

浅谈不同类型柔性网在山区铁路地质灾害防治中的应用

石亮

中国铁路上海局集团有限公司芜湖工务段,安徽芜湖,241000;

摘要:山区铁路受复杂地质与地形影响,危岩危石、崩塌落石等灾害频发,柔性防护网因地形适应性强、耗能效果优,成为核心防治手段。本文以主动防护网与被动防护网为研究对象,先剖析两类柔性网的组成构造(含锚固、支撑、网体、消能等核心构件),再梳理关键施工技术要点(如锚杆制安、网体挂设、张力调整),进而明确二者功能差异——主动网聚焦“源头加固”,约束坡面浅层岩土体;被动网侧重“路径拦截”,吸收落石冲击能量,并结合山区铁路灾害特点划分适配场景,为同类工程防治方案比选提供技术参考。

关键词:柔性网;主动网;被动网;帘式网

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.078

引言

我国是一个多山地的国家,作为交通网络遍布全国的铁路,其山区铁路里程约占全国铁路总里程的60%~70%。大部分山区地质构造复杂,地形陡峭,地表岩体破碎严重,极易导致崩塌落石、泥石流等地质灾害的发生,严重威胁铁路运输安全,目前此类地质灾害防治主要有加固(如圬工支撑、主动网、锚固、框架梁等)、拦截(如拦石墙、被动网、格栅坝、落石槽、棚洞等)、排导(排导槽、导流堤、帘式网等)三种方案,不同的防治方案基于不同的作用机理和使用条件,根据地质灾害的特性和现场的地质条件进行方案比选,以达到防治效果的最优化。三种防治方案中对应的不同类型的柔性网因其系统结构轻型、施工便捷、适应性强,同时保护了原有植被及其生长条件等特性,得以在山区铁路危石整治、岩质边坡防护中广泛应用。

1 柔性网系统简介

自1995年SNS柔性防护系统引进国内以来,柔性网逐步广泛应用至铁路沿线地质灾害防治中,为此铁道部2004年颁发行业标准《铁路沿线斜坡柔性安全防护网》(TB/T 3089—2004),后经逐年工艺优化与材料升级,交通运输部更新行业标准《边坡柔性防护网系统》(JT/T 1328—2020),对柔性网防护能级、防护系统、消能装置、检测试验标准等内容进行了明确与更新。该规范中将柔性防护网系统按加固、拦截与引导三种基本形式划分为主动防护系统、被动防护系统和引导防护系统。

2 不同类型柔性网系统功能

2.1 主动防护网

2.1.1 主动网组成结构

主动防护系统以“坡面全覆盖、浅层强约束”为设计核心,通过锚杆与支撑绳构建骨架,搭配柔性网体形成整体防护结构,典型配置以APS-150/P型(防护能级150kJ, P代表普通型)为例,主要构件分为四类:1. 锚固构件:包括钢绳锚杆与加密锚杆。钢绳锚杆采用直径16mm的镀锌钢丝绳制作,长度2.5米,纵横向间距4.5米,通过钻孔植入边坡地层后灌注水泥砂浆,形成与地层的牢固连接。2. 支撑构件:即纵横向支撑绳,均采用直径12mm的高强度镀锌钢丝绳,纵向支撑绳沿坡面上自上而下布设,横向支撑绳垂直于纵向支撑绳布设,二者通过卡扣连接形成网格状骨架,支撑绳抗拉强度不低于1570MPa。3. 网体构件:包含外层主网与内层格栅网。主网用于抵御岩土体冲击,分为钢丝绳网与环形网两类——钢丝绳网由直径8mm的钢丝绳编织成菱形网格(网孔尺寸20cm×20cm),通过卡扣连接形成整体,拉伸变形稳定且紧固件不易疲劳;格栅网采用聚乙烯材质,网孔尺寸5cm×5cm,铺设于主网内侧,用于拦截细小岩屑与松散土层,防止漏料导致坡面掏空。4. 连接构件:主要为缝合绳,采用直径8mm的镀锌钢丝绳,用于将主网与支撑绳、网片之间的搭接部位串联固定,缝合间距不大于20cm,确保网体与骨架形成整体。

2.1.2 主动网应用原理

主动网通过“主动约束、荷载分散”实现坡面加固,其核心原理是利用网体与锚固系统形成的连续约束面,对边坡浅层岩土体施加持续的径向约束力,限制岩土体的位移与变形,从源头遏制灾害发生。具体作用机制分

为三个层面：1. 孤危石固定：对于坡面直径0.5米至2米的孤危石，网体通过紧密贴合将其包裹，当孤危石受风化、降雨影响出现松动趋势时，网体张力会形成反向约束力，阻止其滚落。2. 岩体裂隙控制：对于存在裂隙的坡面岩体，网体的约束作用可减小裂隙扩展速度——当岩体因应力释放出现裂隙张开时，网体通过拉伸变形吸收能量。3. 坡面整体稳定：对于松散土层或风化岩层坡面，网体与格栅网的组合可形成“保护层”，减少雨水对坡面的冲刷侵蚀。

