

某板岩粗粒料湿化特性三轴试验研究

朱俊高^{1, 2}, Mohamed A. ALsakran^{1, 2}, 龚选^{1, 2}, 轩向阳^{1, 2}, 吉恩跃^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 对某板岩粗粒料进行了大型三轴湿化变形试验, 分析了湿化体积应变、湿化剪应变等随围压、应力水平变化关系。试验结果表明: 湿化体积应变、湿化剪应变随着围压增大或应力水平的提高而增大。利用试验结果研究了沈珠江湿化变形模型对试验所用的板岩粗粒料的适用性。结果显示, 沈珠江模型不能满意地反映湿化体积应变, 但是, 能较好地反映湿化剪应变与应力状态的关系。分析湿化后剪切强度性质, 发现不同应力水平下湿化对粗粒土的强度指标影响很小。

关键词: 湿化变形; 大型三轴试验; 强度指标; 沈珠江模型

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)01-0170-05

作者简介: 朱俊高(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事土体基本性质与本构模型、土石坝工程研究方面的研究。

E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn。

Triaxial tests on wetting deformation behavior of a slate rockfill material

ZHU Jun-gao^{1, 2}, Mohamed A. ALsakran^{1, 2}, GONG Xuan^{1, 2}, XUANG Xiang-yang^{1, 2}, JI En-yue^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A number of large-scale triaxial tests are performed to investigate the wetting deformation behavior of a slate rockfill material. The relationship among wetting volumetric strain, shear strain, confining pressure and stress level is analyzed. The test results show that the wetting volumetric strain and the shear strain increase with the increase of both the confining pressure and the stress level. Using the test results, the applicability of Shen's wetting deformation model is verified for the test soil. It is found that Shen's wetting deformation model can not satisfactorily reflect the wetting volumetric strain, but it can suitably reflect the relationship between the wetting shear strain and the stress state. By analyzing the shear strength behavior after wetting, the wetting under different stress levels has little influence on the strength parameter of the coarse-grained soil.

Key words: wetting deformation; large-scale triaxial test; strength parameter; Shen's model

0 引言

近年来, 随着中国经济建设的飞速发展, 能源的供求矛盾日益加剧, 水电作为解决这种矛盾的重要途径得到大力发展。土石坝具有就地取材、对复杂地质条件有良好的适应性等优点, 得到迅速发展, 多座 200 m 甚至 300 m 级高土石坝正在设计和施工中。对心墙坝, 上游坝壳堆石在蓄水初期会经历由干态(或接近干态)变为饱和状态的过程——称为湿化, 在这过程中, 堆石料常常会因湿化产生变形, 称之为“湿化变形”。

到目前为止, 湿化变形的研究主要集中在两个方面: ①对土料进行湿化变形试验, 总结湿化变形规律和相应的变形模型, 如左元明和沈珠江^[1]对某坝壳砂砾料进行了单线法和双线法试验对比; 魏松和朱俊高^[2]对糯扎渡心墙坝堆石料进行了湿化变形三轴试验,

其它类似研究也很多^[3-10]。②分析土石坝等工程中土体湿化变形对结构的影响, 包括分析方法的研究等^[11-17]。

已有研究表明, 有很多堆石料湿化产生压缩的湿化变形, 但是, 有些堆石料在某些应力状态下产生“膨胀”的湿化变形^[2]。理论上, 上游坝壳堆石产生压缩的湿化变形对减轻心墙应力拱效应有利, 但是如果湿化变形太大, 会引起坝体不同部位的变形差异过大, 显然与当今不少学者提出的土石坝“变形协调”的设计原则相悖; 另一方面, 对有些堆石料, 产生“膨胀”的湿化变形可能加剧心墙应力拱效应。因此, 不少学者研究了湿化变形对心墙坝应力变形的影响^[12-15]。湿

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助(B13024); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110094110002); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2012-K3-9)

收稿日期: 2012-04-26

化变形对面板坝的影响更是得到了普遍认可, 不少学者也进行了相关研究^[16-17]。因此, 堆石料湿化变形值得深入研究, 也正因为此, 近年来很多学者进行了大量的试验研究、规律总结以及计算分析方法的研究。尽管堆石料湿化变形研究较多, 但目前为止, 对其认识并不充分, 不同学者所总结的湿化变形规律也常常差异较大, 因此, 分析得到的所谓“湿化模型”也是千差万别。要全面分析、总结湿化变形规律, 还有待进行更多试验。

本文对某堆石坝壳板岩堆石料(以下简称粗粒料)进行了大型三轴湿化变形试验, 揭示湿化变形规律, 分析了不同应力水平下湿化后试样的强度性质, 研究了沈珠江湿化变形数学模型对本文试验板岩粗粒料湿化变形特性的适用性。

