

煤矸石多孔土壤与天然土壤特性对比研究

苏迪, 高宏宇, 廖洪强, 程芳琴

山西大学 资源与环境工程研究所, 山西 太原 030006

中图分类号: X752 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)03-0106-04
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.03.018

摘要 煤炭矿区开发会产生和堆存大量的废弃物, 占用大量的土地资源并引起环境污染、土地荒漠化、水土流失等问题。使用煤矸石等废弃物制作多孔土壤应用于矿区的生态修复, 既解决了煤矸石等废弃物的堆存问题又可以恢复生态环境, 是矿区生态修复重要的研究方向。该文章考察了煤矸石发泡制备多孔土壤特性, 包括松装密度、粒级分布、pH、保水性、流失率、保温性等, 并与天然土壤特性进行对比。试验表明, 与天然土壤相比, 煤矸石多孔土壤松装密度降低约 36%, 保水量增加约 51%, 流失率降低约 63.1%, 且保温性更优, 但 pH 偏高, 适于种植耐碱性植物, 需进一步加工处理后方可用于大宗植物生长。

关键词 煤矸石; 土壤; 特性

矿山开发对矿区的生态系统造成了严重的破坏, 如果不加以修复会加速环境荒漠化进程, 同时也是对土地资源的一种严重浪费^[1]。现今治理一般先采取将煤矸石直接回填压实^[2]和煤矸石粉碎后与其他固体废弃物和胶结材料混合后注浆的方式^[3], 再在填埋层表面直接覆盖 300~500 mm 的新土并结合当地实际情况种植合适的绿植来进行生态修复^[4]。根据矿区生态修复的实际情况和需求, 直接选择用矿区大量堆积的固废来进行原位生态修复, 既可以解决固废堆存的问题又可以解决由于挖掘、运输客土所产生的一系列问题, 同时获得良好的生态修复效果, 是矿区生态修复研究的一条重要路线。

煤矸石是煤矿在建井、开拓掘进、采煤和煤炭洗选过程中排出的含炭岩石及岩石, 是煤矿建设、生产过程中的废弃物^[5], 含碳量约为 20%~30%, 其它主要成分是 Al_2O_3 、 SiO_2 以及少量的 MgO 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 SO_3 、 P_2O_5 和稀有元素等微量成分^[6]。现有大量的煤矸石堆存而没有得到有效的资源化利用, 全国总累计量为 70 多亿 t ^[7], 煤矸石堆存不仅会占用大量土地, 还会引起火灾、污染环境和崩塌等问题^[8]。孔涛等^[9]研究表明一定用量的煤矸石可以改善盐碱土壤的生态质量, 煤矸石在土壤中既可以改善土壤容重、孔隙度等物理性质, 又因为自身含有一定的氮磷钾元素还可以提高土壤中的养分含量, 所以选择煤矸石作为修复矿区生态的主要原材料。杜韬等^[10]将煤矸石、天然

土壤、玉米秸秆、粉煤灰和保水剂按一定比例混合研究其保水性能, 试验表明可以提高保水性能, 使植物在干旱条件下正常生长。但是直接将煤矸石与天然土壤混合使用的方式存在很多问题, 由于直接混用并不能使土壤形成稳定的土体结构所以保水、抗流失等效果欠佳。现存的问题是采用直接覆盖客土的修复方式产生的水土流失问题比较严重, 而采用直接简单混合使用煤矸石恢复生态的方式效果并不优异。

为此, 本文提出以煤矸石为主要原料, 以水泥为胶凝剂, 以铝粉为发泡剂制作一种煤矸石多孔土壤的技术路线。由于该土壤具有多孔结构和不规则外观形态, 可以形成一定的土体结构, 在保温、透气、保水、抗流失等方面的效果良好, 解决了直接使用煤矸石所产生的保水性能等土壤特性不好导致复植效果不好的问题, 又解决了运输、覆盖大量客土产生的过高成本和天然土壤保水、抗流失等性能不好的问题。试验均与天然土壤的各种特性进行对比, 以期煤矸石在土壤改良方面的应用提供基础数据。

1 试验部分

1.1 试验原料

试验使用煤矸石取自山西襄垣县某煤矿。水泥为市售 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥。铝粉为市售工业铝粉。天然土壤、煤矸石及水泥的化学组成如表 1 所示。

