

弧形坡脚梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究

芦 琴^{1,2a}, 刘计良^{2a,2b}, 王正中^{2a,3}, 陈立杰^{2a}, 韩彦宝^{2a}, 刘旭东^{2a}

(1 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2 西北农林科技大学 a. 水工程安全与病害防治研究中心, b. 理学院, 陕西 杨凌 712100;

3 中国科学院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

[摘 要] **【目的】**探讨弧形坡脚梯形渠道衬砌结构冻胀破坏的力学模型, 以科学指导衬砌体的设计与建设。**【方法】**通过对弧形坡脚梯形渠道砼衬砌冻胀破坏机理及破坏特征的分析, 指出了弧形坡脚梯形渠道砼衬砌整体结构的计算简图, 是在法向冻胀力、切向冻胀力和重力共同作用下的近似薄壳拱形结构, 基于此建立了该砼衬砌整体结构冻胀破坏的力学模型。**【结果】**求出了冻胀控制内力及最大拉应力的计算公式, 并结合砼板抗裂条件, 给出了胀裂部位、衬砌板厚及抗冻胀破坏验算的一系列计算方法。**【结论】**弧形坡脚梯形渠道砼衬砌结构较梯形渠道法向冻胀力数值小、分布均匀、恢复力大, 整体适应变形及抗冻胀能力强, 从而优于梯形断面, 为弧形坡脚梯形渠道防冻胀设计提供了科学依据。

[关键词] 弧形坡脚梯形; 渠道砼衬砌; 冻胀破坏; 力学模型

[中图分类号] S277; TV67

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)12-0213-05

Research of the frost heaving destruction mechanics model of the concrete lining channel in trapezoidal section with curved slop toe

LU Qin^{1,2a}, LIU Ji-liang^{2a,2b}, WANG Zheng-zhong^{2a,3}, CHEN Li-jie^{12a},
HAN Yan-bao^{12a}, LIU Xu-dong^{2a}

(1 Yangling Vocational & Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 a Research Center of Water Engineering Safety and Disaster Prevention, b College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: **【Objective】** The study discussed the frost heaving destruction mechanic model of the concrete lining channel in trapezoidal section with curved slop toe to guide the design and structure of the lining scientifically. **【Method】** Through analyzing the frost heaving destroy rule and character of the concrete lining channel in trapezoidal section with curved slop toe, the calculation sketch is approximate a thin shell arch structure produced by the normal frost heaving pressure, the tangential frost heaving pressure and gravity together and based on this, the frost heaving mechanics model of this structure is given. **【Result】** The calculation formula of the frost heaving control internal force and the maximum draw stress is worked out. Combined with the anti-crack term of the concrete board, a series of calculation methods for the crack part, lining board thickness and anti-frost heaving destruction checking are obtained. **【Conclusion】** Theoretical analysis shows that, compared with the trapezoidal section, the normal frost heaving pressure of the concrete lining channel in trapezoidal section with curved slop toe is smaller, more equally distributed with good resilience and stronger ability in adapting distortion wholly and anti-frost heaving. It provides science gist to the anti-frost heaving

* [收稿日期] 2009-03-26

[基金项目] 国家“863”计划项目(2002AA62Z3191); 国家冻土工程重点实验室基金项目(9901)

[作者简介] 芦 琴(1979—), 女, 新疆石河子人, 在读博士, 主要从事冻土本构研究。E-mail: lqyjk0993@126.com

[通信作者] 王正中(1963—), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构及冻土本构研究。

E-mail: wangzz0910@yahoo.com.cn

design of the concrete lining channel in trapezoidal section with curved slop toe.