1 试验设备及土石料

试验在大型三轴仪上进行, 试样直径300 mm, 高度600 mm。试验所用土石料为某堆石坝壳堆石料, 母岩岩性为板岩。由于原级配最大粒径较大, 因此, 必须对原级配进行缩尺后才能用于试验, 缩尺方法为混合法。原设计级配曲线及本文试验用土石料级配(试验级配)曲线如图1。

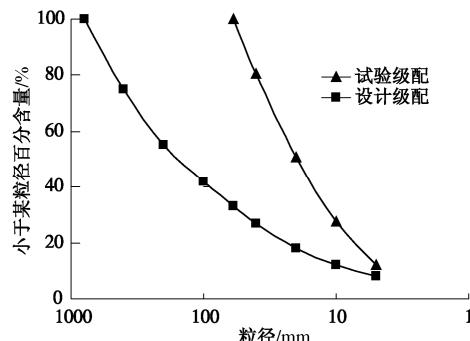


图1 土石料级配曲线

Fig. 1 Curves of graduation of test soil

试验制样干密度为2.114 g/cm³。湿化变形试验方法: ①试样分别在3种围压(0.2, 0.6和1.0 MPa)下固结; ②固结完成后施加轴向附加应力到预定应力水平(0.4, 0.6和0.8); ③从试样底部进水, 使试样缓慢饱和, 测定试样在饱和过程中的变形; ④变形稳定后, 进一步剪切试样到破坏。

试验过程中, 试样体积变形是通过进出压力室的水量扣除加载杆对应体积后得到。

2 试验结果及分析

2.1 湿化变形成性分析

依据试验结果, 整理出同一围压下偏应力

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε_a 和体积应变 ε_v 的试验曲线, 如图2~4所示, 其中S表示应力水平。图中, $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线上水平段为湿化变形段, 对应横坐标的差值即为湿化轴向应变。

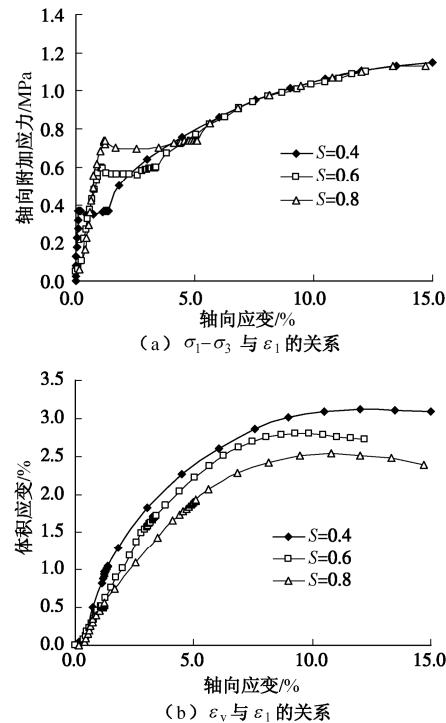


图2 湿化变形三轴试验应力应变关系(围压0.2 MPa)

Fig. 2 Relationship of stress-strain in triaxial tests on wetting deformation (cell pressure of 0.2 MPa)

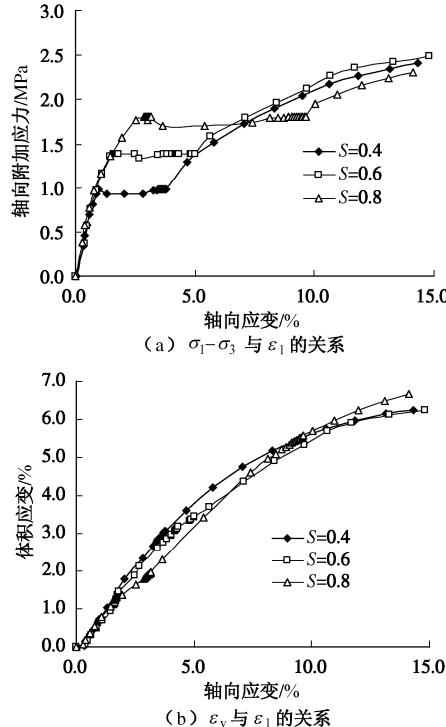


图3 湿化变形三轴试验应力应变关系(围压0.6 MPa)

Fig. 3 Relationship of stress-strain in triaxial tests on wetting deformation (cell pressure of 0.6 MPa)

