

硬岩巴西劈裂法试验误差影响率分析

汪亦显, 曹 平

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 岩石的抗拉强度是导致岩石黏结性破坏的极限应力, 在工程上, 将劈裂法试验规定为测定岩石抗拉强度的必做试验。大量的试验结果研究表明: 劈裂法不能真实地反映岩石的抗拉强度, 实验结果有误差。本文经过硬岩的巴西劈裂法实验, 得到了硬岩巴西法试验结果的误差值与厚径比的关系曲线, 可以知道误差影响的主要来源是试件的厚度变化误差。由计算结果和回归曲线还可以知道, 在厚径比为 1.0 附近时, 误差影响量总和最小。因此, 为了控制实验误差, 建议以后进行劈裂试验时, 试件厚径比 L/D 严格取 1.0。

关键词: 硬岩; 巴西法; 抗拉强度; 误差; 回归分析

中图分类号: TD315

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)07-1085-05

作者简介: 汪亦显(1980-), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 从事岩体力学的工作。E-mail: wangyixian2006@163.com。

Analysis of influence on errors in Brazilian test of hard rock

WANG Yi-xian, CAO Ping

(School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The tensile strength of rock is the ultimate stress of the rock cementation during its destruction. Brazilian test should be done to determine the tensile strength of rock. However, various tests have indicated that, Brazilian test can not exactly reflect the tensile strength of rock, and there are some errors in the test results. Through Brazilian test of hard rock, the relation ship between the error and the thick diameter ratio was obtained. Moreover, the major influence on error came from the variation of the thickness of test samples. The error was the smallest when the thickness-diameter ratio (L/D) was close to 1.0. Therefore, It was suggested that ther L/D ratio of test samples should be 1.0 strictly.

Key words: hard rock; Brazilian test; tensile strength; error; regression analysis

0 引 言

岩石的抗拉强度是指岩石试件在受到轴向拉应力后发生破坏时的单位面积所能承受的拉力^[1]。岩土工程中, 岩体拉伸断裂是失稳的一种主要类型, 因而, 为了分析预测岩体拉伸破坏发生的可能状态, 保证工程安全, 往往需要进行岩石抗拉强度的测定工作。通常, 测定岩石抗拉强度的方法大致有: 直接拉伸法、劈裂法、弯曲试验法、点荷压裂法^[1]等等。

我国2001年新颁布的《水利水电工程岩石试验规程》已成为指导岩石试验的全国性规程。在这个规程中, 将劈裂法试验规定为测定岩石抗拉强度的必做试验, 删除了原有的轴向拉伸法参考试验^[2]。因此, 目前工程设计单位在测定岩石抗拉强度时, 都选择做劈裂试验, 而不做轴向拉伸试验。

但大量的试验结果研究表明: 劈裂法不能真实反映岩石的抗拉强度, 由巴西劈裂法试验得到的抗拉强度与直接拉伸法得到的结果有较大的出入, 多数情况下巴西劈裂法试验结果小于直接拉伸法实验结果^[3-5]。

对于硬岩, 一般偏低约 50%~100%, 对于软岩或层状岩石, 则偏高很多^[6]。就硬岩而言, 巴西劈裂法试验结果的误差影响因素有很多, 主要有载荷分布形式, 载荷加载速率, 试件尺寸等, 本文由硬岩劈裂法实验结果误差影响分析, 得到不同厚径比时, 实验误差影响的主要来源是试件厚度变化。

1 试验过程及结果分析

1.1 试验方法

劈裂试验亦称巴西试验 (Brazilian test), 是目前测定岩石抗拉强度应用最广泛的试验方法。这种试验方法是: 将经过加工符合规范要求的圆盘状试件, 置于刚性实验机的承压板间, 并在试件的上、下承压板之间各放置一根直径为2 mm的硬质钢丝作为垫条, 垫条须位于与试件垂直的对称轴面, 使将施加的压力变为线荷载, 并使试件产生垂直于上、下荷载作用方向

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50274074)