Key words: trapezoidal section with curved slop toe; concrete lining channel; frost heaving destruction; mechanic model

渠道衬砌是减少输水损失、保护岸坡稳定、有效控制地下水位普遍使用的工程措施,在发展节水灌溉中占有十分重要的地位。研究表明,没有衬砌的土渠,其渗漏损失约占总引水量的 40%~60%。渠道防渗衬砌在很大程度上有效提高了水的利用效率,促进了节水农业的发展。在广大北方季节性冻土地区,冬季气候寒冷,低温持续时间长,自然冻深较大,加之周而复始的昼夜温差作用,使渠道衬砌工程普遍存在严重的冻胀破坏,渠道衬砌工程使用寿命严重缩短,渠道衬砌的冻胀破坏成为影响和制约渠道建设的一大难题。

弧形坡脚梯形渠道是近年来发展起来的一种渠道形式,是渠道防渗工程技术规范推荐使用的一种渠道形式^[1]。对于宽浅式梯形渠道,将折线坡脚改成弧形坡脚,可以改善衬砌板对基土冻胀的约束,使冻胀分布较为均匀,虽然渠底的冻胀力和冻胀不均匀系数均较大,但其量值较梯形渠道小,且一般无残留冻胀量,衬砌板不易产生冻胀破坏^[2]。但到目前为止,对该种形式衬砌结构的设计,仍无明确计算简图及结构计算方法。尽管梯形断面衬砌已有初步力学模型^[3-4],但关于弧形坡脚梯形渠道的力学模型,目前还没有相关研究,以往采用有限的地区性原型试验及室内试验和有限元数值模拟分析^[4],均无法提出通用、简单、量化、且便于工程设计应用的力学模型。因此,寻求近似量化简单通用的弧形坡脚梯形渠道衬砌冻胀破坏的力学模型,以指导工程实践非常必要。为此,本研究在总结前人研究成果的基础上^[2-13],通过恰当的假设及简化,依据工程力学及冻土力学理论与方法,提出了弧形坡脚梯形渠道衬砌冻胀破坏的简化力学模型,以期对相关工程的设计和施工提供参考。

1 弧形坡脚梯形渠道衬砌的冻胀破坏特征及控制状态

1.1 冻胀破坏特征

弧形坡脚梯形渠道与梯形渠道衬砌体的破坏特征存在相似之处,如冻胀方向为法线方向;渠顶冻胀力及冻结力在渠顶小,渠底大;渠底中线附近往往发生裂缝。与梯形渠道主要区别为:(1)现浇整体式弧形坡脚梯形渠道衬砌体整体性强,在阴阳两侧

不同法向冻胀力的作用下,整体上抬位移较大,同时也发生微小的整体侧移,从而对冻胀力及冻结力分布都具有均匀化调整作用;(2)其断面曲线连续变化,不像梯形断面在坡脚处突变而使坡板与底板相互制约不能变位。因而弧形坡脚梯形断面的冻胀变形、法向冻胀力的大小及方向变化是均匀连续的,从而使法向冻胀力减小。总之,正是由于弧形坡脚梯形渠道特有的特点,使其表现出冻胀变形的连续性和较强的复位能力。因此,渠道衬砌整体结构的计算简图,可以看作在法向冻胀力及切向冻结力和重力共同作用下的近似薄壳拱形结构,使冻胀力、冻结力的自动调整减小且均匀化。为分析方便,近似认为该对称结构达到极限平衡状态时,受力也达到基本对称状态。

1.2 控制状态

弧形坡脚梯形渠道衬砌的冻胀破坏过程,可以认为是在负温作用下,阴坡及弧底首先产生冻胀变形及法向冻胀力,使衬砌结构整体产生上抬、侧移,通过这种位移协调及变形释放,使弧形坡脚梯形渠道衬砌结构上的冻胀力、冻结力及内力发生重调整,当阳坡衬砌板下冻结力约束达到极限时,冻胀力也达到极限值,阳坡衬砌板会产生与冻结基土间的剪切破坏,衬砌结构会产生较大的冻胀变形而破坏。此时,冻胀力及衬砌体的控制内力达到极大值,即达到该渠道冻胀破坏的控制状态,而在此之前,冻胀积累不足以使衬砌体承载力达到极限值。因此,按此时的结构受力进行衬砌板结构设计,能使整体与局部冻胀破坏同步,因而是经济合理的。

