

喷射工艺及土壤质地对岩石边坡植被护坡 效应的影响

李绍才^{1, 2}, 孙海龙^{1, 2}, 杨志荣¹, 何 磊³, 崔保山⁴

(1. 四川大学 生命科学学院, 四川 成都 610064; 2. 四川省励自生态技术有限公司, 四川 成都 610031;
3. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610064; 4. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

摘要: 通过试验定量研究了岩石边坡植被护坡喷射施工过程中, 喷射压力、供水量及所用土壤质地对植被萌发生长及基质混合物稳定性的影响。研究表明: (1) 植被出苗率、后期生长高度及最大收缩率随喷射压力的增加而降低, 随供水量的增加而提高; (2) 基质混合物抗剪强度与回弹率表现为随喷射压力的增加而提高, 随供水量的增加而降低; (3) 喷射压力、供水量及土壤质地对基质混合物的侵蚀影响不显著。试验条件下, 各处理类型的基质混合物的产砂量变幅均为超过 5%; 在相同的工艺控制条件下, 基质混合物所用土壤质地不同, 植被出苗率、后期生长高度及基质混合物最大收缩率、抗剪强度、回弹率均有较大差异, 且受工艺控制条件改变的影响程度不同。以植被出苗率、后期生长高度及基质混合物的最大收缩率、抗剪强度、回弹率为综合评价指标, 对试验结果进行逐步回归分析, 建立了喷射施工的效应模型, 该模型中包括了喷射压力、供水量及基质混合物所用土壤的质地指标。以上研究可为岩石边坡植被护坡工程的喷射施工提供理论依据。

关键词: 岩土力学; 岩石边坡; 植被护坡; 喷射压力; 供水量; 基质混合物

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5374 - 08

EFFECTS OF SPRAYING TECHNIQUES AND SOIL TEXTURE ON ECO-ENGINEERING FOR ROCK SLOPE PROTECTION

LI Shao-cai^{1, 2}, SUN Hai-long^{1, 2}, YANG Zhi-rong¹, HE Lei³, CUI Bao-shan⁴

(1. *College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China*; 2. *Sichuan Lizi Bioenvironmental Engineering Co., Ltd., Chengdu 610031, China*; 3. *College of Architecture and Environment, Sichuan University; Chengdu 610064, China*;
4. *College of Environmental Sciences; Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: The effects of spraying technics, water supply and soil texture on the developing and growth of vegetation are studied quantitatively. The results show: (1) the germination rate, late growth height and the maximal contraction rate decrease with spraying press increasing, while increasing with supply water increasing; (2) shearing resistance and resilience rate of substrate increase with spray press increasing, while decreasing with water supply increasing; and (3) spray press, water supply and soil texture are not notably for erosion. The variety of several treatment sediment yield of substrate exceeds 5%. In the same technical condition, germination rate, late growth height and the maximal contraction rate, shearing resistance and resilience rate of substrate vary with different soil texture. Germination rate, late growth height and the maximal contraction rate, shearing resistance and resilience rate of substrate are selected as integrated evaluation indexes. Then the effect model of spray construction is founded. The studies can provide theories to eco-engineering for rock slope protection.

收稿日期: 2005 - 04 - 19; **修回日期:** 2005 - 05 - 31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415104); 国家“十五”科技攻关计划项目(2003BA901A30)

作者简介: 李绍才(1965 -), 男, 1988 年毕业于兰州铁道学院土木工程专业, 现为博士研究生、高级工程师, 主要从事岩石创面生态防护及抗逆植物资源方面的研究工作。E-mail: lizist@vip.sina.com。

Key words: rock and soil mechanics; rock slope; eco-engineering; spray press; water supply; substrate

1 引言

喷射工艺是目前岩石边坡植被护坡工程最常用的施工技术^[1~8],是指借助喷射机械,利用压缩空气的动力,将基质混合物通过管道输送并喷射到岩石坡面上的一种方法。与喷射混凝土技术相似,具有工艺简单、机动灵活及效率高的优点。

在岩石边坡植被护坡工程喷射施工过程中,喷射压力及供水量等工艺条件的控制是保证工程质量的关键,使形成的基质混合物防护层既要利于植被的正常生长,又要保持一定的稳定。但在工程应用中,对以上工艺参数的控制还处于经验性阶段,施工质量往往取决于喷射手对喷射后基质混合物外观性状的判断,缺乏工程效应定量评价的理论依据;在不同的施工区域,基质混合物所用土壤质地不同常需要改变喷射工艺参数,也为喷射施工人员增加了技术难度。

