

阳泉矿区自燃煤矸石山绿化中覆盖层碾压效果试验

陈胜华¹, 胡振琪², 李美生³, 张勇³, 邢超³

[1. 太原理工大学阳泉学院, 山西 阳泉 045000; 2. 中国矿业大学(北京)

土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 3. 山西阳泉煤业(集团)有限责任公司, 山西 阳泉 045000]

摘要: 自燃煤矸石山是矿区环境主要的污染源之一, 对其实施封闭并绿化, 需要构建具备一定阻隔空气能力的覆盖层, 而覆盖层多为土质材料经碾压构成, 空气阻隔性受其碾压质量的影响。结合阳泉三矿煤矸石山治理现场进行野外碾压试验, 研究了煤矸石山现场碾压工具及碾压条件下的压实效果。通过对不同铺土厚度的黄土进行碾压, 测定紧实度和干密度来表征碾压效果, 分析以压实度(85%)作为压实质量控制标准的条件下合理的碾压工程参数。结果表明, 利用现场自制碾磙(4 t)进行平碾碾压, 浅部土层受到碾压遍数的影响较大, 深部土层受到碾压遍数的影响较小, 其特征深度在 15—25 cm; 建议的施工方法及碾压参数为: 含水量接近最优含水率(相差不超过±2%), 松铺厚度 20~40 cm, 碾压 3~5 遍。

关键词: 自燃煤矸石山; 覆盖层; 碾压质量; 紧实度; 压实度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0020-05

中图分类号: X752

An Experiment on Rolling Compaction Effect of Covering Layer on Coal Gangue Pile with Spontaneous Combustion in Yangquan City

CHEN Sheng-hua¹, HU Zhen-qi², LI Mei-sheng³, ZHANG Yong³, XING Chao³

[1. Yangquan College, Taiyuan University of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China;

2. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology

(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Yangquan Coal Industry (Group) CO., LTD, Yangquan, Shanxi 045000, China]

Abstract: Spontaneous combustion of coal gangue hill is one of the main environmental pollution sources in mining area. To seal and afforest the coal gangue, a covering layer with a certain air barrier property is needed. The covering layer is made of soil materials by rolling compaction and thus the performance of air barrier depends on rolling quality. The compaction effect in relation to rolling tool and the rolling conditions of field coal gangue was studied by combining on-site compaction test for coal gangue dump governance in the Yangquan 3rd coal mine. Based on the rolling compaction experiment on the loess of various thicknesses, soil rigidity and dry density were measured to illustrate the rolling effect and the reasonable rolling parameters were analyzed under the condition that the degree of compaction(85%) was used as the compacted quality control standard. By utilizing the self-made grinding roller(4 t) for flat rolling, results show that shallow soil was more sensitive to rolling frequency in comparison with deep soil, and its corresponding depth was about 15—25 cm. The suggested construction proposal and rolling parameters are that moisture content is close to the optimum rate of water content (between±2%), loose paving thickness is 20—40 cm, and the material is compacted by 3~5 times rolling.

Keywords: coal gangue pile with spontaneous combustion; covering layer; rolling compaction quality; soil rigidity; compaction degree

收稿日期: 2013-05-24

修回日期: 2013-10-21

资助项目: 山西省自然科学基金项目“山西自燃煤矸石山生态修复的覆压阻燃机理及其优化技术模式研究”(2011011030-3); 国家自然科学基金项目“酸性煤矸石山源头污染控制与生态恢复一体化机理与方法”(50874112); 阳泉煤业(集团)有限责任公司“自燃煤矸石山生态恢复优化参数研究”(2012005109)

作者简介: 陈胜华(1971—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 博士, 副教授, 主要从事土地复垦与矿区生态重建的研究。E-mail: csh1971@126.com。

通信作者: 胡振琪(1963—), 男(汉族), 安徽省五河市人, 博士生导师, 教授, 从事土地复垦与生态重建。E-mail: huzq@cumtb.edu.cn。

