

# 小麦根系力学性能及微观结构研究\*

郭维俊<sup>1</sup> 黄高宝<sup>2</sup> 王芬娥<sup>2</sup> 雒六元<sup>1</sup> 张明朗<sup>1</sup>

(1. 兰州工业高等专科学校建筑工程系, 兰州 730050; 2. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070)

**【摘要】** 测定了小麦成熟期根系力学性能的主要指标,研究了根的应力-应变规律,观察了根的微观组织结构,得到了根的解剖构造图像,建立了小麦根的横截面力学模型。结果表明:小麦根是一种典型的多相、筛状、不连续、不均匀、各向异性的复合材料,根具有一定的强度和良好的弹性,其承载能力取决于机械组织厚度、维管束数量,以及各组织及其细胞之间的连接形式和连接强度,小麦初生根和次生根的强度极限分别为 21.21 ~ 57.25 MPa 和 3.08 ~ 13.07 MPa。

**关键词:** 小麦 根系 力学性能 微观结构

**中图分类号:** S12; Q947.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0092-04

## Mechanical Properties and Micro-structure of Wheat Roots

Guo Weijun<sup>1</sup> Huang Gaobao<sup>2</sup> Wang Fene<sup>2</sup> Luo Liuyuan<sup>1</sup> Zhang Minglang<sup>1</sup>

(1. Department of Building Engineering, Lanzhou Polytechnical College, Lanzhou 730050, China

2. Engineering College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

### Abstract

The mechanical properties of wheat roots in mature were tested, and the curves on stress-strain of wheat roots were measured by the electronic testing machine CMT2502. The micro-structure of wheat roots was observed, and the SEM images of wheat roots were scanned by electron microscope. The relation between mechanical properties and micro-structure of wheat roots was analyzed, and mechanical model of wheat roots was established. The results showed that wheat root was a typical porous, no-continuous, no-homogeneous and anisotropic composite material. Wheat roots had enough strength and good flexibility, and its carrying capacity depended on the thickness of thick-walled cells and the numbers of vascular bundles, as well as the connection form and strength of cells in roots. The strength of primary root and secondary root were 21.21 ~ 57.25 MPa and 3.08 ~ 13.07 MPa, respectively.

**Key words** Wheat, Root, Mechanical properties, Micro-structure

### 引言

小麦根系在整个生命活动中,不仅吸收养分、水分,参与体内物质合成和转化,同时也是起固定支撑作用的主要组成部分。小麦根系由初生根和次生根组成,大多分布在深度 50 cm 的土层内,最深可达 3.0 m 以上<sup>[1]</sup>。作用在根系上的力主要来源于两个方面:一是在锄草、施肥、浇水和收割等田间管理过

程中,由于人工或机械原因,必然会引起土壤状态的变化,根系可能受到挤压、剪切或弯曲。二是根系自身在发育伸长过程中,会受到土壤在各个方向的阻力。这些外力,对小麦生长和产量形成过程具有重要影响。因此,许多学者就小麦根系分布、根系形态、吸水模式、生长规律等方面进行了研究,并取得了许多重要成果<sup>[2-10]</sup>。但是,运用材料力学原理,研究小麦根系性能的成果还不多见。本文以成熟期

小麦根系为对象, 试验分析小麦根的力学性能与微观结构之间的关系, 以期为进一步认识小麦特定生长期根系与土壤相互间作用的力学机理, 以及根系资源的开发利用提供一定的参考依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 小麦根力学性能试验

#### 1.1.1 试验设备

利用深圳 SANS 公司 CMT2502 型电子万能试验机进行试验。该机是微机控制技术、全数字技术和图形显示技术集成的精密仪器。试验过程中, 该机实时动态显示力的大小、变形、加载速度和试验曲线。试验结束后, 即可打印出完整的试验报告。