基于以上原因,本文通过试验,针对基质混合物所用土壤质地,定量研究了喷射压力、供水量对岩石边坡护坡植被萌发生长及基质混合物稳定性的影响,目的是为岩石边坡植被护坡工程的喷射施工提供理论依据。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料与设备

为使研究具有普遍适用性,试验选择了 3 种质地的土壤配置基质混合物, A: 壤土; B: 粘土; C: 壤质砂土, 3 种土壤均取自四川成南高速公路植被护坡工程施工现场, 各类土壤理化指标见表 1。试验时将各类土壤风干过 1 cm 筛后分别与绿化基材(组成及比例见文[7])混合形成 3 种“基质混合物”, 其含水量为 95~100 g/kg, 采用干喷法喷射至试验土槽内, 喷射厚度 10 cm。

表 1 各土壤基本理化指标

Table 1 Basic physical and chemical indexes of soil

项目	pH 值	基质混合物含水量/(g · kg ⁻¹)		
		砂粒(2~0.05 mm)	粉粒(0.05~0.002 mm)	粘粒(<0.002 mm)
A	6.23	465	153	382
B	6.34	245	493	262
C	6.12	791	79	130

喷射施工设备采用 12 m³ 空压机、5 m³/h 转子式混凝土喷射机, 输料管长度 20 m, 直径 75 mm。为有效模拟岩石边坡植被护坡工程性状, 土槽采用人工切割的黄色砂岩石板为底面, 石板长 2.55 m、宽 1.05 m、厚 6 cm; 上面用高 12 cm、厚 1 cm 的 PVC 板锚固形成净空为 1.0 m×2.5 m 的装土槽, 一方留径流口, 石板与 PVC 板连接处用防水胶密封, 整体放置于坡度可调的移动支架上。

2.2 试验设计

试验设置了喷射压力、供水量及土壤质地的三因素完全试验, 喷射压力及供水量水平控制见表 2。喷射压力为喷射机的工作风压, 其与供水量的上下限采用试喷的方法确定, 保证施工可用, 即不因压力过低或水量过低出现喷敷不上的现象; 不因水量过高使基质混合物出现滑落。

表 2 喷射试验水平控制

Table 2 Gradient control of spraying

项目	喷射压力/MPa	供水量/(L · min ⁻¹)
1	0.080	9.0
2	0.085	9.5
3	0.090	10.0
4	0.095	10.5
5	0.100	11.0

2.3 试验方法

试验时在供水管处安装流量表, 控制供水量。试件摆放坡度 60°, 喷枪出料口距石板垂直距离 1 m; 收集对每个试件喷射过程的回弹损失物料, 计算回弹率; 在喷射施工 48 h 后进行人工降雨, 试验坡度为 60°, 降雨强度采用 80 mm/h, 降雨时间为 90 min。试验前将各处理的基质混合物含水量调整至相同, 试验过程用秒表记录坡面产流时间, 并每 5 min 对径流桶读数一次, 降雨结束后在径流桶内用 1 000 mL 烧杯采集水样, 过滤定量径流, 测定泥砂含量。

在降雨试验结束后, 将试件仍成 60° 坡度放置于玻璃棚内, 用 PVC 隔板将试件分成两部分。其中一部分用环刀取样测量基质混合物的物理性质, 用直剪法测定基质混合物抗剪强度, 并测量其自由收缩率(e_{con})、水平收缩率(r_{con}), 收缩率的具体测定方法见文[9]; 另一部分采取相同的养护管理措施, 观察植被的生长状况, 记录出苗率及后期生长高度变

化。除人工降雨试验外，其余各试验均以基质混合物的饱和含水量为起始点。

3 结果与讨论

3.1 喷射工艺及土壤质地对植被萌发生长的影响

植被生长状况的好坏是对岩石边坡植被护坡工程的最直接评价。喷射压力、供水量等工艺控制参数及土壤质地的改变是否对植被的萌发生长产生影响，影响程度如何，是值得探索的重要内容。图 1 是在相同的管理措施下，植被出苗率与喷射压力的关系。由图 1 可知，在试验控制的水平范围内，随喷射压力的逐渐提高，出苗率呈降低趋势。喷射压力的提高导致基质混合物的容重增加(图 2)，孔隙降低，使基质混合物通气状况发生改变，水热交换能力下降，不利于种子的萌发，也影响植物根系的呼吸生长，导致生长变缓(图 3)。因此从植被生长发育的角度考虑，低喷射压力要好于高喷射压力。

