



推荐阅读:

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业 4.0 与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)



移动扫码阅读

毛正君,王双明,安 宁.黄土高原矿区边坡生态恢复治理研究——PVC 板材格构锚杆梁植被种植保障技术[J].煤炭科学技术,2020,48(4):120-128. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.04.012

MAO Zhengjun, WANG Shuangming, AN Ning. Research on slope ecological restoration and management in mining areas on the loess plateau——planting support technology of PVC plates lattice anchor beam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 120-128. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.04.012

黄土高原矿区边坡生态恢复治理研究 ——PVC 板材格构锚杆梁植被种植保障技术

毛正君^{1,2,3},王双明^{1,2,3},安 宁¹

(1.西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054;2.西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院,陕西 西安 710054;

3.陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:为了保护黄土高原矿区生态环境,解决传统工程措施景观效果差且随时间推移结构易失效的问题,采用植被进行坡面保护和侵蚀控制的边坡生态恢复治理,可以实现长期有效地固土护坡以及美化环境的功能。针对当前黄土高原矿区边坡生态恢复植被种植保障结构构筑物自重较大,且后期存在强度损伤缺陷的问题,基于PVC板材具有耐酸、耐碱、耐盐、原材料丰富、质量小、对环境友好无危害、更好的耐久性,以及运输成本、施工工期、后期养护综合优势大的特点,提出了基于PVC板材格构锚杆梁的边坡生态恢复治理植被种植保障技术,阐述了其结构设计和施工方法,并整理了黄土高原矿区各植被分带区典型植被,提出了采用灌草型植被群落类型进行坡面生态恢复,辅以乔木进行多级平台生态恢复。结果表明:基于PVC板材格构锚杆梁的边坡生态恢复治理植被种植保障技术改善了传统施工工艺,结构简单,施工方法步骤简便,在保证结构完整性的基础上,自重较小,景观效果好,植被恢复率高,不仅起到坡面防护效果,还能提高边坡稳定性,应用前景广阔。研究成果对于进一步揭示基于PVC板材格构锚杆梁的植被护坡机理,以及黄土高原矿区边坡生态恢复治理研究,实现黄土高原矿区区域经济可持续发展具有重要意义。

关键词:黄土高原矿区;边坡工程;生态恢复治理;PVC板材格构锚杆梁;植被群落

中图分类号:TD88

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)04-0120-09

Research on slope ecological restoration and management in mining areas on loess plateau: planting support technology of PVC plates lattice anchor beam

MAO Zhengjun^{1,2,3}, WANG Shuangming^{1,2,3}, AN Ning¹

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Geological Research Institute for

Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological

Support for Coal Green Exploitation, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor effect of traditional engineering measures on landscape, easy failure of structure over time and unscientific selection of vegetation species, and protect the ecological environment of loess plateau mining areas, using vegetation for slope protection and erosion control to restore the slope ecology can achieve long-term and effective functions of retaining soil and protecting slope and beautifying environment. This paper presents a technique of ecological restoration and treatment of slope based on PVC plates lattice anchor beam, and discusses its structure design and construction method. The use of PVC plates instead of concrete material not only makes the structure more portable, but also improves the durability, and solves the defect of self-significant and later strength damage in the conventional use of reinforced concrete. In addition, the time effect that the PVC plates lattice anchor beam structure will gradually fail over time is considered, and the reinforcement effect of plant roots is gradually enhanced during the growth process of plantro-

收稿日期:2019-10-25;责任编辑:赵 瑞

基金项目:陕西省重点研发计划资助项目(2020SF-379);陕西省教育厅服务地方科学研究计划资助项目(19JC027);国家自然科学基金资助项目(11972283)

作者简介:毛正君(1983—),男,宁夏固原人,副教授,博士(后)。E-mail:136895123@qq.com

通讯作者:王双明(1955—),男,陕西岐山人,中国工程院院士。E-mail:sxmtsm@163.com

ots, until the failure of the structure completely depends on the plant roots to play the role of slope reinforcement, thus realizing the concept of dynamic management of slope stability and later reinforcement. At the same time the use of PVC plates is environmentally friendly, what harm to human health, PVC plates has better durability, from the transport cost, construction period and post-maintenance of PVC plates has more advantages. In accordance with the principles of naturalness, safety, diversity, functionality and landscape in ecology, this paper puts forward the method of ecological restoration of slope in loess plateau mining area by using vegetation community type of irrigated grass, and ecological restoration of slope engineering in loess plateau mining area by using multi-stage platform of slope supplemented by planted trees. The typical vegetation in the loess plateau mining area is sorted out, which provides a basis for the ecological restoration of slope engineering in loess plateau mining area.

Key words: loess plateau mining areas; slope engineering; ecological restoration and management; PVC plates lattice anchor beam; vegetation community

0 引 言

我国是煤炭开采与消费大国,多年来煤炭作为国民经济发展的基础能源发挥了重要支撑作用。煤炭资源的开采为国民经济做出贡献的同时,也对矿区生态环境造成了巨大影响^[1-2]。就国内而言,截至目前,大部分露天开采煤矿以及井工采煤塌陷区的边坡几乎没有得到有效的生态恢复与重建^[3-4]。中共十九大以来,以高质量发展为特征的现代化经济体系,推动经济发展质量变革、效率变革、动力变革,提高全要素生产效率,为煤矿发展提出了更高的要求,需要在安全、智能、绿色、高效等方面取得更大突破。近年来学者们对基于煤炭绿色开采理念,对矿区生态恢复重建进行了大量尝试^[5-7]。目前大多数矿区边坡往往采用传统工程措施进行边坡防护,不考虑景观效果,不符合生态恢复和可持续发展的理念。