自燃煤矸石山是煤矿区主要的污染源之一,对其进行综合治理一直是中国煤矿区土地复垦和生态环境修复的难点^[1-2]。目前中国煤矸石堆存量(据估计,全国历年堆放的煤矸石累计存量约 4.5×10^9 t,且每年以 2×10^8 t 的速度递增)^[2-4],综合利用技术水平低(不超过 30%)^[3],尚不可能如美国等发达国家那样,大量消耗煤矸石甚至彻底铲除^[5-6],基于此将煤矸石山作为废弃物污染场,对其实施封闭并绿化,是对煤矸石山进行综合环境治理的有效途径,也是煤矿区可持续发展的重要保障^[4]。由于煤矸石山特殊的堆积形式及煤矸石的高含硫、含碳量,露天堆积的煤矸石山极易自燃^[7-12],从而给煤矸石山综合治理及生态修复带来许多限制因素和技术难题。

目前中国煤矸石山治理实践中自燃防治常用的办法是在煤矸石山表面构建覆盖层以改变煤矸石山的供氧蓄热条件,即选用土质惰性材料并经有效压实,使其密实度增大,孔隙比减小,空气阻隔性增强,以保障覆盖层具备一定的低渗透性能,从而有效阻隔空气,防止煤矸石山内部发生自燃^[8-10]。覆盖材料的空气阻隔性与其压实程度有很大关系^[13-19],而中国在自燃煤矸石山覆土压实方面,实践较多,有针对性的理论及试验研究较少^[1-2]。调研表明,煤矸石山有关覆土工程设计、压实方法及压实质量控制等,多是借用其他土建工程项目的经验与参数,在实践中凸显的问题有:压实工程的实施无针对性的施工标准,压实质量的控制无实用可行的指标,从而导致煤矸石山治理投入大、成效差。分析原因,煤矸石山有其特殊的地形条件和施工环境,例如坡面长、倾斜度大、机械施工条件差等,有效实施碾压难度较大,且覆土层直接摊铺于堆积疏松的煤矸石上,其基层刚性差,一定程度上影响碾压效果。因此,需要研究煤矸石山构建覆盖层相关的碾压方法及参数,如碾压遍数、铺土厚度及质量控制标准等,为煤矸石山综合治理实践提供科学的试验数据及参数设计思路。本研究在山西省阳泉市的自燃煤矸石山治理现场进行了黄土碾压试验。结合现场碾压条件,使用现场自制的煤矸石山压实工具,对不同铺土厚度的覆盖用黄土材料实施碾压,并测定紧实度和干密度以表征碾压效果,研究以压实度(85%)作为质量控制标准条件下合适的碾压遍数及铺土厚度,旨在为煤矸石山构建覆盖层提供碾压参数及工程设计方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料及工具

本碾压试验在煤矸石山治理现场进行,试验材料

为料场代表性黄土,土料来自附近 307 复线施工现场。测定其界限含水率,塑性指数 IP 为 13.7,属于粉质黏土^[20],天然含水率在 14.5%~19.3%,平均 16.9%,干密度在 $1.32 \sim 1.45$ g/cm³。根据室内轻型击实试验结果^[21],该土样的最大干密度为 1.82 g/cm³,最优含水率 16.4%。碾压工具为施工现场的压实工具。由于该项目需要在煤矸石山斜坡上进行碾压操作,而国内无专用的大坡面碾压机具,工程项目组自制一套设备,即用铁皮包裹混凝土构成碾磙(主要参数为:截面直径 1.58 m,宽 1.1 m,单位重量 3 800 kg,总重约 4 t),由挖掘机牵引作业,依据平碾碾压法的压实原理,由碾磙的重力作用于土体达到压实目的。该碾压工具可在 40° 以下的坡面工作,牵引机构纵横行走自如,牵引速度调节非常方便。

1.2 试验设计

试验场地选在阳泉矿大垆梁煤矸石山治理现场,具体在山顶一处平台。将试验用黄土按松铺厚度 20,40,60,80 cm 分段连续摊铺,每段面积按 $3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 布置。人工铁锹分段整平后用煤矸石山现场自制碾压工具进行碾压(图 1),往返碾压共 5 遍。每碾压一遍,即用土壤紧实度仪测量土层剖面的紧实度,另用环刀取 3 个平行样室内测定干密度。