收稿日期: 2019-01-03

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (201903D311007); 襄垣县科技攻关项目 (2018XYSDYY-08)

作者简介: 苏迪 (1995—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用, 877821720@qq.com。

通信作者: 廖洪强 (1966—), 男, 四川广安人, 博士, 教授, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用, 13910766805@139.com。

表 1 天然土壤、水泥、煤矸石化学组成 /%

Table 1 Chemical composition of natural soil, cement, coal gangue

Element	Si	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Ti
Natural soil	17.40	6.76	6.02	3.66	2.00	1.33	0.71	0.45
Cement	9.51	4.29	36.50	2.09	0.78	2.32	0.27	0.38
Coal gangue	16.30	11.00	0.53	2.22	2.17	0.34	0.32	0.62

1.2 试验方法

1.2.1 煤矸石多孔土壤的制备方法

首先将煤矸石进行破碎、磨粉和筛分,取小于 0.15 mm 的煤矸石粉作为试验原料;然后,分别称取煤矸石粉 950 g、P. O 42.5 水泥 50 g、铝粉 0.7 g 和水 620 g;再先将煤矸石粉与水泥充分混合均匀,再将混合好的粉料置于分散机中加水搅拌制浆,以 800 r/min 的搅拌速度搅拌 5 min,再加入铝粉,并以 1 200 r/min 的搅拌速度继续搅拌 30 s 进行发泡;最后将制备好的发泡浆体注入模具中,并放入恒温箱中在 50 ℃ 温度下养护 12 h 固化成型,养护完成后将固化成型的试块放入鼓风干燥箱中在 105 ℃ 下烘干 24 h,将烘干后试块用颚式破碎机进行破碎并筛分,制成粒径小于 5 mm 的煤矸石多孔土壤样品,用于性能分析测试。

1.2.2 测试方法

煤矸石多孔土壤样品的测试指标主要包括松装密度、粒级分布、保水量、流失率和保温性 5 个指标。

(1) 松装密度测试方法

称取 100 g 的煤矸石多孔土壤,将称好的煤矸石多孔土壤倒入量筒中测出其体积记为 V_0 。按公式(1)计算:

$$S = 100/V_0 \tag{1}$$

式中, S 为松装密度, g/cm^3 ; V_0 为体积, cm^3 。

(2) 粒级分布测试方法

将煤矸石多孔土壤称重记为 G ,将筛子按照孔径 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 的顺序放置在电动筛上,以相同的功率将煤矸石多孔土壤震动筛分 5 min 后,称取各层质量,其中 5 ~ 4 mm 记为 g_1 、4 ~ 3 mm 记为 g_2 、3 ~ 2 mm 记为 g_3 、2 ~ 1 mm 记为 g_4 、< 1 mm 记为 g_5 ,按公式(2)计算不同粒径范围所占质量分数:

$$Y = g/G \times 100\% \tag{2}$$

式中, Y 为质量分数,%; g 为不同粒径范围中煤矸石多孔土壤质量, g ; G 为煤矸石多孔土壤总质量, g 。

(3) 保水率和流失率指标的测试方法:

在直径为 100 mm 的漏斗 (G_1) 中均匀铺上 100 g 的煤矸石多孔土壤并称重记为 G_2 。称取水量 300 g,通过设计的测量装置向漏斗中的土层缓慢均匀地倒入,

静置放至漏斗无水滴下,并称重记为 G_3 ,静置至无水滴后再将漏斗及过滤物在 105 ℃ 烘干至恒重,并称重记为 G_4 。测试装置如图 1 所示。按公式(3)、(4)计算保水率和流失率:

$$G = (G_3 - G_2)/(100 + G_4 - G_2) \tag{3}$$

$$L = (G_2 - G_4)/(G_2 - G_1) \tag{4}$$

式中, G 为保水率,%; L 为流失率,%。

(4) 土壤保温性能测试方法:

选用两个优利德 UT321 型数字式测温仪,可实时记录环境与土壤的温度值。将煤矸石多孔土壤装入 500 mL 的烧杯中使土柱高度为 8 cm,再将其中一个测温仪测量温度的热电偶置于土柱的正中央,此时热电偶距土柱边界均为 4 cm 则其受外界各方向温度变化影响相同,再将另一个测温仪的热电偶放置在烧杯旁测量环境温度,设定测温仪每 1 h 自动记录实时的环境与土壤温度,最后根据土壤与环境在同一时间的不同温度及测量时间内的温度变化体现土壤的保温效果。