与传统工程措施相比,采用植被进行坡面保护和侵蚀控制具有明显优势,可实现长期有效的固土护坡、美化环境功能^[8]。有文献^[8-9]将其称为“植物固坡”、“植被护坡”或“坡面生态工程”,国外也称其为“生态护坡”,定义为“用活的植物,单独用植物或者植物与土木工程和非生命的植物材料相结合,以减轻坡面的不稳定性和侵蚀”^[10]。总而言之,利用植被进行坡面保护和侵蚀控制,可以统一称为边坡生态恢复。文献^[11-13]研究发现植被可以成功应用于边坡土壤加固、防止浅层滑坡和土壤侵蚀。RAIJESH 等^[14]通过直剪试验与数值模拟结合的方法证明坡面种植小型植物根系能够提高边坡安全系数。YANG 等^[15]用数值模拟计算了植物根系加固后边坡的安全系数,发现植物根系对深土层的加固效果要优于浅土层,在保证草本植物生长的同时要鼓励根系较深的植物生长。

黄土高原矿区边坡在降水冲刷作用下,边坡剥落病害时有发生,坡面局部往往出现草皮脱落现象,需要进行多次补种,更有甚者发育成为厚层滑塌状剥落^[16]。植被种植保障技术是边坡生态恢复的重

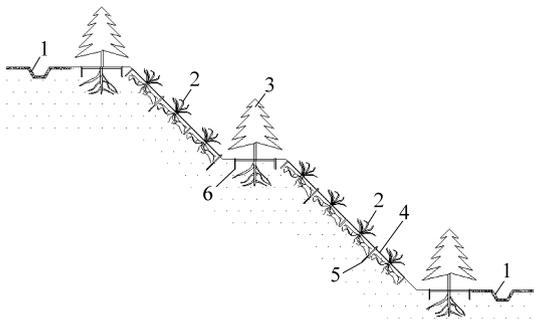
要环节之一,其主要解决如何保证植物种植到坡面,并能长期、稳定生长的问题^[17-18]。

随着格构锚杆梁复合结构在边坡生态恢复的实际应用,证明该结构具有较好的经济性和适用性^[19-20],是一种有效的支挡加固结构,格构框架能够将锚头的应力传递分散至整个坡面,防止锚头处的应力集中,这样就将整个护坡与支撑结构结合在一起,并且在格构之中能够进行植被恢复^[21]。然而,常规采用钢筋混凝土制备格构框架,自重大且后期存在强度损伤的缺陷^[22-23]。此外埋置于坡体中的预应力锚杆(索)在经历长时间服役后大多会因电化学腐蚀、局部腐蚀、应力腐蚀等综合因素发生结构损伤或失效,进而导致坡体破坏^[24-27]。

针对当前黄土高原矿区边坡生态恢复植被种植保障结构构筑物工后维护成本高、结构可靠性差的问题,笔者提出基于 PVC(聚氯乙烯)板材格构锚杆梁的黄土高原矿区边坡生态恢复治理植被种植保障技术,并对黄土高原矿区边坡生态恢复植被群落设计原则、类型和植被种类选择进行了阐述,研究工作对于进一步揭示基于 PVC 板材格构锚杆梁的植被护坡机理,以及黄土高原矿区边坡生态恢复治理研究,实现黄土高原矿区区域经济可持续发展具有重要意义。

1 PVC 板材格构锚杆梁植被种植保障结构设计

基于 PVC 板材格构锚杆梁的黄土高原矿区边坡生态恢复治理植被种植保障技术,其效果如图 1 所示,包括垂直打入黄土边坡的台阶结构面和坡面结构面内的植被种植保障 PVC 板材格构 1,其设计形状为边长为 0.5~3.0 m 的正方形,以及嵌入安装在植被种植保障 PVC 板材格构 1 的多个固土格栅 2 和种植在多个固土格栅 2 中的植被形成的植被群落^[17-18]。其中 PVC 板材为高强度 PVC 板材,其设计厚度为 10~50 mm,设计拉伸屈服应力为 50~100 MPa。



1—排水沟;2—灌木;3—乔木;

4—固土格栅;5—锚杆机构;6—PVC 板材格构

图1 PVC 板材格构锚杆梁植被种植保障技术效果示意

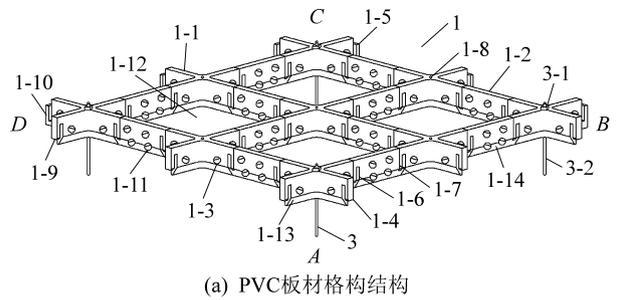
Fig.1 Slope ecological restoration rendering in the loess area based on PVC plates lattice anchor beam

PVC 板材格构 1 如图 2a 所示^[17],包括由 PVC 板材制成的多个十字连接构件 1-1 和多个中间连接构件 1-2,以及用于将植被种植保障 PVC 板材格构 1 固定在黄土边坡的台阶结构面或坡面结构面上的多个锚杆机构 3。

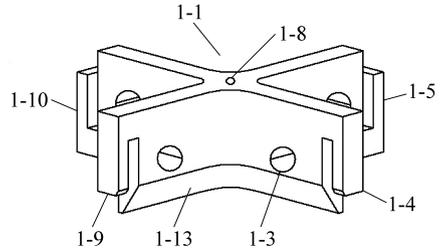
十字连接构件 1-1 如图 2b 所示,其 4 个十字边的长度均相等,十字连接构件 1-1 的底部设置有第一刃角 1-13,十字连接构件 1-1 水平方向上的两端分别设置有第一卡接口 1-4 和第四卡接口 1-10,十字连接构件 1-1 垂直方向上的两端分别设置有第二卡接口 1-5 和第三卡接口 1-9^[17-18]。

