

黑沙蒿直根的材料力学特性研究

李雪松¹, 刘静¹, 王博¹, 刘嘉伟¹, 张欣², 李强³

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010019; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010019; 3. 神东煤炭集团环保管理处, 内蒙古 伊金霍洛 017200)

摘要: 以鄂尔多斯采煤塌陷区植物的优势种之一黑沙蒿为研究对象, 采用伺服式强力机研究其直根的材料力学特性。结果表明: 在1~5 mm 径级范围内抗拉力、抗折力与根径均呈幂函数正相关, 抗拉强度、抗折强度与根径呈幂函数负相关。在拉力和折力分别作用下, 直根均表现出弹塑性变形特征, 抗拉极限弹性力大于抗折极限弹性力, 轴向弹性变形小于径向弹性变形。直根承受径向折力的 $\sigma \sim \epsilon$ (应力—应变) 曲线基本为下凹型, 承受轴向拉力时的 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线基本为上凸型, 对于两种受力形式, 极限强度均随根径的增大而减小, 极限应变与根径无相关性。1~5 mm 根径直根的平均抗拉强度(8.32±1.67) MPa 大于平均抗折强度(5.39±0.85) MPa, 表明黑沙蒿直根抵抗轴向拉力的能力优于抵抗径向折力。

关键词: 黑沙蒿; 直根; 抗拉力; 抗折力; 弹塑性; 本构特性

中图分类号: Q947.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0353-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.055

Study on the Material Mechanical Properties of Straight Roots of *Artemisia ordosica*

LI Xuesong¹, LIU Jing¹, WANG Bo¹, LIU Jiawei¹, ZHANG Xin², LI Qiang³

(1. Desert Science and Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019;

2. Institute of Water Resource for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010019;

3. Environmental Management Office of Shendong Coal Group, Ejin Horo Banner, Inner Mongolia 017200)

Abstract: In this paper, we adopt servo-type strong machine to research the material mechanical properties of straight roots of *Artemisia ordosica* which is one of the dominant species in the coal mining subsidence area of Ordos. Results showed that the anti-tension force and the anti-fracture force of straight roots of *Artemisia ordosica* were positively correlated with the diameter of roots with a power function and both of the anti-fracture strength and the anti-fracture strength were negatively correlated with the root diameter with a power function in the 1~5 mm diameter range. Under the action of tension force and fracture force, the straight roots' ultimate anti-tension elastic force was greater than the ultimate anti-fracture elastic force and its axial elastic deformation was smaller than the radial elastic deformation, it showed the characteristics of elasto-plastic deformation. The σ (stress)— ϵ (strain) curve under fracture force and tension force of the straight roots were concave and convex respectively, the ultimate strength decreased with the increase of root diameter, and the ultimate strain had no correlation with root diameter under these two kinds of force. The average anti-tension strength of the straight roots was greater than the average anti-fracture strength ((8.32±1.67) MPa>(5.39±0.85) MPa) in the 1~5 mm diameter range, it showed that the ability of the straight roots to resist axial tension force was better than the ability to resist radial fracture force.

Keywords: *Artemisia ordosica*; straight roots; anti-tension force; anti-fracture force; elasto-plastic; constitutive characteristics

内蒙古鄂尔多斯地区在煤炭开采过程中会造成土地塌陷等现象, 植物根系可以作为受力材料与土体形成根—土复合体起到固土抗蚀的作用, 根—土复合

体的强度主要取决于根系的材料力学特性和根—土界面的摩擦特性。根系的材料力学特性随植物种、植物生境等而异, 现有成果均是针对特定植物的研究报

收稿日期: 2017-05-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“根系固土抗蚀受损后自我修复的力学特性”(51364034); 内蒙古自治区水利科技项目“神东煤矿采煤塌陷区水土保持植被配置研究”(nsk2016-s6)

第一作者: 李雪松(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: lixuesongnnd@163.com

通信作者: 刘静(1958—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱、半干旱地区水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: ljing58@126.com