2 弧形坡脚梯形渠道衬砌冻胀破坏的力学模型

2.1 基本假设及简化

根据前人的研究成果^[2-13],提出以下假设:(1)达到极限破坏状态时,冻土及衬砌混凝土均为线弹性材料,结构变形仍为小变形,可应用迭加原理。极限破坏状态指整个结构超过某一特定状态就不能满足设计规定的要求。

(2)渠床土冻结前已固结完成,不计未冻土的压缩效应。

(3)冻土的弹性模量远小于混凝土(一般为1/10

左右),冻土不参与衬砌板的弯曲变形,只对衬砌板施加冻胀力,并提供被动冻结约束。

(4)渠坡衬砌板顶部基土含水量达到起始冻结含水量或在低温下毛管水刚好能补给到渠顶处。

(5)就渠坡段、坡脚及渠底段单独而言,近似为单向冻结。

(6)坡板衬砌上法向冻胀力沿渠坡线性分布,坡板和坡脚相接处最大,坡脚板和渠底板上的法向冻胀力均匀分布。

(7)渠坡衬砌板上切向冻结力沿坡长线性分布,在坡板和坡脚相接处达到最大值,在弧形坡脚上也为线性分布,在坡脚和底板相交处为零,忽略底板的切向冻结力。

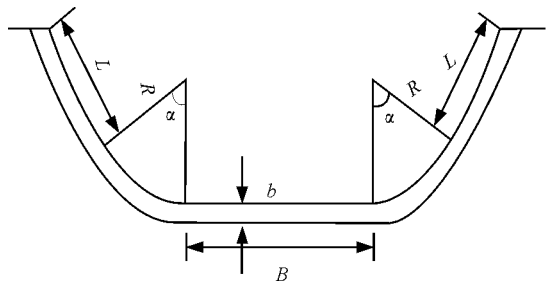


图 1 砼衬砌弧形坡脚梯形渠道计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of concrete lining trapezoidal canal with arc-angle

极限平衡状态时,弧形坡脚梯形渠道砼衬砌结构上切向冻结力分布如图 3 所示,图 3 中 τ 为最大切向冻结力。

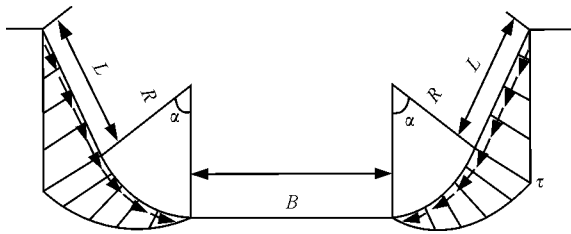


图 3 砼衬砌弧形坡脚梯形渠道切向冻结反力的分布

Fig. 3 Distribution of tangential freezing reaction of concrete lining trapezoidal canal with arc-angle

根据图 2 和图 3 建立平衡方程,切向冻结力最大值为阳坡衬砌板与冻结基土之间的最大冻结力,确定其值取决于土质、负温及土壤含水量等因素,属已知反力,根据竖直方向的平衡条件,可得:

$$qL\cos\alpha + 2qR\sin\alpha + qB = \tau L\sin\alpha + 2b\gamma(L + R + \frac{B}{2}) \quad (1)$$

式中: γ 为单位长度渠道衬砌板的质量。

令坡脚直径和坡板长之比为 $n = \frac{2R}{L}$ 。则由式

(8)通过衬砌结构整体上抬及微小侧移的变位协调,将各向冻胀力及冻结力重新调整,近似认为外力及内力近似接近于对称分布。

(9)弧形坡脚梯形渠道的砼衬砌结构近似简化为,在法向对称分布的冻胀力、重力作用及在切向冻结力约束下,保持静力平衡的近似薄壳拱形结构。

2.2 弧形坡脚梯形渠道砼衬砌结构计算的简图

弧形坡脚梯形渠道砼衬砌结构断面的尺寸如图 1 所示。设坡板长为 L ,弧形坡脚的弧半径为 R ,坡角为 α ,则边坡系数为 $m = \text{ctg}\alpha$ 。