中间连接构件 1-2 如图 2c 所示,为长条状结构,中间连接构件 1-2 的底部设置有第二刃角 1-14,中间连接构件 1-2 的一端设置有与第二卡接口 1-5 和第四卡接口 1-10 均配合的第五卡接口 1-6,中间连接构件 1-2 的另一端设置有与第一卡接口 1-4 和第三卡接口 1-9 均配合的第六卡接口 1-7,第一卡接口 1-4、第三卡接口 1-9 和第五卡接口 1-6 的结构相同且均为设置有开口向下的卡槽卡接口,第二卡接口 1-5、第四卡接口 1-10 和第六卡接口 1-7 的结构相同,且均为设置有开口向上的卡槽卡接口^[17-18]。

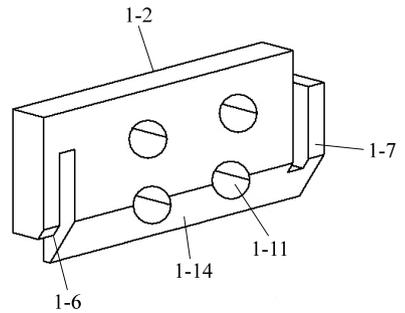
十字连接构件 1-1 上设置有为植物根系提供生长空间的第一孔洞 1-3,中间连接构件 1-2 上设置有为植物根系提供生长空间的第二孔洞 1-11,十字连接构件 1-1 的几何中心设置有锚孔 1-8,锚杆机构 3 包括用于穿入锚孔 1-8 中的锚杆 3-2 和用于锚固锚杆 3-2 的螺栓 3-1,多个锚杆机构 3 构成了锚杆群;相邻的 2 个十字连接构件 1-1 通过一个中间连接构件 1-2 连接,4 个十字连接构件 1-1 和用于连接 4 个十字连接构件 1-1 的 4 个中间连接构件 1-2 围成的空腔为用于嵌入安装固土格栅 2 的



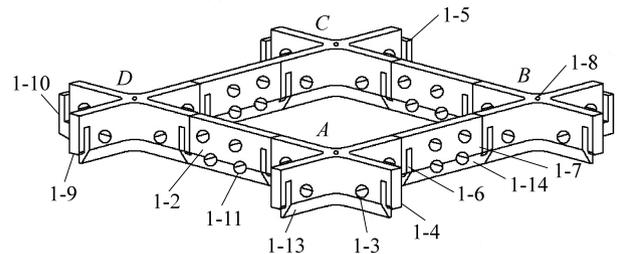
(a) PVC 板材格构结构



(b) 十字连接构件的结构



(c) 中间连接构件的结构



(d) PVC 板材格构基本单元的结构

1—PVC 板材格构;1-1—十字连接构件;1-2—中间连接构件;1-3—第一孔洞;1-4—第一卡接口;1-5—第二卡接口;1-6—第五卡接口;1-7—第六卡接口;1-8—锚孔;1-9—第三卡接口;1-10—第四卡接口;1-11—第二孔洞;1-12—固土格栅安装格;1-13—第一刃角;1-14—第二刃角;3—锚杆机构;3-1—螺栓;3-2—锚杆

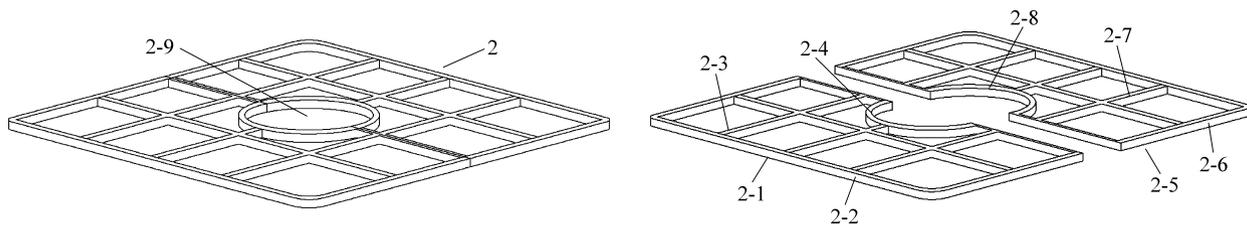
图2 PVC 板材格构及各部件结构示意图

Fig.2 Structural diagram of PVC plates lattice and components 固土格栅安装格 1-12;通过在十字连接构件 1-1 的底部设置第一刃角 1-13,并在中间连接构件 1-2 的底部设置第二刃角 1-14,能够减小植被种植保障 PVC 板材打入黄土边坡内部的阻力^[17-18]。

PVC 板材格构基本单元如图 2d 所示,包括 4 个十字连接构件 1-1 和 4 个中间连接构件 1-2,4 个十字连接构件 1-1 分别布设在 PVC 板材格构基本单元 ABCD 的 4 个顶点绕逆时针方向布设,2 个

十字连接构件 1-1 通过 1 个中间连接构件 1-2 连接;其中,每个 PVC 板材格构基本单元 8 中,位于 PVC 板材格构基本单元 ABCD 的 B 顶点和 D 顶点处的十字连接构件 1-1 的中心分别布设在相邻 2 根施工基准线 7 上^[17-18],位于 PVC 板材格构基本单元 ABCD 的 A 顶点和 C 顶点处的十字连接构件 1-1 的中心均布设在施工辅助线 9 上;相邻的 2 个 PVC 板材格构基本单元共用一个十字连接构件 1-1,且前一个施做的 PVC 板材格构基本单元的菱形 C 顶点处的十字连接构件 1-1 作为下一个施做的 PVC 板材格构基本单元的菱形 A 顶点处的十字连接构件 1-1。

