

# 先张法预应力波型板桩截面分析与力学试验

黄建华<sup>1,2</sup>,朱永涛<sup>1,2</sup>,覃少杰<sup>1,2</sup>,常建华<sup>1,2</sup>

(1.福建工程学院 土木工程学院 福建 福州 350118; 2.地下工程福建高校重点实验室 福建 福州 350118)

**摘要:** 分析了先张法预应力混凝土波型板桩自身截面原形的力学性能,克服了以往将波形板桩截面等效简化为工字型截面的计算过程复杂繁琐且易产生误差的缺点,新的计算分析方法较以往等效截面计算方法更加科学合理,过程简单清晰,结果误差小。同时结合理论分析进行波型板桩抗弯和抗剪力学试验,对比理论计算结果与力学试验数据,两者吻合较好,验证了理论分析方法合理可靠。

**关键词:** 先张法;预应力;波型板桩;等效截面法;力学性能试验

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)04-0307-06

## Section analysis and mechanical test of pre-tensioned pre-stressed corrugated sheet piles

HUANG Jianhua<sup>1,2</sup>, ZHU Yongtao<sup>1,2</sup>, QIN Shaojie<sup>1,2</sup>, CHANG Jianhua<sup>1,2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The mechanical properties of the original sections of pre-tensioned pre-stressed waveform sheet piles were analyzed. It overcame the problems in the equivalent simplification of corrugated sheet pile's sections into I-shaped sections, whose process was complicated and easy to produce calculation errors. Compared with the previous equivalent section calculation method, the new method is more scientific and reasonable, and the calculation process is simple and clear, which could produce more accurate results. Bending and shearing mechanical tests of the corrugated sheet piles were carried out in combination with theoretical analysis. A comparison of the theoretical calculation results and the mechanical experimental data analysis showed that they were in good agreement, which proved that the theoretical analysis method is reasonable and reliable.

**Keywords:** pre-tensioning method; pre-stress; corrugated sheet piles; equivalent section method; mechanical property test

预应力混凝土板桩作为一种新生的预制混凝土直立挡土支护结构,在土地资源日益紧缺的城市区域内的河道整治工程、市政管道工程、基坑支护工程的建设中可以极大程度的减少征地面积,降低对周边环境的影响<sup>[1-3]</sup>。由于独特的结构截面设计使其在力学性能、挡土止水等方面具

有一定优势,因此得到了广泛的应用。近些年来,随着建筑行业的不断进步,混凝土板桩的制造工艺不断提升,其截面形式也由单一的矩形截面发展到方形薄壁、工字形薄壁等形式<sup>[4-5]</sup>。

当前,在水利、港口、码头等工程领域中常见的挡土结构主要有普通混凝土平板桩、钻孔灌注

收稿日期: 2018-02-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678153);福州市科技计划项目(2017-G-69);校企合作开发基金项目(GY-Z17145)

第一作者简介: 黄建华(1969-),男,福建莆田人,教授,博士(后),研究方向:岩土与环境、地下围护与结构。

桩以及地下连续墙等传统的支护方式。此类支护结构的共同特点为需现场施工浇筑混凝土,从而导致施工周期变长,工程成本提高。而预制混凝土板桩可以很好地解决现浇混凝土支挡结构现有的缺点。先张法预应力波形板桩(以下简称“波形板桩”)作为一种新型挡土支护用预制混凝土板桩,相对于传统的混凝土支护桩具有结构挡土截面大、抗弯抗剪强度高、施工工期短、经济生态效益显著等优点<sup>[6-7]</sup>,是一项绿色节能工程产品,对河岸驳堤、边坡基坑等工程应用技术有重要意义。