#### 1.1.2 试验材料

根系材料来自甘肃农科院小麦试验田。试验品种: 陇春 23 号, 成熟期, 株高 1 000 ~ 1 200 mm, 节间数均为 5 个。试样在自然状态下清除泥土后, 从不同部位选取, 同一部位取两根, 试验结果取其平均值。共取初生根 20 条, 次生根 20 条, 长度 80 mm, 试验标距 30 mm, 含水率 44.1% ~ 45.7%。

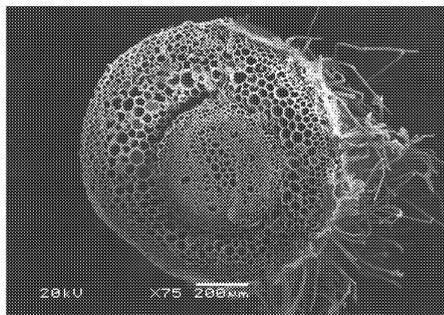
#### 1.1.3 试验方法

试验于 2007 年 7 月 15 日在甘肃农业大学材料力学实验室进行。参考 GB/T1040.1—2006 标准中塑料和复合材料拉伸强度、拉伸模量和拉伸应力-应变关系的测定方法。为避免根试验过程中的破损和滑移, 夹具夹持部位贴一层 2 mm 厚且具有横向沟槽的弹性较好的橡胶垫片。试验开始前, 用游标卡尺、分析天平量取试件的直径、质量并计算含水率等基本参数。加载速度 3 mm/min。

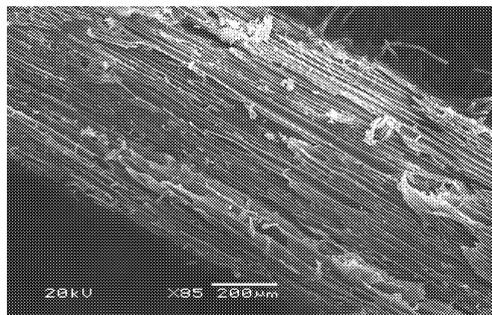
### 1.2 小麦根微观结构试验

#### 1.2.1 试验仪器

采用日本生产的 JSM-6380(LV) 扫描电子显微镜。小麦成熟期根材料的水分含量较低, 且不易变形, 可以不经过固定、干燥等处理, 在较低加速电压下直接观察, 观察和拍摄照片时须尽可能迅速。



(a)



(b)

图 2 小麦根的 SEM 形貌

Fig. 2 SEM images on transverse and longitudinal section of wheat root

(a) 横截面 (b) 纵截面

#### 1.2.2 样品制备

试验在甘肃农业大学中心实验室进行, 选取陇春 23 号不同部位的初生根和次生根。样品制作时, 应当特别注意: 要保持完好的组织和细胞形态; 充分暴露欲观察的部位; 要具有良好的导电性和较高的二次电子产额; 保持充分干燥的状态。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 力学性能

图 1 是小麦的一条次生根拉伸应力-应变 ( $\sigma - \varepsilon$ ) 曲线。试样的直径为 0.3 mm, 最大拉力 1 N, 拉伸强度 11.4 MPa, 弹性模量 348.7 MPa, 断裂伸长率 7.65%。图 1 表明: 在静载条件下, 小麦根的变形随着应力的增加而增加,  $\sigma - \varepsilon$  曲线呈非线性上凸递增, 没有明显的屈服和比例特征。当应力达到最大时, 根在横截面上发生断裂。

图 1 小麦根拉伸应力-应变曲线  
Fig. 1 Curve on stress-strain of wheat root

试验表明: 小麦根具有良好的弹性和一定的强度。同一品种, 根的植株、部位、生长期不同, 它的强度和刚度有差异。初生根细而坚韧, 上下直径比较一致, 强度较高, 扎根集中而且较深, 趋于垂直分布; 次生根比初生根粗壮, 根毛密集, 强度较低, 入土较浅, 呈锐角向四周扩散。初生根的强度接近于聚四氟乙烯塑料。小麦根的力学性能试验结果如表 1 所示。