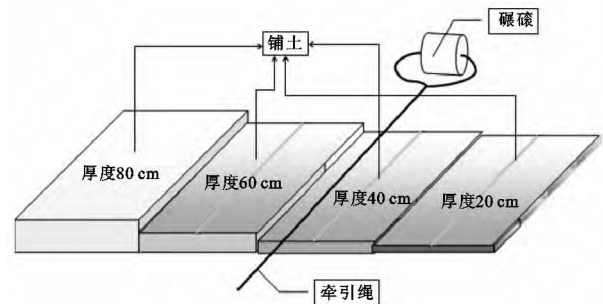


图 1 煤矸石山碾压试验

土壤紧实度又称土壤硬度,也叫穿透阻力,是指土壤对穿透、剪切作用的抵抗能力,是土壤机械组成、孔隙度、容重、含水状况等的综合表现,用力的大小来衡量(kPa)^[22-23]。本试验选用美国芝加哥 Spectrum 技术公司生产的 SC 900 数字式土壤紧实度仪,以其末端穿透土壤时因土壤的抵抗能力而作用的阻力作为土壤紧实度,仪器的末端为锥形,可用于深层土壤的测定。紧实度测定在铺土每碾压一遍后进行,按照梅花状布点选择 5 个样点,每个测点从 0 开始,在土层剖面上由浅入深每隔 2.5 cm 为一个层次,即有 0—2.5, 2.5—5.0, 5.0—7.5 cm 等多个层次。

干密度的测定须在土层剖面分层取样。铺土厚度 20,40 cm,均在剖面分上、下两层取样;铺土厚度

为 60 cm, 在剖面分上、中、下 3 层取样; 铺土厚度 80 cm, 在剖面分上、中、下、底 4 层取样。每层取样, 需同时用环刀取两个代表性土样, 以烘干法测定试样的含水率 ω , 当两个测值的差值小于 1% 时, 取平均值。干密度反映土质材料的压实效果, 密度越大, 孔隙越小, 土质材料也就越密实, 说明压实效果越好, 反之, 压实效果就差一些^[18]。在工程中, 土的压实程度用压实度 D_c 来表示(式 1), 本试验用的黄土测得最大干密度为 1.82 g/cm^3 :

$$D_c = \frac{\text{压实后实测干密度}}{\text{室内标准功能击实的最大干密度}} \times 100\% \quad (1)$$

本文依托课题, 研究中基于煤矸石山坡面压实具有一定难度, 不可能如路基工程类达到高的压实度 ($\geq 90\%$)^[24], 故各种覆盖材料的空气阻隔性是在其压实度约 85% 的条件下测试的^[17], 因此, 试验以压实度 85% 作为压实质量控制标准, 研究该压实目标条件下合理的碾压工程参数。

2 结果与讨论

试验通过测试不同厚度土层的紧实度和干密度, 来衡量土层的压实效果。针对碾压遍数和铺土厚度对紧实度及干密度的影响分别分析如下。

2.1 碾压遍数对土层紧实度和干密度的影响

分析图 2 不同厚度土层碾压后紧实度变化。当铺土厚度为 20 cm 时, 随着碾压遍数的增加, 不同深

度的紧实度都有增长的趋势, 碾压 3 遍, 土层不同深度的紧实度均超过 2 000 kPa, 碾压至 5 遍后, 土层整体的紧实度较大, 均超过 2 500 kPa。

当铺土厚度为 40 cm 时, 随着碾压遍数增加, 不同土层深度的紧实度均有增加, 且 1~3 遍的增长趋势较为明显, 碾压 3 遍后, 不同土层深度的紧实度从 0~1 000 kPa 升高到 1 000~2 000 kPa, 约增加 1 倍, 且变化比较均匀, 碾压 5 遍后, 土层的紧实度有所增加但趋势不是很明显, 在土层深度在 12~20 cm 处, 增加碾压遍数, 土层紧实度几乎与碾压 3 遍时的紧实度相同, 在 2 000~2 500 kPa。当铺土厚度为 60 cm 时, 随着碾压遍数的增加, 浅部土层(土层深度大约在 20~30 cm 以内)的紧实度增加较快, 碾压 5 遍后, 达到了整体较大的水平, 紧实度在 2 000~2 500 kPa; 而深度较大的土层(土层深度超过 20~30 cm), 碾压遍数对紧实度的影响不是很明显, 碾压 2 遍后, 紧实度在 1 000 kPa 左右, 碾压 3 遍、5 遍后, 不同深度土层的紧实度约在 1 500 kPa 左右。