极限平衡状态时,弧形坡脚梯形渠道砼衬砌结构上法向冻胀力的分布如图 2 所示,图 2 中 q 为最大法向冻胀力。

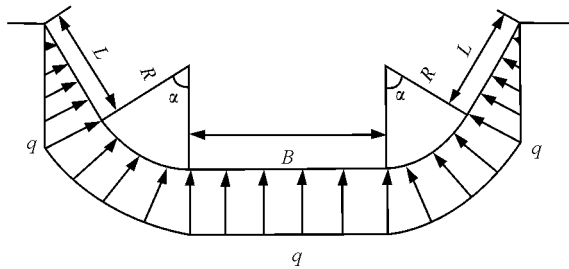


图 2 砼衬砌弧形坡脚梯形渠道法向冻胀力的分布

Fig. 2 Distribution of normal frost-heaving force of concrete lining trapezoidal canal with arc-angle

(1)解得法向冻胀力的最大值为:

$$q = \frac{\tau}{m + n + \frac{B}{L\sin\alpha}} + \frac{(2 + n\alpha + \frac{B}{L})b\gamma}{(m + n)\sin\alpha + \frac{B}{L}} \quad (2)$$

式中: m 为边坡系数。

当 $R=0$ 时,弧形坡角梯形渠道即为梯形渠道,其砼衬砌的法向冻胀力可简化为^[5]:

$$q = \frac{\tau}{0.66m + n} + \frac{n\gamma b}{0.66m + n} \quad (3)$$

比较式(2)及式(3),从第 1 项可以看出,弧形坡脚梯形渠道的法向冻胀力明显小于梯形断面,表明采用弧形坡脚梯形渠道时冻结基土对衬砌约束减弱;从第 2 项可以看出,弧形坡脚梯形渠道质量产生的法向冻胀力明显大于梯形断面,说明弧形坡脚梯形断面的质量使其冻胀变形的恢复力更强。

3 弧形坡脚梯形渠道砼衬砌冻胀破坏力学模型的求解

3.1 边坡板内力

在计算边坡板内力时,取坐标原点在坡顶处,并以沿渠线单位长度的衬砌板为研究对象,则轴力:

$$N(x)=\frac{\tau+\gamma b\sin\alpha}{2L}x^2,(0\leq x\leq L)。(4)$$

式中: $N(x)$ 为轴力, x 为边坡板的横坐标。

弯矩:

$$M(x)=\frac{q}{6L}x^3-\frac{b\tau}{4L}x^2-\frac{\gamma b\cos\alpha}{2}x^2,(0\leq x\leq L)。(5)$$

式中: $M(x)$ 为弯矩。

剪力:

$$Q(x)=\frac{q}{2L}x^2-\gamma b\cos\alpha x,(0\leq x\leq L)。(6)$$

式中: $Q(x)$ 为剪力。

坡板内力的最大值在坡板和坡脚相接处取值,将 $x=L$ 代入式(4)~(6)中,可得到坡板的控制内力:

$$N=\frac{\tau+\gamma b\sin\alpha}{2}L, (7)$$

$$M=\frac{q}{6}L^2-\frac{b\tau}{4}L-\frac{\gamma b\cos\alpha}{2}L^2, (8)$$

$$Q=\frac{q}{2}L-\gamma b\cos\alpha L。 (9)$$

3.2 弧形坡脚内力

计算弧形坡脚板内力时,为计算方便,将坐标原点设在坡脚和底板的交接处,分析简图见图 4。

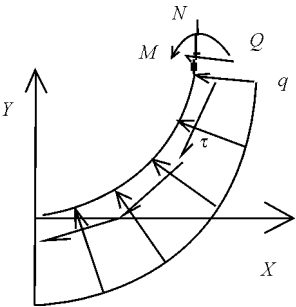


图 4 砼衬砌弧形坡脚梯形渠道的坡脚受力简图

Fig. 4 Calculation diagram of arc-angle plate lining of concrete lining trapezoidal canal with arc-angle