### 2.2 微观结构

图 2a 是小麦根横截面的显微结构。图中表明: 小麦根由表皮、皮层和中柱 3 部分组成。表皮即最外层细胞, 细胞排列整齐, 胞壁较薄, 细胞大多成椭圆状。皮层是表皮以内薄壁细胞组织, 由外及内

细胞直径逐渐增大,密度逐渐减小,内外皮层界限非常明显;基本薄壁组织的细胞由于相互挤压大多呈多边形,皮层的主要作用是根内水分和养分的横向传递。中柱即根的中央部分,它由中柱鞘、木质部、韧皮部等组成,中柱细胞直径相对最小,密度最高,机械组织最发达。

图 2b 是小麦根的纵向显微结构。图中表明:小麦根是由各组织的细胞壁沿纵向形成的众多空心纤

维组成的复合材料。一般来说,表皮细胞壁较厚,纤维较细,层密度较高;皮层细胞直径较大,细胞壁薄,留有大量空腔,纤维比较稀疏;中柱细胞直径最小,纤维层密度最高。细胞之间、导管与筛管之间的相互连接作用明显存在。

表 2 为一条直径 1 057.4  $\mu\text{m}$  小麦根的各微观组织结构的测量数据。测试表明:表皮、皮层和中柱的面积分别为总面积的 7.36%、71.81%、20.83%。

表 1 小麦根拉伸力学性能

Tab. 1 Tensile mechanical properties of wheat roots

试验组别	试件编号	试件参数			力学性能		
		试件长度/mm	试件直径/mm	横截面积/ $\text{mm}^2$	最大拉力/N	强度极限 $\sigma_b/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$
初生根	1	30	0.24	0.045	1.69	29.39	0.40
	2	30	0.25	0.049	3.07	49.12	0.22
	3	30	0.28	0.062	4.48	57.25	0.33
	4	30	0.30	0.071	2.64	29.31	0.26
	5	30	0.32	0.080	2.01	21.21	0.31
	6	30	0.34	0.091	3.47	29.88	0.27
	7	30	0.40	0.126	7.49	46.78	0.13
	8	30	0.40	0.126	4.13	38.62	0.47
	9	30	0.40	0.126	4.54	28.35	0.47
	10	30	0.40	0.126	3.08	23.51	0.25
平均值		30	0.33	0.090	3.66	35.34	0.31
次生根	1	30	1.11	0.967	3.34	6.42	0.47
	2	30	0.90	0.636	2.47	3.08	0.11
	3	30	0.83	0.541	9.00	13.07	0.21
	4	30	0.80	0.502	5.81	9.08	0.33
	5	30	0.76	0.453	2.52	11.90	0.38
	6	30	0.70	0.385	2.14	4.37	0.26
	7	30	0.64	0.322	4.59	8.04	0.26
	8	30	0.60	0.283	1.45	7.02	0.47
	9	30	0.56	0.246	3.17	7.32	0.17
	10	30	0.50	0.196	2.41	12.30	0.24
平均值		30	0.74	0.453	3.69	8.26	0.29

表 2 小麦根横截面显微结构测试结果

Tab. 2 Measuring results of cross-section microstructure of wheat root

参数	表皮组织	皮层组织		中柱组织	
		内层	外层	外层	内层
细胞直径/ $\mu\text{m}$	9.82 ~ 29.05	39.19 ~ 70.16	13.55 ~ 31.65	5.64 ~ 15.01	13.86 ~ 26.29
细胞壁厚/ $\mu\text{m}$	1.42 ~ 5.49	2.39 ~ 4.78	3.11 ~ 7.41	2.39 ~ 4.68	3.77 ~ 7.41
组织层数	1	5 ~ 6	3 ~ 4	7 ~ 13	4 ~ 6
组织厚度/ $\mu\text{m}$	15.5 ~ 31.05	130.41 ~ 208.65	56.50 ~ 76.38	440.91 ~ 515.43	
组织面积/ $\mu\text{m}^2$	64 595.19	383 556.82	237 945.66	182 825.82	
占总面积比例/%	7.36	71.81		20.83	

