

# 高速侵彻战斗部壳体材料动态力学性能研究

张 骥

(海装重庆局,重庆 400042)

**摘要:**利用分离式霍普金森压杆对3种高速侵彻战斗部壳体材料的动态力学性能进行了研究,得到了3种壳体材料在高应变率条件下的力学性能,同时拟合出了3种材料各自的本构方程,为数值模拟和高速侵彻战斗部壳体材料的优选奠定了基础。

**关键词:**战斗部;材料;力学性能

**本文引用格式:**张骥.高速侵彻战斗部壳体材料动态力学性能研究[J].四川兵工学报,2014(8):11-14.

**中图分类号:**TJ410.33

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2014)08-0011-04

## Study on Dynamic Mechanical Property of Shell Material for High Speed Penetration Warhead

ZHANG Ji

(Chongqing Bureau, Equipment Department of the Navy, Chongqing 400042, China)

**Abstract:** The paper studied on dynamic mechanical properties of shell material for three sorts of high speed penetration warhead by means of SHPB, achieved the mechanical property of three sorts of shell material under high strain rate, and at the same time, fitted the constitutive equation of three sorts of material respectively. The study result lays the foundation for the optimization of numerical simulation and shell material of high speed penetration warhead.

**Key words:** warhead; material; mechanical property

**Citation format:** ZHANG Ji. Study on Dynamic Mechanical Property of Shell Material for High Speed Penetration Warhead[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(8): 11-14.

为了使重要的战略设施有效防止敌方攻击,一些国家把它们建造到地下数米,甚至18m的隐蔽深处。为了对付这类深层目标,世界各军事强国都在积极研究高速深侵彻导弹。随着导弹着速的不断提高,靶标的防护不断增强,对导弹战斗部也相应提出了更高的要求。导弹战斗部壳体是导弹在高速侵彻过程中主要的承载体,因此战斗部壳体材料的选择显得尤为重要。目前,国内较为常用的高速侵彻战斗部壳体材料有:30CrMnSiNi2A、DT300、TH200。由于高速侵彻战斗部壳体材料的服役条件是在高速冲击条件下,应变率高,此时材料的力学性能与准静态条件相比会有较大不同。因此利用分离式霍普金森压杆进行这3种材料在高应变率( $10^2 \sim 10^4/S$ )条件下的动态力学性能研究显得十分有必要和迫切,对战斗部壳体材料的性能评判更加科学可靠<sup>[1-2]</sup>。

## 1 实验原理

当枪膛内的子弹以某一速度撞击入射杆时,在入射杆内产生一个入射脉冲,试件在该应力脉冲作用下发生高速变形;与此同时,在入射杆中产生一反向的反射脉冲,在透射杆中产生一向前的透射脉冲,入射、反射和透射脉冲的相对幅度取决于试件的材质。在加载脉冲的作用时间内,试件中会发生多次的内反射,因为加载脉冲的时间比短试件中波的传播时间要长的多,可使得试件中的应力很快趋于均匀,因此可忽略试件内部的波的传播效应<sup>[3-6]</sup>。通过贴在弹性杆上的2对称应变片测得入射波、反射波和透射波的信号,并经动应变仪放大和高速数据采集卡采集,再经计算机存储、分

析、处理,即可得到材料在高速冲击条件下的应力-应变曲线<sup>[7-10]</sup>。本次实验所采用的霍普金森压杆直径为12 mm,杆件材质为马氏体时效钢(HRC > 50,准静态屈服强度 $\geq 1\ 800$  MPa)试件规格为 $\Phi 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 3种壳体材料的动态性能测试结果与分析