## 1 波形板桩截面设计

### 1.1 板桩截面形式

在水利边坡与基坑支护工程中,要求支护结构不但要满足挡土要求,还要具有止水功效。波形板桩截面设计形式可以同时发挥挡土与止水作用,截面形式借鉴了钢板桩的力学性能优越性和材料制作的经济性。结合混凝土板桩截面形式与河岸、边坡工程的支护挡水要求,新型预应力波形板桩的截面形式如图 1 所示,截面设计利用槽榫搭接的方式实现桩与桩之间的搭接,并发挥其止水作用<sup>[8]</sup>。



图 1 预应力波形板桩截面简图

Fig.1 Cross-section of a prestressed corrugated sheet pile

### 1.2 截面有效预压应力计算

混凝土的弹性变形、徐变、收缩以及预应力钢筋的松弛是混凝土波形板桩截面有效预压应力的主要影响因素。此外,张拉锚具的变形和钢筋内缩、混凝土蒸汽养护、预应力钢筋的应力松弛以及混凝土收缩和徐变同样会引起预应力钢筋预应力的损失<sup>[9]</sup>。一般来说,当分析所得的预应力总损失值小于 100 MPa 时,取 100 MPa。桩身混凝土有效预压应力  $\sigma_{ce}$  具体可以参考《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中有关混凝土有效预压应力值的方法进行分析<sup>[10]</sup>。

## 2 波形板桩力学性能计算

### 2.1 桩身抗裂弯矩计算

根据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)波形板桩抗裂弯矩  $M_{cr}$  按式(1)计算:

$$M_{cr} = (\sigma_{ce} + \gamma \cdot f_{tk}) \cdot W_0 \quad (1)$$

式中:  $M_{cr}$  为波形板桩桩身抗裂弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $\sigma_{ce}$  为波形板桩桩身截面混凝土有效预压应力, MPa;  $f_{tk}$  为桩身混凝土抗拉强度标准值,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $\gamma$  为混凝土截面抵抗矩塑性影响系数;  $W_0$  为板桩换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩,  $\text{mm}^4$ 。

### 2.2 桩身正截面抗弯承载力计算

波形板桩采用预应力结构,在保证构件结构强度的同时降低了构件的结构配筋率<sup>[11-12]</sup>。取桩身正截面受弯承载力计算示意图如图 2,本文以截面高度为 450 mm 和 600 mm 的桩型作为主要研究对象,进行力学性能分析。

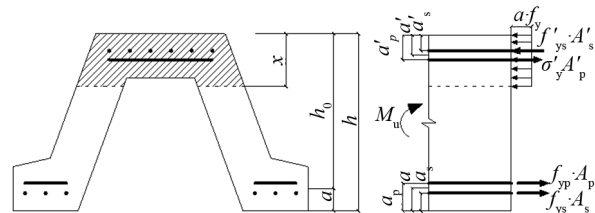


图 2 波形板桩受弯承载力计算示意图

Fig.2 Calculation of bending bearing capacity of a corrugated sheet pile

由于波形板桩顶板位于受压区内,故受压区高度的不同会引起受压区截面形式的变化如图 3。

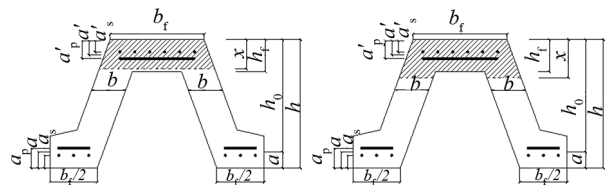


图 3 波形板桩受压区高度

Fig.3 Height of compression zone of a corrugated sheet pile

图 3 中,  $h_0$  为截面有效高度;  $b$  为波形板桩腹板宽度;  $b_f$  为波形板桩顶板厚度;  $x$  为混凝土的受压区高度;  $a_p$  为受拉区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受拉边缘的距离;  $a'_p$  为受压区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至

截面受压边缘的距离。

①若符合式(2)的条件,按高度为 $x$ 的梯形截面分析。

$$f_{py} A_p + f_y A_s \leq \alpha_1 f_c A_{cl} + f'_y A'_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p \quad (2)$$

