

HOPKINSON 冲击拉杆的改进及应用

宋顺成 田时雨

(兵器工业五二研究所, 包头014034)

摘要 本文给出用 Hopkinson 空心杆代替实心杆进行材料动态拉伸性能测试实验研究。实践证明, Hopkinson 空心杆比实心杆有明显优点, 我们利用了空心杆测试材料动态拉伸性能, 使测试结果较实心杆有明显改进。

为了证明空心杆的动态可靠性, 本文用二维动力有限元法分析了空心杆的一维性。

关键词 Hopkinson 杆, 材料动态性能, 动力有限元法

一、引言

材料的力学性能在某种程度上受应变率的影响。对于材料应变率敏感性的研究, 特别是对金属材料应变率敏感性的研究已经是国内外有关学者多年来研究的重要课题。但是由于缺少可靠的测试方法, 该研究曾经一度受到障碍。该领域内一项突破进展是 Kolsky 装置的改进, 即用分离式 Hopkinson 装置测试材料的动态压缩性能^[1]。这项技术已经在我国广为应用, 文献^[2]曾给出了详细介绍, 最近文献^[3]又做了进一步地讨论。

一个时期以来, 人们曾试图改进 Kolsky 装置用以进行材料的动态拉伸试验^{[4]~[9]}, 但大多数装置设计比较复杂, 机械连接处误差较大。其中较为简单、较为成功的是 T. Nicholas 的改进装置^[9]。该装置是由两个 Hopkinson 长杆及肩套组成。螺纹试件连接两长杆, 中间放入肩套。试验前将螺纹旋紧使肩套紧靠两长杆端部。当冲击杆(子弹)撞击一长杆端部时产生压缩波。压缩波通过肩套-试件复合截面几乎无损失地传入另一长杆, 并在该杆自由端部反射为拉伸波。向后传播的拉伸脉冲通过试件又透射到原被撞击杆, 此时肩套失去支撑作用。用类似于压缩试验方法处理拉伸结果, 可以获得材料动态拉伸性能。

Nicholas 拉伸试验装置使用了实心 Hopkinson 杆。实践证明用实心杆进行动态拉伸试验有一些弊端, 而我们利用空心杆代替实心杆使测试结果得到了明显改进。本文给出了空心杆试验装置、试验结果及空心杆动态特征有限元分析。

二、HOPKINSON 空心杆试验装置

用 Hopkinson 实心杆做动态拉伸试验装置, 如图1。该试验装置有如下缺点:

(1) 试件横截面积远小于实心杆横截面积(Nicholas 装置设计为1:18), 因此从试件传入 No. 1 杆的透射波强度被大大减弱, 物别是对于强度较低的测试材料, 很难区分有用的应力信号和干扰信号, 如图2。

(2) 使用实心杆测试材料动态力学性能, 由于实心杆在联接螺纹试件的端部存在一个

盲孔如图 1“*A*”, 因此拉伸波的反射不能完全代表试件的变形, 而一部分盲孔底面 *B* 处的自由反射, 所以在计算应力-应变关系时将出现较大误差。

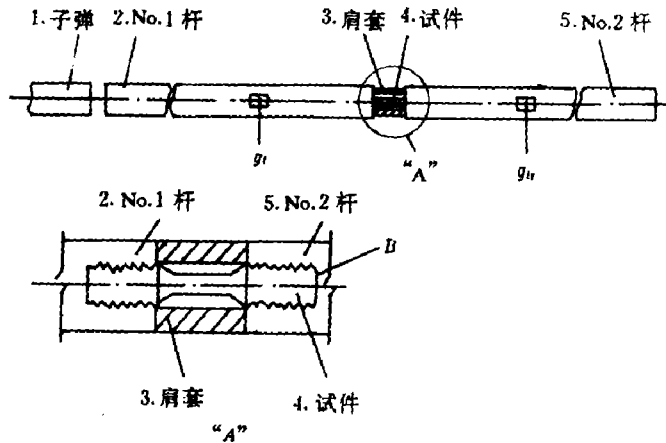


图 1 Hopkinson 实心杆装置示意图
Fig. 1 Scheme of solid bar used for dynamic tensile test

1. Bullet, 2. No. 1 rod, 3. Shoulder case, 4. Sample, 5. No. 2 rod

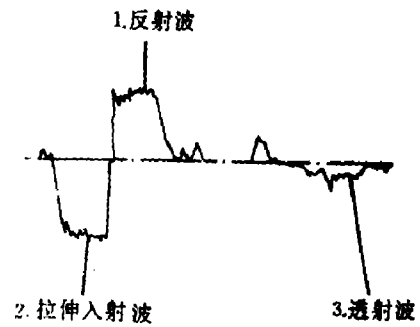


图 2 实心杆测得的 35CrMnSi 试件动态拉伸波
Fig 2 Dynamic tensile wave of 35CrMnSi steel generated with solid bars