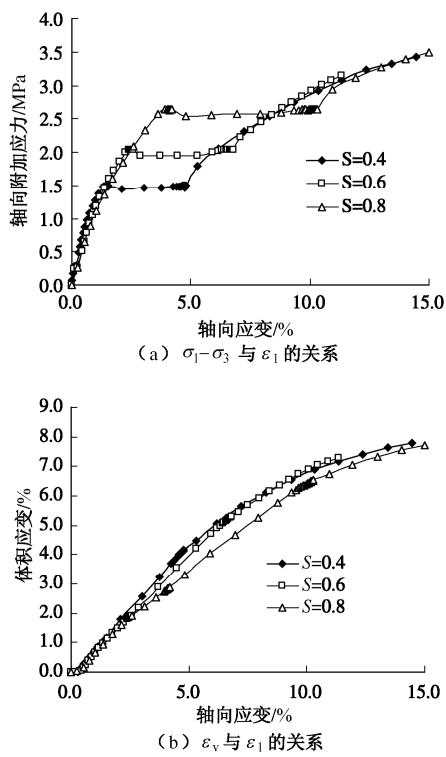


图4 湿化变形三轴试验应力应变关系(围压1.0 MPa)

Fig. 4 Relationship of stress-strain in triaxial tests on wetting deformation (cell pressure of 1.0 MPa)

试验得到的粗粒料湿化变形(湿化轴向应变 $\Delta\varepsilon_a$ 、湿化体积应变 $\Delta\varepsilon_v$ 及湿化广义剪应变 $\Delta\varepsilon_s$)列于表1。表1可以看出,同一围压下, $\Delta\varepsilon_a$, $\Delta\varepsilon_v$ 及 $\Delta\varepsilon_s$ 均随应力水平增大而增大;对应相同应力水平, $\Delta\varepsilon_a$, $\Delta\varepsilon_v$ 及 $\Delta\varepsilon_s$ 均随围压的增大呈增大趋势。

表1 试验测定的湿化变形量

Table 1 Wetting deformation of soil

σ_3 /MPa	S	$\Delta\varepsilon_a$ /%	$\Delta\varepsilon_v$ /%	$\Delta\varepsilon_s$ /%
0.2	0.40	1.188	1.009	0.790
	0.60	2.298	1.121	1.895
	0.80	3.890	1.337	3.431
	0.40	2.790	2.349	2.007
0.6	0.60	3.418	2.363	2.630
	0.80	6.003	3.271	4.913
	0.40	3.498	3.189	2.435
1.0	0.60	4.260	3.398	3.127
	0.80	6.362	3.813	5.091

为了更清楚地反映应力水平、围压等对湿化变形的影响,整理出了 $\Delta\varepsilon_v$ 与 $\Delta\varepsilon_s$ 随应力水平、围压变化关系曲线,如图5和图6所示。

沈珠江曾建议一个湿化变形模型,如式(1),

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varepsilon_v &= C_w \\ \Delta\varepsilon_s &= d_w \frac{S}{1-S} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

其中, C_w 和 d_w 为材料参数。

从式(1)表明,湿化体积应变 $\Delta\varepsilon_v$ 为常数,而图5显示, $\Delta\varepsilon_v$ 不仅随应力水平变化,而且随围压变

化。因此,该模型描述的湿化体积应变不适用于本文的板岩料。

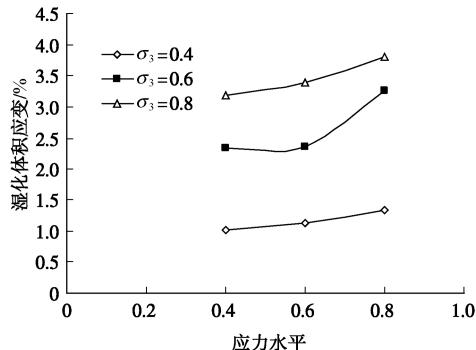


图5 $\Delta\varepsilon_v$ 与S关系

Fig. 5 Relationship between $\Delta\varepsilon_v$ and S

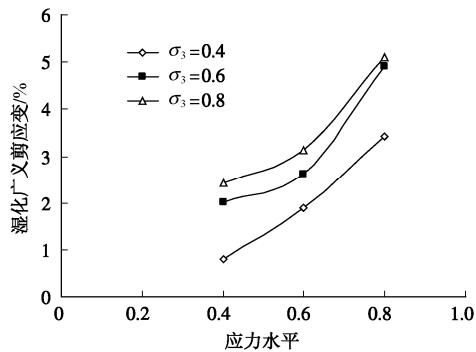


图6 $\Delta\varepsilon_s$ 与S关系

Fig. 6 Relationship between $\Delta\varepsilon_v$ and S

下面再来分析式(1)中第2式对本文试验板岩料的适用性。如果此式适用,则 $\Delta\varepsilon_s$ 与 $S/(1-S)$ 之间应该为线性关系。因此,依据上述试验结果整理出 $\Delta\varepsilon_s$ 与 $S/(1-S)$ 关系,如图7所示,线性关系较好,因此,沈珠江湿化模型的湿化剪应变表达式适用于本文所试验的板岩料。

