

绿色生态材料在矿山高边坡防护中的应用

李 峰¹, 赵 涛², 朱瑞庚¹

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 济宁市公路管理局, 山东 济宁 272000)

摘要: 开展一种可将矿山高边坡防护和恢复植被有机结合的 ZZLS 绿色生态材料的研究应用。ZZLS 是一种强度高、抗侵蚀能力强, 且草、灌木均可生长的“人造土壤”。分析研究了 ZZLS 材料的微观特性和力学性质, 根据“射流”原理喷射于高边坡上, 形成适于植物生长的绿色基层, 在基层上植草、灌木、花, 从而可使护坡、绿化一道工序完成, 可以降低成本、护坡成功、美化环境, 实现生态可持续发展。

关键词: 岩土工程; ZZLS 绿色生态材料; 高边坡护坡; 人造土壤; 生态绿化

中图分类号: TU 43; S 157

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5297 - 04

APPLICATION OF GREEN ECOLOGICAL MATERIAL TO MINE HIGH SLOPE PROTECTION

LI Feng¹, ZHAO Tao², ZHU Rui-geng¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Jining Highway Administration, Jining 272000, China)

Abstract: This work tries to study an eco-type revetment material named ZZLS that can combine vegetation recovery with mine high slope protection. ZZLS is a kind of green ecological material with high strength and great erosion resistance. It also be named “the artificial soil” in which such vegetable as grass and bush can grow well. Then, the microscopic and mechanical properties are analyzed. Based on the principle of “jet”, ZZLS is injected to the slope, and the green material which is suitable for vegetable growth is formed. By planting grass, bush, and flower in the green material, the object of slope protection is achieved, thus the price is lower. With successful protection and beautification of environment, the ecological sustained development can be reached.

Key words: geotechnical engineering; ZZLS ecotype revetment material; high slope protection; artificial soil; ecological afforest

1 引 言

在矿山工程建设过程中经常要大量挖方、填方, 形成大量的裸露边坡。裸露边坡会带来一系列环境问题, 如水土流失、滑坡、泥石流、局部小气候的恶化及生物链的破坏等。这些工程所形成的边

坡靠自然界自身的力量恢复生态平衡往往需要较长时间。采取工程措施, 对边坡进行人工绿化是减少生态灾害, 保护环境的需要。

有鉴于此, 为了探索经济、有效且植被绿化与护坡相结合的边坡综合防护措施, 加快建设速度, 降低建设成本, 从而研究和开发出一种成本低、效益高, 符合我国国情的生态护坡材料——ZZLS 材

收稿日期: 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 07 - 01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707); 国家自然科学基金资助项目(10372112, 50221402); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目

作者简介: 李 峰(1978 -), 男, 2000年毕业于中国地质大学岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事生态岩土工程与工程地质方面的研究工作。
E-mail: lf780620@sina.com.cn.

料。

2 ZZLS 绿色生态材料特性

2.1 主要原材料

ZZLS 绿色生态材料是一种强度高、抗侵蚀能力强，且草灌植被可生长的“人造土壤”。其主要成分分为天然无机非金属矿物、营养素、植物纤维、团粒剂、水泥胶结材料和种植土壤等，主要原料来自于大自然，不含妨碍植物生长的有害成分，可与植物共生，ZZLS 材料的试验用料包括 425#普通硅酸盐水泥、自来水、无机非金属矿物和由生活垃圾、棉籽壳、黄砂、粘土等组成的种植土。

2.2 微观特性

微观结构是影响 ZZLS 绿色生态材料植物生长功能、抗侵蚀和强度性质的重要因素之一。对 ZZLS 绿色生态材料做电镜 SEM 扫描，得出 ZZLS 绿色生态材料特点：

(1) ZZLS 绿色生态材料具有与土壤类似的多孔结构，存在大量贯通的微裂缝和非毛管孔隙，在颗粒或微团聚体间也含有大量的毛管孔隙^[1](图 1)，因而具有持水力强和通气性好的特点，有利于水、气、肥、热等在 ZZLS 绿色生态材料中的上下迁移和植物根系的生长发育^[2, 3]。