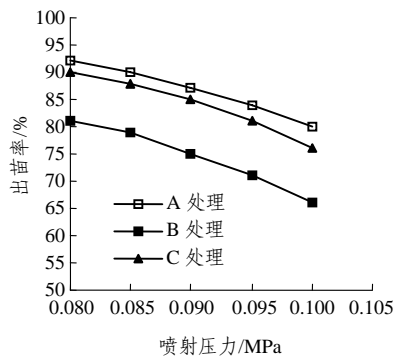


图 1 出苗率随喷射压力变化情况(以供水量 10 L/min 为例)
Fig.1 Variation of germination rate with spraying press (water supply is 10 L/min)

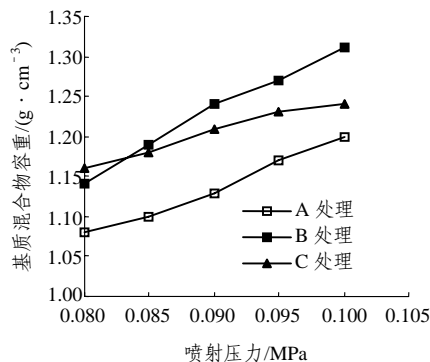


图 2 基质混合物容重随喷射压力变化情况(以供水量 10 L/min 为例)

Fig.2 Variation of substrate bulk density with spray press (water supply is 10 L/min)

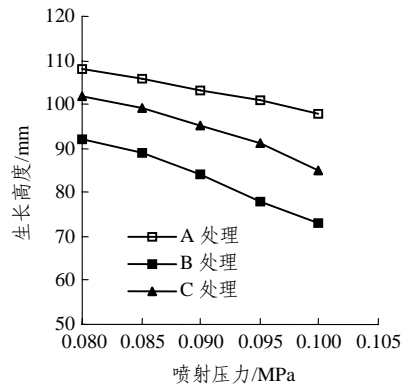


图 3 植被生长高度(播种后 2 个月)随喷射压力变化情况(以供水量 10 L/min 为例)
Fig.3 Variation of growth height (two months after planting) with spray press (water supply is 10 L/min)

土壤质地不同，植被萌发生长受喷射压力的影响不相同。从出苗率来看，在相同的控制水平范围，含壤土的 A 处理降低了 13%，粘土的 B 处理降低了 18%，壤质砂土的 C 处理降低了 15%，说明喷射压力对含壤土的 A 处理影响程度最小；从喷射压力对植被后期生长高度的影响来看，含壤土的 A 处理好于其他处理，且受喷射压力的影响最小，在控制范围内仅降低了 9%，对含粘土的 B 处理影响最大，生长高度降低了 20%。

在相同的喷射工艺参数条件下，出苗率及后期生长高度的大小顺序为 A 处理>C 处理>B 处理，表明基质混合物所用土壤质地对植被萌发生长的影响较大。含壤土的基质混合物(A 处理)由于其内部团粒结构可以良好的保持，其孔隙分布状况较为理想，适合植被萌发生长，受喷射压力变化的影响较小；含粘土的基质混合物(B 处理)则由于存在大量的非活性孔隙，水汽交换能力较弱，植被萌发生长的条件被限制，过高的喷射压力使这种影响更显著；含壤质砂土的基质混合物(C 处理)由于通气性较好，其出苗率与 A 处理相差不大，但在长时间的水分作用下，使土粒沉实，不利于植被生长^[10]。

图 4, 5 分别是供水量对出苗率及后期生长高度的影响。可以看出，在相同的喷射压力下，植被出苗率及后期生长高度均随供水量的增加而提高。供水量的提高可使基质混合物的容重降低(图 6)，利于通气透水，也利于种子萌发及植被的后期生长。在试验水平范围内，含壤土的 A 处理的出苗率提高了 14%，含粘土的 B 处理提高了 7%，含壤质砂土的 C 处理提高了 12%，供水量对 B 处理的影响程度最小；

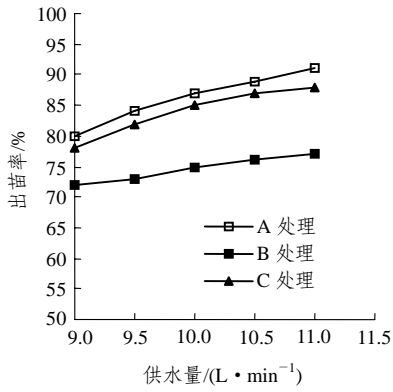


图 4 出苗率随供水量变化情况(以喷射压力 0.09 MPa 为例)
Fig.4 Variation of germination rate with spraying press (spray press is 0.09 MPa)