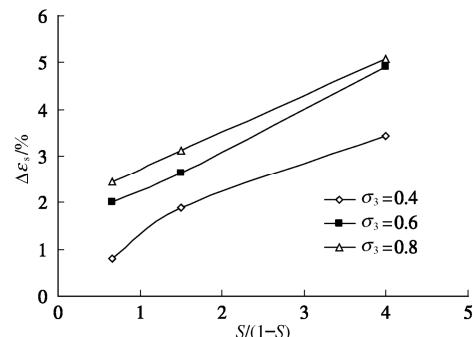


图7 $\Delta\varepsilon_s$ 与 $S/(1-S)$ 关系

Fig. 7 Relationship between $\Delta\varepsilon_s$ and $S/(1-S)$

2.2 湿化后强度特性

从图2(a)、3(a)、4(a)可以看出,不同应力水平下湿化对最终的破坏强度影响不大。左永振等^[4]

也曾得到同样的结论。这意味着不管是在什么应力状态下湿化, 然后进行剪切, 最后得到的强度指标(黏聚力和内摩擦角)是相同的。这一结论对实际工程有一定的指导意义。因为土石料的强度参数一般是利用饱和土三轴试验测定, 即在各向等压条件下饱和, 然后进行剪切; 实际工程中, 不同部位堆石料的应力水平是不同的, 蓄水湿化后对应相同的强度指标就使得设计时可以放心使用各向等压条件下饱和后的剪切试验的强度参数。否则, 就意味着不同应力水平下湿化就有不同的强度指标, 设计取值就很困难。

根据试验资料, 整理出对应围压0.2, 0.6和1.0 MPa的破坏时平均主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)_f分别为1.13, 2.41和3.49 MPa, 画出莫尔圆如图8所示。对所试验的板岩料, 其黏聚力和内摩擦角分别为0.154 MPa和36.5°。如用邓肯非线性强度公式 $\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p_a)$, 则对应强度参数为: $\varphi_0 = 51.1^\circ$, $\Delta\varphi = 5.1^\circ$ 。

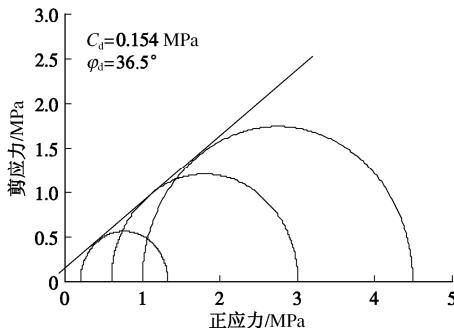


图8 破坏莫尔圆及强度包线

Fig. 8 Morh circle and strength envelop

3 结 论

本文对某堆石坝坝壳板岩堆石料进行了大型三轴湿化变形试验研究, 分析了湿化变形规律, 得到如下结论:

(1) 不同应力水平下, 湿化体积应变随着围压增大而显著增大; 在建立湿化变形模型时应该考虑湿化体积应变随应力状态的变化。

(2) 不同应力水平下湿化, 所产生的湿化剪应变大小不同, 同一围压下, 随着应力水平的提高, 湿化剪应变显著增大。

(3) 试验结果表明沈珠江湿化变形模型不能满意地反映湿化体积应变, 但能较好地反映湿化剪应变与应力状态的关系。

(4) 板岩料湿化后剪切试验表明, 不同应力水平下湿化对粗粒土的强度指标影响很小。

参考文献:

[1] 左元明, 沈珠江. 坝壳砂砾料浸水变形特性的测定[J]. 水利水运科学研究, 1989(1): 107 - 113. (ZUO Yuan-ming, SHEN Zhu-jiang. Deformation character of gravel sand due to wetting[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1989(1): 107 - 113. (in Chinese))