②若不符合式(2)的条件,其正截面的受弯承载力按下列公式计算。

根据力矩平衡条件可知:

$$M \leq \alpha_1 f_c A_{cl} \left( h_0 - \frac{h_f}{2} \right) + 2 \alpha_1 f_c \times \frac{b(x - h_f)}{2} \cdot \left[ h_0 - h_f - \frac{(x - h_f)}{2} \right] + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (3)$$

根据水平方向力的平衡条件可得:

$$f_{py} A_p + f_y A_s = \alpha_1 f_c [A_{cl} + b(x - h_f)] + f'_y A'_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p \quad (4)$$

适用条件为:

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (5)$$

$$x \geq 2a' \quad (6)$$

$$\text{其中, } \xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{cu}} + \frac{f_y - \sigma_{p0}}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (7)$$

如果 $x \leq 2a'$ ,可近似按以下方法计算。

若 $\sigma'_p$ 为压应力,则取 $x = 2a'$ ,对受压区合力点取矩:

$$M \leq f_{py} A_p (h - a'_p - a_p) + f_y A_s (h - a'_p - a_s) \quad (8)$$

若 $\sigma'_p$ 为拉应力,取 $x = 2a'_s$ ,令弯矩 $\sum M = 0$ 可得:

$$M \leq f_{py} A_p (h - a'_s - a_p) + f_y A_s (h - a_s - a'_s) + (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (a'_p - a'_s) \quad (9)$$

式中: $M$ 为弯矩设计值, $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度设计值;  $\xi_b$ 为相对界限受压区高度;  $A_{cl}$

为波型板桩顶板面积;  $\alpha_1$ 为系数,根据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中的规定进行计算;  $\sigma'_{p0}$ 为受压区纵向预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时预应力钢筋应力;  $a_s$ 为受拉区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受拉边缘的距离;  $a'_s$ 为受压区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离。

### 2.3 桩身抗剪承载力计算

当配有箍筋时,波型板桩斜截面的抗剪承载力 $Q_p$ 应按《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)第6.3.4条的规定计算:

$$Q_p = V_{cs} + V_p \quad (10)$$

式中: $Q_p$ 为波形板桩斜截面抗剪承载力设计值, $\text{kN}$ ;  $V_{cs}$ 为预应力波形板桩斜截面混凝土和横向钢筋抗剪承载力设计值, $\text{kN}$ ;  $V_p$ 为由预应力所增加的部件抗剪承载力设计值, $\text{kN}$ 。

$$\text{其中, } V_{cs} = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_c b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{S} h_0 \quad (11)$$

$$V_p = 0.05 N_{p0} \quad (12)$$

式中: $\lambda$ 为计算截面的剪跨比,取 $\lambda = 1.5$ ;  $f_{yv}$ 为横向钢筋抗拉强度设计值, $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $A_{sv}$ 为横向钢筋的截面面积, $\text{mm}^2$ ;  $S$ 为沿长度方向的横向钢筋间距, $\text{mm}$ ;  $N_{p0}$ 为计算截面上混凝土法向预应力等于零时纵向钢筋的合力, $\text{N}$ ;  $\sigma_{p0}$ 为预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋应力, $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

### 2.4 计算实例

依据上文理论计算公式,计算不同截面高度波型板桩的力学性能,构件采用C60高性能混凝土,纵向受力钢筋采用直径为15.2 mm的预应力钢绞线,其中顶板与底板预应力钢绞线的数量相同,箍筋按照规范要求配置 $1\Phi 8@200$ 。为与试验形成对比,理论计算时波型板桩原材料的力学性能均采用标准值。各详细参数及计算过程见表1、表2。

表1 波型板桩截面尺寸及配筋情况表

Tab. 1 Section size and reinforcement of a corrugated sheet pile

截面高度/ mm	板厚/ mm	截面宽度/ mm	翼缘高度/ mm	底边长/ mm	腹板厚度/ mm	型号	预应力 筋数量	钢筋规格/ mm	钢筋类型
450	120	1 000	120	440	240	AB+	12	15.2	钢绞线
450	120	1 000	120	440	240	B+	16	15.2	钢绞线