收稿日期: 2006-07-05

的张力。然后加载使试件受压，试件沿径向产生张拉破坏，以求其抗拉强度（图1）。按照我国岩石力学试验方法标准的规定^[2]，试件厚径比取0.5~1.0。若试件厚度为 L ，直径为 D ，破坏荷载为 P ，则其抗拉强度一般可以近似表示为^[1-2]

$$\sigma_t = -2P/\pi DL \quad (1)$$

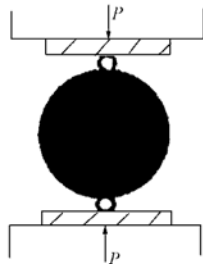


图1 岩石加载示意图

Fig. 1 Loading sketch of rock

1.2 试验结果分析

(1) 结果计算

如图2(a)所示，巴西劈裂试件即对径受压圆盘，根据平面应力问题的弹性力学解析解^[7]，在直径为 D 的圆盘直径 A, B 上受到集中力 P 的作用而发生破坏，若试件厚度为 L ，则圆盘内任一点 M ，若以拉应力为负，压应力为正，则正应力 σ_x, σ_y 和剪应力 τ_{xy} 可表示为^[7]

$$\sigma_x = \frac{2p}{\pi L} \left(\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2p}{\pi DL}, \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{2p}{\pi L} \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2p}{\pi DL}, \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2p}{\pi L} \left(\frac{\sin \theta_1 \cos^2 \theta_1}{r_1} + \frac{\sin \theta_2 \cos^2 \theta_2}{r_2} \right). \quad (4)$$

上述简化计算公式(1)和应力表示式(2)~(4)，是建立在完全假设平面内仅试件直径 A, B 两个端点受到集中荷载 P 的作用，由圣维南原理知，在远离 A, B 两点处，应力集中的影响可以不计^[8]。且在圆盘中心 O 处，即 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ ， $r_1 = r_2 = 0.5D$ ，不计其它影响，由式(2)、(3)知，压应力是拉应力的3倍，而根据格里菲斯强度理论，岩石的单轴抗压强度是抗拉强度的8倍^[1]。故一般认为劈裂实验中，岩石试件是从中心最先开始发生破坏，并且是由于岩石抗拉强度达到极限值，故劈裂实验可以用来测定岩石试件的抗拉强度，且抗拉强度计算公式可以简化成式(1)。

(2) 计算公式的误差

实际上，实验中试件受力是一个复杂的三维力学问题，且试件在三维条件下受力远比二维条件下复杂，越来越多的实验研究表明，试件不同横截面上的应力分布沿厚度方向是有变化的。因此，用平面条件的简

化公式解岩石材料的抗拉强度是不真实的，至少是不精确的^[9]。越来越多的实验研究表明，实验过程中，图1中承压板通过合金钢丝并不能完全传递线荷载，即不能保证在图2中的 A, B 两点是受集中力的点载作用，而是 P 在与试件接触面上有适当的分布域。如果假定 P 与圆盘接触面对应的圆心角为 2α ，如图2(b)所示，则圆盘内某点 M 的应力与分布角 α 有下列关系式(5)、(6)，式中各变量含义见图2(b)。

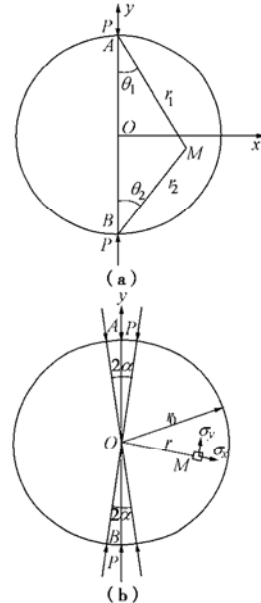


图2 试件受力示意图

Fig. 2 Sketch of Brazilian disk test

$$\sigma_x = -\frac{p}{\pi r_0 L \alpha} \left[\frac{\left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{r_0} \right)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2}{1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2} \tan \alpha \right] \right], \quad (5)$$

$$\sigma_y = \frac{p}{\pi r_0 L \alpha} \left[\frac{\left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{r_0} \right)^4} + \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2}{1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2} \tan \alpha \right] \right]. \quad (6)$$

若 $r=0$ ，即圆心处，式(5)、(6)可以写为

$$\sigma_x = -\frac{p}{\pi r_0 L} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right) = -\frac{2p}{\pi DL} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right), \quad (7)$$

$$\sigma_y = \frac{p}{\pi r_0 L} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right) = \frac{2p}{\pi DL} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可知,在圆心处,拉、压应力的分布与分布载荷 P 的分布域即角 α 有关。对于式(7),若 $\alpha \rightarrow 0$,即 $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right) = 1$,可知式(7)亦可回归到式(1)。

显然,实验中软岩时变形比较大,合金钢丝甚至会出现压入试件的现象,使得 α 发生增大,而硬岩的 α 要比软岩的小很多。并且载荷 P 的分布角 α 的影响函数 $f(\alpha) = \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1$,在其定义域内为单调递减函数,故利用式(1)计算出的岩石试件抗拉强度偏高,因此,实验中试件与承压板间有无垫条和垫条的形状如何,将直接关系到计算结果的误差大小变化情况。