2.1.3 主动网施工技术

主动网施工需遵循“先锚固、后组网、再验收”的流程，确保系统与边坡贴合紧密、传力顺畅，核心施工步骤与技术要点如下：1. 锚杆制安：按设计间距（纵横向4.5米）在坡面钻孔，孔径不小于100mm，孔深比锚杆长度长10cm（预留注浆空间）；将钢绳锚杆植入孔内，锚杆外露端安装张拉套筒，随后采用水泥砂浆（强度等级不低于M30）灌注，灌注过程中需振捣密实，避免出现空洞。2. 铺设格栅网：从坡顶向坡底平铺格栅网，网片之间采用缝合绳搭接，搭接宽度不小于10cm，缝合间距20cm。3. 安装纵横向支撑绳：先安装纵向支撑绳，将支撑绳一端固定于坡顶锚杆的张拉套筒上，另一端沿坡面拉至坡底锚杆，通过紧线器张拉至设计张力（一般为5kN），再固定于坡底锚杆。4. 铺设钢丝绳网：将钢丝绳网覆盖于格栅网外侧，网片之间搭接宽度不小于10cm，搭接部位采用缝合绳串联；缝合时需从网片边缘向中心推进，缝合间距15cm至20cm。5. 质量验收：检查锚杆锚固质量（无松动、无注浆空洞）、支撑绳张力（无松弛、无明显下垂）、网体贴合度（无悬空、无褶皱）及缝合质量（无漏缝、无断线）。

2.2 被动防护网

2.2.1 被动网组成结构

被动防护系统以“拦截冲击、分级耗能”为设计核心，通过钢柱与锚固系统构建支撑框架，搭配柔性网体与消能部件形成拦截屏障，典型配置以PPS-100/DB-A型（防护能级100kJ，DB代表大跨度，A代表普通型）为例，主要构件分为四类：1. 支撑系统：包括钢立柱与混凝土基座。钢立柱采用直径168mm的无缝钢管制作，高度5米，壁厚8mm，表面采用热镀锌防腐处理（锌层厚度不低于85μm）；混凝土基座为矩形截面（1m×0.8m×0.6m），强度等级不低于C30，内部配置4根直径20mm

的锚固钢筋，与钢立柱底部法兰盘通过螺栓连接。2. 网体系统：包含外层主网与内层格栅网。主网用于拦截落石，分为钢丝绳网与环形网两类——钢丝绳网由直径10mm的钢丝绳编织成菱形网格（网孔尺寸30cm×30cm），抗拉强度不低于1770MPa，适用于防护能级50kJ至100kJ的低能级落石；环形网由直径8mm的钢丝绳绕制为环形（环直径40cm），再通过直径12mm的钢丝绳串联成网，环形网通过环体变形与摩擦耗能，适用于防护能级100kJ至500kJ的高能级落石；格栅网采用高强度聚酯纤维材质，网孔尺寸10cm×10cm，铺设于主网内侧，用于拦截粒径小于10cm的岩屑，防止漏网。3. 锚固系统：包括钢绳锚杆、上拉锚绳与侧拉锚绳。钢绳锚杆采用直径22mm的镀锌钢丝绳制作，长度3米，纵横向间距10米（与钢柱间距一致），植入地层后灌注水泥砂浆，抗拔力不低于100kN。4. 消能系统：核心为减压环，采用特种钢材制作，串联于上拉锚绳与侧拉锚绳上，每个拉锚绳配置2个减压环；减压环通过预设的“拉伸-变形”路径实现耗能，当荷载达到设计阈值（一般为20kN至50kN）时，减压环开始拉伸变形，单次变形耗能可达15kJ至30kJ，大幅削弱落石冲击能量。

2.2.2 被动网应用原理

被动防护系统主要是对落石或泥石流进行拦截，以达到灾害防治的效果，系统由柔性网、支撑系统、耗能装置和钢柱四部分构成，其中柔性网受到落石的冲击作用后，首先通过自身的变形进行耗能，然后柔性网将冲击荷载传递到支撑绳上，当荷载达到减压环的阈值时，减压环开始耗能，同时支撑绳和拉锚绳将荷载传递给钢柱和锚杆，最终由钢柱和锚杆将荷载传递给地层，通过各构件之间的拉压平衡形成“以柔克刚”的防护体系，以拦截的形式减小或阻止地质灾害。

2.2.3 被动网施工技术

被动网工艺施工程序主要有钢柱基座施工→安装钢柱→上拉、侧拉锚杆制安→钢立柱、上拉及侧拉锚绳安装→上下支撑绳安装→环形网挂设→格栅网挂设→安装完成。在被动网常规配件基础上，为进一步强化网底防护与收集能力，一般施工时在两钢柱间网底增设两根锁脚锚杆；对于跨度较大的被动柔性防护网结构，其在自重作用下的初始变形非常大，为减少初始变形对防护能级的影响，一般每间隔50米增设一根钢柱作为一个安装单元。