道, Sadosky 等^[1]通过本构理论、参数估计的方法研究了被子植物根系的力学性能; Tosi^[2]对犬蔷薇(*Rosa canina*)、旋覆花柳(*Inula salicina*)、鹰爪豆(*Spartium junceum* L.)根系的抗拉力和抗拉强度与根径的关系进行了探索; Jonasson 等^[3]研究了北极地区的低灌木和禾草等根系的拉伸强度、应变和弹性。国内学者对根系力学特性的研究主要集中在直根抗拉力和抗拉强度方面, 吕春娟等^[4]和惠尚等^[5]分别针对华北地区乔木根系和南方丛生竹根系, 研究其抗拉力和抗拉强度与根径的关系; 陈丽华等^[6]进一步对乔木单根轴向 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线特性进行了研究。本课题组完成了柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙柳(*Salix psammophila* Schneid.)、沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)根系的材料力学特性研究, 主要包括直根抗拉力及抗拉强度^[7]、抗折力及抗折强度^[8]以及直根与侧根分支处抗拉、抗折的差异^[9-10]。但是, 对当地优势种之一的黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)根系材料力学特性的研究未见报道。黑沙蒿主要分布于鄂尔多斯高原的固定沙丘及半固定沙丘, 其根系属于深根性轴根型植物, 可起到良好的固土抗蚀作用, 本文研究黑沙蒿直根段的抗拉力、抗折力以及变形特征, 进一步充实灌木根系固土的力学机制, 并为该地区植被建设提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 标准株的确定及试验根采集

2016 年 7 月, 在鄂尔多斯市伊金霍洛旗上湾矿区, 从生长良好的黑沙蒿样地内随机选取 30 株测量其株高、冠幅、地径, 各指标取均值确定标准株: 株高 (53.20 ± 9.65) cm、冠幅 $(60.67 \pm 14.40) \times (74.17 \pm 20.36)$ cm², 地径 (12.49 ± 2.82) mm。由标准株地径切片确定其生长年限为 4~5 年, 针对标准株取样, 每个径级每种受力的极限力试验根取 30 根, 弹塑性试验根取 10 根, 本构特性试验根取 20 根, 两种受力形式试验根形状见图 1 和图 2, 将挖取的根系覆盖根际土并使其处于根际土温(距地表 20 cm 土温 4℃左右)的环境中保存, 在 10 天内完成试验, 以得到具有活性根系的材料力学特性^[9]。

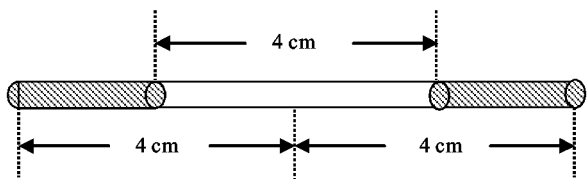


图 1 抗折特性试验根形状

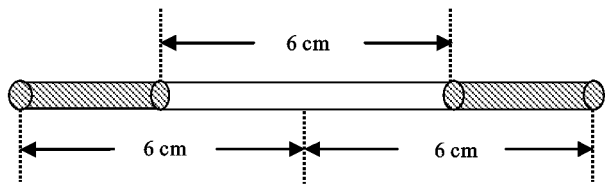


图 2 抗拉特性试验根形状

1.2 试验仪器和试验方法

仪器为 TY 8000 伺服控制材料试验机。

1.2.1 抗拉力及抗拉强度测定 将试验根两端用上下夹具固定(见图 2 阴影部分), 使其处于轴向受拉状态, 用加载速度 500 mm/min 测定试验根承受瞬时拉力时的极限抗拉力。试验根断裂处的根径取断裂处两侧标记点(轴向间距 1 cm)根径的平均值。并采用公式(1)进行抗拉强度的计算。

$$P = 4F / (\pi D^2) \quad (1)$$

式中: P 为抗拉强度(MPa); F 为抗拉力(N); D 为根系直径(mm)。

1.2.2 抗折力及抗折强度测定 本文定义根系抵抗的径向折力为抗折力。试验方法为: 将试验根呈水平状两端固定(见图 1 阴影部分), 在试验根段的中部施加径向荷载, 测定抗折力, 加载速度同上, 在试验根中点断裂时, 根系断裂处直径取试验根中点的直径, 断裂处偏离中点但左右不超过 1 cm 时, 取断裂处两侧标记点直径的平均值, 抗折强度仍采用公式(1)进行计算。

1.2.3 弹塑性、本构特性测定 预试验发现, 用 500 mm/min 加载速度进行反复加载试验^[11]难以控制每次的位移量, 故选择 10 mm/min 进行弹塑性特征和本构特征的试验研究。仪器自记实时荷载和位移, 分别绘制力~位移(即 $F \sim s$)曲线和应力~应变(即 $\sigma \sim \epsilon$)曲线, 进行弹塑性特性分析和本构特性分析。参照《材料力学》^[11]中应力、应变的计算方法, 轴向拉力下的应力 $\sigma = F/S$ (F 为抗拉力 N, S 为根横截面积(mm²)), 应变 $\epsilon = \Delta l/l$ (Δl 为轴向变形(mm), l 试验段根长(mm)), 径向折力下的应力 $\sigma = F/S$ (F 为抗折力 N, S 为根横截面积(mm²)), 应变 $\epsilon = \Delta l/l$ (Δl 为径向变形(mm), l 为试验段根长(mm))。