1. Reflected wave, 2. Incident tension-wave, 3. Transmitted wave

为了克服上述困维, 我们采用 Hopkinson 空心杆代替 Hopkinson 实心杆如图 3。空心杆代替实心杆后测试能力没有减弱, 而可使试件截面积与实心杆载面积之比加大, 可以增大到 1 : 4, 因此从试件透射到 Hopkinson 杆上的应力信号增大, 容易区分应力信号与干扰信号如图 4, 比较图 4 和图 2 可以看出空心杆代替实心杆后透射波形得到了明显的改善。另一方面由于空心杆与螺纹试件连接处不存在盲孔, 因此不存在拉伸波在盲孔底面的自由反射, 提高了计算试件变形精度。

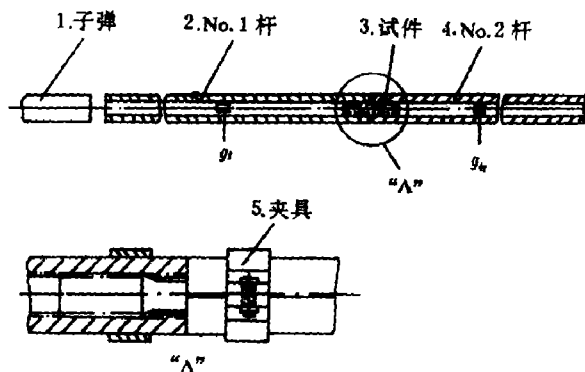


图 3 Hopkinson 空心杆装置示意图

Fig. 3 Scheme of hollow bar used for dynamic tensile test
1. Bullet, 2. No. 1 rod, 3. Sample, 4. No. 2 rod, 5. Clamper

为了消除螺纹间隙, 可以在空心杆端部沿轴线方向线切割一条长缝, 当试件拧入空杆

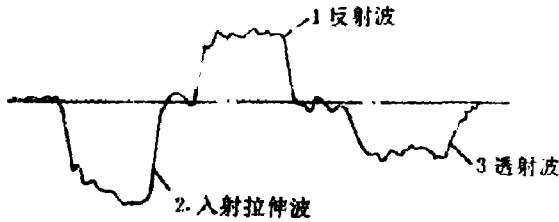


图4 空心杆测得的 35CrMnSi 试件拉伸波

Fig. 4 Dynamic tensile wave of 35CrMnSi steel generated with hollow bars

1. Reflected wave, 2. Incident tension-wave.
3. Transmitted wave

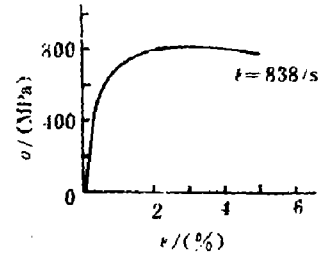


图5 35CrMnSi 应力-应变曲线

Fig. 5 The σ - ϵ curve of dynamic tensile for 35CrMnSi steel

后,用夹具夹紧如图 3“*A*”。

当冲击杆(子弹)打击 No. 1 空心杆端部时,压缩波几乎无损失的传入 No. 2 杆,并且由于空心杆面积较试件面积大保证空心杆不超过弹性限。压缩波脉冲继续传播到 No. 2 空心杆自由端部时反射为拉伸波并向后传播。拉伸波达到试件处,部分通过试件透射到 No. 1 空心杆并利用应变片“*g*”记录下该透射应变波“ ϵ_t ”。另一方面由于试件的变形,拉伸波的另一部分被反射进入 No. 2 空心杆,该反射应变波“ ϵ_r ”通过应变片“*g₁₂*”被记录下来。与 Hopkinson 压缩试验一致,利用下列方程可计算试件的拉伸应力-应变曲线。

$$\sigma = E_0 \frac{A_0}{A_s} \epsilon_r \quad (1)$$

$$\epsilon = -2c_0/l_s \int_0^t \epsilon_r dt \quad (2)$$

其中 σ , ϵ 分别表示应力和应变, E_0 为空心杆材料弹性模量, A_0 和 A_s 分别表示空心杆和试件截面积, c_0 表示空心杆内弹性纵波速度, l_s 表示试件拉伸段长度, ϵ_t 和 ϵ_r 分别代表拉伸透射应变波和反射波。

