

扭转 SHB 实验的数值模拟

陈 刚

(中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:采用 LS-DYNA 开展了分离式霍普金森扭杆实验的数值模拟分析。通过数值模拟获得波导杆上的应变信号,将波导杆上的信号按照扭转 SHB 实验的数据处理方法获得试件材料的“实验”应力应变曲线,再通过与输入的本构关系进行比较,观测“真值”与数值实验结果的差别。通过数值模拟结果讨论了实验加载过程中的试件变形和应力均匀性,并进一步分析了试件的测试段壁厚和直径对实验结果的影响。

关键词:扭转 SHB;LS-DYNA;数值实验

中图分类号:0347.3

文献标志码:A

引 言

分离式霍普金森扭杆(扭转 SHB)是研究高应变率下材料动态剪切行为和剪切局部化现象的重要手段。金属材料的高应变率扭转试验主要采用分离式霍普金森扭杆实验技术实施,该技术通过弹性杆(输入杆和输出杆)对固连于其间的试样施加冲击扭转载荷,使试样发生高应变率的剪切变形。扭转 SHB 技术采用纯扭转加载,能有效避免波传播的几何弥散、试件的端面摩擦、径向惯性以及大应变的几何不均匀性等问题。

1966 年,Baker 和 Yew 首先提出了分离式霍普金森扭杆技术^[1],之后,众多研究者对该方法进行了研究和改进^[2-5]。近年来,扭转 SHB 实验技术日益成熟,运用该种实验手段开展了大量的金属材料的高应变率剪切力学性能和绝热剪切研究^[6-13]。针对扭转 SHB 的加载过程,还未见数值模拟的相关分析。本文采用 LS-DYNA 开展扭转 SHB 的数值模拟,以数值实验的方式进行分析。即通过数值模拟获得波导杆上的应变信号,通过波导杆上的信号按照扭转 SHB 实验的数据处理方法获得试件材料的“实验”应力应变曲线,再通过与输入的本构

关系进行比较,观测“真值”与数值实验结果的差别。同时通过提取试件本身的变形与应力等信息,分析试件在加载过程中的受力与变形。进一步,通过改变试件的尺寸,开展系列的数值实验,分析各参量对实验结果的影响。

1 有限元模型

扭转 SHB 实验中,将两根长的弹性圆柱形波导杆与试样共轴固连,采用在波导杆中传播的扭转波对试样加载。通过测量波导杆中的应变历程,基于一维应力波理论,应力波在波导杆中的传播不发生形状和幅值的变化,即在远离杆端测得的信号可以反映杆端面的变形和应力情况,从而由杆上获得的应变信号计算得出试样两端面的载荷和位移历程。在试件均匀变形的假定下(忽略应力波在试件中的传播),计算获得试件材料的动态剪切应力、应变和应变率等。

采用 LS-DYNA 开展扭转 SHB 的数值模拟,模型包括输入杆、输出杆以及试件,如图 1 所示。波导杆的尺寸为 $\varphi 25 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$,试件薄壁段内径为 15 mm,厚度 1 mm,两端为厚度 5 mm 的法兰,法兰外径为 25 mm。波导杆的单元尺度为 2 mm。为有效反映试件薄壁段的变

收稿日期:2016-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(11572299)