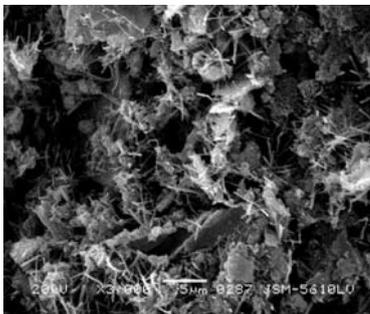


图 1 ZZLS 材料的 SEM 照片
Fig.1 SEM photo of ZZLS

(2) ZZLS 绿色生态材料除具有粒状堆积结构和胶结式结构外，其微结构也表现了一定的紊流结构特征。微结构单元为片状颗粒、扁平状聚集体颗粒单元为主，大致平行地集结成堆，片状、扁平状颗粒具有一定的定向趋势^[4, 5]。

(3) ZZLS 绿色生态材料强度构成是多层次的，其微团聚体的胶结物质除了各类游离氧化物外，水泥水化反应使胶结物质中钙离子的含量明显增加^[6]，这是 ZZLS 绿色生态材料强度形成和抗侵蚀性增强的主要原因。这种由水泥胶结形成骨架的微团聚体

粘结力强，水稳性能好^[7]，因而 ZZLS 绿色生态材料在作为植被生长基材的同时，可兼作边坡的抗侵蚀防护材料^[8]。

2.3 主要的技术特点

(1) 将绿色生态 ZZLS 材料与种子加水拌和，应用射流原理通过压力管道输送至喷射机，直接向边坡上喷射倾注，可产生一定厚度(通常为 7~10 mm)的“人造土层”。待植被形成后，根系发达的草本植物根系网，将坡面上绿草、ZZLS 绿色生态材料和土壤(或岩石)表层紧紧的连在一起。

(2) ZZLS 绿色生态材料具有与土壤相似的功能结构、物质基础和环境条件，提供了水、气、肥、热等植被生长要素的存储和迁移途径，有利于植被的生长发育^[9]。

(3) ZZLS 绿色生态材料作为植被生长基材的同时，兼具有较高的强度和抗侵蚀性能，可有效防止或减缓边坡侵蚀，因而可直接作为边坡的防护材料。

(4) ZZLS 绿色生态材料在添加草灌植被的种子后加水拌和，采用喷播技术直接喷射到边坡上。对这些无法栽种植物的陡坡地带，只能采用这种强化绿化技术。

3 喷射增强机理

ZZLS 绿色生态材料由活塞强制喂入气料混合仓后，与压缩空气形成稀薄流形态，经管道输送到喷嘴，在喷嘴处物料在内设的双水环形成的水雾作用下在运动中与水混合高速喷射到受喷面上。ZZLS 绿色生态材料以压缩空气为载体，受压缩空气动力支配，射流呈现空气射流的特点。根据流体力学的研究，空气射流的轴线速度在其起始段内保持不变，在起始段后的基本段中则是沿程衰减。由于空气射流不断“卷吸”周围的空气，使射流断面沿程不断扩大，成为扩散射流。如图 2 所示，扩散角为 2θ ，

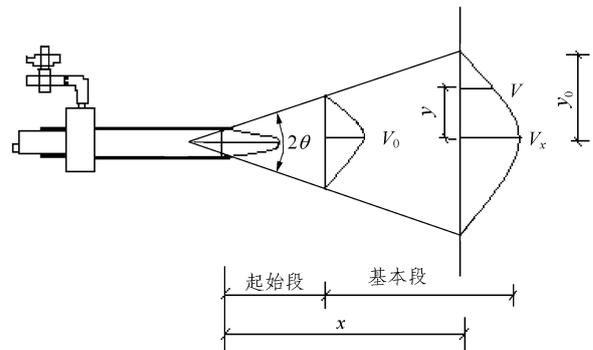


图 2 扩散射流示意图

Fig.2 Schematic plan of diffusion jet

实验测得圆形喷嘴产生的扩散角 $\theta = 12^\circ$ ，渐缩形喷嘴的扩散角 $\theta = 10^\circ$ 。

3.1 扩散射流的平均速度 \bar{V}

射流基本段中，在 x 处轴线速度为 V_x 。由该轴心向外，速度逐渐减小，在位置 y 处，减为 V 。到扩散半径端点 y_0 处，即射流边界的速度与周围空气的速度相同，等于 0。可用下列公式描述：

$$V/V_x = \left[1 - (y/y_0)^{3/2}\right]^2 \quad (1)$$

就水平喷射的固、液、气三相流而言，气相流易于被环境空气衰减和淹没，而固、液料团惯性大，难以被淹没，其速度一方面在衰减，一方面又相对领先于气相流，气相流反而对固液相流造成阻碍，这也就喷速沿程衰减的又一原因^[10]。

