

冲击作用下的摩擦力效应实验研究*

蒋国平^{1)†} 郝洪¹⁾ 曾春航²⁾ 郝逸飞¹⁾ 吴如军²⁾ 刘纪超¹⁾

1) (广州大学, 工程抗震中心, 广州 510405)

2) (广州市胜特建筑科技开发有限公司, 广州 510405)

(2012年12月20日收到; 2013年1月30日收到修改稿)

针对摩擦力效应产生的机理, 本文设计了三种不同尺寸的试件进行 SHPB 实验, 得到了摩擦力效应对实验的定量影响, 在此基础上对混凝土的 DIF 进行了修正研究, 为混凝土抗冲击工程设计提供了参考依据.

关键词: 冲击, 混凝土, SHPB, 摩擦力

PACS: 62.50.-p, 62.20.-x, 81.70.Bt

DOI: 10.7498/aps.62.116203

1 引言

在防护工程材料测试中, 通常需要测试中应变率与高应变率下混凝土的动态力学性能^[1-3], 目前中应变率下采用的测试手段主要是分离式的 Hopkinson 压杆 (SHPB) 实验, SHPB 实验中存在的摩擦力效应越来越被研究者所关注, 1963 年 Davies 和 Hunter 根据 Siebel, Thompson 和 Symmons 的研究成果, 总结出了忽略摩擦效应时的试件的长径比. Meng 和 Li^[4] 使用有限元软件对试件的摩擦效应进行模拟分析, 认为在不使用润滑剂的情况下, 试件的端面动摩擦因数在 0.244 到 0.414 之间. 同时, 他们还认为在试件的惯性效应可以忽略的情况下, 试件的端面摩擦不同, 其相应的应力均匀情况也有明显的不同. 虽然取得了很多的成果, 然而混凝土中摩擦力效应对不同尺寸的实验的系统研究还未开展, 特别是摩擦力效应对 SHPB 实验的定量影响还没有相关研究, 为此, 本文设计了三种不同尺寸的混凝土试块, 研究摩擦力效应产生的机理, 并对其动态强度放大因子进行研究, 对其进行了修正, 研究结果表明: 如果不考虑动态效应中的非材料因素将可能在防护工程设计中过高的估计混凝土材料的性能, 为工程带来隐患.

2 试件制备

本文中通过对三种不同尺寸的混凝土试件进行 SHPB 实验以研究摩擦效应, 试件的直径都是 32 mm, 长度分别是 10 mm, 20 mm, 30 mm. 试件采用了水: 水泥: 沙为 1:2:2.25 的素混凝土. 混凝土一般具有一定的离散性, 为了将离散性降到最低, 先将混凝土制作为标准的方形试件, 养护 28 天后通过取芯的办法取出圆柱形试件, 再对其进行切割, 打磨等工作, 得到的测试试件两边的平整度小于 0.5 mm(图 1).

3 SHPB 动态实验测试

3.1 实验

实验采用分离式的 Hopkinson 压杆 (SHPB) 进行, 实验装置示意图如图 2 所示. SHPB 实验装置主要由储气设备、子弹、激光测速设备、试件、输入杆、输出杆、阻尼器和数据采集系统(主要包括超动态应变仪、示波器等设备)等组成. 在实验中采用了直径为 $\phi 40$ mm 的压杆进行实验. 实验得到的典型波形图见图 3.

根据 SHPB 实验的经典方程有^[5-7]

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{A_s}(\epsilon_i(t)) = \frac{EA}{A_s}[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)], \quad (1)$$

* 国家自然科学基金项目(批准号: 51078094)和广州白云区科技计划项目(批准号: 2012-KZ-58)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lp2002999@yahoo.com.cn

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(t) &= -\frac{2c_0}{L} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \\ &= \frac{2c_0}{L} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)] dt, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_s(t) &= \frac{2c_0}{L} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)] \\ &= -\frac{2c_0}{L} (\varepsilon_r(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\varepsilon_i, \varepsilon_r, \varepsilon_t$ 分别代表入射波、反射波和透射波的应变, c_0 表示杆中的应力波的波速, A, A_s 分别表示压杆与试件的横截面面积, $\sigma_s(t)$ 表示试件中的应力, $\varepsilon_s(t)$ 表示试件中的应变. E 是压杆的弹性模量.