当铺土厚度为 80 cm 时, 随着碾压遍数的增大, 浅部土层(土层深度小于 15~25 cm)的紧实度增加较快, 碾压 1 遍时浅部土层的紧实度在 500~1 000 kPa, 碾压 5 遍后升高到 2 000~2 500 kPa, 较深土层(土层深度超过 15~25 cm)的紧实度受碾压遍数的影响较小, 碾压 1 遍时在 1 000~1 500 kPa, 碾压 5 遍后为 2 000~2 500 kPa。

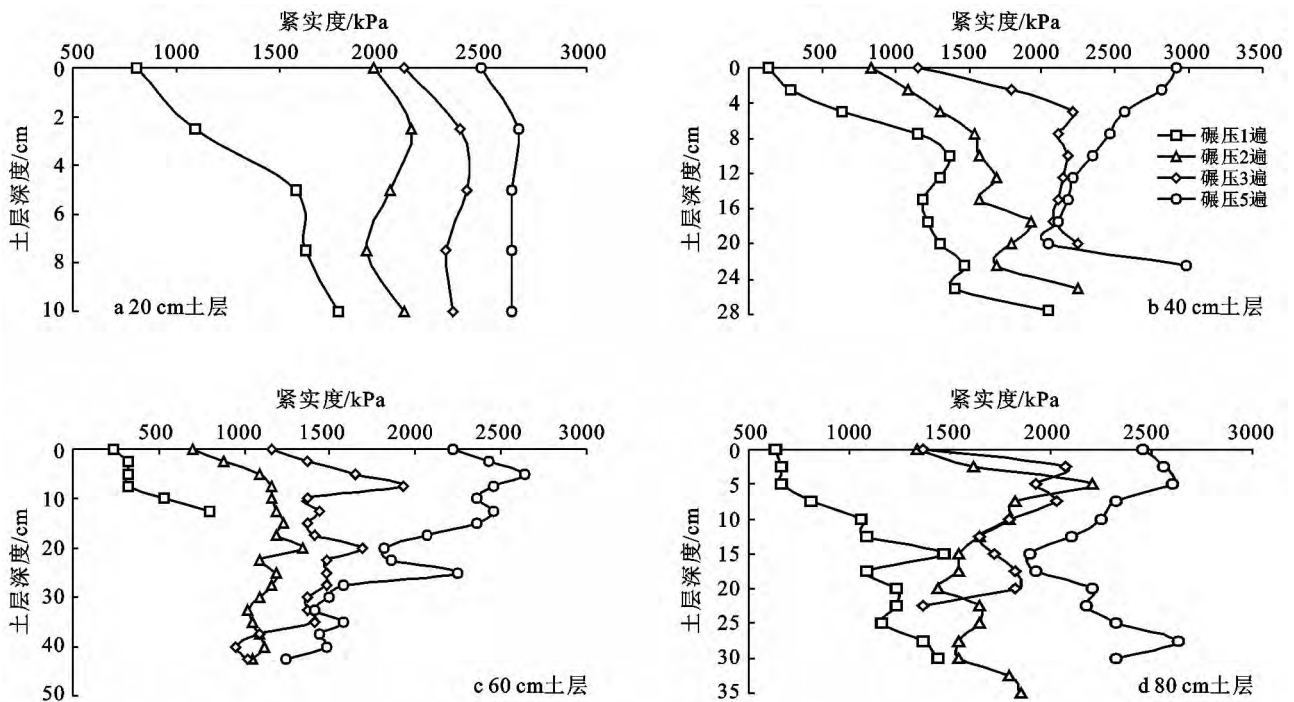


图 2 不同厚度土层碾压后紧实度变化

可以得出,碾压遍数的增加会增大土层的紧实度,且 1~3 遍时紧实度增大的趋势较大,而 3 遍以后紧实度有所增加,但不是很明显;浅部土层(土层深度小于 15—25 cm)受碾压遍数的增加紧实度变化较大,而深部土层(土层深度超过 15—25 cm)紧实度的变化受到碾压遍数影响较小。