对于圆形喷嘴喷出的射流，单位时间内通过任意横截面射流料团的动量，应等于喷口处料团的动量，即

$$\int_0^{y_0} (\rho_x 2\pi y dy V) V = \rho_0 \pi R_0^2 V_0^2 \quad (2)$$

式中： R_0 为喷嘴口半径； ρ_x 、 ρ_0 分别为喷口和任意位置 x 处单位体积内物料的平均密度。

为简化计算，仍采用流体力学中射流为不可压缩流体的假设，故认为密度为常数，即 $\rho_x = \rho_0$ ，将式(1)代入式(2)，并整理得

$$V_x/V_0 = 2.732 R_0 / y_0 \quad (3)$$

式中： y_0 为扩散半径。

由图 2 可知：

$$y_0 = R_0 + x \tan \theta \quad (4)$$

于是任意截面扩散射流的平均速度为

$$\bar{V} = \frac{1}{y_0} \int_0^{y_0} V_x \left[1 - \left(\frac{y}{y_0}\right)^{3/2}\right]^2 dy = 0.45 V_x \quad (5)$$

3.2 扩散射流对壁面的冲击力 P

射流对壁面正碰撞受到的反作用力等于射流对壁面的冲击力 P 。根据动量定理，在单位时间内，流体动量的改变等于作用在流体上全部外力的合力，有

$$P = (\pi y_0^2 \bar{V} \rho_x) \bar{V} \quad (6)$$

则

$$P = \pi (1.414 y_0)^2 \rho_x \left(\frac{\bar{V}}{2}\right)^2 \quad (7)$$

或

$$P = \pi (0.636 y_0)^2 \rho_x \left(\frac{V_x}{2}\right)^2 \quad (8)$$

式(7)，(8)为射流对壁面的冲击力计算公式，式中 $1.414 y_0$ 指明了射流的扩散范围， $0.636 y_0$ 指明了有效作用半径。

4 工程应用

4.1 工程概况

湖北大冶某矿因露天直接开挖边坡，造成植被破坏而无法修复。该边坡开挖后，岩石裸露在外边，破碎岩体可能随时下滑，相对高差为 20~30 m。边坡较陡，地层主要为第四纪上更新统冲积物，岩性结构具有典型河流相二元结构。

4.2 施工方案

ZZLS 绿色生态材料喷播绿化技术是将 ZZLS 绿色生态材料与草种和植物纤维等通过搅拌机加水均匀混合，对高陡边坡喷播时适当添加粘合剂，而后通过管道将液态混合物输送至液压喷播机，并喷射到所需绿化区域的一种绿化新技术(图 3)。

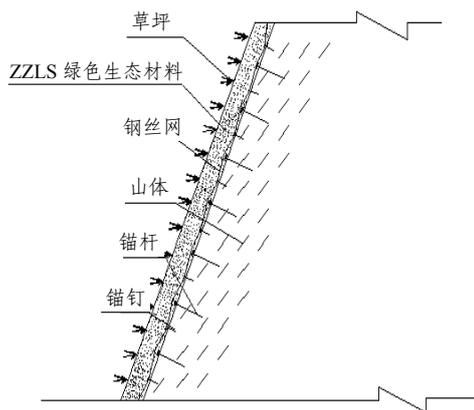


图 3 生态护坡结构

Fig.3 Structure of ecological revetment

生产工艺：清理、平整坡面→搭脚手架，架立安全网→打铆钉铺设、固定坡面铁丝网→干拌添加草种后的 ZZLS 绿色生态材料→ZZLS 绿色生态材料加水拌合，输送至高压喷射机→向边坡喷射 ZZLS 绿色生态材料→洒水养护，铺设防晒网或保温薄膜→拆除防晒网或保温薄膜→结束。

4.3 测试结果

(1) 测试的试样是与施工同步进行制作的，共 3 组 12 个试样，试样在养护 28 d 后拆模。试验在 100 kN 液压试验机上进行。图 4 为试验的应力-应变曲线。基材与耕植土拌和高压喷射形成的基材，其抗压强度极限值不小于 2.0 MPa，最大可达到 3.0 MPa。