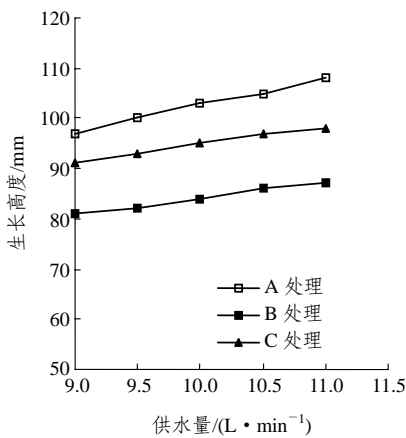


图 5 植被生长高度(播种后 2 个月)随供水量变化情况
(以喷射压力 0.09 MPa 为例)
Fig.5 Variation of growth height (two months after planting) with water supply (spraying press is 0.09 MPa)

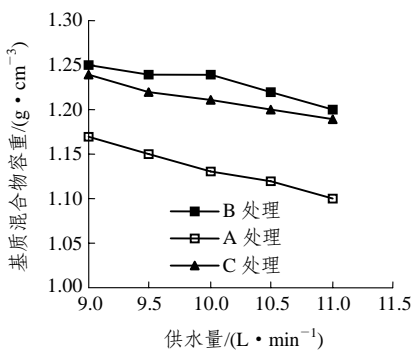


图 6 基质混合物容重随供水量变化情况(以喷射压力 0.09 MPa 为例)
Fig.6 Variation of substrate bulk density with water supply (spraying press is 0.09 MPa)

从植被后期生长高度的影响来看, 含粘土的 B 处理受供水量的影响最小, 仅提高了 7%, 对含壤土的 A 处理影响最大, 生长高度提高了 10%。以上数据说

明, 在相同的喷射压力下, 适当提高供水量可明显促进植被的萌发生长, 但由于所用土壤质地不同, 影响效果上存在差异, 基质混合物采用粘土为土源, 供水量对其效应发挥的正向促进作用较弱。

3.2 喷射工艺及土壤质地对基质混合物抗侵蚀性的影响

在有限的物质条件下, 产砂量的多少是评价基质混合物抵抗雨水侵蚀能力的重要指标。图 7, 8 分别描述了喷射压力及供水量对基质混合物抗侵蚀能力的影响程度。从图 7, 8 中可以看出, 在试验控制的水平范围内, 2 种工艺控制条件对基质混合物产砂量的影响程度并不显著, 且变幅均未超过 5%。在其他条件相同的情况下, 影响侵蚀的因素主要有以下两方面: 一是坡面产流过程的变化, 体现在产流时间及入渗量的变化等方面; 二是基质混合物自身的颗粒性质改变, 主要是水稳性团粒的量变^[11]。施工工艺过程并不改变基质混合物的颗粒性质, 而从前面的研究可以看出, 喷射压力及供水量可影响基质混合物的容重指标, 容重的降低可导致入渗量的提高, 进而影响产流过程, 使产砂量发生变化。但本次试验过程中的产砂量变化并不明显, 而且在相同的喷射工艺参数条件下, 3 种质地的土壤对侵蚀的影响程度也相差不大。初步分析可能是基质混合物中人工添加功能材料 PAM 的重要作用。一般条件下, 壤土由于其较多的水稳性团粒, 因此产砂量较低; 砂土的渗透性较好, 可降低径流减少侵蚀; 粘土非水稳性的小颗粒较多, 且入渗差, 抗侵蚀性较差。但由于基质混合物中加入了 PAM, 能吸附土壤表面的颗粒, 起类似粘结物质的作用, 导致

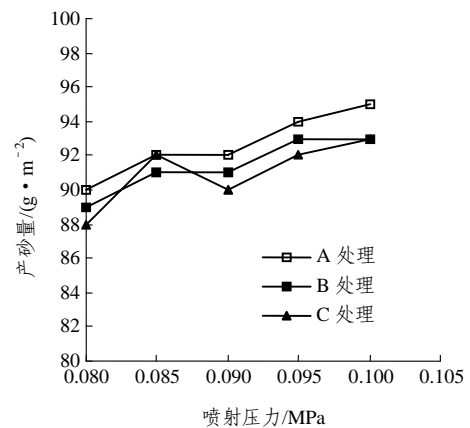


图 7 基质混合物产砂量随喷射压力变化情况(以供水 10 L/min 为例)
Fig.7 Variation of substrate sediment yield with spraying press(water supply is 10 L/min)