但是由于硬岩试件在接触点 A, B 处的变形小,故一般认为在劈裂法实验中试件依然是受线载荷用,实验结果的误差受载荷分布域的影响不大,如实验中采用2 mm的合金钢丝作为垫条,则 $f(\alpha) = \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1$ 的最小值可达到0.999999,即利用式(1)得到的抗拉强度的误差很小,精确度可达99.9999%。因此笔者没有对硬岩劈裂实验时, α 作误差影响率的统计分析。

2 误差影响率分析

前已述及,巴西劈裂法测得岩石抗拉强度 σ_t 的计算公式,可以简化成式(1)、(7)。对于硬岩,一般可以选用式(1)计算。由此,对于硬岩抗拉强度的计算公式可以写成下面的多元函数,其表达式为

$$\sigma_t = f(P, D, L) \quad (9)$$

对于多元函数,其增量可以用函数的全微分表示,则上述函数表达式(9),其函数增量可以用表示为^[10]

$$d\sigma_t = \frac{\partial f}{\partial p} dp + \frac{\partial f}{\partial D} dD + \frac{\partial f}{\partial L} dL \quad (10)$$

由于各个直接测量值的系统误差都较小,则可以近似用 $\Delta p, \Delta D, \Delta L$ 代替上式中的微分量 dp, dD, dL ,即函数式(9)的系统误差公式可写为

$$\Delta\sigma_t = \frac{\partial f}{\partial p} \Delta p + \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial f}{\partial L} \Delta L \quad (11)$$

式中, $\Delta D = D_{\text{测}} - D_{\text{标}}$, $\Delta L = L_{\text{测}} - L_{\text{标}}$, Δp 由实验机的性能指标确定。

将式(11)展开后即可得

$$\Delta\sigma_t = -\frac{2}{\pi} D^{-1} L^{-1} (\Delta p - p D^{-1} \Delta D - p L^{-1} \Delta L) \quad (12)$$

为分析 $\Delta p, \Delta D, \Delta L$ 在抗拉强度误差 $\Delta\sigma_t$ 中的影响,

即只需分析 $\frac{\partial f}{\partial p} \Delta p$, $\frac{\partial f}{\partial D} \Delta D$, $\frac{\partial f}{\partial L} \Delta L$ 3个误差分量在

$\Delta\sigma_t$ 中的影响比例关系。为此,定义新概念误差影响率,所谓误差影响率是指测试中由于某一影响因素产生的误差值,与所有因素产生的误差总和的比率,以百分数表示。若用 $\delta_p, \delta_D, \delta_L$ 分别表示 $\frac{\partial f}{\partial p} \Delta p$, $\frac{\partial f}{\partial D} \Delta D$,

$\frac{\partial f}{\partial L} \Delta L$,则可用 $(\delta_p / \Delta\sigma_t) \times 100\%$, $(\delta_D / \Delta\sigma_t) \times 100\%$, $(\delta_L / \Delta\sigma_t) \times 100\%$ 分别表示 $\Delta p, \Delta D, \Delta L$ 对抗拉强度误差 $\Delta\sigma_t$ 的影响率。

对于硬岩,笔者通过大量劈裂实验分析,得出了不同的厚径比试件, $\Delta p, \Delta D, \Delta L$ 分别对抗拉强度误差 $\Delta\sigma_t$ 中产生的影响率曲线。实验在中南大学岩土力学与工程研究所“湖南省硬岩深部开采与环境控制重点实验室”进行,实验过程的相关操作,严格按照《规程》的相关规定进行。实验试件全部取自于云南大红山铁矿矿区,经过测试,在矿区内采取的各类岩石试件单轴抗压强度都比较高,属坚硬岩类。劈裂实验过程的相关操作,严格按照《规程》的相关规定进行,实验设备采用国内最先进的RYL-600微机控制岩石试验机,该实验机可以实时画出岩石试件加、卸载下的全过程 $p-s$ 曲线。经过劈裂实验,得到试件的抗拉强度的 $p-s$ 全程曲线,部分试件的 $p-s$ 全程曲线见图3。并且由实验结果计算出 $\delta_p, \delta_D, \delta_L$ 和 $(\delta_p / \Delta\sigma_t) \times 100\%$, $(\delta_D / \Delta\sigma_t) \times 100\%$, $(\delta_L / \Delta\sigma_t) \times 100\%$ 结果见表1。