图3是根据微观组织结构分析抽象得到的小麦根横截面的力学模型。根**的强度主要由占55.3%的表皮、外皮层和中柱来承担,薄壁细胞组织主要起连接、传递载荷的作用。小麦根系各组织细胞大小、细胞壁厚、维管形态、中柱密度以及各组织之间的比重等,随品种不同、植株不同、初生根和次生根的不同而变化,但主要的**

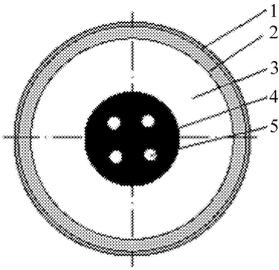


图3 小麦根横截面力学模型

Fig.3 Mechanical model on cross-section of wheat root

1.表皮 2.外皮层 3.内皮层  
4.中柱 5.导管

组织架构及其构成的要素基本不变。表皮、外皮层和中柱机械组织越发达,根**的强度就越高。**

### 3 结束语

小麦根由表皮、皮层和中柱3部分构成,是一种典型的多相、筛状、不连续、不均匀、各向异性的复合材料。薄壁细胞组织即为基体相材料,中柱为增强相材料。

小麦根具有一定的强度和良好的弹性,其承载能力主要取决于中柱的机械组织、表皮及外皮层的发达程度,以及各组织及其细胞之间的连接形式和连接强度。初生根强度为21.21~57.25 MPa,远大于次生根的强度3.08~13.07 MPa。

### 参 考 文 献

- 1 山东农学院.作物栽培学:上册[M].北京:农业出版社,1995.
- 2 杨培岭,罗远培.冬小麦根系形态的分形特征[J].科学通报,1994,39(20):1911~1913.
- 3 苗果园,尹钧,张云亭.中国北方主要作物根系生长的研究[J].作物学报,1998,24(1):1~6.  
Miao Guoyuan, Yin Jun, Zhang Yunting. Study on root growth of main crops in North China[J]. Acta Agronomica Sinica, 1998,24(1):1~6. (in Chinese)
- 4 郭维俊,黄高宝,王芬娥,等.农业土壤应力状态与作物根系生长相关性研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2006,42(2):105~108.  
Guo Weijun, Huang Gaobao, Wang Fene, et al. Study on the stress-state of agricultural soil and the distribution of the crop root system[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2006, 42(2):105~108. (in Chinese)
- 5 Mian Mar. Roots size and distribution of field-grown wheat genotypes[J]. Crop Science,1994,34(3):810~812.
- 6 Narayan D. Root growth and productivity of wheat cultivation under different soil moisture condition[J]. International Journal of Ecology and Environmental Sciences, 1991,17(1):19~26.
- 7 Chan K Y. Tillage induced differences in the growth and distribution of wheat roots[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1992,43(1):19~28.
- 8 郭维俊,王芬娥,黄高宝,等.小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J].农业机械学报,2009,40(2):110~114.  
Guo Weijun, Wang Fene, Huang Gaobao, et al. Experiment on mechanical properties and chemical compositions of wheat stems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(2):110~114. (in Chinese)
- 9 高梦祥,郭康权,杨中平,等.玉米秸秆的力学特性测试研究[J].农业机械学报,2003,34(4):47~52.  
Gao Mengxiang, Guo Kangquan, Yang Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003,34(4):47~52. (in Chinese)
- 10 王芬娥,黄高宝,郭维俊,等.小麦茎秆力学性能与微观结构研究[J].农业机械学报,2009,40(5):92~95.  
Wang Fene, Huang Gaobao, Guo Weijun, et al. Mechanical properties and micro-structure of wheat stems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):92~95. (in Chinese)