续表 1

截面高度/ mm	板厚/ mm	截面宽度/ mm	翼缘高度/ mm	底边长/ mm	腹板厚度/ mm	型号	预应力 筋数量	钢筋规格/ mm	钢筋类型
600	150	1 000	150	440	300	AB+	12	15.2	钢绞线
600	150	1 000	150	440	300	B+	16	15.2	钢绞线

表 2 波型板桩力学性能分析表

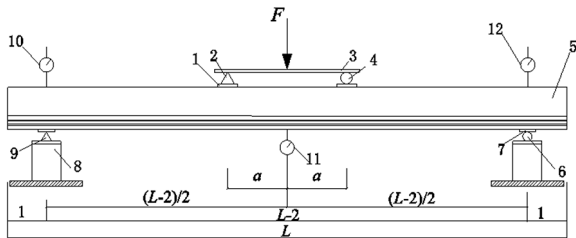
Tab. 2 Mechanical property analysis of corrugated sheet piles

截面高度/ mm	型号	混凝土截 面惯性矩/mm <sup>4</sup>	复合截面 惯性矩/mm <sup>4</sup>	抗弯模量/ mm <sup>3</sup>	$\sigma_{pt}$ / (N · mm <sup>-2</sup> )	$\sigma_{ce}$ / (N · mm <sup>-2</sup> )	$M_{cr}$ / (kN · m)	$M_u$ / (kN · m)	$Q_p$ / kN
450	AB+	3 510 867 776	3 758 615 276	16 704 957	1 238.5	10.16	236.5	515.6	324.9
450	B+	3 510 867 776	3 841 197 776	17 071 990	1 218.7	12.93	289.3	620.9	329.5
600	AB+	8 392 958 238	8 917 118 238	29 723 727	1 255.8	7.58	335.9	703.1	344.9
600	B+	8 392 958 238	9 091 838 238	30 306 128	1 241.2	9.77	408.8	937.4	370.9

### 3 载荷试验与分析

#### 3.1 抗弯试验

采用简支梁对称加载装置对波型板桩进行抗弯试验分析,如图 4 所示,其中竖向荷载  $F$  的方向垂直于地面(波型板桩的轴线与地表平行)。抗弯试验用的波型板桩要求截面高度为 450 mm 单节桩长不得小于 6 m,截面高度为 600 mm,单节桩长不得小于 7 m,且最大桩长均不超过 15 m。本实验中采用截面高度 450 mm 的 AB+型波型板桩进行抗弯试验,桩长为 12 m。



注:1 分配梁铰支座垫板;2 分配梁固定铰支座;3 分配梁;4 分配梁滚动铰支座;5 波型板桩;6 滚动铰支座;7 支墩铰支座垫板;8 支墩;9 固定铰支座;10、11、12 测挠度用百分表。

图 4 波型板桩抗弯试验示意图

Fig.4 Bending test of a corrugated sheet pile

#### (1) 加载程序

第一步:根据抗裂弯矩的大小以 20% 的差值,由 0 逐级加载至抗裂弯矩的 80%,每级荷载的

持续时间 180 s;然后再以抗裂弯矩的 10% 为差值,由 80% 逐级加载至 100%。每级荷载的持续时间 180 s,观察是否有裂缝出现,测量并记录各项读数。

第二步:若加载至抗裂弯矩的 100% 时,桩身没出现裂缝,则以抗裂弯矩 5% 的差值继续加载至桩身出现裂缝。每级荷载弯矩的持续时间依然 180 s,观察并记录出现裂缝时荷载大小及裂缝宽度。