图 5 是由图 4 所示的原始波形得到的材料动态拉伸应力-应变曲线。

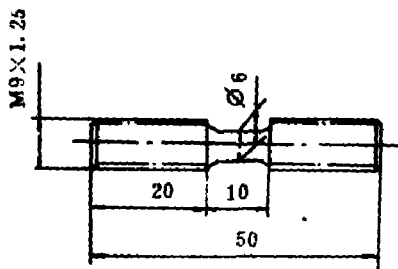


图6 拉伸试件尺寸设计

Fig. 6 Specimen dimensions

三、试件尺寸

拉伸试件的尺寸设计如图 6, 较长的螺纹长度保证剪切应力不超过空心杆材料及试件材料的屈服强度, 较短的拉伸段长度可以提高测试精度。

四、动力有限元分析

为了说明 Hopkinson 空心杆做动态试验的可靠性, 我们利用动力有限元分析了空心杆横向效应。空心杆内直径为 7.8mm, 外直径

为 14.5mm, 单元划分如图 7。跳跃载荷 600MPa 持久作用于杆端部。计算结果表明, 空心杆横向应力效应很小, 即纵向应力响应 σ_z 接近 600MPa, 而径向应力响应 σ_r 接近于零, 图 8 为作用时间 30 μ s 时的输出结果。图 9 是 600MPa 脉冲载荷(脉冲宽度为 10 μ s)作用于空心杆端部时在某一单元内纵向应力响应 σ_z-t 的输出结果。

需要说明的是, 波前及波后间断面计算误差是在动力有限元计算中为平滑间断值引入人工粘性造成的。

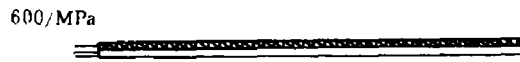


图 7 有限元网格划分

Fig. 7 Elements divided for numerical analysis

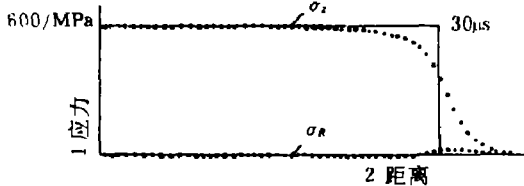


图 8 跳跃持久载荷应力响应

Fig. 8 The response to the enduring-loading

1. Distance

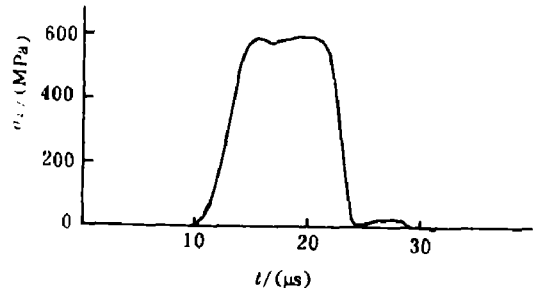


图 9 某单元对脉冲载荷应力响应

Fig. 9 The response to the impulse-loading

五、Hopkinson 空心杆装置测试结果

利用 Hopkinson 空心杆代替实心杆使材料的动态拉伸测试结果有明显改进。我们利用这一装置测试了两种结构材料的动态拉伸力学性能。其中一种材料是铝合金 Lc4, 另一种材料为锻造态钨合金和真空退火态钨合金。图 10~图 12 是材料应力-应变测试结果。每种材料在相近条件下测试三个试件并在图中用虚线表示, 实线表示综合处理结果。

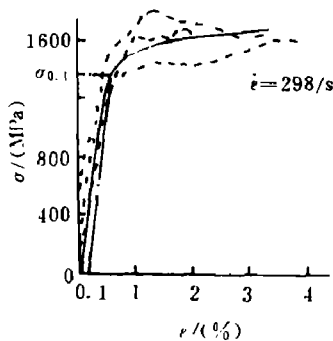


图 10 锻造态钨合金 σ - ϵ 曲线

Fig. 10 The σ - ϵ curve for forging tungsten alloy

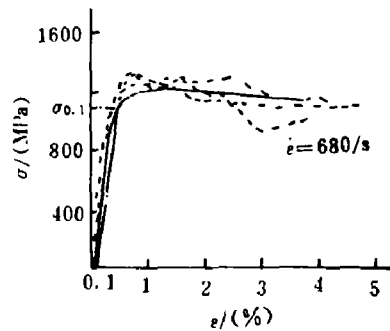
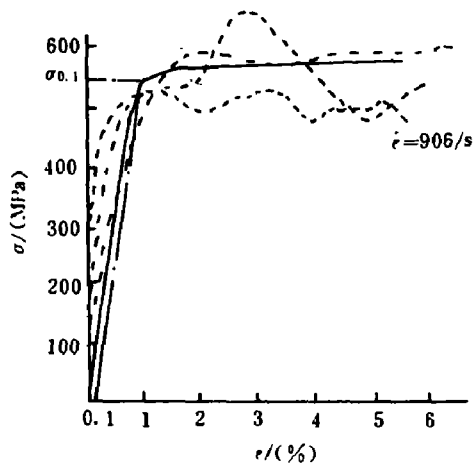
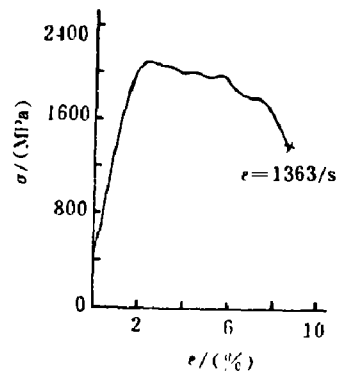