2 结果与分析

2.1 黑沙蒿直根的抗拉力及抗拉强度

在试验过程中夹口处断裂和在夹口处滑出的均视为无效, 只对试验段断裂的根进行统计, 并计算抗拉强度, 结果见图 3、图 4。由图 3 和图 4 可知, 在 1~5 mm 径级范围内, 随根系根径由 (1.20 ± 0.08) mm 增至 (4.77 ± 0.07) mm, 抗拉力由 (15.11 ± 3.38) N 增至 (99.39 ± 14.77) N, 呈幂函数增加的趋势; 随根径的增加, 直根的抗拉强度呈幂函数减小的趋势, 由 (13.40 ± 2.98) MPa 降至 (5.56 ± 0.82) MPa。虽然

粗根整体上表现出更强的抗拉力,但是在根系单位面积上的抗拉力要小于细根,表明由细根组成的根系网络能够与土体结合形成根—土复合体,使黑沙蒿根系发挥出更好的固土抗蚀作用。

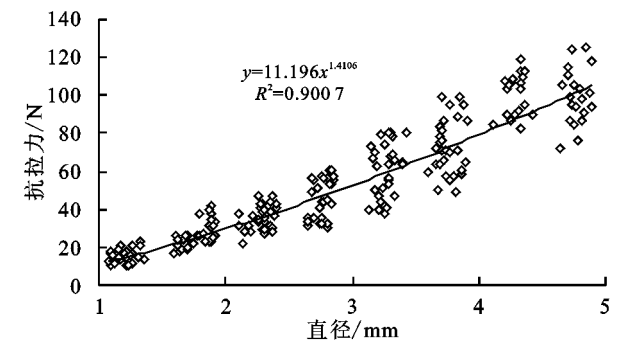


图 3 黑沙蒿直根抗拉力

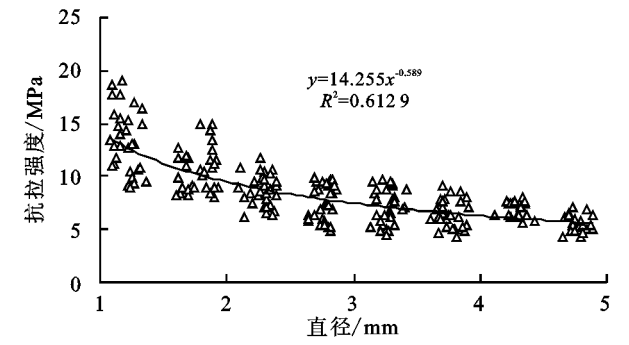


图 4 黑沙蒿直根抗拉强度

2.2 黑沙蒿直根的抗折力及抗折强度

与直根抗拉力的测定相同,试验过程中只记录在试验部分断裂的数据,并计算其抗折强度,结果见图 5 和图 6。

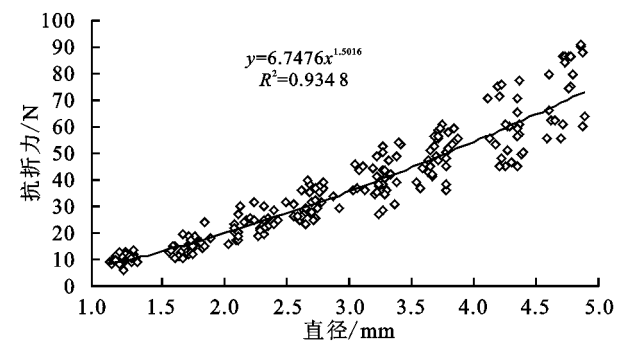


图 5 黑沙蒿直根抗折力

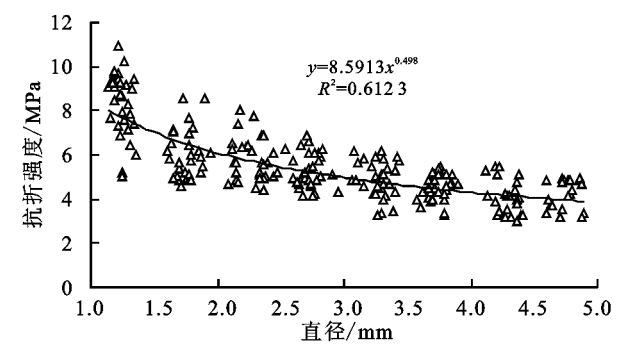


图 6 黑沙蒿直根抗折强度

由图 5、图 6 可知,在 1~5 mm 径级范围内,随根系

根径由(1.24±0.06) mm 增至(4.75±0.10) mm,抗折力由(10.08±1.68) N 增至(74.77±12.49) N,表现出幂函数增长的趋势;随根系根径的增加,黑沙蒿直根的抗折强度由(8.33±1.44) MPa 降至(4.05±0.66) MPa,呈幂函数减小的趋势。粗根整体上表现出更大的抗折力,但是细根单位面积上的抗折力要强于粗根,与直根在轴向受力下表现的规律一致。