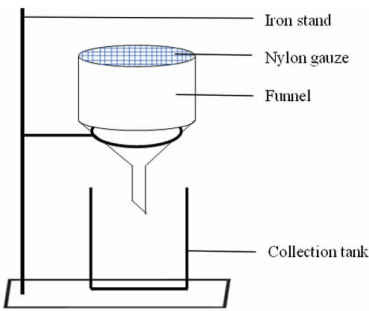


图 1 土壤保水率和流失率测试装置图

Fig. 1 Test equipment for soil water retention and loss rate

2 结果与分析

2.1 松装密度、粒度分布及 pH 比较

按照前述方法进行试验和测试,得到天然土壤与煤矸石多孔土壤的松装密度和粒级分布。天然土壤松装密度为 1.05 g/cm^3 ,小于煤矸石多孔土壤的松装密度 0.67 g/cm^3 ,松装密度降低约 36%,松装密度越小则孔隙率越大;由表 2 可以看出,煤矸石多孔土壤的粒径分布较天然土壤集中,因为粒径大小越相近所产生的孔隙率越大,所以煤矸石多孔土壤的孔隙率大于天然土壤。孔隙率对保水率和保温性都有影响,一般而言,土壤的孔隙率越大,其孔洞可储存更多水分和空气,导致保水性能和保温性能更优。

天然土壤的 pH 值为 8.15,小于煤矸石多孔土壤的 pH 值 11.25,由于使用原料中水泥为碱性物质,所以制作出的煤矸石多孔土壤呈现碱性。显碱性的煤矸石多孔土壤可以种植耐碱性植物,也可与酸性土壤进行混合使用来改良酸性土壤。

表 2 天然土壤与煤矸石多孔土壤的粒级分布

Table 2 Grain size distribution of natural soil and coal gangue porous soil

Granularity / %	5 ~ 4 mm	4 ~ 3 mm	3 ~ 2 mm	2 ~ 1 mm	< 1 mm
Natural soil	18.75	14.03	9.58	19.35	38.29
Porous soil	3.75	8.43	8.59	25.36	53.87

2.2 保水性与流失率比较

经测试,天然土壤保水率为 57%,小于煤矸石多孔土壤保水率 86%,保水率增加约 51%。试验结果证明,煤矸石多孔土壤的保水性优于天然土壤。其原因可能是天然土壤质地疏松不能形成稳定的土体结构,而制作煤矸石多孔土壤时使用了发泡工艺,形成了多孔的稳定的土体结构,有利于吸收和储存更多水分,所以增加了保水效果。

经测试,天然土壤流失率为 2.52%,而煤矸石多孔土壤流失率为 0.93%,流失率降低约 63.1%。试验结果证明,煤矸石多孔土壤的抗流失性能远优于天然土壤。其原因可能是天然土壤中含有较多易溶于水的物质,一般而言,含有更多易溶解于水的物质,更易造成土壤流失;而煤矸石多孔土壤使用水泥作为胶凝物质具有较稳定的结构,且煤矸石和水泥的胶凝组分均难溶于水,遇水不易流失。

2.3 保温性比较

所测温度为土壤中植物根系生长所处的环境温度,保温性旨在保持植物生长温度位于相对较高的水平,防止环境温度过低对植物的生长产生不利影响。在相同条件下对天然土壤和煤矸石多孔土壤进行对比试验,试验结果如图 2 所示,在相同的升温过程中,天然土壤和煤矸石多孔土壤的起始温度和后续温度均明显高于环境温度,这说明土壤具有保温性;与天然土壤相比,煤矸石多孔土壤的升温段初期与天然土壤温度接近,但在升温段后期和高温段以及降温段的温度均高于天然土壤;从 10 h 内的平均温度来看,煤矸石多孔土壤、天然土壤和环境温度的平均温度分别为 18.36 ℃、