根据 (1), (2), (3) 式可以得到入射波、反射波和透射波的关系. 然而, 在实验中通常会因为试件的加工, 实验中应变片贴片导致的能量损失等, 导致三者之间并不能完全平衡. 图 3 给出了测量得到的典型原始图 (纵坐标为电压信号 U , 其单位为伏 (V), 横坐标为时间, 于是通过三波间的关系可以验证实验的精度 (图 4), 图 4 中纵坐标为杆中应变, 横坐标为时间点数, 两点间的时间差为 $0.02 \mu\text{s}$, 结果表明实验具有较好的精度. 经过 (1), (2), (3) 式对实验进行处理得到了三种试件的应力与应变关系曲线 (图 5).



图 1 混凝土试件的制作

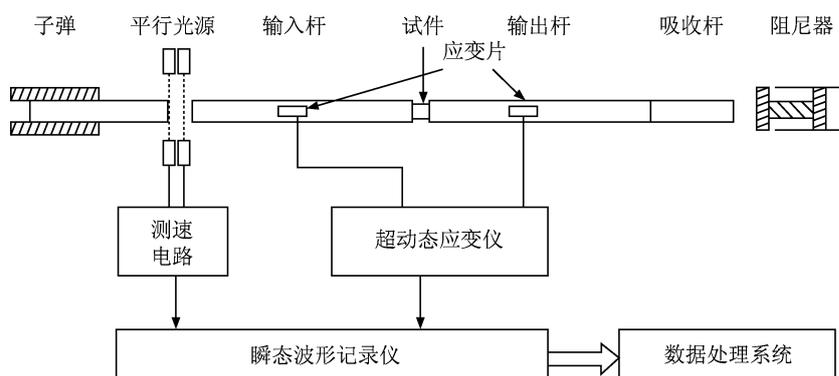


图 2 典型的 Hopkinson 压杆实验装置

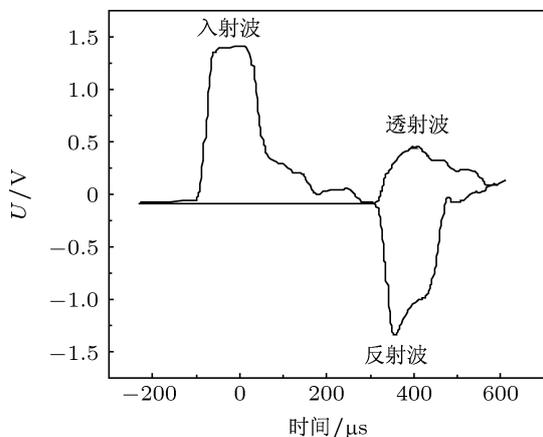


图 3 典型的应变测量得到的电压与时间关系波形图

3.2 实验结果处理

3.2.1 应变率处理

实验中得到了典型的混凝土中应变率下的应变率时程曲线, 破坏与未破坏试样的应变率计算方法参考图 6. 在实际处理中, 选择了平均应变率作为混凝土的应变率.

3.2.2 实验结果

通过上述的应变率处理方法, 可以得到在不同应变率下的混凝土应力峰值 (图 6) 的变化, 由实验结果可以看出, 在进行 SHPB 实验时, 混凝土试件达到一定的应变率才能产生压缩破坏. 当应变率小于此值时, 实验测得的混凝土试件的峰值应力略

大于它的静态抗压强度,随着应变率的改变,混凝土试件的峰值应力变化并不大,在此范围内通过实验看到经过冲击压缩后的混凝土试件没有明显的破坏.当应变率达到该值时,混凝土试件的强度突然升高.可见混凝土的应变率存在一个敏感阈值,超过该阈值时,混凝土就会对应变率非常敏感,混凝土材料的峰值应力就会随着应变率呈很快增长.本实验测得的混凝土试件的应变率敏感性临界值是 30/s 左右. Ross^[5] 和 Tedesco^[6] 等人利用直径为 51 mm 的 SHPB 实验装置对 C60 普通混凝土试件进行测试,所得到的应变率敏感性临界值是 60/s; 而严少华等^[8] 使用直径为 74mm 的 SHPB 实验装置对 C50 的普通混凝土进行了测试,所得到的混凝土应变率敏感性临界值是 43/s—47/s 之间,可见,不同混凝土的敏感阈值并不相同.