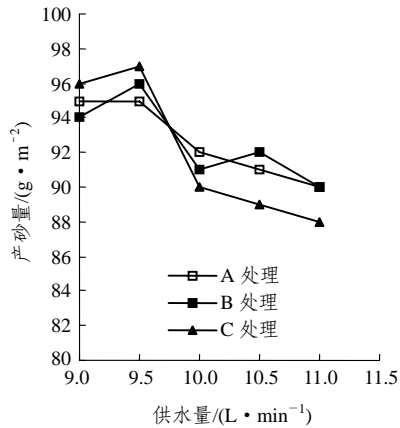


图8 基质混合物产砂量随供水量变化情况(以喷射压力 0.09 MPa 为例)

Fig.8 Variation of substrate sediment yield with water supply (spraying press is 0.09 MPa)

形成大的团聚体抵抗雨滴的破坏作用，增加入渗，使基质混合物的抗侵蚀能力增强^[11~13]，所以基质混合物所用土壤质地不同，其侵蚀量变化不明显，同时其对侵蚀的控制作用远超过了工艺过程的影响程度，使产砂量保持在相对较低的范围，喷射工艺对侵蚀的影响也不显著。

3.3 喷射工艺及土壤质地对基质混合物收缩性的影响

基质混合物的收缩性是指基质混合物失水后的收缩特性，是评价基质混合物整体稳定的重要指标之一，过高的收缩率可使基质混合物产生较多的裂缝，不利于其整体性的保持^[9]。图 9, 10 分别是在相同的供水量下，不同处理的基质混合物最大水平收缩率、最大自由收缩率与喷射压力的关系(起始点为各自的饱和含水量)。由图 9, 10 可知，各处理的

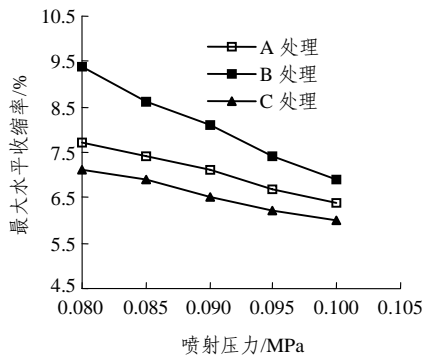


图9 基质混合物最大水平收缩率随喷射压力变化情况 (以供水量 10.5 L/min 为例)

Fig.9 Variation of substrate maximal horizontal contraction rate with spray press (water supply is 10.5 L/min)

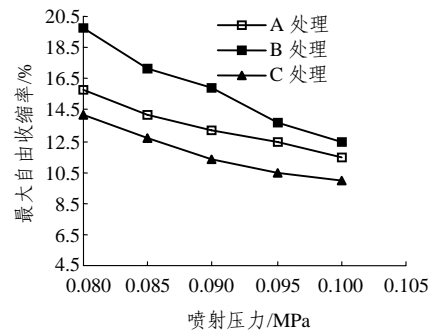


图10 基质混合物最大自由收缩率随喷射压力变化情况 (以供水量 10 L/min 为例)

Fig.10 Variation of substrate maximal free contraction rate with spray press (water supply = 10 L/min)

基质混合物试样的最大水平收缩率及最大自由收缩率随喷射压力增大而降低，其表明在一定条件下，适当增加喷射压力可降低基质混合物的收缩率。在其他条件相同时，收缩率的大小主要受基质混合物内部的空间结构影响，高喷射压力可使基质混合物的内部颗粒结合更紧密，可收缩的空间变小，收缩率降低。

在相同的喷射压力及供水量的情况下，以含粘土的 B 处理的最大收缩率最高，含壤质砂土的 C 处理的最大收缩率最低。在相同条件下，由于粘土的湿胀干缩激烈，具有类似膨胀土的特性，导致其具有较高的收缩率；砂土大颗粒的砂粒较多，且分布较均匀，抵抗收缩变形的能力较强，收缩率较低。

图 11, 12 分别记录了在相同的喷射压力下，不同处理的基质混合物最大水平收缩率、最大自由收缩率与供水量的关系(起始点为各自的饱和含水量)。与喷射压力对收缩率的影响相反，各处理的基

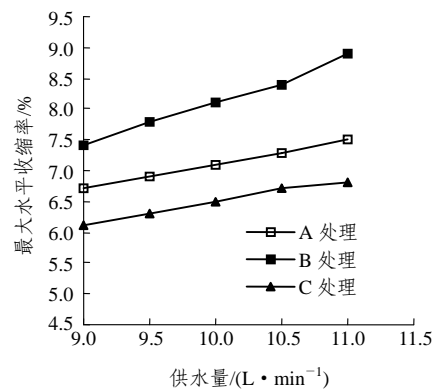


图11 基质混合物最大水平收缩率随供水量变化情况 (以喷射压力 0.09 MPa 为例)