固土格栅 2 如图 3 所示,为由均一体成型的左半砌体格栅 2-1 和右半砌体格栅 2-5 对接组成的矩形砌体格栅,左半砌体格栅 2-1 包括矩形的左半



2—固土格栅;2-1—左半格栅;2-2—左半边格框;2-3—左半内格框;2-4—左半圆形格框;2-5—右半格栅;
2-6—右半边格框;2-7—右半内格框;2-8—右半圆形格框;2-9—植被种植孔

图 3 固土格栅的结构示意

Fig.3 Structural diagram of soil fixation grid

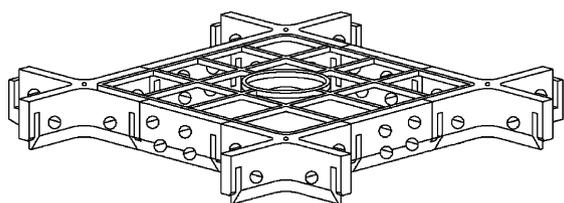


图 4 固土格栅与 PVC 板材格构的组合结构示意

Fig.4 Structural diagram of soil fixation grid
with the combination of PVC plates lattice

2 PVC 板材格构锚杆梁植被种植保障施工方法

基于 PVC 板材格构锚杆梁的边坡生态恢复治理技术,施工步骤包括:边坡整形、主体结构施工、植被种植、排水结构施工、植被养护。其中结构面整形、植被种植、排水结构施工、植被养护 4 个步骤,现有技术已经相当成熟,本文不再详述。对于主体结构施工,按照从坡顶到坡脚的顺序,依次在黄土边坡的多个台阶结构面和坡面结构面上进行施工。

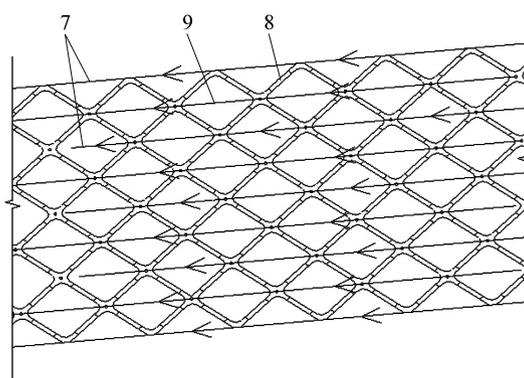
2.1 施工区域划分与施工基准线和辅助线确定

首先在黄土边坡的多个台阶结构面和坡面结构面上划出矩形施工区域。在矩形施工区域内放多条平行于黄土边坡的坡面结构面走向的线,作为施工

边格框 2-2、设置在左半边格框 2-2 内部的左半内格框 2-3 和设置在左半边格框 2-2 一侧边上且向内凹的左半圆形格框 2-4;右半砌体格栅 2-5 包括矩形的右半边格框 2-6、设置在右半边格框 2-6 内部的右半内格框 2-7 和设置在右半边格框 2-6 一侧边上且向内凹的右半圆形格框 2-8;左半圆形格框 2-4 和右半圆形格框 2-8 对接组成了位于固土格栅 2 中心位置处的植被种植孔 2-9^[17-18];固土格栅 2 具有保水固土的作用。固土格栅与 PVC 板材格构的组合结构如图 4 所示。

上述结构设计中,涉及到十字连接构件的十字交叉处的 4 个面均为圆弧面,固土格栅的 4 个顶点处外凸面均为圆弧面,这是为了与十字连接构件的十字交叉处的 4 个圆弧面进行配合使用^[17-18]。

基准线 7,相邻 2 条施工基准线 7 之间的间距均为 $\sqrt{2}(2L_1+L_2)$;其中, L_1 为十字连接构件 1-1 的一个十字边的长度, L_2 为中间连接构件 1-2 的长度;然后,在每相邻的 2 根施工基准线 7 之间的中间位置处放 1 条施工辅助线 9^[17-18];施工基准线、施工辅助线和 PVC 板材格构基本单元的布设如图 5 所示。



7—施工基准线;8—PVC 板材格构基本单元;9—施工辅助线
图 5 施工基准线、施工辅助线和 PVC 板材格构基本单元的布设示意

Fig.5 Layout diagram of construction base line, auxiliary line and PVC plates lattice basic unit

2.2 施做PVC板材格构基本单元

按照从坡顶到坡脚的顺序,依次在相邻2条施工基准线7之间施做多排相互对接的PVC板材格构基本单元8,PVC板材格构基本单元的施做过程为:

1)将位于PVC板材格构基本单元8的菱形A顶点处的十字连接构件1-1打入黄土边坡的台阶结构面中^[17-18],且使该十字连接构件1-1的第二卡接口1-5外漏在PVC板材格构基本单元8的AB边位置处,使该十字连接构件1-1的第四卡接口1-10外漏在PVC板材格构基本单元8的AD边位置处。

2)在步骤1中的十字连接构件1-1的第二卡接口1-5上,连接位于PVC板材格构基本单元8的AB边位置处的中间连接构件1-2,并将该中间连接构件1-2打入黄土边坡的台阶结构面中,且使该中间连接构件1-2的第六卡接口1-7外漏在PVC板材格构基本单元8的AB边位置处;其中,中间连接构件1-2的第五卡接口1-6与十字连接构件1-1的第二卡接口1-5连接^[17-18]。

3)在步骤1中的十字连接构件1-1的第四卡接口1-10上连接位于PVC板材格构基本单元8的AD边位置处的中间连接构件1-2,并将该中间连接构件1-2打入黄土边坡的台阶结构面中,且使该中间连接构件1-2的第六卡接口1-7外漏在PVC板材格构基本单元8的AD边位置处;其中,中间连接构件1-2的第五卡接口1-6与十字连接构件1-1的第四卡接口1-10连接^[17-18]。