摩擦力对动态效应强度的影响机理可以由图 8(c) 进行解释,由于摩擦力的存在抑制了试件的侧向扩展,导致材料的动态强度增加.很明显,试件高度越高,摩擦力效应影响越小.这与实验结果一致

(图 7).

3.2.3 动态放大因子

众所周知,混凝土材料是一种应变率敏感材料,其动态强度会随着应变率的变化显著提高,目前关于混凝土材料动态强度提高的机理方面的研究已经越来越被研究者所关注,材料强度的动态增强因数 (dynamic increase factor, DIF) 作为衡量材料的动态强度提高的主要参数也得到了大量的研究.

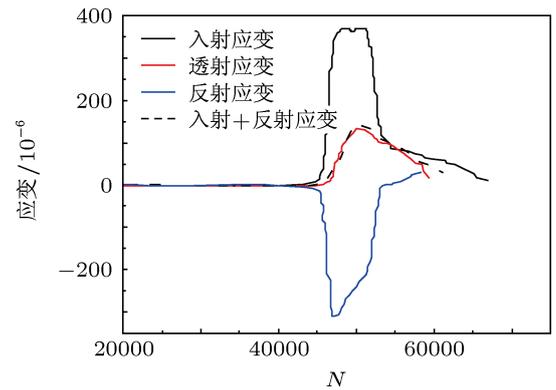


图 4 三波平衡状况

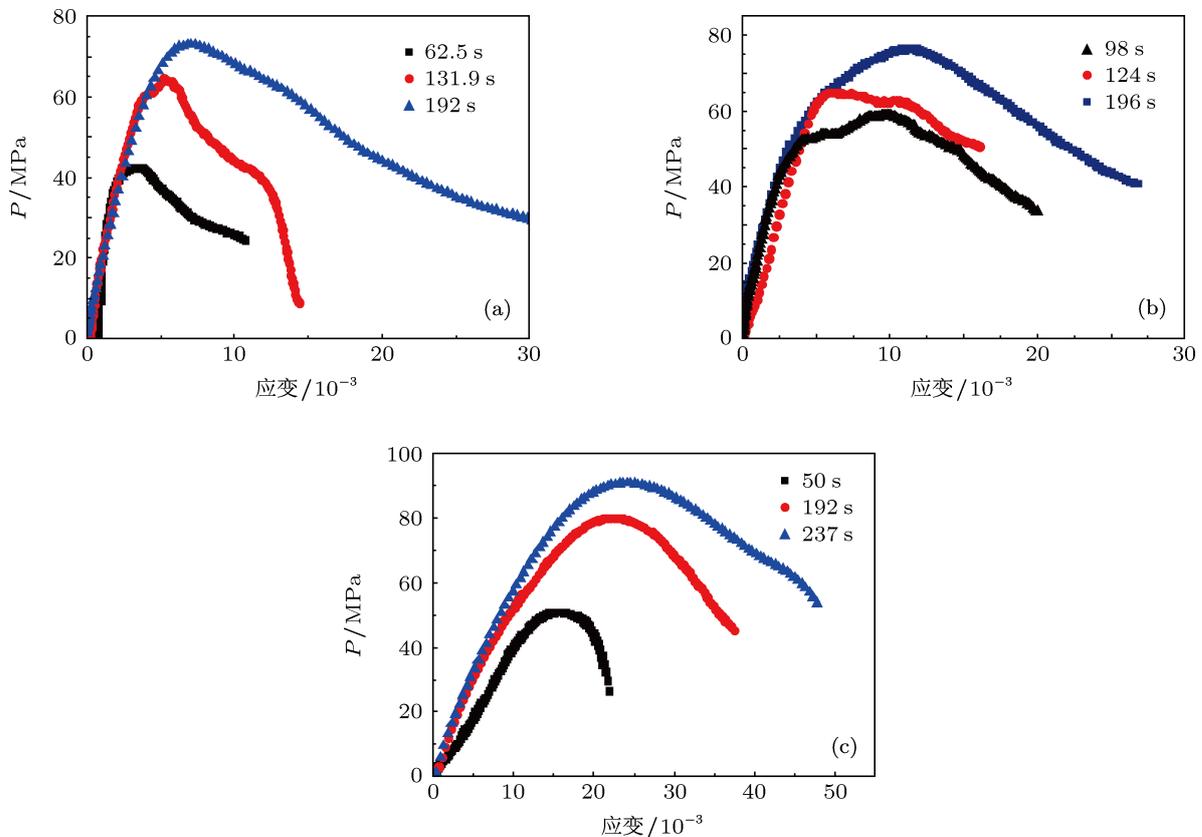


图 5 不同应变率下三种试件典型的应力应变图 (a) 不同应变率下 $\phi 32 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 试件的应力与应变全曲线; (b) 不同应变率下 $\phi 32 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 