作者简介:陈刚(1971-),男,四川中江人,研究员,博士,主要从事冲击动力学的实验与数值模拟方面的研究,(E-mail)chengang@caep.cn

形非均匀性,在径向划分了5层单元,试件在周向分为120份,保证试件各方向上尺寸相当,大致为0.2 mm。

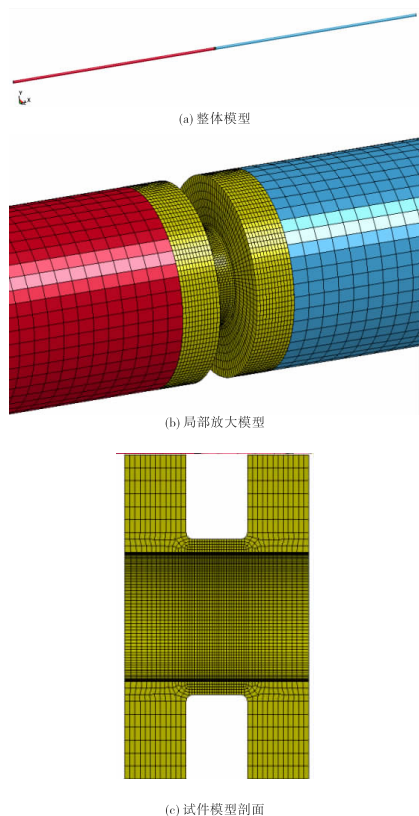


图1 数值模拟有限元模型

在数值模拟中,杆和试件均处于自由状态。在输入杆的前端施加随时间变化的角速度边界条件模拟加载。

试件和波导杆在实验中通过胶粘连接,在数值模拟中,采用了LS-DYNA中的面面固连功能CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE将二者连接到一起实现载荷的传递。为检验这种面面固连功能的效果,将两根波导杆连接到一起开展数值模拟。在两杆中的应变波形如图2所示,入射杆和透射杆上的信号完全相同,表明采用Tie的方式将部件连接到一起不会对应力波的传播造成大的影响,同时也表明所采用的模型可以有效地描述杆中剪切波的传播。

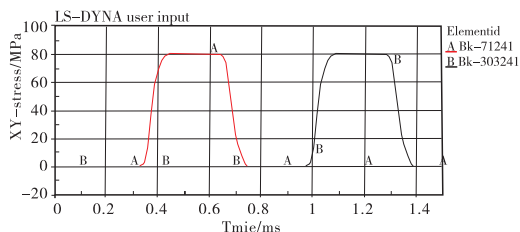


图2 两杆直接连接的信号比较

数值模拟中波导杆采用弹性材料模型(* MAT_ELASTIC),试件采用弹塑性材料模型(* MAT_PLASTIC_

KINEMATIC),其中数值模拟中的具体参量见表1。在数值模拟中试件材料没有考虑应变率效应,这样通过数值扭转SHB实验获得的结果可以方便地与输入参量进行比较。

表1 材料模型参量值

	密度 / (kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力 /MPa	强化模量 /MPa
波导杆	4400	110	0.28	—	—
试件	7800	200	0.28	400	500

2 数值模拟结果及分析

2.1 数值实验结果

在数值模拟中,输出波导杆中部表面单元的信息,其中包含的应变信息为在直角坐标下的6个应力分量,通过坐标变换获得杆表面的剪切应变信号(等同于实验中所测试的应变信号,需要考虑单元中心距杆轴心距离与杆表面的差异),如图3所示。进一步得到数值实验的材料剪应力-剪应变曲线,如图4所示。

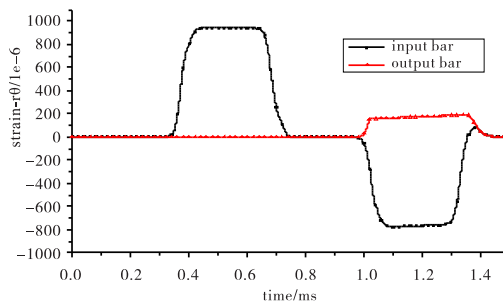


图3 数值实验波形

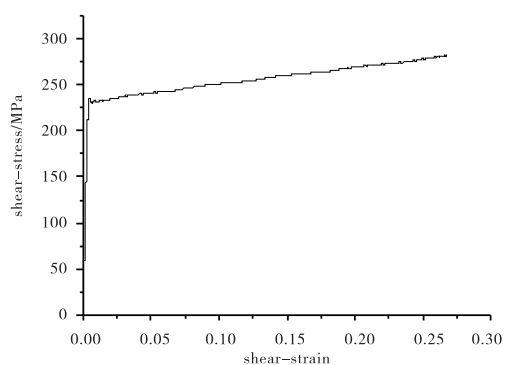


图4 标准试件数值实验结果

在数值模拟中,输入的参量是等效应力与等效应变的关系,而扭转SHB实验中获得的是材料的剪应力-剪应变关系,在进行输入材料与数值扭转SHB实验进行对比时就需要进行转换。