4)在步骤2中的中间连接构件1-2的第六卡接口1-7上连接位于PVC板材格构基本单元8的B顶点位置处的十字连接构件1-1,并将该十字连接构件1-1打入黄土边坡的台阶结构面中,且使该十字连接构件1-1的第二卡接口1-5外漏,使该十字连接构件1-1的第四卡接口1-10外漏在PVC板材格构基本单元8的BC边位置处;其中,十字连接构件1-1的第三卡接口1-9与中间连接构件1-2的第六卡接口1-7连接^[17-18]。

5)在步骤3中的中间连接构件1-2的第六卡接口1-7上,连接位于PVC板材格构基本单元8的D顶点位置处的十字连接构件1-1,并将该十字连接构件1-1打入黄土边坡的台阶结构面中,且使该十字连接构件1-1的第二卡接口1-5外漏在PVC板材格构基本单元8的DC边位置处,使该十字连接构件1-1的第四卡接口1-10外漏;其中,十字连接构件1-1的第一卡接口1-4与中间连接构件1-2的第六卡接口1-7连接^[17-18]。

6)在步骤4中的十字连接构件1-1的第四卡接口1-10上连接位于PVC板材格构基本单元8的BC边位置处的中间连接构件1-2,并将该中间连接构件1-2打入黄土边坡的台阶结构面中,且使该中间连接构件1-2的第六卡接口1-7外漏在PVC板材格构基本单元8的BC边位置处;其中,中间连接构件1-2的第五卡接口1-6与十字连接构件1-1的第四卡接口1-10连接^[17-18]。

7)在步骤5中的十字连接构件1-1的第二卡接口1-5上连接位于PVC板材格构基本单元8的DC边位置处的中间连接构件1-2,并将该中间连接构件1-2打入黄土边坡的台阶结构面中,且使该中间连接构件1-2的第六卡接口1-7外漏在PVC板材格构基本单元8的DC边位置处;其中,中间连接构件1-2的第五卡接口1-6与十字连接构件1-1的第二卡接口1-5连接^[17-18]。

8)将位于PVC板材格构基本单元8的菱形C顶点处的十字连接构件1-1打入黄土边坡的台阶结构面中,使该十字连接构件1-1的第二卡接口1-5和第四卡接口1-10外漏,且将该十字连接构件1-1的第一卡接口1-4与步骤6中的中间连接构件1-2的第六卡接口1-7连接,将该十字连接构件1-1的第三卡接口1-9与步骤7中的中间连接构件1-2的第六卡接口1-7连接^[17-18]。

2.3 施做锚固工程

采用钻孔工具穿过十字连接构件1-1上的锚孔1-8,在施做有PVC板材格构1的黄土边坡的台阶结构面上钻孔,将锚杆3-2穿过锚孔1-8放入钻孔中并进行注浆,然后在位于锚孔1-8上端的一段锚杆3-2上连接螺栓3-1^[17-18]。

3 植被群落设计

3.1 植被群落设计原则及类型

植被群落设计应建立符合当地的立地条件、形成适宜立地要求和协调周围环境的植被群落,并满足生态学相关原理的自然性原则、安全性原则、多样性原则、功能性原则和景观性原则^[13,28]。

植被群落类型可分为草本型植被群落、草灌型植被群落、灌草型植被群落、乔灌型植被群落和特殊型植被群落^[13,29]。草本型植被群落是以草本植物为主体的植被群落,由于其前期生长快,易成活等特点,是目前边坡生态恢复中应用最多的植被群落类型;草灌型植被群落是以草本植物为建群种、灌木为伴生种的植被群落类型,避免了单一应用草本植物;灌草型植被群落是以灌木为建群种、草本植物为伴

生种的植被群落类型,由于灌木根系长且发达,对坡面有很好的加筋作用,能加强边坡稳定性;乔灌型植被群落是以乔木为主要建群种,辅以草灌的植被群落类型^[28];特殊型植被群落,在选择物种时要着重考虑景观效果好、观赏价值高的花卉以及一些有特殊寓意的植物,注重颜色和造型上的搭配。采用灌草型植被群落类型进行黄土高原矿区边坡的坡面生态恢复,对于边坡的多级平台辅以乔木进行生态

恢复。

3.2 植被种类选择

根据气候特征及年平均降水量可将黄土高原矿区进行植被分带,依次分为森林地带、森林草原地带、典型草原地带和荒漠草原地带。当对实际边坡工程生态恢复时,依据植被群落设计原则及其所处植被分带进行植被种类的选择,黄土高原矿区各植被分带区典型植被见表1。

表1 黄土高原矿区各植被分带区典型植被^[30-32]

Table 1 Typical vegetation in different vegetation zones of mining areas on loess plateau