#### 2.1.1 同种壳体材料在不同应变率下的动态力学性能及分析

对30CrMnSiNi2A、DT300、TH200分别进行霍普金森压杆试验,测得各自在不同应变率下的应力-应变曲线分别为图1~图3所示。

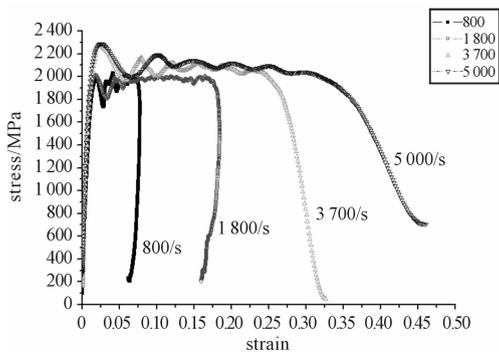


图1 30CrMnSiNi2A在不同应变率下的应力-应变曲线

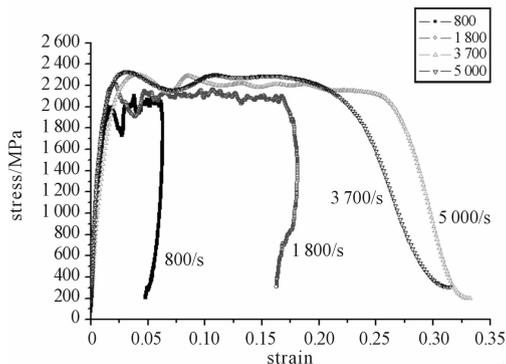


图2 DT300在不同应变率下的应力-应变曲线

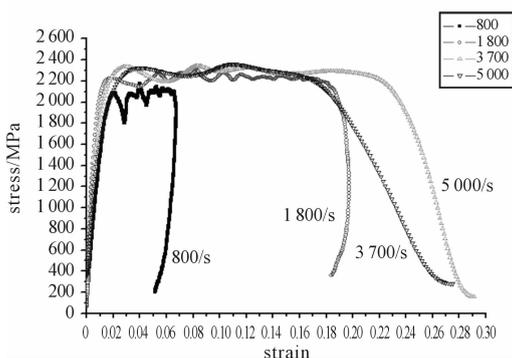


图3 TH200在不同应变率下的应力-应变曲线

由图1~图3可知,随着应变率的提高,30CrMnSiNi2A的动态屈服极限由2 000 MPa提高至2 200 MPa,DT300的动态屈服极限由2 000 MPa提高至2 300 MPa,TH200的动态屈服极限由2 100 MPa提高至2 300 MPa。这说明3种材料均为应变率敏感材料,应变率强化效果明显。3种材料的塑性应变段都明显增大,具有较好的塑性变形能力。在高应变率(5 000/S)条件下,DT300和TH200的动态屈服极限相对较30CrMnSiNi2A稍高。

#### 2.1.2 不同壳体在材料相同应变率下的动态力学性能及分析

图4~图6为3种壳体材料在相同应变率条件下的应力-应变曲线。

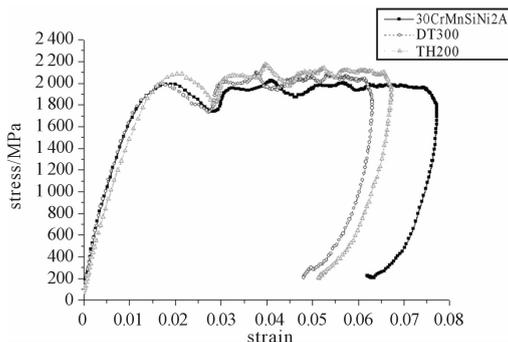


图4 3种材料在应变率为800/s条件下的应力-应变曲线

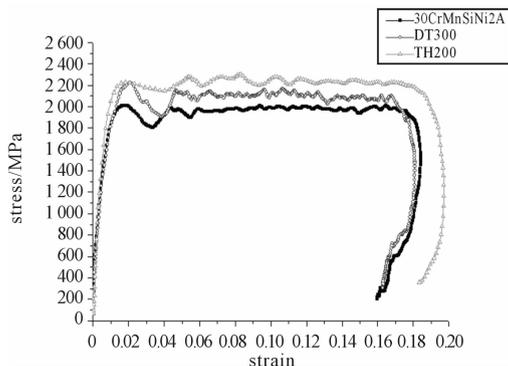


图5 3种材料在应变率为2 000/s条件下的应力-应变曲线

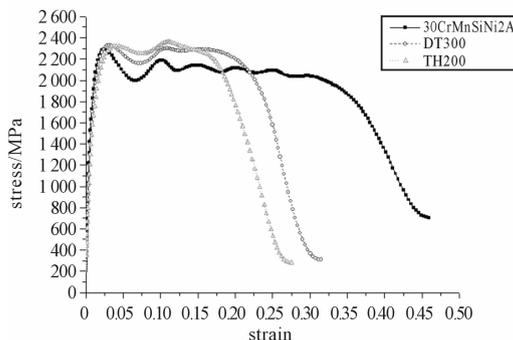


图6 3种材料在应变率为5 000/s条件下的应力-应变曲线

由图4~图6可知,在应变率为800/s的条件下,3种材料的动态屈服极限均约为1900MPa。由于30CrMnSiNi2A的塑性应变段较长,因此其较DT300和TH200具备更好的动态塑性应变能力。