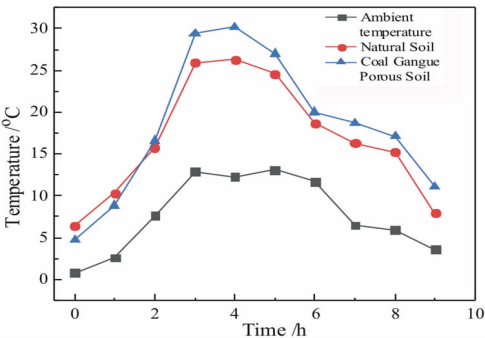


图 2 煤矸石多孔土壤与天然土壤保温性对比

Fig. 2 Comparison of thermal insulation between porous soil and natural soil

16.74 ℃ 和 7.7 ℃,煤矸石多孔土壤和天然土壤的平均温度明显高于环境温度,说明土壤具有保温效果;相比天然土壤而言,煤矸石多孔土壤较天然土壤具有更好的保温性,其原因可能是煤矸石本身的导热性与储热性能优于天然土壤,更主要的是煤矸石多孔土壤在制作的过程中形成了丰富的多孔结构,其中含有大量空气,且空气的导热性弱于土壤颗粒,所以具有更好的保温性。

2.4 矿物组成比较

如图 3 所示,煤矸石与煤矸石多孔土壤的组成矿相基本相同,证明在制作过程中并没有破坏煤矸石稳定的矿相形态。天然土壤与煤矸石多孔土壤的主要组成都是石英,而相比于天然土壤的单一组成,煤矸石多孔土壤还具有一定量的其他硅酸盐类矿物,如锆石、高岭石、丝光沸石和锰钙辉石。不同的矿物组成也将带来不同的性能特性。高岭石属于黏土矿物,吸水性强,和水结合后具有良好的可塑性,性质稳定,含有高岭石可以起到增强结构的稳定性和增加吸水性的作用^[11]。丝光沸石是沸石矿的主要矿物组分之一,由于硅铝比高,五元环多,故耐酸性及热稳定性特别高,同时丝光沸石还具有良好的吸附性能^[12]。所以煤矸石多孔土壤的组成中含有丝光沸石可以使自身具有一定的吸附性能,对本身多孔结构产生的特性起到正向的促进增强作用。

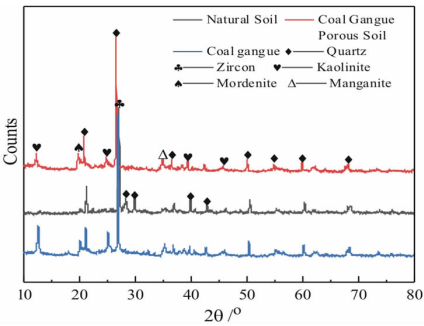


图 3 天然土壤、煤矸石多孔土壤和煤矸石 XRD 对比

Fig. 3 Comparison of XRD of natural soil, coal gangue porous soil and coal gangue

2.5 微观结构比较

从图 4(a)可以看出,煤矸石多孔土壤具有明显的胶凝成团结构,且该结构中含有丰富的孔洞;从图 4(b)可以看出,煤矸石多孔土壤颗粒内部具十分丰富的孔洞和裂隙,且孔洞和裂隙中含有许多胶凝矿物和针状纤维矿物;从图 4(c)可以看出,天然土壤的表面则显现出许多细小颗粒堆积结构,颗粒之间存在堆积孔隙;从图 4(d)可以看出,天然土壤颗粒内部呈现较为致密的矿物结构,未见多孔结构。从煤矸石多孔土壤与天然土壤的表观及颗粒内部结构可以看出,煤矸

石多孔土壤整体上呈现多孔的胶凝成团结构,使其结构稳定且富有孔洞,这样的结构赋予了煤矸石多孔土壤更优的保水性、抗流失和保温性能;而天然土壤则整体上呈现出相对松散而内部致密的颗粒堆积结构,这样的结构则显现出较低的保水性、较高的流失率和较低的保温性。