2.3 黑沙蒿直根的弹塑性、本构特性

2.3.1 黑沙蒿直根的弹塑性 进行弹塑性试验时,4~5 mm 根径内试验根几乎全部在夹持处损坏,故仅分析 1~4 mm 根径的试验数据,在相同受力形式下各根径直根的弹塑性曲线形状相似,本文以 3~3.5 mm 根径内直根的弹塑性曲线为例分析其特征,图 7 为在轴向拉力下的弹塑性曲线,图 8 为在径向折力下的弹塑性曲线。由图 7 和图 8 可知(右侧为局部放大图),参考《弹塑性力学》^[12],对于反复加载下轴向受拉的 $F \sim s$ 曲线(力—位移曲线)在力小于 a 点,即 $F \sim s$ 曲线在 b 曲线之前时, $F \sim s$ 曲线分布密集,外力所做的功以弹性变形能的形式积累在根内,卸载时弹性变形能全部释放,根的位移得以恢复,发生弹性变形,在此阶段内各条 $F \sim s$ 曲线最大值的连线表现出线性比例关系;当外力大于 a 点,即 $F \sim s$ 曲线在 b 曲线之后时, $F \sim s$ 曲线的间距逐渐变大,开始出现残余变形,即弹性变形后外力所做的功不可逆,通过变形过程耗散这部分能量,根产生不可恢复的塑性变形,对应的各条 $F \sim s$ 曲线最大值的连线呈非线性。对于反复施加折力的($F \sim s$ 曲线),试验根的变形特征和反复承受拉力的变形特征相似,即 a 点之前发生弹性变形,a 点之后发生塑性变形。对于图 7、图 8 所示的根径,拉力作用下的弹性极限力为 4.17 N,变形约为 1.82 mm;折力作用下的弹性极限力为 1.02 N,变形约为 2.96 mm,即抗拉弹性力大于抗折弹性力,轴向弹性变形小于径向弹性变形。

2.3.2 黑沙蒿直根的本构特性 对于加载速度 10 mm/min 的本构特性试验,参照《材料力学》^[11]中应力、应变的计算方法,轴向拉力下的应力 $\sigma = F/S$ (F 为抗拉力(N); S 为根横截面积(mm^2)),应变 $\epsilon = \Delta l/l$ (Δl 为轴向变形(mm); l 为试验段根长(mm)),径向折力下的应力 $\sigma = F/S$ (F 为抗折力(N); S 为根横截面积(mm^2)),应变 $\epsilon = \Delta l/l$ (Δl 为径向变形(mm), l 为试验段根长(mm)),将每个根径内各条试验根的极限应力和极限应变分别计算均值。由表 1 可以得出,在轴向拉力和径向折力两种受力形式下,黑沙蒿直根的极限应力均与根径表现为负相关($R^2 = 0.988, R^2 = 0.975$),随根径由(1.21±0.09) mm 增至(4.83±0.09) mm,轴向极限应力

由 (1.18 ± 0.22) MPa 逐渐降至 (0.54 ± 0.09) MPa, 减少 54.24%; 随根径由 (1.25 ± 0.08) mm 增至 (4.80 ± 0.06) mm, 径向极限应力由 (0.96 ± 0.22)

MPa 逐渐降至 (0.43 ± 0.06) MPa, 减少 55.21%。径向极限应变、轴向极限应变均与根径无相关性 ($R^2=0.183, R^2=0.128$)。