根据弹塑性力学理论,等效应力为:

$$\sigma_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2}$$

在纯剪应力状态下, $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau, \sigma_2 = 0$, 可以得

到 $\sigma_{eff} = \sqrt{3}\tau$ 。

等效应变为:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

在纯剪切状态下, $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \gamma/2, \varepsilon_2 = 0$, 可以得到

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_1 = \gamma/\sqrt{3}。$$

将数值实验的结果与输入参量曲线放置到一起如图 5 所示,在屈服点二者的差异在 0.1%,最大差异在 2% 以内。

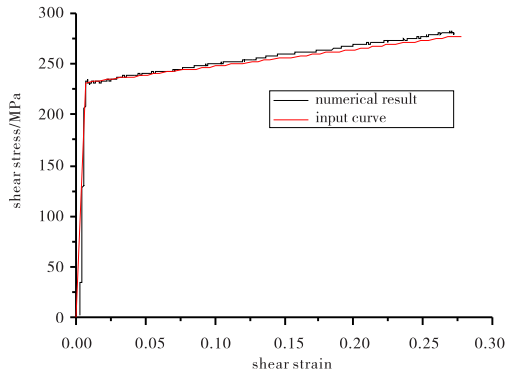


图 5 数值实验结果与输入曲线的比较

2.2 均匀性分析讨论

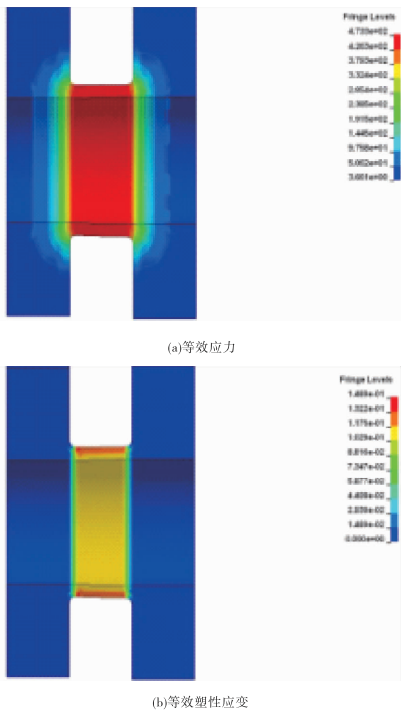


图 6 加载后期试件变形云图

图 6 给出了在加载过程中(后期)某一时刻试件的等效应力和等效塑性应变云图。由图 6 可见,在整个试件的测试段,试件的等效应力均比较均匀,而在靠近法

兰和倒角的部位塑性应变比中间部位小,而且随位置变化较大。为进一步定量比较试件变形的均匀性,取试件中间三个单元,即分别为外层、中间和内层,输出单元的等效应力和等效塑性应变历程如图 7 所示。结果表明,外层和里层单元的等效应力最大值差别为 2.6%,等效塑性应变的最终值的差别为 15.9%。圆柱扭转时,材料的应变与其离轴心的距离成正比。试件测试段内径为 10 mm,外径为 12 mm。由此,试件测试段外表面与内表面的应变差别为 20%。由于在数值模拟中单元具有一定尺度,而计算结果输出为试件中心值,按照单元中心坐标计算得到的结果与数值模拟一致。