分析图 3 不同厚度土层碾压后干密度的变化,铺土厚度为 20 cm 时,碾压第 2 遍,上、下土层的干密度均到达较高值,约 1.7~1.8 g/cm³。铺土厚度为 40 cm 时,上土层在碾压第 3 遍时干密度达到最大(约 1.7 g/cm³),下土层在碾压第 2 遍时达到最大(约 1.6 g/cm³),之后随着碾压遍数增加,干密度没有明显

递增(第 5 遍碾压后,上、下土层的干密度在 1.6 g/cm³ 左右),分析原因,应与土壤的含水率在碾压过程中发生变化有关。当铺土厚度为 60 cm 时,随着碾压遍数的增加,上、中部土层的干密度有逐渐增大的趋势(第 1 遍碾压后,上、中部土层的干密度在 1.2~1.3 g/cm³;碾压 5 遍后,干密度增加到 1.5 g/cm³ 左右),而下部土层的干密度在第 3 遍碾压后,干密度不再有明显增加(第 3 遍与第 5 遍几乎持平),这也说明,碾压遍数对下部土层的干密度影响较小。当铺土厚度为 80 cm 时,上、中、下土层在碾压 2 遍后达到较大值(平均干密度约为 1.6 g/cm³),而底部土层受碾压遍数的影响不是很明显。