植被分带	地理特征	气候特征	年平均降水量/ mm	乔木	灌木	草本
森林地带	黄土高原矿区地区的东南部及山西、河南、陕西、甘肃境内的局部山地	暖温带半湿润气候	>550	华山松、铁杉、漆树、油松或栎树等	荆条、黄刺玫、构子、丁香、黄栌、三桠绣线菊、木本铁线莲、白刺花、酸枣、荆条、达乌里胡枝子、黄蔷薇等	白羊草、黄背草、野菊花、马先蒿、铁杆蒿、芨蒿、山萝卜花、本氏针茅、西伯利亚针茅、大油芒、野古草、隐子草、大油芒和蒿属等
森林草原地带	黄土高原矿区中部稍偏南地区,南与森林地带相连,北临典型草原区	半湿润-半干旱气候	450~550	油松、辽东栎、山杨、白桦、椴树等	自芨稍、自刺花、扁核木、沙棘、虎榛子、榛子、忍冬、三桠绣线菊、酸枣、达乌里胡枝子、柠条等	白羊草、本氏针茅、铁杆蒿、芨蒿、本氏羽茅、兴安胡枝子、长芒草、隐子草、白草、茵陈蒿等
典型草原地带	黄土高原矿区的中部稍偏北,南与森林草原地带相连,北与荒漠草原地带相接	暖温性半干旱气候	300~450	云杉、油松、辽东栎、白桦、山杨等	荆条、黄刺玫、白刺花、沙棘等	针茅、披碱草、委陵菜、硷草以及铁杆蒿等
荒漠草原地带	黄土高原矿区的西北部,东南与典型草原区相连,面积较小	半干旱-干旱气候	<300	榆树、沙枣、小叶杨等	怪柳、沙柳等	盐蓬、芨芨草、甘草、针茅、披硷草、委陵菜、硷草、铁杆蒿等

4 PVC 板材格构锚杆梁植被种植保障技术特点

1) 基于 PVC 板材格构锚杆梁的黄土高原矿区边坡生态恢复治理植被种植保障技术,其结构简单,施工方法步骤简便,该技术适用于黄土高原矿区土质边坡或坡率缓于 1 : 0.75 的全风化岩质边坡。

2) PVC 板材还具有耐酸、耐碱、耐盐、原材料丰富和质量小的特性^[33];总体上 PVC(聚氯乙烯)板材对环境是友好的,对人类健康基本没危害^[34-35]。

3) 按照设计的厚度为 10~50 mm 的 PVC 板材具有更好的耐久性,根据已有文献推测其寿命至少

30 年^[36-37],而钢筋混凝土板材最多 30 年^[38-40]。

4) PVC 板材的成本比钢筋混凝土的要高,但是从运输成本、施工工期以及后期养护综合来看,PVC 板材具有优势。尤其是在 2017 年以来,全国砂石供应普遍减少,价格上涨明显,导致混凝土原材料紧缺,价格也相应上涨的情况下,PVC 板材将更具优势^[39,41-42]。

5) 与现有技术相比,基于 PVC 板材格构锚杆梁的黄土高原矿区边坡生态恢复治理植被种植保障技术具有自身的优势,是一种适用范围更广,更加科学的边坡生态恢复治理技术,基于 PVC 板材格构锚杆梁的植被种植保障技术与现有技术对比分析见表 2。

表2 现有技术与基于PVC板材格构锚杆梁技术对比分析^[43-44]

Table 2 Comparative analysis of the existing technology and the technology based on PVC plate lattice anchor beam

现有技术	适用条件	特点	对比分析
抹面技术	人工将水泥砂浆等材料抹覆在坡面上以封闭边坡,从而对坡面起保护作用;抹面适用于尚未严重风化的软质岩石边坡,边坡坡度可不受限制,但坡面应干燥 ^[45]	应用范围广,尤其在陡峭的岩石边坡运用最为广泛 ^[46]	基于PVC板材格构锚杆梁技术相抹面技术,前期人力、物力等投入相对较小,景观效果好
干、浆砌片石技术	包括干砌片石、浆砌片石、护面墙等样式种类;干砌片石、浆砌片石可采用浆砌条石、块石、片石、卵石或混凝土预制块等作为砌筑材料,适用于坡度缓于1:1.00的易风化的岩石边坡和土质挖方边坡;护面墙可采用浆砌条石、块石或混凝土预制块等作为砌筑材料,也可现浇素混凝土;适用于防护易风化或风化严重的软质岩石或较破碎岩石挖方边坡,以及坡面易受侵蚀的土质边坡	取材方便,技术简单;除自重外,不承担其他荷载	基于PVC板材格构锚杆梁技术相比干、浆砌片石技术,结构自重小;不仅起到坡面防护效果,还对边坡稳定性有所提高
喷射混凝土技术	包括喷浆护坡、喷射混凝土护坡和喷锚护坡等种类。适用于岩性较差、强度较低、易于风化或裂隙发育的岩质边坡	易于操作,设备简单,故障率低,施工工期短 ^[47]	喷射混凝土技术主要适用于岩石边坡,基于PVC板材格构锚杆梁技术主要适用于土质边坡
框格技术	包括骨架护坡、混凝土空心块护坡等种类;骨架护坡适用于边坡坡率缓于1:0.75土质和全风化的岩质边坡防护与绿化,当坡面受雨水冲刷严重或潮湿时,坡度应缓于1:1.00;混凝土空心块护坡适用于边坡坡率缓于1:0.75土质和全风化、强风化的岩石挖方边坡,并根据需要设置浆砌片石或混凝土骨架	可根据现场情况确定骨架形状,并与周围景观相协调,有良好的景观性 ^[48] 。挖方工程量小,景观效果好 ^[49]	框格技术虽然考虑了生态恢复,但是其恢复率较基于PVC板材格构锚杆梁技术低
钢筋混凝土格构锚杆技术	适用于土质边坡和坡体中无不良结构面、风化破碎的岩石挖方边坡	加固效果好,施工便捷,是一种兼顾深层抗滑与浅层护坡的复合支护体系 ^[50]	钢筋混凝土结构虽然整体性较好,但是自重较大,基于PVC板材格构锚杆梁技术在保证结构完整性的同时减轻了材料自重

5 结 论

1) 基于PVC板材格构锚杆梁的黄土高原矿区边坡生态恢复治理植被种植保障技术解决了常规采用钢筋混凝土制备格构框架所存在的自重较大且后期存在强度损伤的缺陷,采用耐久性更好、更加轻便、绿色环保的PVC板材替代混凝土材料,并且从运输成本、施工工期以及后期养护综合来看PVC板材更具有优势。该技术改善了格构锚杆梁的传统施工工艺,结构简单,施工方法步骤简便,应用前景好,便于推广使用。