在应变率为2000/s的条件下,DT300和TH200的动态屈服极限为2200MPa,30CrMnSiNi2A的动态屈服极限约为2000MPa,因此此时DT300和TH200较30CrMnSiNi2A具有较好的抗变形能力。3种材料的塑性应变段相当,其塑性变形能力也相当。

在应变率为5000/s的条件下,DT300和TH200的动态屈服极限为2300MPa,30CrMnSiNi2A的动态屈服极限约为2100MPa,因此此时DT300和TH200较30CrMnSiNi2A的抗变形能力稍高。但30CrMnSiNi2A的塑性应变段明显大于DT300和TH200,因此其塑性变形能力较好。

## 2.2 3种壳体材料的本构方程拟合

Johnson-Cook模型是一种经验性的黏塑性本构模型,这种模型能较好地描述金属材料的加工硬化效应,应变率效应和温度软化效应。因此,本文采用此模型来描述这3种战斗部壳体材料在一维应力作用下的状态。

J-C模型的具体形式为

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$ 为材料参数,需要根据不同应变率和不同温度条件下的应力-应变关系实验曲线来拟合; $\bar{\epsilon}^p$ 为无量纲有效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0$ ;  $\dot{\epsilon}^p$ 为有效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考塑性应变率,一般取 $\dot{\epsilon}_0 = 1s^{-1}$ ;  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度, $T$ 为实际温度, $T_r$ 为室温, $T_m$ 为熔点温度。

由于3种战斗部材料的服役环境是短时冲击,因此可忽略温度的影响,温度为室温,3种战斗部壳体材料的本构方程可转化为

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (2)$$

采用最小二乘法对上述3种战斗部壳体材料进行非线性拟合,分别得到它们各自的本构方程:

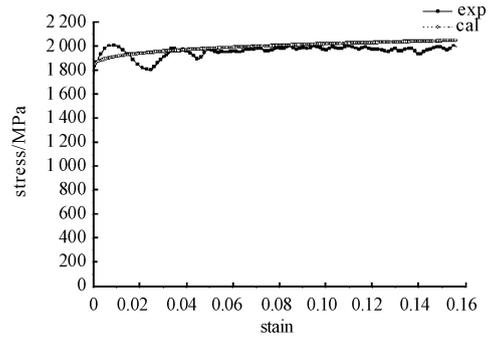
$$\sigma_{30Cr} = [1587 + 382.5(\bar{\epsilon}^p)^{0.245}][1 + 0.017 \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (3)$$

$$\sigma_{DT300} = [1603 + 382.5(\bar{\epsilon}^p)^{0.245}][1 + 0.025 \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (4)$$

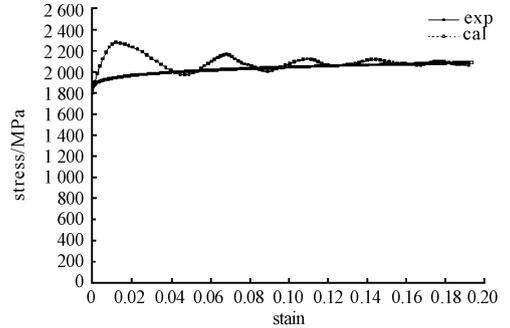
$$\sigma_{TH200} = [1657 + 382.5(\bar{\epsilon}^p)^{0.245}][1 + 0.026 \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (5)$$

