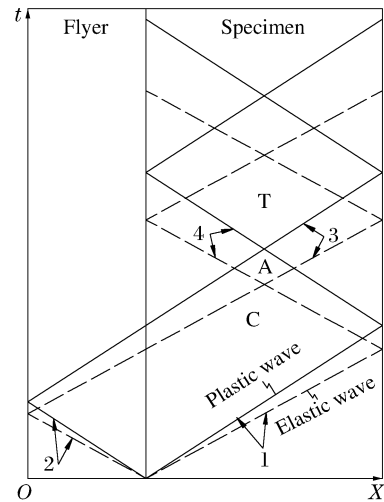


图 1 在飞片和样品中波传播和相互作用的 X-t 图像
Fig. 1 X-t profile of the wave propagation and interaction between the flyer and specimen

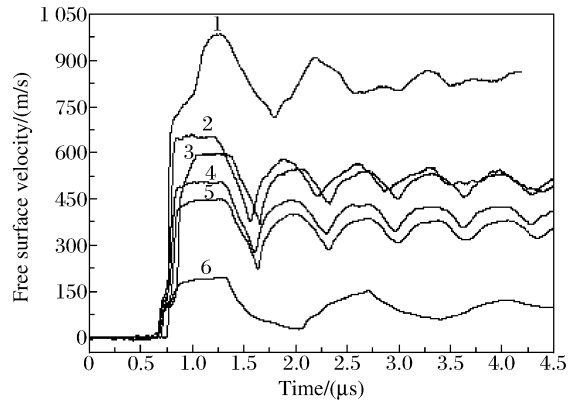


图 3 VISAR 测得的无钴合金钢的自由面速度
Fig. 3 Free-surface velocity profiles for no-Co steel

3 实验结果

3.1 Hugoniot $C_{pl}-u_p$ 关系

由于顶住 PZT 陶瓷片的黄铜探针与样品固定支架之间的弛豫效应,使得 PZT 压电陶瓷片测量的弹性先驱波速度 C_e 经平面修正后分散性仍较大。但根据文献[1,3],利用材料常温常压下的纵波波速 C_{L0} 替代 C_e 。由超声测量中的回波反射法测得数据与由此计算的相关物理性能参数在表 1 中列出。为了帮助分析自由面速度历史图像所反映的冲击波结构及层裂断裂信息^[4],将图 3 归结为图 4。

结合图 4,首先确定弹性先驱波到达自由面的时间 $t_e = h/C_e$,其中 h 为样品厚度,然后根据这个时间将自由面速度历史曲线重新归零,从而确定塑性波到达自由面的时间 t_p 。于是,塑性波速度 $C_{pl} = h/t_p$,

表 1 无钴合金钢一维常压下弹性参数

Table 1 One-dimensional elastic properties of no-Co steel at standard atmosphere

Density $\rho_0/(g/cm^3)$	Longitudinal wave speed $C_{L0}/(km/s)$	Shear wave speed $C_{T0}/(km/s)$	Youngs modulus $E/(GPa)$	Poisson's ratio ν	Bulk sound speed $C_0/(km/s)$
7.637 ^[1]	5.848	3.165	197.8	0.29	4.57

塑性波波后粒子速度 $u_p = U_p/2$, 其中 U_p 为塑性波到达自由面时的自由面速度。将塑性波速度 C_{pl} 和粒子速度 u_p 数据组进行线性拟合, 拟合曲线如图 5 所示, 关系式为