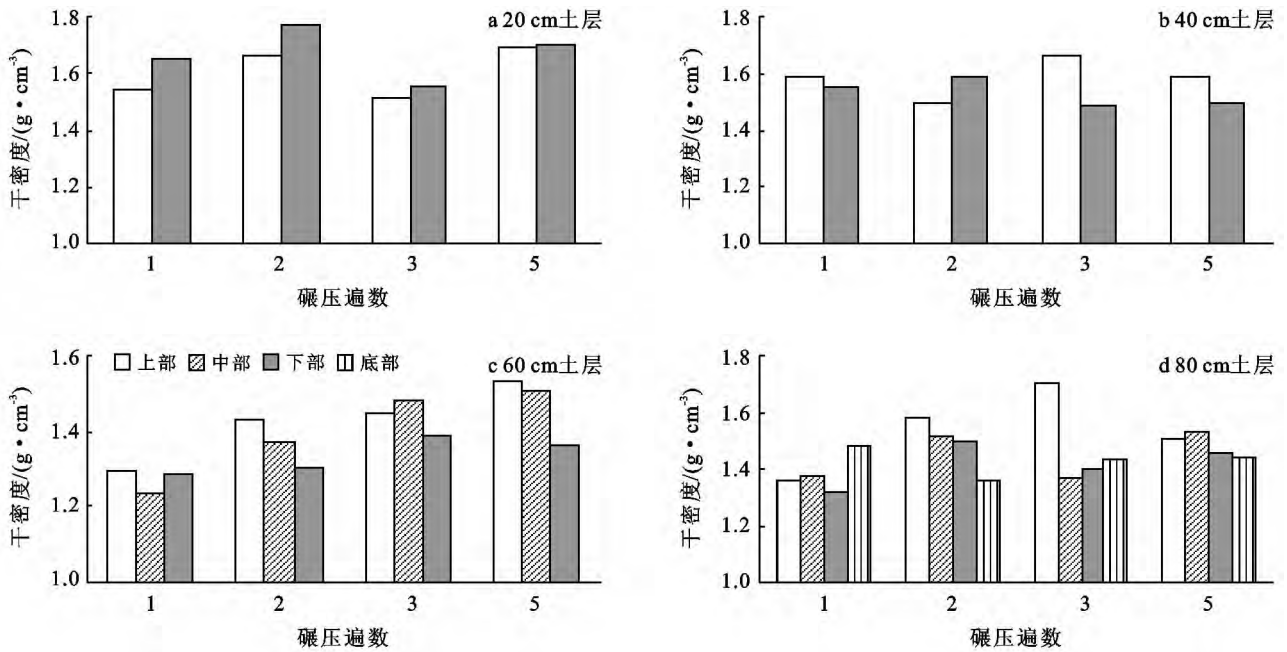


图 3 不同厚度土层碾压后干密度变化

碾压遍数对上、中部土层干密度的影响较大,对下、底部土层的干密度影响较小,表明该碾压条件下具有一定的作用深度。在碾压 3 遍后,上、中部土层的干密度达到较大值,分析原因,土层经碾压后干密度会发生变化,其大小不仅与碾压机具及碾压遍数有关,也受土壤含水率的影响。试验过程中,覆土表层含水率有所降低,改变了初始接近最优含水率的状态,因此,土层干密度不会随碾压遍数增加而持续上升,甚至下降。本试验过程模拟现场施工条件,反复碾压间隔时间符合现场实际。综合分析得出,当碾压遍数为 1~3 遍时,不同厚度土层的紧实度和干密度有较大的增加趋势,随着碾压遍数的增加,紧实度和干密度增加较小,且下部土层受碾压遍数的影响较小。

2.2 铺土厚度对土层紧实度和干密度的影响

土层在碾压后,对各个层位进行取样,并测试其

紧实度和干密度,为了衡量不同铺土厚度经压实后土层整体的紧实度和干密度,现依据式(1)和(2)计算不同铺土厚度土层的平均紧实度与平均干密度。计算结果见表 1—2 及图 4—5。

$$\text{平均紧实度} = \frac{\text{各层位紧密度之和}}{\text{取样层位数}} \quad (2)$$

$$\text{平均干密度} = \frac{\text{各层位干密度之和}}{\text{取样层位数}} \quad (3)$$

表 1 不同铺土厚度的土层平均紧实度

| 铺土厚度/cm | 紧实度/kPa | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 碾压 1 遍 | 碾压 2 遍 | 碾压 3 遍 | 碾压 5 遍 |
| 20 | 1 379.0 | 2 037.2 | 2 316.8 | 2 611.8 |
| 40 | 1 126.0 | 1 570.1 | 2 000.8 | 2 460.8 |
| 60 | 418.2 | 1 099.6 | 1 388.4 | 1 950.3 |
| 80 | 1 098.0 | 1 666.1 | 1 758.6 | 2 290.0 |

表 2 不同铺土厚度的土层平均干密度及压实度

| 铺土厚度/cm | 指标 | 紧实度 | | | |
|---------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 碾压 1 遍 | 碾压 2 遍 | 碾压 3 遍 | 碾压 5 遍 |
| 20 | 干密度/(g·cm ⁻³) | 1.60 | 1.72 | 1.53 | 1.70 |
| | 压实度/% | 87.60 | 94.30 | 84.20 | 93.20 |
| 40 | 干密度/(g·cm ⁻³) | 1.57 | 1.54 | 1.58 | 1.54 |
| | 压实度/% | 86.30 | 84.90 | 86.60 | 84.80 |
| 60 | 干密度/(g·cm ⁻³) | 1.27 | 1.37 | 1.44 | 1.47 |
| | 压实度/% | 69.90 | 75.10 | 79.10 | 80.60 |
| 80 | 干密度/(g·cm ⁻³) | 1.38 | 1.49 | 1.48 | 1.48 |
| | 压实度/% | 75.90 | 81.70 | 81.10 | 81.60 |

注:用压实度来表示土的压实程度(最大干密度为 1.82 g/cm³)。

分析图 4 不同铺土厚度的土层碾压后平均紧实度的变化,同等碾压遍数下,铺土厚度为 20 cm 时,平均紧实度最大,随着铺土厚度的增加,平均紧实度有所下降。总体趋势来看,铺土厚度在 20—40 cm 时,能得到较大的平均紧实度。本次试验用碾压工具为现场自制碾磙,重约 4 t,分析可知,利用该轻碾进行碾压,土体承受的是碾磙重量的静压作用,压实强度较低,作用深度较小。