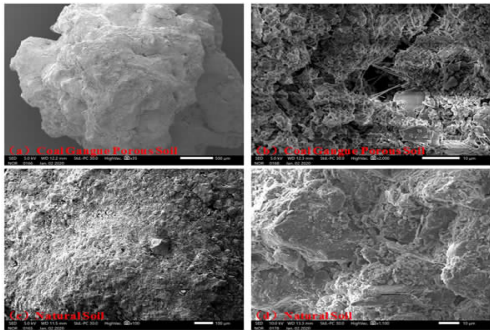


图4 煤矸石多孔土壤与天然土壤 SEM 图
Fig. 4 SEM images of porous soil and natural soil

3 结论

研究表明,采用发泡工艺装备的煤矸石多孔土壤较天然土壤具有更高的保水性,更优的保温性和更低的流失率,显示出更优的土壤特性。这两种土壤结构上差异较大,煤矸石多孔土壤整体上呈现多孔的胶凝成团结构,使其结构稳定且富有孔洞,这样的结构赋予了煤矸石多孔土壤更优的保水性、抗流失和保温性能;而天然土壤则整体上呈现出相对松散而内部致密的颗粒堆积结构,这样的结构则显现出较低的保水性、较高

的流失率和较低的保温性。所以使用煤矸石多孔土壤替代天然土壤或与天然土壤按一定比例混合用于矿区生态修复可以使其修复后具有更良好的土壤特性,更有利于生态恢复。但是,煤矸石多孔土壤在制备工艺中人为添加了无机胶凝材料(水泥),其水介质中呈现更高的 pH,不利于大宗植物生长,需要进行后续加工处理。

参考文献:

[1] 吴伟业. 矿区生态修复研究进展[J]. 广东化工,2014,41(1):82-83.

[2] 张廷会,李小刚,贺卫中,等. 丘陵沟壑区煤矸石填埋技术及应用[J]. 中国煤炭,2016,42(2):107-111.

[3] 耿晓兵. 利用煤矸石回填煤矿采空区[J]. 中国科技信息,2018(22):42,44.

[4] 董文龙,白涛,杨旭,等. 矿区生态修复研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(1):146-148.

[5] 冯晶晶,张成梁,刘治辛,等. 自然降水条件下煤矸石坡土壤含水量及径流变化[J]. 中国水土保持科学,2016,14(4):60-67.

[6] 贾敏. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):46-52.

[7] 王鹏涛. 煤矸石综合利用的现状及存在的问题研究[J]. 科学技术创新,2019(16):182-183.

[8] 孙春宝,董红娟,张金山,等. 煤矸石资源化利用途径及进展[J]. 矿产综合利用,2016(6):1-7,12.

[9] 孔涛,郑爽,张莹,等. 煤矸石对盐碱土壤绿化和土壤微生物的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(6):321-326.

[10] 杜韬,王冬梅,张泽洲,等. 煤矸石植生基质保水性能对黑麦草生长的影响[J]. 中国水土保持科学,2019,17(4):75-84.

[11] 董震雨,王双明,申涛. 含煤地层岩石吸水性分析——以陕北杭来湾煤矿为例[J]. 煤田地质与勘探,2017,45(5):94-99.

[12] 李雪英,瞿广飞,曾金花. 丝光沸石静态吸附牛尿废水中氮的试验研究[J]. 材料导报,2013,27(14):78-81.

Comparative Study on Characteristics of Coal Gangue Porous Soil and Natural Soil

SU Di, GAO Hongyu, LIAO Hongqiang, CHENG Fangqin

Institute of Resources and Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

Abstract: The development of coal mining areas will generate and accumulate a large amount of waste, occupy a large amount of land resources and cause problems such as environmental pollution, land desertification and soil erosion. The use of coal gangue and other wastes to make porous soil for ecological restoration in mining areas not only solves the problem of waste storage of coal gangues but also restores the ecological environment, which is an important research direction for ecological restoration in mining areas. This article examined the characteristics of porous soil prepared by foaming coal gangue, including bulk density, particle size distribution, pH, water retention, loss rate, heat retention, etc., and compared it with natural soil characteristics. Experiments showed that compared with natural soil, the loose density of coal gangue porous soil was reduced by about 36%, the water retention was increased by about 51%, the loss rate was reduced by about 63.1%, and the thermal insulation was better, but the pH was high, suitable for planting alkali-resistant Sexual plants. Further processing was required before they can be used to grow large plants.

Key words: coal gangue; soil; properties

引用格式:苏迪,高宏宇,廖洪强,程芳琴. 煤矸石多孔土壤与天然土壤特性对比研究[J]. 矿产保护与利用,2020,40(3):106-109.

Su D, Gao HY, Liao HQ and Cheng FQ. Comparative study on characteristics of coal gangue porous soil and natural soil[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(3): 106-109.