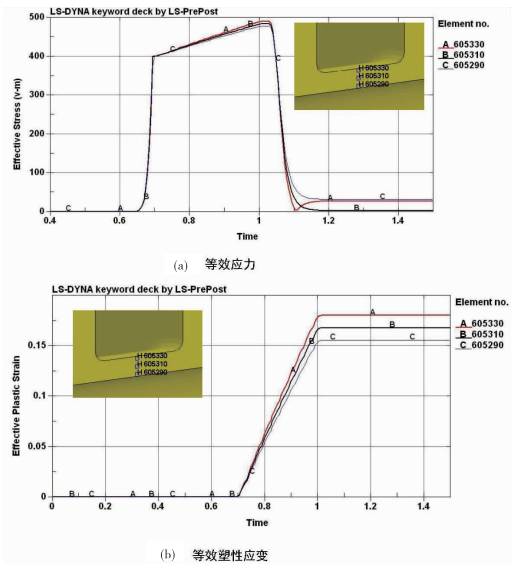


图 7 试件材料在加载过程中响应比较

2.3 试件厚度的影响分析

在内径不变 10 mm 的情况下,对 0.5 mm、1 mm、2 mm 和 4 mm 共 4 种厚度下的试件进行了数值模拟,其中在不同厚度试件的数值模拟中,试件无倒角。试件模型如图 8 所示,相应的数值实验的测试曲线如图 9 所示。随着试件厚度的增加,相应的透射波信号也发生增大。如果输入信号相同,则相应的应变率(与反射波波成正比)减小。要保持应变率的相对不变,就需要增大入射脉冲的幅值。

由于试件与杆固连,在二者的界面上的扭矩和角位移相同,分别计算杆上的扭矩和试件的扭矩,再进一步获得材料的剪应力时间关系。

圆管的扭矩与材料剪应力的关系为:

$$M = \int_{r_i}^R 2\pi r dr * \tau * r = 2\pi \int_{r_i}^R r^2 \tau dr \quad (1)$$

式中: M 为扭矩, R_s 为圆管外半径, r_s 为圆管内半径, τ 为剪应力, r 为半径。

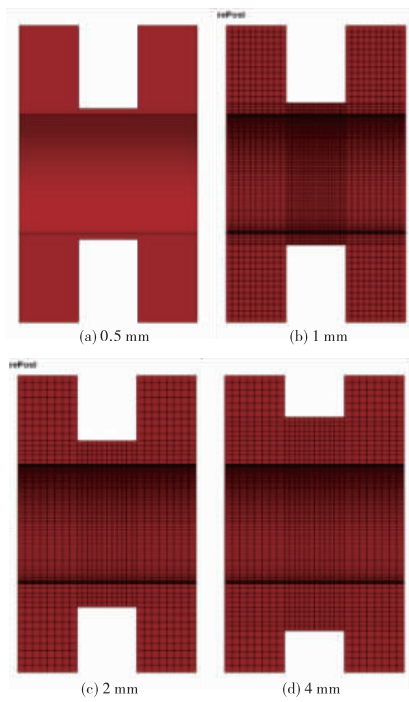


图8 不同厚度试件模型剖面

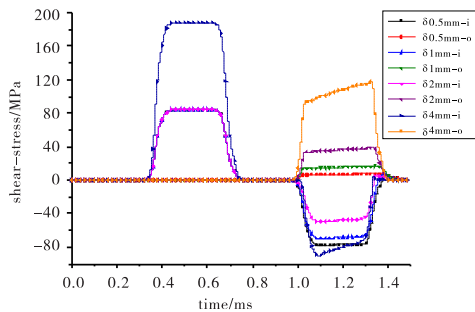


图9 不同厚度试件数值模拟曲线

在薄壁圆筒假设条件下,认为材料的剪应力沿壁厚厚度不变,材料力学为^[14]:

$$M = 2\pi r\delta * \tau * \bar{r} = \frac{1}{2}\pi(R_s + r_s)^2\delta\tau \quad (2)$$

式中: δ 为薄壁圆筒厚度,即内外半径之差, \bar{r} 为平均半径,即内外半径和的一半。

在薄壁圆筒均匀应力假设下,式(1)可以直接积分获得更准确的表达:

$$M = \frac{2}{3}\pi(R_s^3 - r_s^3) * \tau = \frac{2}{3}\pi(R_s^2 + r_s^2 + R_s r_s)\delta\tau \quad (3)$$