试件的应力与应变全曲线; (c) 不同应变率下 $\phi 32 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 试件的应力与应变全曲线

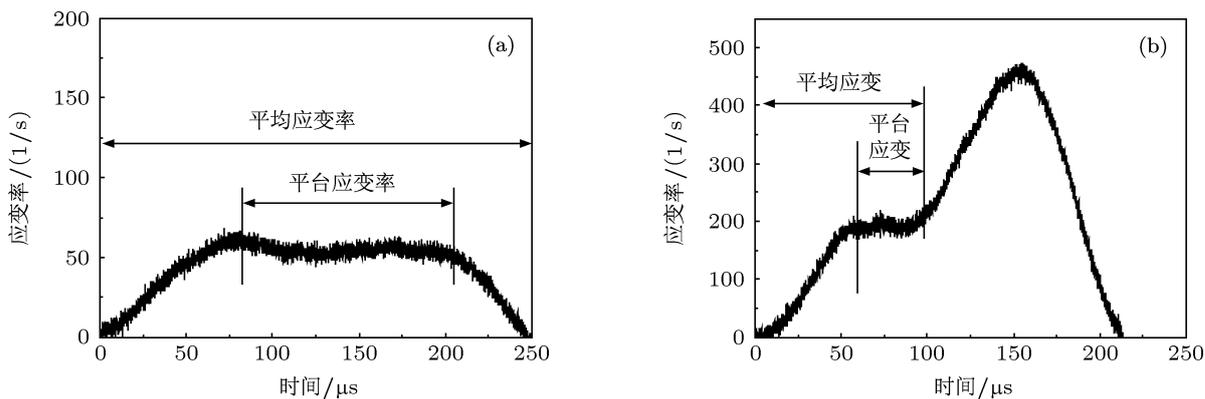


图6 试样应变率计算方法 (a) 试样未破坏 (b) 试样破坏

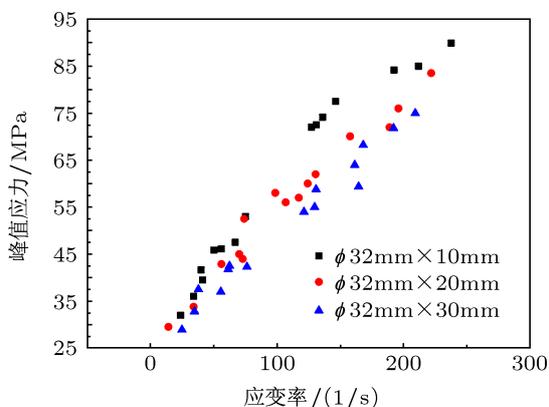


图7 三种混凝土试块峰值应力与应变率关系

然而, 混凝土强度提高机理方面的学术争论仍然没法统一, 其中大部分原因就是动态效应与材料的应变率效应相耦合, 导致了研究的复杂化. 如果不考虑动态效应中的非材料因素将可能在防护工程设计中过高地估计混凝土材料的性能, 为工程带来隐患. 为此, 需要对 DIF 进行修正研究. 进行 DIF 研究还需要得到其静态强度. 为此, 采用电子万能材料实验机对混凝土试件 $\phi 32\text{ mm}$, 高度为 48 mm 的试块进行静态压缩实验, 并得到了该混凝土的静

态强度为 25.25 MPa . 并且对上述三种试块进行了摩擦系数测定 (图 9). 于是计算可以得到三种试件的 DIF (图 10).