为了验证3种材料本构方程的正确性和实用性,分别将3种材料的本构方程与实验曲线进行对比,如图7~图9所示。

由图7~图9可知,3种材料本构方程的计算结果与实验结果较吻合。均可用于数值模拟,为战斗部的仿真计算提供较为可靠的参数。

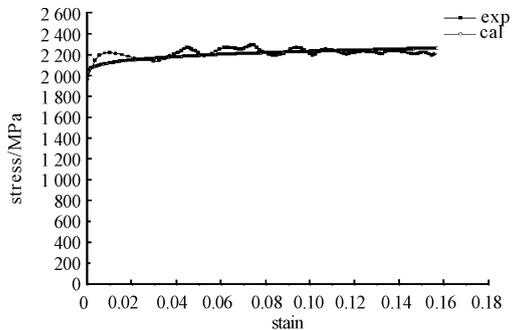


(a) 在应变率为1800/s下的计算结果与实验结果比较

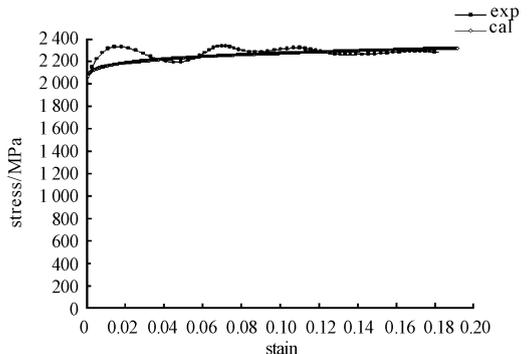


(b) 在应变率为3700/s下的计算结果与实验结果比较

图7 30CrMnSiNi2A本构方程的计算结果与实验结果比较

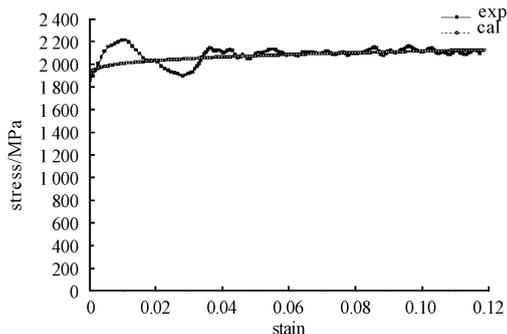


(a) 在应变率为1800/s下的计算结果与实验结果比较

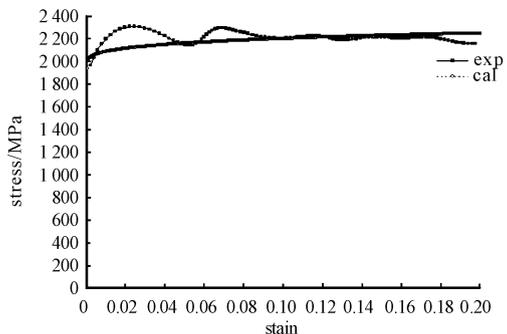


(b) 在应变率为3700/s下的计算结果与实验结果比较

图8 TH200本构方程的计算结果与实验结果比较



(a) 在应变率为1 800/s下的计算结果与实验结果比较



(b) 在应变率为3 700/s下的计算结果与实验结果比较

图9 DT300本构方程的计算结果与实验结果比较

### 3 结论

通过对3种高速侵彻战斗部壳体材料的动态力学性能的测试和分析,可得到以下几个结论:

1) 在高应变率(5 000/s)条件下,DT300和TH200的动态屈服极限相对较30CrMnSiNi2A稍高,抗变形能力较强。但30CrMnSiNi2A的均匀塑性应变段明显大于DT300和TH200,因此其塑性变形能力较好。

2) 拟合得到的3种战斗部壳体材料的本构方程的计算结果与实验结果较为吻合,验证了其正确性和实用性,可为3种壳体材料的数值模拟提供较为可靠的科学依据,可在一定

程度上使得数模模拟的可靠性和准确性提高。

### 参考文献:

- [1] G·克劳斯. 钢的热处理原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1987:30-38.
- [2] Zhou Yiqing, Zhang Zhiming. Experimental Studies on Property of Steel 30CrMnSiNi2A[C]//7th International Symposium on Test and Measurement. [S. l.]:[s. n.],2007.
- [3] R·B·弗里德曼. 金属机械性能. 第一册[M]. 孙希太,译. 北京:机械工业出版社,1982:214-215.
- [4] 田杰,胡时胜. G50钢动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学,2006(6):107-109.
- [5] 韩雷,胡时胜,伍小平. Hopkinson实验装置在提取撞击载荷加载波形中的应用[J]. 实验力学,1990,5(3):68-72.
- [6] 胡时胜,唐志平,王礼立. 应变片技术在动态力学测量中的应用[J]. 实验力学,1987,2(2):73-82.
- [7] 唐志平,虞吉林. SHPB技术中超动态应变仪的带宽和输入阻抗[J]. 仪器仪表学报,1985(6):186-189.
- [8] 唐志平,王礼立. SHPB实验的电脑化数据处理系统[J]. 爆炸与冲击,1986,6(4):320-323.
- [9] 魏勇,朱兆祥,李永池. 轴向冲击载荷作用下直杆弹性动态屈曲的研究[J]. 实验力学,1988,3(3):258-262.
- [10] 杨黎明,朱兆祥,王礼立. 短纤维增强对聚碳酸酯非线性粘弹性性能的影响[J]. 爆炸与冲击,1986,6(1):12-16.
- [11] 刘鹏,李伟兵,李文彬,等. 战斗部破片形成的正交优化研究[J]. 四川兵工学报,2013(4):39-42.

(责任编辑 杨继森)