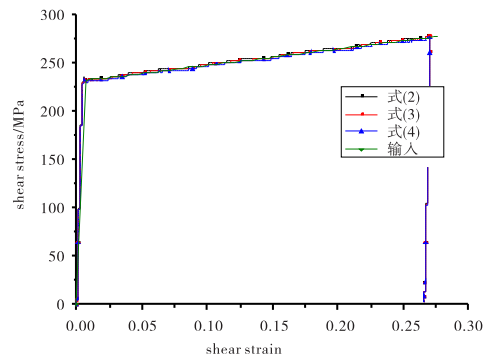
这也是塑性力学针对圆管塑性扭转时,由薄膜比拟给出的结果。

如果假定应力与圆筒的半径成正比,则可由式(1)积分得到:

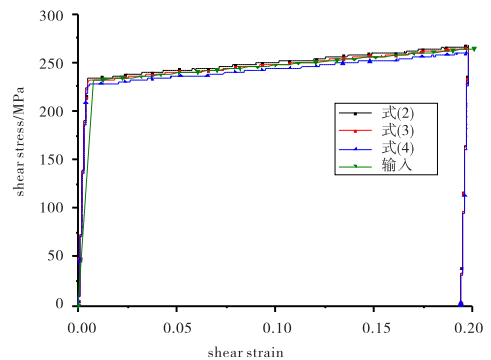
$$M = \frac{J_s}{r}\tau = \frac{\pi(D_s^4 - d_s^4)}{8(D_s + d_s)}\tau = \pi(R_s^2 + r_s^2)\delta\tau \quad (4)$$

在文献中,针对扭转 SHB 实验数据处理,采用第一种方式(式(2))^[3,5,7,10-13]和第三种方式(式(4))^[1-2,6]均有报道。第一种处理公式是第二种公式的简化和近似,第三种处理公式中包含了应力与试件半径成正比的假定,这种假定只是在弹性条件下才严格成立。下面分别运用这三种扭矩 - 剪应力公式对不同壁厚试件开展数值实验所得曲线作进一步的分析。

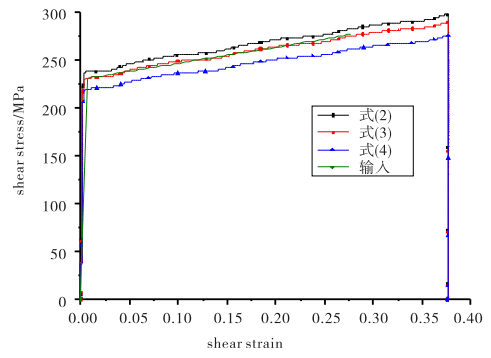
图10给出了1 mm、2 mm和4 mm三种壁厚条件下运用3种不同应力计算方法获得的剪切应力应变曲线。在1 mm厚度以下,3种方法获得的结果的差异很小,并与输入一致;而随着试件厚度的增大,不同公式间也相应加大,但第二种计算方法(式(3))始终与实验一致。



(a)壁厚1 mm时三种应力计算方法的比较



(b)壁厚2 mm时三种应力计算方法的比较



(c)壁厚4 mm时三种应力计算方法的比较

图10 不同壁厚试件时三种应力计算方法的比较

2.4 试件半径变化的影响

通过对试件测试段内径分别为10 mm和15 mm,壁

厚均为 1 mm,测试段长度 5 mm 的两种工况开展了数值模拟,分析试件半径改变对实验数据的影响。图 11 给出了 15 mm 内径试件的剖开图像。图 12 给出了两种工况下数值实验的“测试”波形曲线。由图可见,试件内径增大导致透射波信号相应的增加,且增大幅值与半径增加的比例相当。通过增加入射波的幅值,使得两种工况下的反射波幅值相当。图 13 给出了由图 12 获得的两种工况下的实验应力应变曲线。由图 13 可见,不同内径试件获得的材料剪切应力应变曲线一致。虽然两种工况下的透射波信号相同,但 15 mm 内径的应变(或者说应变率)比 10 mm 的大得多。