由图 9 可以看出, 虽然是同种材料, 试块的尺寸不同, 其 DIF 相差较大, 摩擦力效应不可忽略, 有必要对摩擦力效应进行修正. 根据 Malinowski 和 Klepczko^[9,10] 的研究, SHPB 实验中的摩擦效应可以由下式进行修正:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \frac{\mu \sigma_0}{3s_0} (1 - \varepsilon)^{-3/2}, \quad (4)$$

其中, σ_1 是在进行 SHPB 实验时, 实际测量到的试件应力, σ_0 是不考虑摩擦效应时的试件应力, μ 为试件的端面摩擦因数, s_0 是试件的长径比, ε 是试件的轴向应变. 根据实验得到的应力应变曲线, 测试得到的摩擦系数对混凝土修正得到材料的 DIF 为

$$\text{DIF} = 0.0421(\log \dot{\varepsilon}) + 1.2067, \quad 1/s \leq \dot{\varepsilon} \leq 30/s, \quad (5)$$

$$\text{DIF} = 0.5987(\log \dot{\varepsilon})^2 - 1.1867(\log \dot{\varepsilon}) + 2.0618, \quad 30/s \leq \dot{\varepsilon} \leq 300/s. \quad (6)$$

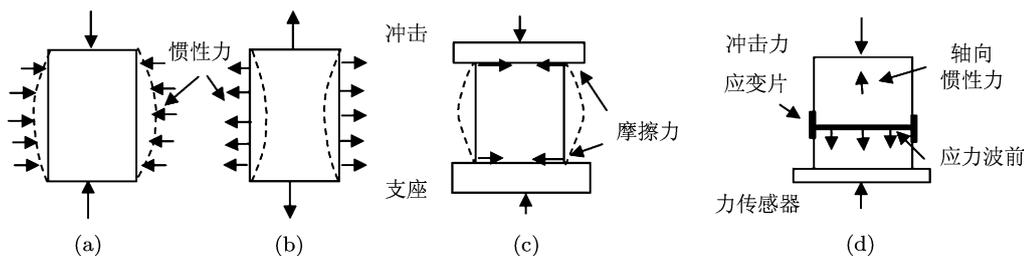


图8 动态效应示意图 (a) 轴向压缩时的横向惯性约束; (b) 轴向拉伸时的横向惯性约束; (c) 边缘摩擦效应; (d) 轴向惯性力和应力波传播示意图



图9 摩擦系数测定

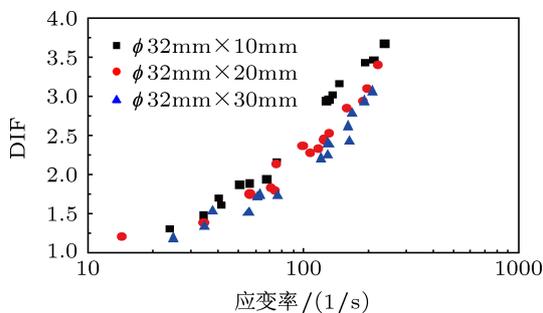


图10 DIF 计算

4 分析与讨论

混凝土在冲击载荷作用下通常存在各种动力学效应, 目前动力学效应对混凝土本构关系的影响已经越来越被研究者所重视, 冲击作用下的摩擦力效应是动态效应中非材料因素的重要一种, 在进行混凝土的 SHPB 实验时, 由于混凝土试件的横截面

的存在较差的平整度, 导致其横向的摩擦系数较大, 这对实验的结果存在很大的影响, 因此, 在对材料进行动态 SHPB 实验时, 需要注意端面摩擦效应. 摩擦效应产生的剪切力会改变混凝土试件的应力状态, 摩擦效应会阻碍混凝土试件端面处的横向变形, 导致试件受到横向约束, 会造成实验中测量到的应力比实际的应力要高, 会使人容易误认为是材料的应变率效应.