- [2] 魏松, 朱俊高. 粗粒土料湿化变形三轴试验研究[J]. 岩石力学, 2007, 28(8): 1609 - 1614. (WEI Song, ZHU Jun-gao. Study on wetting behavior of coarse-grained soil in triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1609 - 1614. (in Chinese))
- [3] 刘新喜, 夏元友, 刘祖德, 等. 复杂应力下强风化软岩湿化变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 925 - 930. (LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, LIU Zu-de, et al. Experimental study on slaking deformation of intense weathering soft rock under complicated stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 925 - 930. (in Chinese))
- [4] 左永振, 程展林, 姜景山, 等. 粗粒料湿化变形后的抗剪强度分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 559 - 562. (ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, JIANG Jing-shan, et al. Analysis of shearing strength after wetting deformation of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S0): 559 - 562. (in Chinese))
- [5] 魏松, 朱俊高. 粗粒料湿化变形三轴试验中几个问题[J]. 水利水运工程学报, 2006(1): 19 - 23. (WEI Song, ZHU Jun-gao. Discussion on some problems in triaxial wetting test of coarse-grained materials[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1): 19 - 23. (in Chinese))
- [6] 程展林, 左永振, 丁红顺, 等. 堆石料湿化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 243 - 247. (CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, DING Hong-shun, et al. Wetting characteristics of coarse-grained materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 243 - 247. (in Chinese))
- [7] 李鹏, 李振, 刘金禹. 粗粒料的大型高压三轴湿化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 231 - 234. (LI Peng, LI Zhen, LIU Jin-yu. Slaking test of coarse aggregate under high triaxial stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 231 - 234. (in Chinese))
- [8] 彭凯, 朱俊高, 王观琪. 堆石料湿化变形三轴试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1953 - 1960. (PENG Kai, ZHU Jun-gao, WANG Guan-qi. Study on slaking deformation of rockfill materials by triaxial test[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2010,

- [4] 41(5): 1953 – 1960. (in Chinese))
- [9] 朱文君, 张宗亮, 袁友仁, 等. 粗粒料单向压缩湿化变形试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(3): 99 – 102. (ZHU Wen-jun, ZHANG Zong-liang, Yuan you-ren, et al. Study on wetting deformation behavior of coarse-grained materials under axial compression condition[J]. Hydro-science and Engineering, 2009(3): 99 – 102. (in Chinese))
- [10] 李广信. 堆石料的湿化试验和数值模型[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 58 – 64. (LI Guang-xin. Study on wetting of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(5): 58 – 64. (in Chinese))
- [11] ESCUDER I, ANDREU J, RECHEA M. An analysis of stress-strain behaviour and wetting effects on quarried rock shells[J]. Can Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 51 – 60.
- [12] 董建筑, 王瑞骏. 黑河水库初次蓄水大坝湿化变形有限元分析[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(1): 71 – 77. (DONG Jian-zhu, WANG Rui-jun. Finite element analysis of wetting deformation for Heihe earth dam during reservoir filling[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2004, 15(1): 71 – 77. (in Chinese))
- [13] 王登银, 孙 义. 湿化作用对粘土斜心墙坝应力变形影响[J]. 三峡大学学报, 2008, 30(5): 13 – 17. (WANG Deng-yin, SUN Yi. Effect of humidification on stress deformation of earth dam with inclined clay core[J]. Journal of China Three gorges University, 2008, 30(5): 13 – 17. (in Chinese))
- [14] 王登银, 王永明, 孙 义, 等. 湿化效应对沥青混凝土心墙坝的应力变形影响[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 112 – 115. (WANG Deng-yin, WANG Yong-ming, SUN Yi, et al. Effect of humidification on stress deformation of earth-rockfill dam with asphalt concrete core[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(4): 112 – 115. (in Chinese))
- [15] 沈珠江, 王剑平. 土质心墙坝填筑及蓄水变形的数值模拟[J]. 水利水运科学研究, 1988(4): 47 – 63. (SHEN Zhu-jiang, WANG Jian-ping. Numerical simulation of construction behavior of clay core dam and its movement due to reservoir impounding[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1988(4): 48 – 63. (in Chinese))
- [16] 李全明, 于玉贞, 张丙印, 等. 黄河公伯峡面板堆石坝三维湿化变形分析[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 24 – 29. (LI Quan-ming, YU Yu-zhen, ZHANG Bing-yin, et al. Three-dimensional analysis for the wetting deformation of Gongboxia concrete faced rock-fill dam on the Yellow River[J]. Journal of Hydropower Engineering, 2005, 24(3): 24 – 29. (in Chinese))
- [17] 王富强, 郑瑞华, 张 嘎, 等. 积石峡面板堆石坝湿化变形分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 56 – 60. (WANG Fu-qiang, ZHENG Rui-hua, ZHANG Ga, et al. Slaking deformation analysis for Jishixia concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydropower Engineering, 2009, 28(2): 56 – 60. (in Chinese))