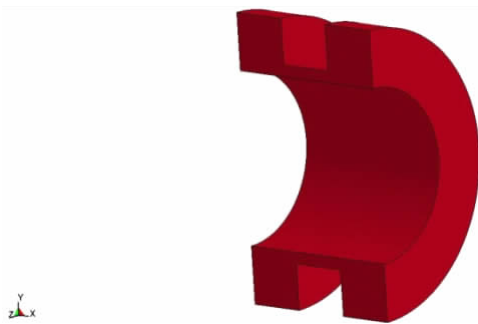


图 11 15 mm 内径试件

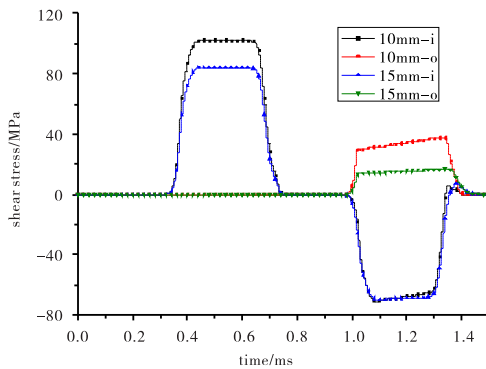


图 12 两种内径试件的数值实验波形

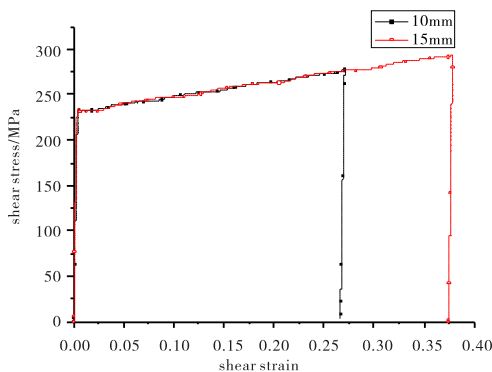


图 13 两种工况下获得的试件材料应力应变曲线

在厚度不变的情况下,试件半径增大将导致透射波

信号的增加。就应力应变测试来说,试件半径的变化对此没有影响。

如果试件与波导杆的连接采用胶粘的话,在试件半径的变化对粘胶强度的要求具有较大的影响。

由于胶粘面是扭矩传播的途径,通过扭矩相等条件也可获得胶粘面最大应力与试件尺寸参数的关系:

$$\tau_{max} = \frac{4R_s^2 R_b \delta}{R_b^4 - R_{si}^4} \tau$$

令:

$$\alpha = \frac{\tau_{max}}{\tau} = \frac{4R_s^2 R_b \delta}{R_b^4 - R_{si}^4}$$

式中, α 为胶粘面最大应力与试件应力的比。取波导杆半径 = 12.5 mm,试件测试段壁厚 = 1 mm,可得 α 随试件内径的变化关系,如图 14 所示。随着试件内径的增大,对胶粘强度的要求也相应的提高。在内径为 10 mm 时,保证传递扭矩所需的粘胶强度与试件应力比 α 为 6.36%;当内径增大到 15 mm 时,相应的比值就增加到 15.06%。

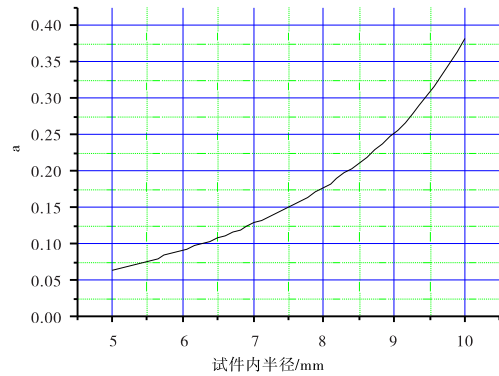


图 14 α 随试件内径的变化

3 结论

针对扭转 SHB 实验中的试件开展分析和数值模拟工作,研究了加载过程中试样的变形特性,并对试样的尺寸等因素对实验结果的影响进行了分析。

(1) 数值实验结果与输入材料性能的一致性表明扭转 SHB 可以较好地测试材料的高应变率剪切性能。模拟表明,在扭转 SHB 的加载过程中,试样材料的应力具有较好的均匀性,而材料的变形与所处的半径位置相关。