Fig.11 Variation of substrate maximal horizontal contraction rate with water supply (spraying press is 0.09 MPa)

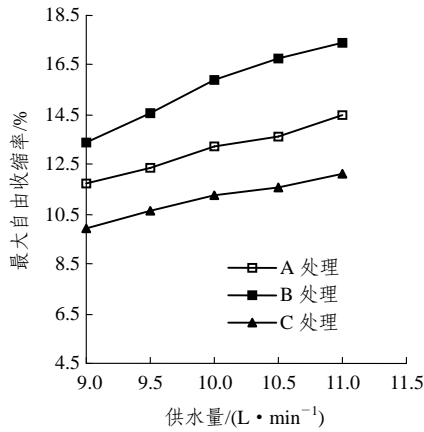


图 12 基质混合物最大自由收缩率随供水量变化情况 (以喷射压力 0.09 MPa 为例)

Fig.12 Variation of substrate maximal free contraction rate with water supply (spray press is 0.09 MPa)

质混合物试样的最大水平收缩率及最大自由收缩率随供水量的增大而提高, 主要影响来自于供水量的提高导致基质混合物容重的降低(图 6), 使基质混合物内部可收缩的空间增加, 收缩率提高, 但其影响程度要低于喷射压力。

3.4 喷射工艺及土壤质地对基质混合物抗剪强度的影响

基质混合物的抗剪强度体现了其抵抗外力的能力, 是评价其整体稳定性的重要指标。图 13 是在供水量相同而喷射压力不同的情况下, 不同处理的基质混合物的抗剪强度变化情况。可以看出, 基质混合物在饱和含水时的抗剪强度随喷射压力的提高而增加, 表明喷射压力在一定程度上可提高基质混合物的整体稳定性。这种增强作用可以从两方面来说明, 一是喷射压力的提高, 使基质混合物的颗粒间结合的更紧密, 使抗剪强度提高; 二是高压使基

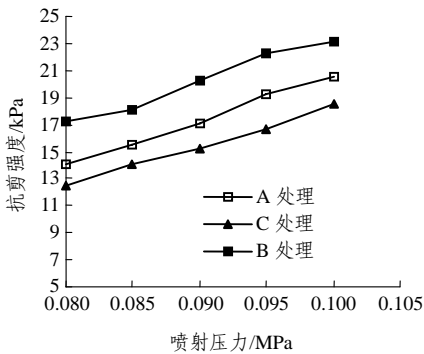


图 13 抗剪强度($\sigma = 75$ kPa)随喷射压力变化情况(以供水量 10 L/min 为例)

Fig.13 Variation of shearing resistance($\sigma = 75$ kPa) with spraying press (water supply is 10 L/min)

质混合物的内部孔隙度降低, 导致其饱和含水量的下降(图 14), 从而使基质混合物颗粒间的摩擦阻力提高, 抗剪强度增大。在相同的喷射压力及供水量的情况下, 以含粘土的 B 处理的抗剪强度最高, 主要由于粘土颗粒间的粘结力较高造成。

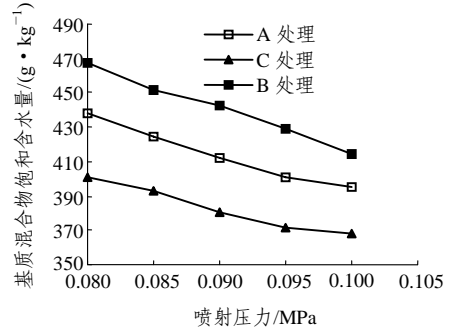


图 14 基质混合物饱和含水量随喷射压力变化情况(以供水量 10 L/min 为例)

Fig.14 Variation of substrate saturated water content with spraying press (water supply is 10 L/min)

图 15 是在喷射压力相同而供水量不同的情况下, 不同处理的基质混合物的抗剪强度变化情况。由图可知, 供水量的大小对基质混合物的抗剪强度也可产生影响。随供水量的提高, 抗剪强度在逐渐降低。从对试件取样分析的结果来看, 在试验控制的水平范围内, 供水量的大小对相同处理的基质混合物的容重有较明显的影响(图 6), 其大小随供水量的增加而降低, 表明含水量可影响基质混合物的内部空间结构; 容重的降低说明基质混合物颗粒间结合处于较松散状态, 同时饱和含水量提高, 导致抗剪强度降低。