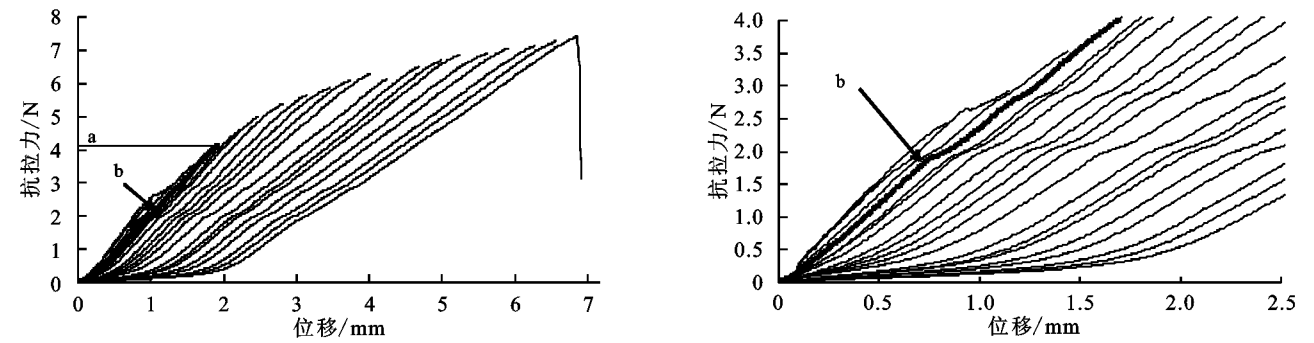


图 7 轴向拉力下 3~3.5 mm 黑沙蒿直根强塑性曲线

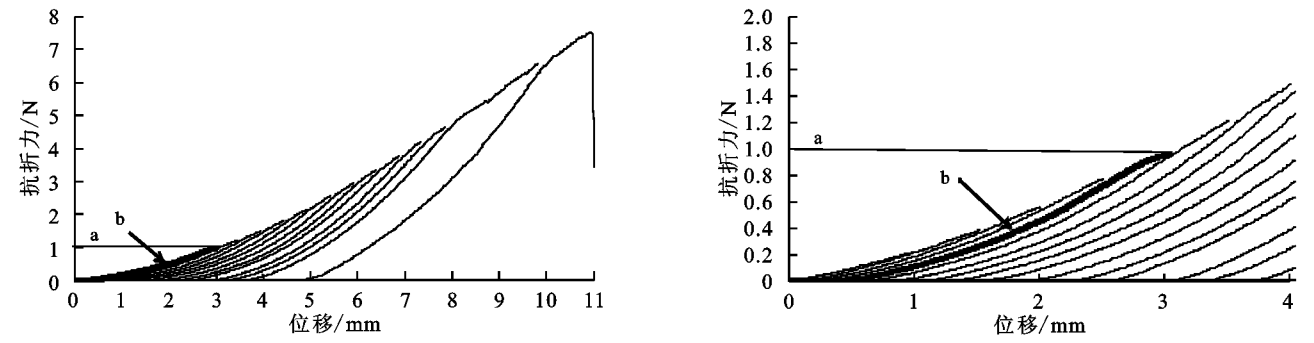


图 8 径向折力下 3~3.5 mm 黑沙蒿直根弹塑性曲线

表 1 两种受力形式下黑沙蒿直根的极限应变与极限应力

根径/mm		1.21±0.09	1.69±0.07	2.24±0.09	2.77±0.07	3.26±0.06	3.78±0.08	4.27±0.07	4.83±0.09
轴向拉力	极限应力/MPa	1.18±0.22	0.95±0.21	0.85±0.17	0.70±0.18	0.63±0.17	0.58±0.14	0.55±0.13	0.54±0.09
	极限应变/%	11.76±2.59	8.25±2.06	7.67±3.89	8.77±3.09	10.95±3.16	7.44±2.37	8.00±3.07	8.79±2.73
根径/mm		1.25±0.08	1.79±0.09	2.22±0.10	2.76±0.11	3.24±0.08	3.76±0.10	4.23±0.10	4.80±0.06
径向折力	极限应力/MPa	0.96±0.22	0.72±0.28	0.63±0.20	0.62±0.15	0.53±0.14	0.46±0.07	0.44±0.05	0.43±0.06
	极限应变/%	23.88±4.03	28.73±4.13	32.10±5.21	24.55±5.30	29.75±5.09	25.86±7.98	32.19±7.13	28.07±6.64

每一条 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线均由 600~1 500 个测点绘制而成, 通过计算每个根径内所有试验根对应点的均值绘制每个根径的平均 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线计算量浩大。在两种受力形式下, 每个根径范围内, 极限应力与根径呈负相关, 极限应变与根径无相关性(表 1), 因此将每个根径范围内极限应力与均值最接近的 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线作为该径级的代表性本构曲线($\sigma\sim\epsilon$ 曲线), 8 个径级的代表性 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线见图 9、图 10。由图 9、图 10 可知, 在 1~5 mm 根径范围内, 黑沙蒿直根在承受径向折力时的