上述计算结果可得误差影响率 $(\delta_p / \Delta\sigma_t) \times 100\%$, $(\delta_D / \Delta\sigma_t) \times 100\%$, $(\delta_L / \Delta\sigma_t) \times 100\%$ 与不同的厚径比 L/D 的相关曲线,经过6阶多项式回归分析,可以得到误差影响率与厚径比 L/D 的关系曲线如下图4。

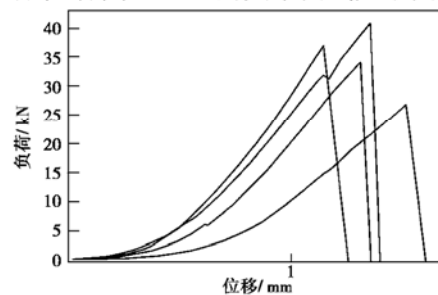


图3 岩石劈裂拉伸全程曲线

Fig. 3 Brazilian test curves of hard rock

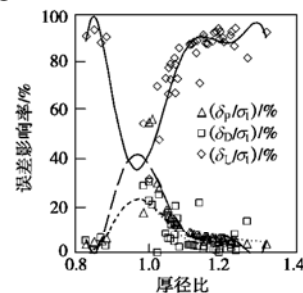


图4 误差影响率关系图

Fig. 4 Relationship between influence on errors and L/D

表 1 误差影响结果
Table 1 Influence of errors

厚径比	δ_p	δ_D	δ_L	$\delta_p/\Delta\sigma_t$ /%	$\delta_D/\Delta\sigma_t$ /%	$\delta_L/\Delta\sigma_t$ /%
0.8300	0.09	0.11	1.92	4.14	5.03	90.84
0.8514	0.05	0.01	0.93	5.32	0.85	93.83
0.8701	0.05	0.05	0.74	5.42	6.36	88.22
0.8835	0.05	0.02	0.65	6.65	2.67	90.68
0.9854	0.08	0.14	0.26	17.36	28.22	54.42
0.9996	0.11	0.09	0.09	38.88	29.77	31.35
1.0000	0.04	0.02	0.02	55.46	22.27	22.27
1.0076	0.07	0.02	-0.03	56.83	20.53	22.64
1.0236	0.07	0.00	-0.17	30.25	0.00	69.75
1.0266	0.04	0.04	-0.07	27.64	24.54	47.81
1.0454	0.03	0.01	-0.13	18.65	8.24	73.11
1.0525	0.04	0.04	-0.18	16.55	16.72	66.72
1.0530	0.06	0.02	-0.26	16.53	5.97	77.50
1.0576	0.06	0.05	-0.30	15.40	11.80	72.80
1.0578	0.01	0.01	-0.08	15.42	5.57	79.01
1.0597	0.05	0.04	-0.26	14.98	12.08	72.95
1.0695	0.08	0.03	-0.51	13.30	4.81	81.89
1.0704	0.04	0.02	-0.23	13.13	7.40	79.47
1.0727	0.03	0.04	-0.14	12.68	20.09	67.23
1.0753	0.02	0.03	-0.13	12.37	14.52	73.11
1.0822	0.02	0.00	-0.15	11.62	2.33	86.05
1.1100	0.09	0.03	-0.90	9.14	3.30	87.56
1.1145	0.08	0.03	-0.84	8.84	3.55	87.61
1.1220	0.02	0.01	-0.19	8.39	3.03	88.58
1.1272	0.10	0.10	-1.05	8.07	7.82	84.11
1.1301	0.03	0.01	-0.32	7.97	2.88	89.15
1.1362	0.03	0.09	-0.32	7.51	21.30	71.19
1.1475	0.02	0.00	-0.30	7.20	1.44	91.35
1.1493	0.08	0.03	-1.05	7.12	2.57	90.30
1.1540	0.02	0.01	-0.25	6.92	5.30	87.78
1.1540	0.04	0.03	-0.52	6.92	5.30	87.78
1.1568	0.04	0.03	-0.50	6.82	5.22	87.95
1.1697	0.04	0.03	-0.59	6.40	4.90	88.69
1.1752	0.09	0.02	-1.26	6.28	1.26	92.47
1.1807	0.02	0.00	-0.26	6.12	0.98	92.89
1.1884	0.04	0.00	-0.63	5.93	0.00	94.07
1.1894	0.03	0.02	-0.45	5.87	4.49	89.64
1.1924	0.06	0.01	-0.89	5.83	1.17	93.01
1.2001	0.06	0.04	-0.95	5.62	3.62	90.75
1.2040	0.03	0.03	-0.52	5.52	5.58	88.91
1.2193	0.03	0.02	-0.46	5.24	3.16	91.60
1.2227	0.04	-0.02	-0.83	5.02	2.00	92.99
1.2317	0.04	0.07	-0.78	4.97	8.08	86.95
1.2340	0.04	-0.01	-0.76	4.94	0.79	94.27
1.2660	0.05	0.16	-0.94	4.41	13.65	81.94
1.3156	0.03	0.03	-0.72	3.97	3.52	92.51