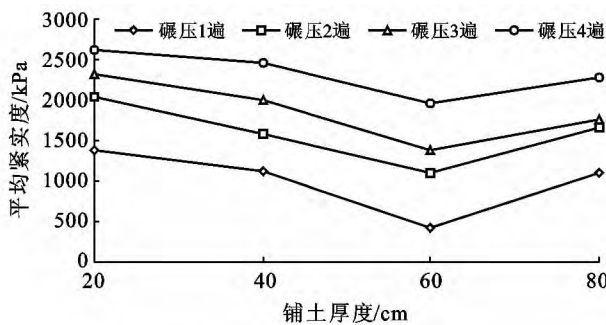


图 4 不同铺土厚度的土层碾压后平均紧实度变化

分析图 5 不同铺土厚度的土层碾压后平均干密度的变化,在相同的碾压遍数下,20—40 cm 土层的平均干密度较大,随着铺土厚度的增加至 60 cm, 80 cm,土层平均干密度有很大程度的下降。20—40 cm 土层碾压 1 遍后,平均压实度为 87.6% 和 86.3%,即碾压 1 遍就基本达到 85%,随着碾压遍数的增多,压实度总体呈递增趋势,碾压 5 遍后,较薄土层的压实度甚至可达到 90%;比较而言,60—80 cm 土层的压实度较低,且随碾压遍数增多,变化并不大,在碾压 5 遍后,总体压实度在 75%~80%。

综上所述,相同的碾压遍数下,随着铺土厚度的增大,平均紧实度和平均干密度成下降趋势,土层整体的压实度也在降低,当铺土厚度在 20~40 cm,平均干密度和平均紧实度呈较高的水平。

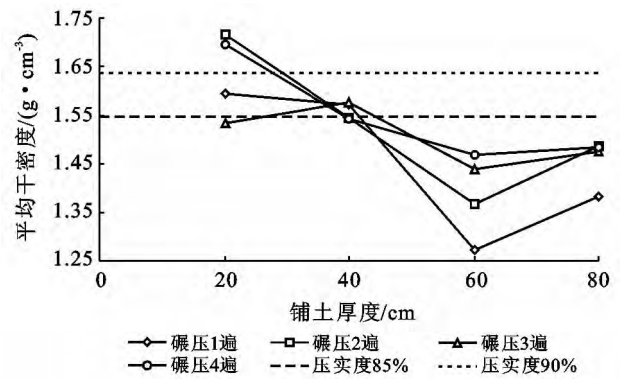


图 5 不同铺土厚度的土层碾压后平均干密度变化

3 结论

(1) 该方法碾压作用深度浅,一定的碾压遍数可满足轻度压实的要求(质量标准为压实度 85%)。

(2) 利用现场自制碾磙(4 t)进行平碾碾压,碾压质量控制标准 85%,建议的施工方案及碾压参数为:含水量接近最优含水率(相差不超过±2%),松铺厚度 20—40 cm,碾压 3~5 遍。

[参 考 文 献]

- [1] 胡振琪. 土地复垦与生态重建[M]. 江苏 徐州:中国矿业大学出版社,2009.
- [2] 张成梁. 山西阳泉自燃矸石山生境及植被构建技术研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.
- [3] 连增增,谭志祥,李培现,等. 老矿区煤矸石山的综合治理与利用研究[J]. 煤炭工程,2010,42(8):86-88.
- [4] 胡振琪,李鹏波,张光灿. 煤矸石山复垦[M]. 北京:煤炭工业出版社,2006.
- [5] 武丽敏. 国外煤矸石处理利用与煤矸石山自燃控制[J]. 煤矿环境保护,1994,8(6):24-26.
- [6] Rainbow A K M. Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes [M]. Elsevier, Inc, 1990.
- [7] 张振文,宋志,李阿红. 煤矸石山自燃机理及影响因素分析[J]. 黑龙江科技学院学报,2001,11(2):12-14.
- [8] 贾宝山,韩德义. 红阳三矿新煤矸石山自燃的预防措施[J]. 煤矿安全,2004,35(6):13-15.
- [9] 黄文章. 煤矸石山自燃发火机理及防治技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [10] 刘守维. 用压实法防止煤矸石山自燃[J]. 煤矿环境保护,1998,12(1):40-43.
- [11] 朱留生. 煤矸石山灭火治理与自燃预警技术研究[J]. 煤炭科学技术,2012,40(8):111-114.
- [12] 王玉平,刘相国,赵华锋. 煤矸石自燃的危害及治理成效[J]. 矿业安全与环保,2002,29(3):51-53.
- [13] 周健. 环境与岩土工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