第三步:按极限弯矩 5% 的级差继续加载,构件达到极限状态的标志有以下 3 种:桩身受拉区范围内裂缝宽度达到 1.5 mm;受拉钢筋被拉断;受压区混凝土破坏;出现以上任一现象时,观察并记录出现裂缝时荷载大小及裂缝宽度。

#### (2) 弯矩计算公式

垂直向下加载:

$$M = \frac{F}{2} \left( \frac{L}{2} - a - 1 \right) + \frac{G}{8} (L - 4) \quad (13)$$

垂直向上加载:

$$M = \frac{F}{2} \left( \frac{L}{2} + a - 1 \right) + \frac{G}{8} (L - 4) \quad (14)$$

水平加载:

$$M = F \left( \frac{L}{2} - a - 1 \right) \quad (15)$$

式中:  $M$  为抗弯弯矩;  $G$  为波形板桩重量;  $L$  为波形板桩长度;  $F$  为试验荷载值;  $a$  为 1/2 的加荷跨距,长度为 0.5 m。

### (3) 抗裂荷载和极限荷载的确定

抗裂荷载的取值方法如表3所示,极限荷载的取值方法如表4所示。

表3 抗裂荷载的取值方法

Tab.3 Value selection method of the crack resistance load

试验阶段	裂缝出现次数	抗裂荷载取值
正在加载阶段	第一次	前一级荷载值
荷载持续阶段	第一次	前一级与本级荷载平均值
荷载持续结束	第一次	本级荷载值

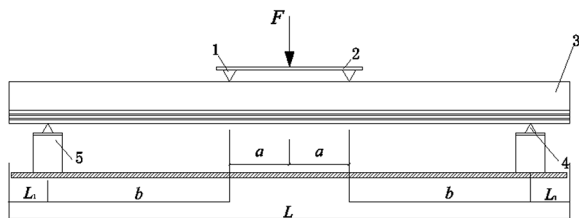
表4 极限荷载的取值方法

Tab.4 Value selection method of the ultimate load

极限状态所处阶段	极限荷载取值
正在加载阶段	前一级荷载值
荷载持续阶段	前一级与本级荷载平均值
荷载持续结束	本级荷载值

## 3.2 抗剪试验

利用对称加载装置进行波型板桩的抗剪试验,如图5,其中, $F$ 垂直于地面方向,剪跨 $b$ 取 $2.0H$ ,试件悬出长度 $L_1$ 取 $(2.0\sim 3.0)H$ 。 $L$ 试验用波型板桩长度; $1/2a$ 的加荷跨距,长度 $0.5m$ ;



注:1 分配梁支点;2 分配梁;3 波型板桩;4 铰支座;5 支墩;

图5 波型板桩抗剪试验示意图

Fig.5 Shearing test of a corrugated sheet pile

### (1) 加载程序

第一步:根据抗剪承载力设计值以20%的差

值,由0逐级加载至剪力设计值的80%,每级荷载的持续时间为180s;然后再以剪力设计值的10%为差值,逐级加载至100%。每级荷载的持续时间保持180s,观察是否有裂缝出现,测定并记录各项读数。

第二步:若加载至剪力设计值的100%时桩身没有出现裂缝,则以剪力设计值的5%为差值继续加载至桩身出现裂缝。每级荷载弯矩的持续时间依然为180s,观察并记录出现裂缝时荷载大小及裂缝宽度。

### (2) 抗剪承载力计算公式

实测抗剪承载力按下式计算:

$$Q = \frac{F}{2} \quad (16)$$

式中: $Q$ 为抗剪承载力; $F$ 为剪跨内产生斜拉裂纹时的荷载。

### (3) 抗剪承载力的确定

抗剪承载力的取值方法如表5所示。

表5 抗剪承载力的取值方法

Tab.5 Value selection method of the shear strength

试验阶段	裂缝出现次数	抗剪承载力取值
正在加载阶段	第一次	前一级荷载值
荷载持续阶段	第一次	前一级与本级荷载平均值
荷载持续结束	第一次	本级荷载值

## 3.3 试验结果分析

以截面高度450mm的AB+型波型板桩为实例,表6列出了此种桩型的抗裂弯矩、抗剪承载力、极限弯矩理论值、实验值以及二者比值。通过分析计算,抗裂弯矩实验值与理论值的比值为1.21,抗剪承载力实验值与理论值的比值为1.06,极限弯矩实验值与理论值的比值为1.14。由此可见,理论计算方法可真实反映波型板桩的抗剪承载力和极限弯矩;此外,抗裂弯矩理论计算值与实测值相比偏小,工程上利用理论值作为设计值可能偏于保守。

表6 力学试验与理论计算结果分析

Tab.6 Result analysis of the mechanical test and theoretical calculation

截面高度/ mm	型号	抗裂弯矩			抗剪承载力			极限弯矩		
		计算值/ (kN·m)	实测值/ (kN·m)	实测值/ 计算值	计算值/ kN	实测值/ kN	实测值/ 计算值	计算值/ (kN·m)	实测值/ (kN·m)	实测值/ 计算值
450	AB+	236.5	286.8	1.21	324.9	346.3	1.06	515.6	589.1	1.14

## 4 结论

1) 直接利用波型板桩原截面形式特点,给出截面有效预压应力的确定方法,推导波型板桩截面力学性能分析的理论计算公式,并通过力学试验证明。相对于以往等效截面计算方法,新方法计算过程简单明了,计算结果更加科学合理,可为波型板桩的设计提供理论依据,便于实际工程项目的推广应用。

2) 新型波型板桩特殊的截面结构形式不仅提高了挡土截面宽度,而且有效提高了截面高度与截面惯性矩,使得板桩受力性能得到显著提升,

经济效益明显,是一种更为合理的挡土止水围护桩型。

3) 通过波型板桩抗弯试验与抗剪试验的操作实施与计算分析,给出了波型板桩抗裂弯矩、抗剪承载力的确定方法,并将理论分析与试验值进行对比,结果基本吻合,证明计算方法合理可行。

4) 本研究仅针对单根波形板桩进行力学性能分析与试验验证,实际工程应用中,波形板桩挡土止水过程形成排桩联合受力,桩间土所产生的“拱效应”对板桩受力形态的影响尚需进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 张后禅. U形预应力混凝土板桩[J]. 中国水利, 2010(21): 67-67.
- [2] 胡少伟, 孙岳阳, 范向前. 先张法预应力高强混凝土波形板桩抗弯性能的试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 9-15.
- [3] 陈鹏飞, 龚晓南, 刘念武. 止水帷幕的挡土作用对深基坑变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2014(S2): 254-258.
- [4] 谭可, 万小龙. U型预应力混凝土板桩在河道工程中的施工技术应用[J]. 福建建材, 2015(8): 54-56.
- [5] 孙蓓. U型预应力混凝土板桩在直立式护岸工程中的应用[J]. 中国水运, 2013(7): 239-240.
- [6] 颜荣华. 预应力混凝土支护桩水平承载力性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2011.
- [7] 孙文怀, 胡亚楠. U形预应力混凝土板桩受力性能分析[J]. 科协论坛, 2013(12): 6-7.
- [8] 黄建华, 覃少杰, 常建华, 等. 高强预应力混凝土板桩抗裂弯矩算法分析[J]. 福建工程学院学报, 2018, 16(1): 1-7.
- [9] 蒋元海. 关于管桩结构设计中预应力损失计算问题的探讨[J]. 混凝土与水泥制品, 2001(1): 26-27.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] 上官京灵, 黄广龙, 耿山河. U型预应力混凝土支护板桩承载力计算方法[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013(5): 100-104.
- [12] 汤关祚, 王清, 禹琦. 先张法预应力混凝土管桩抗裂弯矩和极限弯矩计算式的探讨[J]. 工业建筑, 2004(1): 57-59.

(责任编辑: 陈雯)