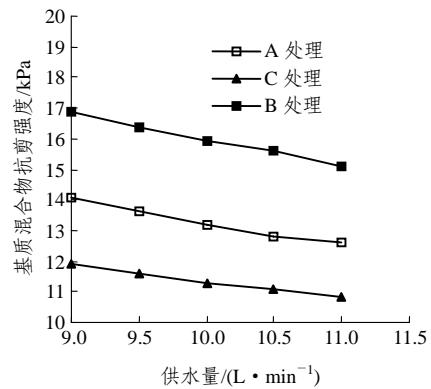


图 15 基质混合物抗剪强度随供水量变化情况(以喷射压力 0.09 MPa 为例)

Fig.15 Variation of substrate shearing resistance with water supply (spraying press is 0.09 MPa)

3.5 喷射工艺及土壤质地对回弹率的影响

回弹是由于喷射料流与岩石坡面碰撞或物料颗粒间的相互撞击而从受喷面上弹落下来的基质混合物，回弹率的大小对评价喷射施工的效率具有重要意义。图 16 是在供水量相同而喷射压力不同的情况下，不同处理的基质混合物回弹率变化情况。从中可以看出，在试验的水平控制范围内，基质混合物的回弹率是随喷射压力的增加而呈增加趋势。随压力的增加，喷射料流对试件石板撞击及基质混合物颗粒间的碰撞更加剧烈，使损失的物料增加，但在喷射压力逐渐增加的初期并不显著。同时，基质混合物中所用土壤的质地不同也使回弹率发生改变，在相同的喷射压力及供水量的情况下，以含壤质砂土的 C 处理最高，含粘土的 B 处理最低。其原因主要是大颗粒的砂粒含量较高时，基质混合物的干料分离现象相对严重造成的。

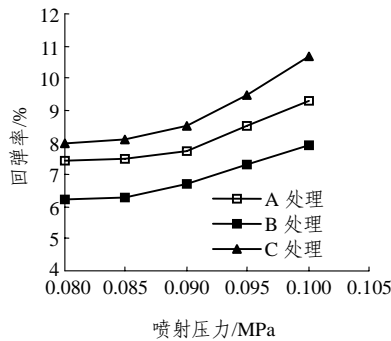


图 16 回弹率随喷射压力变化情况(以供水量 10 L/min 为例)
Fig.16 Variation of resilience with spraying press (water supply is 10 L/min)

图 17 是在喷射压力相同而供水量不同的情况下，不同处理的基质混合物的回弹率变化情况。由图 17 可知，基质混合物的回弹率是随供水量的增加而降低的。由于在水量较低的情况下，喷层的含水量相对较低，且喷射过程表面易出现干斑，对物料的反弹作用较强，使物料损失增加。但并不说明供水量越高越好，因为在试喷过程中，供水量增加超过试验控制范围后，基质混合物易出现下滑、整体脱落的现象，尤以含壤质砂土的 C 处理最明显。

3.6 最佳工艺控制参数的确定

由以上试验可知，基质混合物土壤类型、喷射压力及供水量大小是影响岩石边坡植被护坡效应的重要因素。从工程的主旨来看，适合植被的萌发生长是首要条件，其次是基质混合物的稳定性。为此，选择了如下 5 个指标：(1) 出苗率；(2) 后期生长高

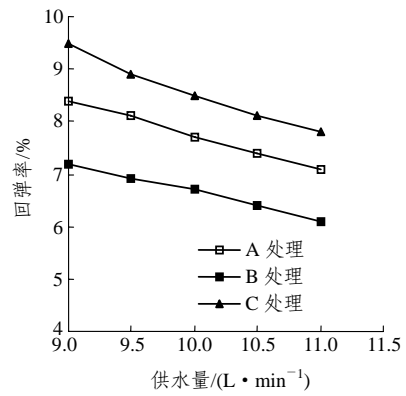


图 17 回弹率随供水量变化情况(以喷射压力 0.095 MPa 为例)
Fig.17 Variation of resilience with water supply (spraying press is 0.095 MPa)