$\sigma\sim\epsilon$ 曲线基本表现为下凹型, 在承受轴向拉力时基本表现为上凸型。在径向折力作用下, 每个根径的代表性 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线首先随应变的增加应力缓慢增加, 试验根发生弹性变形, 随后开始塑性变形, 随应变的增加, 应力较快增加, 直至根系断裂; 在轴向拉力下, 每个根径的代表性 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线线型与径向折力下相反, 首先是随应变的增加应力增长较快, 试验根发生弹性变形, 然后开始塑性变形, 随应变的增加应力缓慢上升, 直至根系断裂。

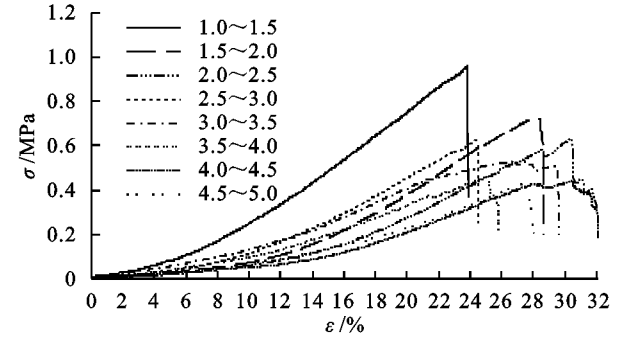


图 9 各个径级直根的径向代表性 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线

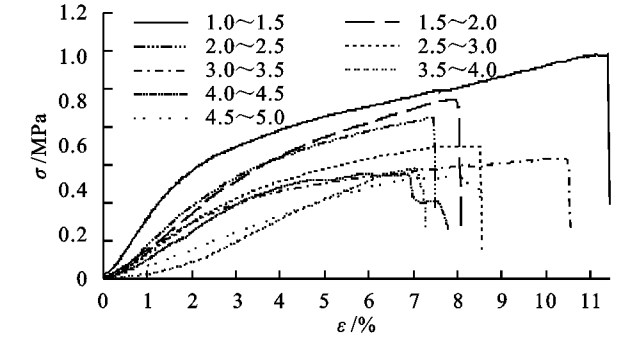


图 10 各个径级直根的轴向代表性 $\sigma\sim\epsilon$ 曲线

在本文的 2.3.1 中的分析已述及黑沙蒿直根在拉和折两种外力作用下,在弹性变形阶段各条 $F \sim s$ 曲线最大值的连线呈线性,塑性变形阶段呈非线性。据此对每一条代表性 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线进行弹塑性分析,得出各个径级直根弹塑性过渡点的应力、应变及其占极限应力、应变的百分比,结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,在轴向拉力下,8 条代表性 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线弹塑性过渡点的应力与根径呈负相关,随根径的增加,由 0.15 MPa 降至 0.09 MPa,占极限应力的百分比为 15.94%~24.78%;代表性 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线的过渡点应变与根径无相关性,占极限应变的百分比为 35.66%~

48.04%;在径向折力下,8 条代表性 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线弹塑性过渡点应力与根径呈负相关,随根径增加,由 0.61 MPa 降至 0.27 MPa,占极限应力的百分比为 48.24%~58.73%,代表性 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线的过渡点应变与根径无相关性,占极限应变的百分比为 24.36%~33.88%。

在轴向拉力下,1~5 mm 根径范围内试验根代表性 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线弹塑性过渡点应力占极限应力的百分比分布范围大于径向折力下的分布范围;而过渡点应变占极限应变的百分比分布范围小于径向折力下的分布范围,表明黑沙蒿根系在径向折力下表现出更强的缓冲能力,在轴向拉力下表现出更强的抵抗力。

表 2 各根径代表性 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线弹塑性过渡点的应力、应变特征值

根径/mm	轴向受力				径向受力			
	应力/MPa	百分比/%	应变/%	百分比/%	应力/MPa	百分比/%	应变/%	百分比/%
1~1.5	0.61	51.69	3.02	25.68	0.15	15.94	10.12	42.38
1.5~2	0.49	51.58	2.01	24.36	0.14	19.72	12.06	41.98
2~2.5	0.41	48.24	2.02	26.34	0.13	21.11	15.42	48.04
2.5~3	0.38	54.29	2.81	32.04	0.12	19.19	10.81	44.03
3~3.5	0.37	58.73	3.51	32.05	0.12	21.89	10.61	35.66
3.5~4	0.34	58.62	2.42	32.53	0.11	24.78	11.08	42.85
4~4.5	0.32	58.18	2.71	33.88	0.09	20.91	14.52	45.11
4.5~5	0.27	50.00	2.45	27.87	0.09	20.00	13.15	46.85