图 11 真空退火态钨合金 σ - ϵ 曲线

Fig. 11 The σ - ϵ curve for annealed tungsten alloy

图 12 铝合金 Lc4 σ - ϵ 曲线Fig. 12 The σ - ϵ curve for aluminum alloy图 13 锻造钨合金断裂试件 σ - ϵ 曲线Fig. 13 The σ - ϵ curve of dynamic tensile with fracture for forging tungsten alloy specimen

测试结果表明,不同的材料及材料的不同状态有不同的应变率敏感效应,即动态屈服强度较静态屈服强度提高的幅度不同。其中真空退火态钨合金提高幅度较锻造态钨合金大,而铝合金 Lc4 几乎没有提高如表 1。

另一方面利用上述装置可以得到直至试件被动态拉断时的应力-应变曲线如图 13~图 15,并可以从中获得试件被拉断的最大应力如表 2。

表 1 材料的屈服强度(拉伸)

Table 1 Tensile yield strength of materials

材 料	屈服强度($\sigma_{0.1}$)/(MPa)		
	静 态	动 态	静态/动态
锻造钨合金	1270	1360	1.07
真空退火态钨合金	840	1080	1.28
铝合金 Lc4	545	547	1.004

表 2 材料的断裂强度(拉伸)

Table 2 Dynamic fracture strength of materials

材 料	动态断裂强度/(MPa)
锻造钨合金	≥ 2134
真空退火态钨合金	≥ 1786
铝合金 Lc4	654

六、结 论

实际证明,用 Hopkinson 空心杆做材料动态拉伸试验较实心杆有明显改进,动力有限元数值分析的结果表明空心杆的横向应力效应很小。空心杆的加工虽然比实心杆困难,但国内有能力加工材料动态性能测试所需要的 Hopkinson 空心杆。

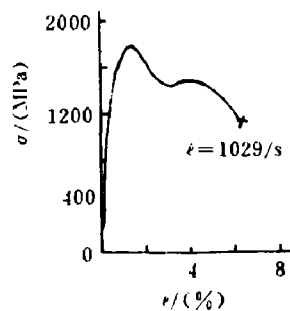
图 14 真空退火态钨合金断裂试件 σ - ε 曲线

Fig. 14 The σ - ε curve of dynamic tensile with fracture for annealed tungsten alloy specimen

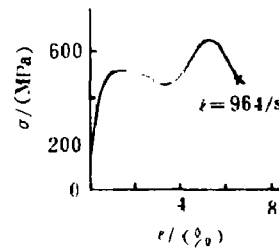
图 15 铝合金 Lc4 断裂试件 σ - ε 曲线

Fig. 15 The σ - ε curve of dynamic tensile with fracture for aluminum alloy specimen

参 考 文 献

- [1] Kolsky H. Proc Phyc Sol (London), 1949, B 62(359B): 676~700
- [2] 段祝平, 田兰桥等. 力学进展, 1980, (1)
- [3] 胡时胜, Hopkinson 压杆技术. 兵器材料与科学(待发表)
- [4] Harding J, Wood E O, Campbell J D. J Mech Eng Sci, 1960, (2): 88~96
- [5] Hauser F E. Expt Mech, 1966, 6: 395
- [6] Lindholm U S, Yeakley L M. Expt Mech, 1968, 8: 1-9
- [7] Christman D R, Isbell W M, Babcock S G, et al. AD-730750; 1971
- [8] Albertini C, Montagnani M. Testing Techniques Based on the Split Hopkinson Bar. In: Mechanical Properties at High Rates of Strain. London: The Institute of Phys, 1974
- [9] Nicholas. T. AD-092 832/5; 1981

DYNAMIC TENSILE TESTING OF MATERIALS USING THE HOLLOW HOPKINSON BARS INSTEAD OF THE SOLID HOPKINSON BARS

Song Shuncheng, Tian Shiyu

(Inner Mongu Institute of Metallic Materials, Baotou 014034)

ABSTRACT A survey of dynamic tensile testing of materials using the hollow Hopkinson bar instead of the solid Hopkinson bar is presented. It is substantiated that the hollow Hopkinson bar has more advantages than the solid Hopkinson bar. In order to explain the reliability of the dynamic testing with the hollow bar, we have calculated the transverse effects of the hollow bar using the dynamic finite element code.

KEY WORDS Hopkinson bar, Dynamic properties of materials, Dynamic finite element method