(下转第 39 页)

- 学,2011,28(5):813-818.
- [4] 张克斌,李瑞,侯瑞萍.宁夏盐池县不同荒漠化治理措施植物多样性研究[J].中国水土保持科学,2004,2(4):66-72.
- [5] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [6] 任继周.草业科学研究方法[M].北京:中国农业出版社,1998:15-28.
- [7] 马克平.生物群落多样性的测度方法[M].北京:中国科学技术出版社,1994:141-165.
- [8] 曹成有.科尔沁沙地退化生态系统植被恢复与重建机制的研究[D].沈阳:中国科学院沈阳应用生态研究所,2002.
- [9] Wilson M V, Schmidt A. Measuring beta diversity with presence-absence data[J]. Journal of Ecology, 1984, 72: 1055-1064.
- [10] 朱志梅,杨持,曹明明.多伦草原土壤理化性质在沙漠化过程中的变化[J].水土保持通报,2007,27(1):1-5.
- [11] 赵哈林,黄学文,何宗颖.科尔沁地区农田土壤沙漠化演变的研究[J].土壤学报,1996,33(3):242-248.
- [12] 赵存玉,赵文智.河北丰宁坝上土地沙漠化现状及其综合整治的研究[J].干旱区资源与环境,1994,8(1):80-85.
- [13] 朱震达,陈广庭.中国土地沙质荒漠化[M].北京:科学出版社,1994.
- [14] 高尚武,王葆芳,朱灵益,等.中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系[J].林业科学,1998,34(2):1-10.
- [15] 陈文业,郑华平,戚登臣.甘南玛曲高寒草甸草地沙化的研究[J].草原与草坪,2008,2(2):77-80.
- [16] 许冬梅,赵丽莉,谢应忠.盐池县草地沙漠化过程中植物群落的动态变化[J].西北植物学报,2011,31(10):2084-2089.
- [17] 苏永中,赵哈林,张铜会,等.科尔沁沙地旱作农田土壤退化的过程和特征[J].水土保持学报,2002,16(1):25-28.
- [18] 李菊梅,王朝辉,李生秀.有机质、全氮和可矿化氮在反应土壤供氮能力方面的意义[J].土壤学报,2003,40(2):33-35.

(上接第 24 页)

- [14] Cabrera J G, Lynsdale C J. A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1988, 40(144): 177-182.
- [15] Stormont J C, Daemen J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(4):325-342.
- [16] 孔祥言.高等渗流力学[M].合肥:中国科技大学出版社,1999.
- [17] 陈胜华,郭陶明,胡振琪,等.压实强度对煤矸石山覆盖材料空气阻隔性的影响[J].煤炭科学技术,2013,41(11):116-119.
- [18] 侍倩,曾亚武.岩土力学实验[M].武汉:武汉大学出版社,2006.
- [19] Kallel A, Tanaka N, Matsutot T, et al. Gas permeability and tortuosity for packed layers of processed municipal solid wastes and incinerator residue [J]. Waste Manage Research, 2004, 22(3):186-194.
- [20] 东南大学,浙江大学,湖南大学,等.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2001
- [21] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准(GB/T50123-1999)[S].北京:中国计划出版社,1999.
- [22] Teh C I, Houlby G T. An analytical study of the cone penetration test in clay [J]. Geotechnique, 1991, 41(1):17-34.
- [23] 孙海运,李新举,胡振琪,等.马家塔露天矿区复垦土壤质量变化[J].农业工程学报.2008,24(12):205-209.
- [24] 中文第一公路工程局有限公司.GB/T50123-1999 公路路基施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2006.