3 讨论

黑沙蒿直根的抗拉力与根径呈幂函数正相关;抗拉强度与根径呈幂函数负相关,与本课题组对柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿直根抗拉特性的研究结论相同^[13],也与针对其他植物直根的研究结论相符,即白三叶(*Trifolium repens* L.)、小冠花(*Coronilla varia* L.)、早熟禾(*Poa annua* L.)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)的根系极限抗拉强度与直径呈明显的幂函数负相关关系,合欢树(*Albizia julibrissin* Durazz.)根系的最大抗拉力随根径的增加而增加,最大抗拉强度随根径的增加而减少^[14-15],银合欢(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.)和双翼豆(*Peltophorum tonkinense* (Pierre) Gagnep.)的根系抗拉强度均随根径的增加而降低^[16]。这在一定程度上表明,绝大多数植物根的抗拉力随根径的增加呈幂函数增加趋势,抗拉强度随根径的增加呈幂函数减少趋势。

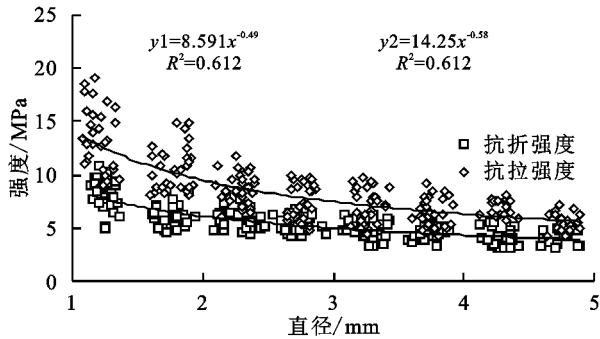
对柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿直根抗折的研究表明,抗折力随根径的增加呈幂函数增长趋势,抗折强度随根径的增加呈幂函数减小趋势^[17],黑沙蒿直根的抗折力和抗折强度随根径的变化规律与上述 4 种植物相同。黑沙蒿等灌木细根的抗拉强度和抗折强度大于粗根,表明广泛分布的细根对于根系的固土抗蚀有重要的作用。

黑沙蒿直根在轴向拉力下的 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线各根径均表现为上凸型,这与冷杉(*Abies fabri* (Mast.)

Craib.)、杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.)、冬瓜杨(*Populus purdomii* Rehd.)、糙皮桦(*Betula albosinensis* Burk. var. *septentrionalis* Schneid.)、花楸(*Sorbus pohuashanensis* Hedl)、莢迷(*Viburnum dilatatum* Thunb.)、卫矛(*Euonymus alatus* (Thunb.) Sieb.)直根在拉拔力下的 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线特征相似^[18]。郑永刚^[17]研究表明,在径向折力作用下柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿的本构曲线在弹性极限点之后,曲线的斜率增大,本文结果与其规律一致,即 a 点之后(图 7、图 8) $F \sim s$ 曲线的斜率开始增大,表现为下凹型。

黑沙蒿直根抗拉强度与抗折强度、抗拉力与抗折力的差异性见图 11、图 12。在 1~5 mm 的每个根径范围内,黑沙蒿直根的抗拉强度和抗拉力均大于对应的抗折强度和抗折力,随根径的增加,两种强度之间的差异逐渐变小(图 11),抵抗力之间的差异逐渐变大(图 12)。黑沙蒿直根抗拉能力优于抗折能力这一特点,与沙棘、白沙蒿的直根相似,即沙棘和白沙蒿直根的抗拉力和抗拉强度均大于抗折力和抗折强度^[19];但是,柠条、沙柳直根抗拉能力和抗折能力的差异与以上的 3 种植物相反,即抗拉强度小于抗折强度、抗拉力小于抗折力^[19]。这说明植物种类不同,根系抵抗轴向拉力破坏的能力与抵抗径向折力破坏能力的差异不同,易于造成根系破坏的外力类型不同。表明在水土保持植物种的选择时,应重视主要侵蚀类型对根系施加的外力类型:抵抗大风拉拔,应选择轴