2.3 帘式防护网

2.3.1 帘式网组成结构

引导防护系统（以下简称帘式网）即为采用锚杆、支撑绳、纵横向拉绳等构件，将柔性金属网自然覆盖在具有潜在地质灾害的坡面上，或顶部结合钢柱、拉锚绳、支撑绳等固定方式，将柔性金属网以一定的角度张开，形成以控制落石运动范围和轨迹并引导落石滑落或滚落到预设地点的一种边坡柔性防护网系统。以GPS-100-0型帘式网为例，主要构件有钢立柱、基座、环形网、格栅网、上下支撑绳、钢绳锚杆、上拉锚绳、侧拉锚绳、减压环、钢筋锚杆、纵横向支撑绳、钢丝绳网及零小配件，钢柱高度5米，安装间距10米，收集部分锚杆间距横向5米、纵向10米；帘式网分为张口式和覆盖式两种，其中，张口式特别适合于高陡边坡，覆盖式特别适合于中陡边坡，一般多采用开口帘式网。

2.3.2 帘式网应用原理

帘式网适用范围较广，对于边坡高陡、落石频发、表面风化严重、环保要求高、落石清理困难等特点的边坡防护效果极好，相对于被动网具有防护范围更高更广的优势，且更加经济和高效。帘式网采用落石“引导”的设计理念，分为拦截部分与引导部分，落石经拦截部分底部进入引导部分，引导落石与地面不断摩擦，使落石动能被不断损耗，具有以下特点：一是性能突出，避免落石二次危害；二是适用度高，适合各种不同坡度且高度较高的山体边坡；三是后期维护便利，可将落石引导至设计收集区域，以便定期集中清理。

2.3.3 帘式网施工技术

帘式网（以开口型为例）工艺施工程序主要有拦截部分安装（参照被动网）→收集部分安装（参照主动网，无缝合过程）→收集区锁脚锚杆安装→安装完成。帘式网立柱安装位置的选择需要综合考虑山体坡面整体坡型、个别重点防治的危石、坡体上部零星落石滚落轨迹等因素后慎重选择；帘式网引导部分的柔性网与坡面间需留出50厘米左右的空间，具体高度可根据坡面落石大小情况予以调整。

3 柔性网技术的组合运用

本文提到的三种柔性网系统具有不同的功能与特

点，在实际运用中可单一应用或与其他工艺联合应用，例如某些体量较大的危石可能需加长锚杆或预应力锚索与主动网结合，如危石体量大且连续则还可能结合锚杆（锚索）框架梁使用；根据现场实际工况与需求，还有“主动网+喷射混凝土”、“拦石墙+被动网（或帘式网）”、“拦泥坝+被动网”等等联合方案。

目前有种“改进型开口帘式网”减少了引导网拖尾长度，在引导部分的后方增加一道被动网，可适用于较陡边坡的滚石防治，以及其他不易修筑拦石墙的地形，也可换成增加一道拦石墙，适用于拦石墙易于开展的空旷地形，滚石经柔性网耗能后冲击能量将大幅度衰减，使拦石墙不易发生严重受损从而导致结构失效；另外“改进型开口帘式网+棚洞”体系适用于公路、铁路沿线的滚石防治工程，可极大减小棚洞顶板受到的滚石冲击力，延长棚洞使用寿命。

4 结语

综上所述，柔性网产品功能开发齐全，且具有系统结构轻型、施工便捷、适应性强的特性，与山区铁路遇地质灾害需快速抢通、地理位置偏远的特性非常契合，可在山区铁路广泛应用与推广；鉴于目前柔性网应用现场还存在的卡扣锈蚀、螺栓锈蚀、落石不易清理等问题，后续还需进一步研究新材料应用、构件更新等措施予以解决和优化。

参考文献

- [1] 刘成清，陈林雅，齐欣. 落石冲击作用下不同连接方式被动防护网的受力分析[J]. 中国铁道科学，2016, 37(2): 17-25.
- [2] 潘勤学，查旭东，杨博. 主动柔性支护系统构件的力学性能分析[J]. 中外公路，2015, 35(5): 19-23.
- [3] 交通运输部. 边坡柔性防护网系统 (JT/T 1328-2020) [S]. 北京：人民交通出版社，2020.
- [4] 孙明亮. 帘式网在高陡岩石边坡防护工程中的应用[J]. 交通与桥梁，2020, 17(352): 178-179.
- [5] 王东坡，何启维，刘彦辉，温继伟，李伟. 滚石冲击改进型开口帘式网耗能机制研究[J]. 岩土力学，2021, 42(12): 3356-3450.