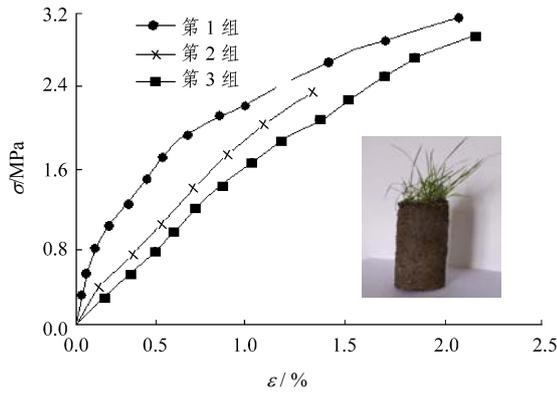


图4 应力 - 应变关系曲线

Fig.4 Curves between σ and ε

(2) 基材可抵御降雨量大于 800 mm 的暴雨长时间冲刷。作为植被种植基，其保水能力强。

(3) 基材作为植被种植基，在播种后，40 d 后坡面植被覆盖率达到 80%，90 d 后坡面基本被植被覆盖。

(4) 绿化、护坡一次完成^[11]，护坡成本可比目前传统护坡和绿化的综合成本降低 20%左右。

5 结 论

将 ZZLS 绿色生态材料应用于矿山开挖后护坡，不仅达到了护坡绿化一道工序完成，而且具有技术先进、施工快捷、经济合理等优点，具体来说，有如下几点：

(1) ZZLS 绿色生态材料以无机非金属矿为基材，无毒无污染，含水、土、气、肥，强度高、抗侵蚀能力强。

(2) 将 ZZLS 绿色生态材料应用于矿山开挖边坡工程中，具有技术先进、施工快捷、经济合理等优点。其特色和创新点在于，护坡和绿化一次完成，可降低成本。

(3) ZZLS 绿色生态材料利用“射流”原理进行喷射，初凝快、密实度好、强度高。

(4) ZZLS 绿色生态材料上面可以植花、草、灌木等植物，可以进行景观、历史、文化设计。

(5) ZZLS 绿色生态材料中含有冬夏两季种籽，可以保证护坡植物四季常绿；冬夏两季的草死后，可以互作肥料，保证养分的供应。

(6) ZZLS 绿色生态材料是一个系列材料，可根

据不同的矿山边坡条件和需求进行选择、优化设计。

参考文献(References):

- [1] 吴义祥. 工程粘性土微观结构的定量分析[J]. 中国地质科学院院报, 1991, 23: 143 - 153.(Wu Yixiang. Microstructure quantitative analysis of engineering clay soil[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1991, 23: 143 - 153.(in Chinese))
- [2] Krinsley P D. Petrographic examination of sedimentary rocks in the SEM using back-scattered electron detectors[J]. J. Sed. Petr., 1984, 54: 877 - 888.
- [3] Smart P, Tovey N K. Theoretical aspects of intensity gradient analysis[J]. Scanning, 1988, 10: 115 - 121.
- [4] Tovey N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric[J]. J. of Microscopy, 1990, 120: 303 - 315.
- [5] Smart P, Tovey N K, Leng X, et al. Automatic analysis of microstructure of cohesive sediments[A]. In: Microstructure of Fine Grained Sediments from Mud to Shale[C]. [s. l.]: [s. n.], 1991. 280 - 285.
- [6] 施 斌, 姜洪涛. 粘性土的微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864 - 870.(Shi Bin, Jiang Hongtao. Technical research of clay microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 864 - 870.(in Chinese))
- [7] Tovey N K, Krinsley D H. Mapping of the orientation of fine-grained minerals in soils and sediments[J]. Bulletin of IAEG, 1992, 46: 93 - 101
- [8] Shi B, Li S L, Tolkachev M. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils[J]. Science in China(Series B), 1995, 38(6): 741 - 748.
- [9] Shi B. Quantitative analysis of the microstructural changes of remolded clayey soil in the process of compaction[A]. In: Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soils[C]. [s. l.]: [s. n.], 1995. 23 - 30.
- [10] 张 明, 陈庆寿. 湿喷混凝土喷射速度特性解析[J]. 探矿工程, 2000, (3): 12 - 14.(Zhang Ming, Chen Qinshou. Jet velocity analysis of wet blasting concrete[J]. Exploration Engineering, 2000, (3): 12 - 14.(in Chinese))
- [11] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态种植基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 239 - 242.(Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Experimental research of ecological planting body in rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 239 - 242.(in Chinese))