2) 基于PVC板材格构锚杆梁的黄土高原矿区边坡生态恢复治理植被种植保障技术优化了格构锚杆梁结构的设计方法,考虑了随时间变化的动态过程,以及植物根系生长过程中加筋作用逐渐增强,直至结构失效后完全依靠植物根系起到边坡加固的作用,从而实现了边坡稳定性动态管理和后期补强的理念。

3) 从生态学的自然性原则、安全性原则、多样性原则、功能性原则和景观性原则来看,采用灌草型植被群落类型进行黄土高原矿区边坡的坡面生态恢

复,对于边坡的多级平台辅以施种乔木进行黄土高原矿区边坡工程生态恢复是更加合理的方法,根据气候特征整理出黄土高原矿区典型植被物种,为黄土高原矿区边坡工程生态恢复植物选择提供了理论依据。

参考文献 (References) :

- [1] 宋子岭,范军富,赵东洋,等. 露天煤矿生态恢复环节作业方式与参数确定方法[J]. 煤炭学报,2018,43(S1):104-111.
SONG Ziling, FAN Junfu, ZHAO Dongyang, et al. Operation methods and parameters determination of ecological restoration at surface coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43 (S1):104-111.
- [2] 范立民,马雄德,蒋泽泉,等. 保水采煤研究30年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术,2019,47(7):1-30.
FAN Limin, MA Xionged, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7):1-30.
- [3] 吴杨,夏冬,梁冰,等. 基于岩体质量评价与分区的露天矿岩质边坡生态重建技术[J]. 煤炭学报,2019,44(7):2133-2142.
WU Yang, XIA Dong, LIANG Bing, et al. Ecological reconstruction technology of rock slope in open pit based on rock mass quality

- evaluation and division[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2133-2142.
- [4] 邱利平,李绍才,孙海龙. 岩石边坡基质-植被系统中氮磷钾损伤模型[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3164-3168.
QIU Liping, LI Shaocai, SUN Hailong. Models of nitrogen phosphorus and potassium losses in rock slope matrix-vegetation system [J]. China Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3164-3168.
- [5] 李浩荡,余长超,周永利,等. 我国露天煤矿开采技术综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 24-35.
LI Haodang, SHE Changchao, ZHOU Yongli, et al. Summary and prospect of open-pit coal mining technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 24-35.
- [6] 卞正富,雷少刚,金丹,等. 矿区土地修复的几个基本问题[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 190-197.
BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, et al. Several basic scientific issues related to mined land remediation [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 190-197.
- [7] 王双明,孙强,乔军伟,等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8-15.
WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- [8] 王晓钟. 永古高速公路边坡生态恢复技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
WANG Xiaozhong. Study on ecological restoration technology of slope of Yongdeng-Gulang expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [9] 李建林. 边坡工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2013: 196-198.
- [10] 张俊云. 厚层基材喷射植被护坡技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
ZHANG Junyun. Study on technology of thick layer base material spraying bio-slope-engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [11] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 115(4): 701-719.
- [12] TEMGOUA A G T, KOKUTSE N K, KAVAZOVI Z. A 3D model applied to analyze the mechanical stability of real-world forested hillslopes prone to landslides[J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 100-109.
- [13] LI Q, LIU G B, ZHANG Z, et al. Effect of root architecture on structural stability and erodibility of topsoils during concentrated flow in Hilly Loess Plateau[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(6): 757-764.
- [14] RAI Rajesh, SHRIVASTVA B K. Numerical simulation of vegetated mine dump slope with reference to small plants[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(1): 111-115.
- [15] YANG Y, WANG J X, DUAN Q S, et al. The Investigation and 3D numerical simulation of herb roots in reinforcing soil and stabilizing slope[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12): 4909-4921.
- [16] 叶万军,杨更社,郭西山. 黄土边坡剥落病害的类型及其发育特征[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(1): 52-57.
YE Wanjun, YANG Gengshe, GUO Xishan. Style of spalling hazard in loess slope and its develop characteristic [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(1): 52-57.
- [17] 毛正君. 一种黄土边坡植被种植保障 PVC 板材结构体系: 中国, CN205399442U [P]. 2016-07-27.
- [18] 毛正君. 黄土边坡植被种植保障 PVC 板材结构体系及其施工方法: 中国, CN105604071A [P]. 2017-06-30.
- [19] 朱彦鹏,郑善义,张鸿,等. 黄土边坡框架预应力锚杆支挡结构的设计研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1582-1585.
ZHU Yanpeng, ZHENG Shanyi, ZHANG Hong, et al. Design of frame supporting structure with pre-stressed anchor rods on loess slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1582-1585.
- [20] 言志信,贺香,郭斌,等. 黄土边坡框架锚杆结构的加固研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 892-897.
YAN Zhixing, HE Xiang, GUO Bin, et al. Study on grillage supporting structure with anchor rods on loess slope reinforcement [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(6): 892-897.
- [21] 戴自航,石金华,卢才金. 预应力锚索框架梁加固滑坡的稳定性数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(3): 9-16.
DAI Zihang, SHI Jinghua, LU Jingcai. Numerical analysis on landslides stabilized by framed beams with pre-stressed cables [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(3): 9-16.
- [22] 王娟娟,邓军涛,门玉明. 锚杆格构梁模型试验及格构梁内力计算[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 64-68, 76.
WANG Juanjuan, DENG Juntao, MEN Yuming. Model tests of the lattice beam anchor and the internal force calculation of the lattice beam [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 64-68, 76.
- [23] 陈春利,殷跃平,门玉明,等. 全长黏结注浆格构锚固工程模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 881-889.
CHEN Chunli, YIN Yueping, MEN Yuming, et al. Model test on fully grouted lattice beam anchorage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 881-889.
- [24] 朱杰兵,王小伟. 高边坡预应力锚固结构腐蚀损伤与诊断研究进展[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(11): 1-6, 19.
ZHU Jiebing, WANG Xiaowei. Research progress of corrosion damage and diagnosis of prestressed anchorage structures in high slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(11): 1-6, 19.
- [25] 何满潮,吕谦,陶志刚,等. 静力拉伸下恒阻大变形锚索应变特征实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 213-220.
HE Manchao, LYU Qian, TAO Zhigang, et al. Experimental study of strain characteristics of constant-resistant large deformation anchor rod under static stretching condition [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 213-220.
- [26] 单仁亮,杨昊,钟华,等. 让压锚杆能量本构模型及支护参数设计[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 241-247.