坡脚的控制内力位于坡脚与边坡板及底板的交接处。前面已经求得坡脚和边坡板交接处的控制内力见式(7)、(8)、(9)。则根据建筑力学,可计算坡脚和底板交接处的控制内力为:

$$N_0=-Q\sin\alpha+N\cos\alpha-q(R-R\cos\alpha)-\frac{\tau R}{\alpha}(\alpha\sin\alpha+\cos\alpha-1), (10)$$

$$M_0=\frac{q}{2}R^2\sin^2\alpha+\frac{(QR\sin(2\alpha))}{2}+M+2NR\sin^2(\frac{\alpha}{2})-\frac{\gamma bR^2\alpha\sin\alpha}{2}。 (11)$$

内力图如图 5 所示。

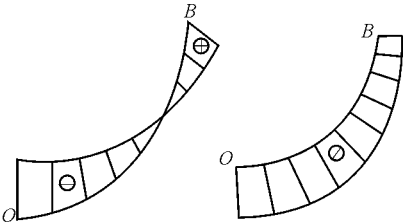


图 5 砼衬砌弧形坡脚梯形渠道底板内力的分布

Fig. 5 Internal forces diagram of arc-bottom plates lining of concrete lining trapezoidal canal with arc-angle

3.3 底板控制内力

底板上的冻胀力分布均匀,其大小主要取决于坡脚板产生的约束力大小。若约束力太小时,渠底板在法向冻胀力的作用下即产生较大的上抬位移,以维持系统的静力平衡条件。当最大轴力为 N_0 ,则跨中的最大弯矩为:

$$M_{\max}=\frac{1}{8}(q-\gamma b)B^2。 (12)$$

由假设(7),可忽略渠底板上的剪力。

3.4 弧形坡脚梯形渠道衬砌板控制应力及抗裂验算

对于两侧坡板、坡脚板和弧底板,其受力形式均可概化为压弯构件,砼衬砌板的胀裂与否,取决于衬砌板的最大拉应力及拉应变是否超过其允许值,根据文献[3]可知,剪力不会导致衬砌板胀裂破坏。

对于坡板,最大拉应力为:

$$\sigma_{\max}=\frac{6M}{b^2}-\frac{N}{b}。 (13)$$

$\sigma_{\max}$ 位于坡板和坡脚交接处。

对于坡脚板,最大拉应力为:

$$\sigma_{\max}=\frac{6M_0}{b^2}-\frac{N_0}{b}。 (14)$$

$\sigma_{\max}$ 位于坡脚和底板交接处。

对于底板,最大拉应力为:

$$\sigma_{\max}=\frac{6M_{\max}}{b^2}-\frac{N_0}{b}。 (15)$$

$\sigma_{\max}$ 位于底板中部。

式(13)~(15)的弯矩和轴力的表达式同前文, b 为衬砌板厚度。

对应的最大拉应变及抗裂条件为:

$$\frac{\sigma_{\max}}{E_c}\leq\epsilon_l。 (16)$$

E_c 和 ϵ_l 可根据砼等级查相关文献得到。工程实际中,如不满足抗裂要求,应采取冻害防治措施。

4 结 论

(1)建立了弧形坡脚梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的简化力学模型及设计方法。

(2)给出了边坡板、弧形坡脚及底板控制内力的计算公式。

(3)本研究中的衬砌结构是在假定衬砌体结构不发生局部强度破坏的前提下且整体达到极限状态的,这是对称性假设的前提。实际中也许会由于施工或衬砌材料或结构尺寸或大型衬砌渠道整体刚度小等原因,使其因局部强度不足而提前破坏,此时按以上模型求解的内力也必然是偏大偏安全的,如对大型衬砌渠道过于安全则会使衬砌体太厚,这时应按局部破坏设计,即非对称性问题。