$$C_{pl} = C_0 + \lambda u_p$$

式中: $C_0 = 4.57 \text{ km/s}$, $\lambda = 1.283$ 。

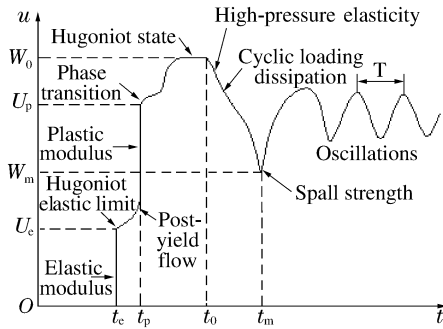


图 4 样品中的冲击波结构图像
Fig. 4 Shock-wave structure profile

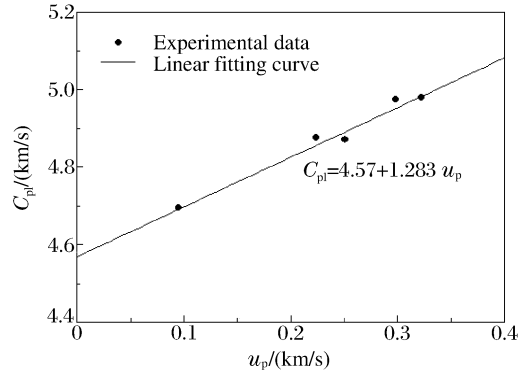


图 5 塑性冲击波速度 C_{pl} 和粒子速度 u_p 关系
Fig. 5 Relationship between plastic shock-wave velocity C_{pl} and particle velocity u_p

3.2 动态力学特性参数

Hugoniot 弹性极限 σ_{HEL} [7,8] 为

$$\sigma_{HEL} = (1/2)\rho_0 C_e U_e$$

式中: U_e 为弹性先驱波到达样品后界面时的自由面速度。

在声学近似的条件下, 层裂面上的破坏应力按如下公式进行计算 [7~10]

$$\sigma_{spall} = (1/2)\rho_0 C_0 (W_0 - W_m)$$

式中: W_0 为自由面峰值速度, W_m 为层裂脉冲阵面出现在后界面前的自由面速度。

由图 4, 根据样品发生层裂后弹性波在裂片中的振荡周期确定层裂片的厚度 [8] 为

$$\delta_s = C_e T/2$$

式中: T 为弹性波在层裂片中的振荡周期。

应变率由下式给出 [6,9]

$$\dot{\epsilon} = [1/(2C_0)](W_0 - W_m)/(t_m - t_0)$$

式中: t_0 和 t_m 为 W_0 与 W_m 分别对应的时间。

将实验数据代入(2)式~(5)式, 便可得到无钴合金钢的层裂参数, 具体参数在表 2 中列出。

表 2 由实验得到的无钴合金钢层裂参数

Table 2 Spall parameters of no-Co steel obtained from experiments

Shot No.	Flyer thickness / (mm)	Sample thickness / (mm)	Hugoniot pressure / (GPa)	Hugoniot elastic limit / (GPa)	Strain rate / (10^4 s^{-1})	Spall strength / (GPa)	Spall thickness / (mm)
1	1.998	4.039	18.917	2.61	5.74	4.43	2.01
2	1.985	4.000	12.267	2.81	8.61	4.21	1.98
3	1.985	4.000	11.326	2.20	8.38	4.00	1.99
4	1.985	4.010	9.332	2.58	6.41	3.83	2.00
5	1.989	4.053	8.239	2.11	7.61	3.89	2.00
6	2.010	4.025	3.416	1.84	2.49	—	—

从表 2 中可以看出, Hugoniot 弹性极限和应变率分散性较明显, 可能与测量波上升前沿的 VISAR 灵敏度和无钴合金钢本身的物理性能有关。层裂强度随着冲击压力的上升而上升虽有较好的一致趋势, 但样品 1 发生了冲击相变后层裂强度有明显提高, 是今后进一步研究中值得关注的。Hugoniot 弹性极限和层裂强度的平均值分别为 2.35 GPa 和 4.07 GPa。

4 结 束 语

通过对无钴合金钢的冲击响应实验, 可以得出以下两点结论:

(1) 无钴合金钢的塑性波速度 C_{pl} 和粒子速度 u_p 的关系式为: $C_{pl} = 4.57 + 1.283u_p$, 单位为 km/s;

(2) 无钴合金钢的 Hugoniot 弹性极限在 2.35 GPa 左右, 层裂强度在 4.07 GPa 左右。

无钴合金钢的微观断裂机制和层裂断裂的数值模拟还有待进一步深入研究。

感谢虞德水、杨晋晏、方茂林、汪小松、陈宏、王为、叶素华等同志对本实验工作的协助与支持。

References:

- [1] Grady D E. Steady-Wave Risetime and Spall Measurements on Uranium [R]. SAND-85-0233C, 1985.
- [2] Chen G H, Li Z R, Liu Y K, et al. Flyer Velocity Measurement Using Duple-Sensitivity VIASR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(1): 70-74. (in Chinese)
陈光华, 李泽仁, 刘元坤, 等. 用双灵敏度 VISAR 测量飞片自由面速度 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(1): 70-74.
- [3] Zhang L, Zhang Z G, Qin X Y, et al. Dynamic Fracture and Mechanical Property of D6A, 921 and 45 Steels under Low Shock Pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(4): 301-304. (in Chinese)
张林, 张祖根, 秦晓云, 等. D6A、921 和 45 钢的动态破坏与低压冲击特性 [J]. 高压物理学报, 2003, 17(4): 301-304.
- [4] Meyers M A. Dynamic Behavior of Materials [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [5] Sun C W, Zhuang S M, Wang Y P, et al. Dynamic Fracture in Metals at High Strain Rate [A]. Davison L, Grady D E. High-Pressure Shock Compression of Solid II: Dynamic Fracture and Fragmentation [C]. Shahinpoor: Springer, 1996. 71-86.
- [6] Tarabay H A, Seaman L, Curran D R. Dynamic Failure of Materials (Volume 1)—Experiments and Analyses [R]. DSWA-TR-96-77-V1, 1998.
- [7] Razorenov S V, Kanel G I, Baumung K, et al. Hugoniot Elastic Limit and Spall Strength of Aluminum and Copper Single Crystals over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures [A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: AIP, 2002. 503-506.
- [8] Werdiger M. Al and Cu Dynamic Strength at a Strain Rate of $5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ [A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: AIP, 2002. 583-586.
- [9] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V. Spallation in Solids under Shock-Wave Loading: Analysis of Dynamic Flow, Methodology of Measurements, and Constitutive Factors [A]. Davison L, Grady D E. High-Pressure Shock Compression of Solid II: Dynamic Fracture and Fragmentation [C]. Shahinpoor: Springer, 1996. 4-8.
- [10] 卡涅夫 Г H, 拉扎列诺夫 С B, 乌特金 И B, 等. 凝聚介质中的冲击波现象 [M]. 韩钧万. 四川绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1998. 179-181.

An Experimental Study on Shock Response of No-Co Steel

GUI Yu-Lin, WANG Yan-Ping, LIU Cang-Li,
SUN Cheng-Wei, ZHANG Ke-Ming

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, the shock response of no-Co steel is studied, in the impact pressure range from 3 GPa to 20 GPa. The two-wave structural profile of the free surface velocities are recorded by a velocity interferometer system for any reflector (VISAR). Using the material longitudinal elastic wave speed at standard atmosphere instead of the elastic precursor wave speed at low shock pressure, we obtained the Hugoniot relationship between the plastic shock wave speed and the particle velocity for no-Co steel. From the information of the free surface velocity profiles, we also obtained the Hugoniot elastic limit, spall strength, spall thickness.

Key words: shock dynamics; no-Co steel; Hugoniot; spall strength

第四届国际凝聚态理论与材料计算学会议会讯

由中国科技大学和四川大学主办、四川省物理学会承办的第四届国际凝聚态理论与材料计算学会议定于 2005 年 7 月 11 日至 17 日在成都市召开。会议主要以邀请报告形式,限于同行之间的研讨交流和对研究生的培养。欢迎国内外凝聚态理论与材料计算学领域的专家学者及研究生踊跃参加。大会将请专家对以下领域作专题性的特邀报告:

1. 凝聚态物理的最新进展:

(1) 自旋电子学, (2) 纳米材料, (3) 固体量子信息和计算, (4) 玻色-爱因斯坦凝聚, (5) 强关联电子系统, (6) 高温超导, (7) 量子霍尔效应, (8) 磁学, (9) 表面和界面, (10) 半导体物理, (11) 低维凝聚态物理, (12) 介观物理, (13) 软凝聚态物质, (14) 生物物理, (15) 统计物理

2. 材料计算学的最新进展

(1) 密度矩阵重整化群, (2) 第一性原理, (3) 蒙特卡罗方法, (4) 分子动力学, (5) 密度泛函理论

会议费用:

邀请报告者和研究生不收注册费,其它参加者酌收注册费 300 元,会议费用自理(包括交通、食宿费用等)。

会议地点:

中国四川省成都市望江宾馆

地址:成都市下沙河铺 42 号(城东)

电话:028-87490000

联系方式:

联系人:刘伍明, E-mail: wmliu@aphy. iphy. ac. cn

电话:010-82649249

传真:010-62553698

地址:北京中关村南三街 8 号中国科学院物理研究所

邮政编码:100080