- SHAN Renliang, YANG Hao, ZHONG Hua, *et al.* Design of support parameters and energy constitutive model for yielding anchor rod[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 241-247.
- [27] 薛道成, 张凯. 煤矿锚杆锚固结构系统横向振动特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 695-700.
XUE Daocheng, ZHANG Kai. Theoretical research on transverse vibrations of the rod anchorage structure in coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology. 2013, 42(4): 695-700.
- [28] 李少丽, 许文年, 丰瞻, 等. 边坡生态修复中植物群落类型设计方法研究[J]. 中国水土保持, 2007(12): 53-55.
LI Shaoli, XU Wengnian, FENG Zhan, *et al.* Study on design methods of plant community types in slope ecological restoration[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(12): 53-55.
- [29] 许文年, 夏振尧, 周明涛, 等. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 35-37.
- [30] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 25-35.
- [31] 刘广全. 黄土高原植被构建效应[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 18-21.
- [32] 周杰, 沈吉. 中国西部环境演变过程研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 44-47.
- [33] 潘祖仁, 邱文豹, 王贵恒. 塑料工业手册: 聚氯乙烯[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [34] 中华人民共和国工业和信息化部. 内衬PVC片材混凝土和钢筋混凝土排水管[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2015.
- [35] 桂祖桐. 环保和毒性的议题对聚氯乙烯消费的影响[J]. 齐鲁石油化工, 2006(4): 372-378, 355.
GUI Zutong. Influences of the theme on environment protection and toxicity on PVC consumption[J]. QILU Petro-chemical Technology, 2006(4): 372-378, 355.
- [36] 孙彦红, 皮红, 郭少云. 聚氯乙烯薄膜使用寿命预测[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(8): 133-136.
SUN Yanhong, PI Hong, GUO Shaoyun. Lifetime prediction for PVC film[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(8): 133-136.
- [37] 辛明亮, 林华义, 李茂东, 等. 聚氯乙烯管材研究进展及使用寿命评估[J]. 塑料科技, 2015, 43(8): 95-98.
XIN Mingliang, LIN Huayi, LI Maodong, *et al.* Research progress and lifetime assessment of PVC Pipe[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(8): 95-98.
- [38] 张冲. PVC板桩的制备及其耐老化性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
ZHANG Chong. Study on preparation and aging resistance of PVC sheet pile[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [39] 耿雅妮. 塑料管在市政排水工程中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
GENG Yani. Applied research of plastic pipes in the municipal drainage engineering[D]. Xi'an: Xi'an university of architecture and technology, 2009.
- [40] 张劲泉, 李承昌, 郑晓华, 等. 不锈钢钢筋混凝土结构研究[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [41] 陈伊. 硬聚氯乙烯(PVC-U)双壁波纹管推广及应用[C]//西南六省、区、市七方土木建筑工程学会第二十四次学术年会论文集. 贵州省土木建筑工程学会, 贵州省建筑设计研究院, 2006.
- [42] 王兵兵. 轻钢骨架PVC生态木装配式房屋建筑结构设计研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2018.
WANG Bingbing. Research on the design of PVC wood-plastic integrated precast building with light steel frame[D]. Changchun Engineering College, 2018.
- [43] GB 50330—2013, 建筑边坡工程技术规范[S].
- [44] GB 51289—2018, 煤炭工业露天矿边坡工程设计标准[S].
- [45] 赵之仲. 公路工程养护及改扩建施工技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017.
- [46] 曾晓东, 孙其河, 穆秋月, 等. 青藏高原东北地区边坡恢复技术探讨[J]. 中国水土保持, 2019(4): 28-30.
ZENG Xiaodong, SUN Qihe, MU Qiuyue, *et al.* Discussion on slope restoration technology in northeast area of qinghai-tibet plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(4): 28-30.
- [47] 宋建军. 电气化铁路堑坡喷锚防护[J]. 铁道工程学报, 1997, 14(4): 122-126.
SONG Jianjun. Anchor bolt-spray protection of electrification railway cut[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1997, 14(4): 122-126.
- [48] 刘黎明, 邱卫民, 许文年, 等. 传统护坡与生态护坡比较与分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2007(6): 528-532.
LIU Liming, QIU Weiming, XU Wengnian, *et al.* Discussion on traditional slope protection and ecological slope protection technology[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2007(6): 528-532.
- [49] 傅重阳. 路基边坡混凝土拱形截水骨架+内嵌空心六棱砖+客土植草组合防护绿色施工技术创新[C]//绿色建筑创新、BIM技术与装配式建筑: 第七届中国中西部地区土木建筑学术年会论文集. 河南省土木建筑学会, 2017: 77-84.
- [50] 韩爱民, 李建国, 肖军华, 等. 预应力锚杆框架梁的支护力学行为研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2894-2900.
HAN Aimin, LI Jianguo, XIAO Junhua, *et al.* Mechanical behaviors of frame beam supporting structure with prestressed anchors, Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2894-2900.