(2) 在采用率无关的材料本构模型,并采用公式(3)计算试件材料的应力时,试件厚度变化对测试结果没有大的影响,采用塑性力学中圆管塑性扭转分析给出的计算试件材料剪应力的公式(3)获得更准确的描述。

但采用文献中的公式(2)或公式(4)计算,随着厚度的增大将导致测试结果出现明显的偏差。而实际上,由于试件变形(应变)直接与半径成正比,试件厚度增加会直接导致试件的应力和应变(及应变率)的非均匀性增大。

(3) 数值模拟表明,试件内径的增加对测试结果没有影响。但如果试件与波导杆之间采用胶粘连接,试件内径的增加会导致对粘胶强度要求的提高。

参考文献:

- [1] BAKER W E, YEW C Y. Strain-rate effects in the propagation of torsional plastic waves [J]. *Journal of applied mechanics*, 1966, 33(4): 917-923.
- [2] NICHOLAS T, LAWSON J E. On the determination of the mechanical properties of materials at high shear-strain rates [J]. *Journal of mechanics and physics of solids*, 1972, 20(2): 57-64.
- [3] GILAT A, CHENG C S. Torsional split hopkinson bar tests at strain rates above 10^4 s^{-1} [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(1): 54-59.
- [4] KHOSRAVIFARD A, MOSHKARSAR M M, EBRAHIMI R. High strain rate torsional testing of a high manganese steel: Design and simulation [J]. *Materials and Design*, 2013, 52(24): 495-503.
- [5] 乌时毅, 佟景伟, 李鸿琦. 高应变率扭转 SHB 实验技术 [J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 1994, 27(3): 277-283.
- [6] 赵西震, 李庆明. 钛合金 TC-4 在高应变率下的动态本构关系 [J]. *爆炸与冲击*, 1990, 10(3): 239-243.
- [7] DAI L H, BAI Y L, LEE S W R. Experimental investigation of the shear strength of a unidirectional carbon/aluminum composite under dynamic torsional loading [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(10): 1667-1673.
- [8] WHITTINGTON W R, OPPEL A L, TURNAGE S, et al. Capturing the effect of temperature, strain rate, and stress state on the plasticity and fracture of rolled homogeneous armor (RHA) steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 594(1): 82-88.
- [9] YAZDANI F, BASSIM M N, ODESHI A G. The formation of adiabatic shear bands in copper during torsion at high strain rates [J]. *Procedia Engineering*, 2009, 1(1): 225-228.
- [10] SHOCKEY D A, SIMONS J W, BROWN C S, et al. Shear failure of inconel 718 under dynamic loads [J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(6): 723-732.
- [11] KOBAYASHI T, SIMONS J W, BROWN C S, et al. Plastic flow behavior of inconel 718 under dynamic shear loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(5): 389-396.
- [12] NAIK N K, ASMEELASH A, KAVALA V R, et al. Interlaminar shear properties of polymer matrix composites: strain rate effect [J]. *Mechanics of Materials*, 2007, 39(12): 1043-1052.
- [13] ODESHI A G, OWOLABI G M, SINGH M N K, et al. Deformation and fracture behavior of alumina particle-reinforced Al 6061-T6 composite during dynamic mechanical loading [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(11): 2674-2680.
- [14] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1992.

Numerical Simulation on Torsional Split Hopkinson Bar Tests

CHEN Gang

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: Numerical simulation on torsional split Hopkinson bar (SHB) tests was carried out with LS-DYNA. The strain signals on the incident bar and output bar were obtained from the simulation just as from the test. Then the numerical experiment result of the material strain-stress relationship was reduced from the numerical strain signal with the experiments data process of torsional SHB. The validity and accuracy of the torsional SHB were analyzed through the comparison of the numerical experiment result and the input constitutive relationship. The uniformity of the specimen deformation and stress in the loading process, as well as the influence of specimen test section wall thickness and diameter to the experimental result, was discussed with the numerical simulation.

Key words: torsional split Hopkinson bar; LS-DYNA; numerical experiment