3 结论和建议

劈裂法的实验误差来源有载荷分布域的大小，载荷加载速率大小，试件尺寸等。但对于硬岩，由上述实验结果和误差影响率的回归曲线分析可知，在厚径比为 0.8~1.4 的范围内，劈裂法的实验误差影响率一般由 $(\delta_L/\Delta\sigma_t)\times 100\%$ 占主导，即硬岩劈裂法实验的计算结果中误差影响分量 δ_L 占优。亦即 Δp ， ΔD ， ΔL 在

抗拉强度误差 $\Delta\sigma_t$ 中的影响主要由 ΔL 的大小决定。

厚径比为 0.8~1.0，图中 $(\delta_L/\Delta\sigma_t)\times 100\%$ 曲线呈递减趋势，即误差影响分量 δ_L 不断减小，而回归曲线图中 $(\delta_p/\Delta\sigma_t)\times 100\%$ ， $(\delta_D/\Delta\sigma_t)\times 100\%$ 曲线呈递增趋势，此即误差影响分量 δ_p ， δ_D 不断增大。而厚径比为 1.0~1.4，误差影响分量 δ_L 不断增大，误差影响分量 δ_p ， δ_D 的大小变化趋势则相反。并且在厚径比为 1.0 附近时， $(\delta_D/\Delta\sigma_t)\times 100\%$ 和 $(\delta_L/\Delta\sigma_t)\times 100\%$ 大小相

近, 即误差影响分量 δ_D , δ_L 相当, 而 δ_p 比 δ_D , δ_L 要小很多, 且 δ_p 比 δ_D , δ_L 小是整体趋势。

由计算结果和回归曲线结果还可以分析得知, 在厚径比 L/D 为 1.0 附近时, 误差影响分量 δ_D , δ_L 总和最小, 即此时实验误差量最小。因此, 为减小或控制实验误差, 建议以后进行劈裂试验时, 试件厚径比 L/D 严格取 1.0。

参考文献:

- [1] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999. (SHEN Ming-rong. Rock mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999. (in Chinese))
- [2] SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 张少华, 缪协兴, 赵海云. 试验方法对岩石抗拉强度测定的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3): 243 - 46. (ZHANG Shao-hua, MIAO Xie-xing, ZHAO Hai-yun, Influence of test methods on measured results of rock tensile strength[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(3): 243 - 246. (in Chinese))
- [4] 叶明亮, 等. 岩石抗拉强度试验方法的探讨[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2001, 30(6): 19 - 25. (YE Ming-liang, et al. Approach to test method of rock strength in uniaxial tension[J]. Journal of Guizhou University of technology (Natural Science), 2001, 30(6): 19 - 25. (in Chinese))
- [5] 窦庆峰, 等. 岩石直接拉伸试验与劈裂试验的对比研究[J]. 地下空间, 2004, 24(2): 178 - 181. (DOU Qing-feng, et al. Experimental study on direct and indirect tension of rock[J]. Underground Space, 2004, 24(2): 178 - 181. (in Chinese))
- [6] 陶纪南. 岩石轴向拉伸与劈裂法试验结果的比较分析[J]. 金属矿山, 1995(3): 28 - 31. (TAO Ji-nan. Comparative analysis of test results by axial tension method and splitting method[J]. Metal Mine, 1995(3): 28 - 31. (in Chinese))
- [7] 铃木光. 岩体力学与测定[M]. 杨其中, 等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980. (LING Mu-guang. Rock mechanics and test[M]. YANG Qi-zhong, et al. Translators. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1980. (in Chinese))
- [8] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. (LIU Hong-wen. Materials mechanics[M]. Beijing: High education Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 喻 勇, 等. 岩石巴西圆盘试验中的空间拉应力分布[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1913 - 1916. (YUAN yong, et al. Spatial distribution of tensile stress in Brazilian disk test of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1913 - 1916. (in Chinese))
- [10] 王武义, 等. 误差原理与数据处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. (WANG Wu-yi, et al. Erroneous principle and data processing[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001. (in Chinese))