向抗拉能力强的植物种;存在土体坍塌位移风险,应选择径向抗折能力强的植物种,在固土抗蚀的同时可减少植物根系的损伤和植物的死亡。



注: y1 为径向折力下的回归方程; y2 为轴向拉力下的回归方程。

图 11 黑沙蒿直根的抗拉强度与抗折强度

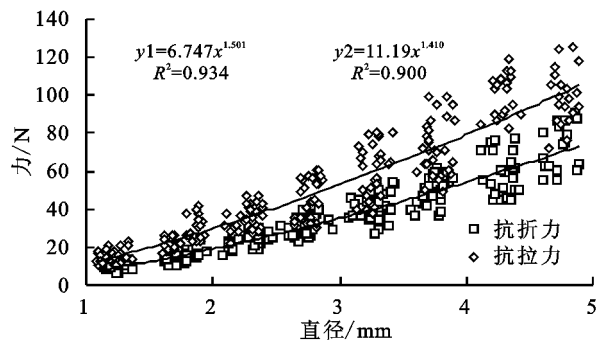


图 12 黑沙蒿直根的抗拉力与抗折力

4 结论

(1) 黑沙蒿 1~5 mm 径级范围内直根的抗拉力、抗折力均与根径呈幂函数正相关,而抗拉强度、抗折强度均与根径呈幂函数负相关;各径级直根的抗拉强度均大于抗折强度,抗拉力均大于抗折力。根径由 (1.20 ± 0.08) mm 增至 (4.77 ± 0.07) mm,抗拉力由 (15.11 ± 3.38) N 增至 (99.39 ± 14.77) N,抗拉强度由 (13.40 ± 2.98) MPa 降至 (5.56 ± 0.82) MPa;根径由 (1.24 ± 0.06) mm 增至 (4.75 ± 0.10) mm,抗折力由 (10.08 ± 1.68) N 增至 (74.77 ± 12.49) N,抗折强度由 (8.33 ± 1.44) MPa 降至 (4.05 ± 0.66) MPa,表明黑沙蒿根系抵抗轴向拉力的能力要优于抵抗径向折力。

(2) 在拉和折两种受力形式下,黑沙蒿直根的变形均由弹性变形过渡到塑性变形,拉力作用下的弹性极限力为 4.17 N,变形约为 1.82 mm;折力作用下的弹性极限力为 1.02 N,变形约为 2.96 mm,即抗拉弹性力大于抗折弹性力,轴向弹性变形小于径向弹性变形。承受径向折力时,各个径级的 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线基本表现为下凹型,即随着应变的增加对应的应力由缓慢增大过渡为快速增大;承受轴向拉力时 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线基本表现为上凸型,即随着应变的增加轴向拉伸应力由快速增大过渡为缓慢增大。

参考文献:

- [1] Sadovsky A V, Baldi P F, Wan Y M. A theoretical study of the in vivo mechanical properties of angiosperm roots: Constitutive theories and methods of parameter estimation[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2007, 129(3): 483-487.
- [2] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy)[J]. Geomorphology, 2007, 87(4): 268-283.
- [3] Jonasson S, Callaghan T V. Root mechanical properties related to disturbed and stressed habitats in the Arctic[J]. New Phytologist, 2010, 122(1): 179-186.
- [4] 吕春娟,陈丽华,周硕,等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 329-335.
- [5] 惠尚,张云伟,刘晶,等. 丛生竹根系抗拉力学特性[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 65-70.
- [6] 陈丽华,余新晓,刘秀萍,等. 林木根系本构关系[J]. 山地学报, 2007, 25(2): 224-228.
- [7] 苑淑娟,牛国权,刘静,等. 瞬时拉力下两个生长期 4 种植物单根抗拉力与抗拉强度的研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 77-79.
- [8] 张欣,刘静,郑永刚,等. 4 种植物直根抗折力和抗折强度的研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 338-342.
- [9] 刘鹏飞,刘静,朱宏慧,等. 4 种植物生长旺盛期侧根分支处与相邻上级直根抗折特性的差异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 33-39.
- [10] 李有芳,刘静,张欣,等. 外力作用下 4 种植物根系易损部位的研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(1): 63-68.
- [11] 申向东. 材料力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [12] 李同林. 弹塑性力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2006.
- [13] 苑淑娟. 4 种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.
- [14] 刘子壮,高照良,杜峰,等. 黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 66-71.
- [15] 杨永红,刘淑珍,王成华,等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 138-140.
- [16] Saifuddin M, Osman N, Motior Rahman M, et al. Soil reinforcement capability of two legume species from plant morphological traits and mechanical properties[J]. Current Science, 2015, 108(7): 1340-1347.
- [17] 郑永刚. 4 种植物直根抗折力学特性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
- [18] 陈丽华,余新晓,刘秀萍,等. 林木根系本构关系[J]. 山地学报, 2007, 25(2): 224-228.
- [19] 李有芳,刘静,张欣,等. 4 种植物生长旺盛期根系易受损的外力类型研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 339-344.