实验结果表明随着试件高宽比的增加, 其对应 DIF 随之减小, 证明了混凝土材料在高速冲击下的动态强度对摩擦系数与试件尺寸的相关性. 对应上述关于边界摩擦对混凝土强度影响的数值模拟工作^[10], 将此次实验所得数据代入到提出的消除边界摩擦效应的经验公式以检验. 经检验发现, 静态摩擦系数 (0.235) 不能直接应用于经验公式中, 当摩擦系数为 0.1 时, 通过数值模拟工作所提出的经验公式是合理的. 其原因在于在高速冲击下, 试件的边界摩擦系数为动摩擦系数, 其数值往往低于静摩擦系数.

5 结论

本文通过实验, 验证了摩擦力效应的存在及其对混凝土动态性能影响不能忽略, 如果不考虑摩擦力效应, 将高估混凝土材料的抗冲击性能, 将为抗爆, 抗冲击工程设计中带来隐患, 因此需要对其 DIF 进行修正研究, 本文通过实验与理论分析相结合修正了 DIF 模型, 并且得到了素混凝土的 DIF 真实的材料参数, 将为抗爆, 抗冲击工程设计提供参考, 具有较高的应用价值.

- [1] Wang Y G, Zhang Y P, Wang L L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7789 (in Chinese) [王永刚, 张远平, 王礼立 2008 物理学报 **57** 7789]
- [2] Jiang G P, Jiao C J, Xiao B Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 026701 (in Chinese) [蒋国平, 焦楚杰, 肖波齐 2012 物理学报 **61** 026701]
- [3] Ji S Y, Li P F, Chen X D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184703 (in Chinese) [季顺迎, 李鹏飞, 陈晓东 2012 物理学报 **61** 184703]
- [4] Meng H, Li Q M 2003 *International Journal of Impact Engineering* **28** 537.
- [5] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T 1995 *ACI Materials Journal* **92** 37
- [6] Ross C A 1991 *Netherland: Kluwer Academic Pulishers* p577
- [7] Hao Y, Hao H 2011 *International Journal of Protective Structures* **2** 177
- [8] Yan S H, Qian Q H, Zhou Z S 2000 *Journal of PLA University of Science and Technology* **1** 49 (in Chinese) [严少华, 钱七虎, 周早生 2000 解放军理工大学学报 **1** 49]
- [9] Malinowski J Z, Klepaczko J R 1986 *Int. J. Mech. Sci.* **28** 381
- [10] Malinowski J Z, Klepaczko J R 1978 *High velocity deformation of solids* Springer verlag. Berlin p403

Experimental study of friction effect under impact loading*

Jiang Guo-Ping^{1)†} Hao Hong¹⁾ Zeng Chun-Hang²⁾ Hao Yi-Fei¹⁾
Wu Ru-Jun²⁾ Liu Ji-Chao¹⁾

1) (*Earthquake Engineering Research Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China*)

2) (*Guang Zhou Shi Sheng Te CO., LTD, Guangzhou 510405, China*)

(Received 20 December 2012; revised manuscript received 30 January 2013)

Abstract

When testing impact dynamics of concrete, usually a variety of kinetic effects can be seen, such as the axial and lateral inertial confinement effects, the effects of stress wave propagation and the final friction effects, etc. Some of these are the material is nature itself such as the size effect, some are experimental errors, etc., but all the dynamic effects, may enter the final test results so that unnecessary errors or even wrong values may be brought into experiments. Due to the mechanism of friction effect, we have designed three different sizes of specimen for SHPB test. The quantitative values of the friction effect are obtained. The DIF is corrected, which is the basis for concrete impact engineering design.

Keywords: impact, concrete, SHPB, friction

PACS: 62.50.-p, 62.20.-x, 81.70.Bt

DOI: 10.7498/aps.62.116203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51078094), and the Guangzhou Baiyun District Science and Technology Project (Grant No. 2012-KZ-58).

† Corresponding author. E-mail: lp2002999@yahoo.com.cn