(4)本研究所建立的力学模型,未考虑弧形坡脚梯形渠道衬砌顶部约束影响,这基本符合工程实际。如果具体工程中地表含水量较大或有意加强对渠顶部衬砌板的约束,同样也可建立类似的力学模型,只是求解中应以侧板上最大弯矩取极小值为目标,确定各类冻胀力及支座反力和内力。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范(SL-2004) [S]. 北京:水利水电出版社,2004.
The Ministry Water Resources of the People's Republic of China. Technique specification for seepage prevention engineering on canal SL-2004 [S]. Beijing:China Waterpower Press,2004. (in Chinese)
- [2] 李安国,陈瑞杰,杜应吉,等. 渠道冻胀模拟试验及衬砌结构受力分析 [J]. 防渗技术,2000(1):5-16.
Li A G,Chen R J,Du Y J,et al. The stimulation test of frost-heaving for canal with concrete lining and mechanical analysis [J]. Technique of Seepage Control,2000(1):5-16. (in Chinese)
- [3] 王正中. 梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究 [J]. 农业工程学报,2004,20(3):24-29.
Wang Z Z. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(3):24-29. (in Chinese)
- [4] 王正中,万 斌,姬红云,等. 混凝土渠道衬砌底板裂缝的计算与探讨 [J]. 干旱地区农业研究,2003,21(3):78-81.
Wang Z Z,Wan B,Ji H Y,et al. Discussion and calculation of the crevices in concrete underlying board of water channel [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2003,21(3):78-81. (in Chinese)
- [5] 王正中,李甲林,陈 涛,等. 弧底梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究 [J]. 农业工程学报,2008,24(1):18-23.
Wang Z Z,Li J L,Chen T,et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concretelining trapezoidal canal with arc-bottom [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(1):18-23. (in Chinese)
- [6] 郭利霞,王正中,李甲林,等. 梯形与准梯形渠道冻胀有限元分析 [J]. 节水灌溉,2007(4):44-47.
Guo L Y,Wang Z Z,Li J L,et al. Finite element analysis on frost-heaving of channel with trapezoidal or quasi-trapzoidal cross section based on ANSYS software [J]. Water Saving Irrigation,2007(4):44-47. (in Chinese)
- [7] 张 茹,宋孝斌. 大 U 形混凝土渠道冻胀破坏的力学模型探讨 [J]. 东北水力水电,2007,25(6):4-7.
Zhang R,Song X B. Discussion on frost heave mechanical model of canal with U-shape concrete lining [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2007,25(6):4-7. (in Chinese)
- [8] 辛英华,王正中. U 型衬砌渠道结构及水力最佳断面的分析 [J]. 节水灌溉,2008(2):36-38.
Xin Y H,Wang Z Z. The structural and hydraulic analysis on frost-heaving concrete lining of the U-shape canal [J]. Water Saving Irrigation,2008(2):36-38. (in Chinese)
- [9] 余书超,宋 玲. 刚性衬砌渠道受冻胀时衬砌层受力的试验研究 [J]. 中国农村水利水电,2001(9):4-5.
Yu S C,Song L. Experimental research on stressing status of rigid lining of canals under frost up heaval [J]. China Rural Nater and Hydropower,2001(9):4-5. (in Chinese)
- [10] 张 茹,王正中,陈 涛,等. 基于非对称冻胀破坏的大 U 形混凝土衬砌渠道力学模型 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(11):217-223.
Zhang R,Wang Z Z,Chen T,et al. Establishment and application of mechanic models of dissymmetric frost heaving damage of U-shape canal with concrete lining [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat Sci Ed,2008,36(11):217-223. (in Chinese)
- [11] 安维东,吴紫汪,马 巍,等. 冻土的温度水分应力及其相互作用 [M]. 兰州:兰州大学出版社,1989.
An W D,Wu Z W,Ma W,et al. Interaction among temperature,moisture and strss fields in frozen soil [M]. Lanzhou: Press of Lanzhou University,1989. (in Chinese)
- [12] 任之忠. 我国大 U 形防渗渠道应用总结 [J]. 防渗技术,1996(4):1-10.
Ren Z Z. Application summary of large U-shaped impermeable channels of China [J]. Technique of Seepage Control,1996(4):1-10. (in Chinese)
- [13] 李学军,费良军,穆红文. U 形衬砌渠道冻胀机理与防渗技术研究 [J]. 干旱地区农业研究,2006,24(3):194-199.
Li X J,Fei L J,Mu H W. The study of frost-heave mechanism and seepage technical control on U canal [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2006,24(3):194-199. (in Chinese)