度；(3) 最大自由收缩率；(4) 抗剪强度；(5) 回弹率。作为护坡效应评价的指标，对以上数据进行变量转换，进行极差化处理，并赋予各指标权重，权重分配分别为 $A = (0.3, 0.3, 0.2, 0.1, 0.1)$ ，将 5 组数据转换为 1 组可综合评价的指标。在 DPS 数据处理软件上采用逐步回归分析，建立了如下模型：

$$\left. \begin{aligned}
 y &= 0.61 - 0.38x_1 + 0.07x_2 - 0.7725x_3 + 0.1352x_4 \\
 R &= 0.9892 \\
 F &= 682.6368
 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中： y 为施工效应的综合评价结果，为无量纲常数，当 $0 \leq y \leq 1$ 时， y 越大表明效应越高； x_1 为喷射压力(MPa)， $0.08 \leq x_1 \leq 0.1$ ； x_2 为供水量大小(L/min)， $9 \leq x_2 \leq 11$ ； x_3, x_4 分别为所土壤中粘粒与砂粒的百分含量。在应用中可根据所用土壤的粘粒与砂粒含量，以综合评价指标 y 最大时，在取值范围内确定喷射压力及供水量的最佳组合。

4 结 论

(1) 在喷射施工过程中，喷射压力及供水量的大小可对植被的萌发生长及基质混合物的收缩率、抗剪强度、回弹率产生较为显著的影响。在试验控制的水平范围内，植被出苗率、后期生长高度及基质混合物最大收缩率随喷射压力的增加而降低，随供水量的增加而提高；抗剪强度及回弹率表现为随喷射压力的增加而提高，随供水量的增加而降低。

(2) 喷射压力与供水量对基质混合物的侵蚀影响不显著，试验条件下，各处理类型的基质混合物的产砂量变幅均为超过 5%。

(3) 在相同的工艺控制条件下, 基质混合物所用土壤质地不同, 植被出苗率、后期生长高度及基质混合物收缩率、抗剪强度、最大回弹率均有较大差异, 且受工艺控制条件改变的影响程度不同。

(4) 以植被出苗率、后期生长高度及基质混合物最大收缩率、抗剪强度、回弹率为综合评价指标, 建立了岩石边坡植被护坡喷射施工的效应模型, 该模型中包括了喷射压力、供水量及基质混合物所用土壤的质地指标。

参考文献(References):

- [1] 山田守, 菊地洋司, 堀江直树. 斜面緑地の緑化工法[J]. 基礎工, 2000, 28(5): 22 - 25.
- [2] 堀江直树, 山尾和弘. ファイバーソイル緑化ステップ工法にとり環境の維持・形成[J]. 基礎工, 1999, 27(5): 66 - 68.
- [3] 笹原則之, 田口睦. 高次団粒 SF 緑化システムによる法面の施工事例[J]. 基礎工, 1999, 27(5): 46 - 49.
- [4] 堀家茂一, 高安朝之, 片山功三. 連続長纖維による補強土擁壁の設計・施工一タソル工法[J]. 土木技術, 1990, 45(2): 118 - 124.
- [5] 横塚亨, 瀬川進. 新しいのり面緑化工法一タソル・グリーン工法による緑化[J]. 土木技術, 1994, 49(2): 83 - 88.
- [6] 张俊云, 周德培, 李绍才. 厚层基材喷射护坡试验研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 45 - 48.(Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Test on slope eco-engineering by spraying a thick layer material[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(4): 45 - 48.(in Chinese))
- [7] 张季如, 朱瑞庚, 夏银飞. ZZLS 绿色生态护坡材料的强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1 533 - 1 537.(Zhang Jiru, Zhu Ruiheng, Xia Yinfei. Testing study on strength of the ZZLS material for erosion control of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1 533 - 1 537.(in Chinese))
- [8] 周 颖, 曹映泓, 廖晓瑾, 等. 喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 353 - 356.(Zhou Yin, Cao Yinhong, Liao Xiaojin, et al. Planting on the rock slope of freeway by spraying combined materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 353 - 356.(in Chinese))
- [9] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射植被护坡基材混合物的收缩恢复性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 203 - 1 208.(Zhang Junyun, Zhou Depei. Study on shrinkage and recovery of thick layer base material spraying for bio-slope-engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 203 - 1 208.(in Chinese))
- [10] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.(Huang Changyong. Pedology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002.(in Chinese))
- [11] 雷廷武, 唐泽军, 张晴雯, 等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 II [J]. 侵蚀. 土壤学报, 2003, 40(3): 401 - 405.(Lei Tingwu, Tang Zejun, Zhang Qingwen, et al. Simulation Experiment study on increasing soil rainfall filtration and decreasing erosion by PAM II [J]. Erosion. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 401 - 405.(in Chinese))
- [12] Lentz R D, Shainberg I, Sojka R E, et al. Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1 926 - 1 932.
- [13] Kristian Aase J, Bjorneberg D L, Sojka R E. Sprinkler irrigation runoff and erosion control with polyacrylamide-laboratory tests[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62: 1 681 - 1 687..