

临河隧道W型加厚钢带加固技术应用研究

李亚修

北京中交桥宇科技有限公司 北京 100102

摘要: 结合青海省普通国省干线公路红土山隧道加固治理工程, 阐述复杂山岭临河隧道W型加厚钢带加固设计方法。首先基于连续介质模型的隧道衬砌结构力学特征研究, 并通过特定力学参数分析衬砌受力特征、锚杆受力特征、隧道变形特征, 找出衬砌结构受损机理, 进而验证隧道结构的整体稳定性。然后根据围岩类别、混凝土强度、衬砌类型、病害长度及有限元数值模拟综合确定W型加厚钢带的受力特性, 为隧道加固治理方案提供依据, 最后结合红土山隧道现场损伤调研情况, 建立相应数值模型, 对隧道修复方案进行验证分析, 确保治理方案安全合理。工程实践表明, 红土山隧道属于复杂山岭临河隧道, 采用W型加厚钢带加固方案后, 一定程度上改善了衬砌结构的受力状态, 减少结构裂缝的出现和发展, 安全储备有所提升, 能有效控制围岩变形。

关键词: 复杂山岭; 临河隧道; W型加厚钢带; 连续介质模型; 相应数值模型

0 概述

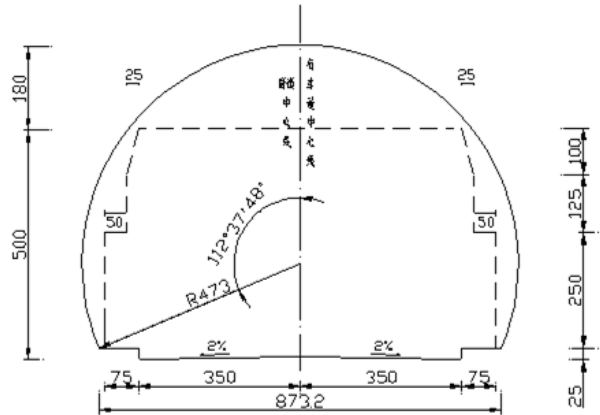
隧道经过长期使用, 隧道病害不断显现, 洞身主体结构强度会发生变化, 出现强度减弱等病害, 为保证使用安全, 应及时对洞身衬砌进行加固, 通过实际应用, W形钢带同钢板相比, W型钢带抗弯截面模量提高37倍, 刚度提高70倍左右, 抗拉强度提高12%~15%^[1]。衬砌结构通过W型钢带把环向分散的多根锚栓连接起来, 与二次衬砌形成一个整体承载结构, 相当于在衬砌外缘形成护拱, 使用该方法时应确定使用后该部位不会侵限, 工程经验表明, W形钢带加固是一种非常好的处理工艺, 已成为此类病害处治的优先选择方法。

1 工程概况

红土山隧道位于省道阿赛公路, 黄南藏族自治州尖扎县, 为山岭区二级路标准, 单洞双向行驶隧道, 起讫桩号为K64+730~K65+030, 长度300m。隧道净宽8.5m, 净高5.0m。隧道进出口均采用端墙式洞门, 照明方式采用自然采光。

隧道始建于2003年, 均采用新奥法设计和施工。施工时采用复合式衬砌, 初期支护采用喷、锚、网、钢(格栅)钢架支护, 二次衬砌采用钢筋混凝土或素混凝土衬砌, 并视地层、地质条件增加了小导管、超前锚杆等预加固措施。隧道支护参数选择以工程类比法为主, 并通过数值计算分析进行校核。

经检测, 红土山隧道土建结构得分66.75分, 被评定为3类, 中等破损(存在破坏, 发展缓慢, 可能会影响行人、行车安全), 应对结构破损部位进行重点监测, 并对局部实施保养维修。



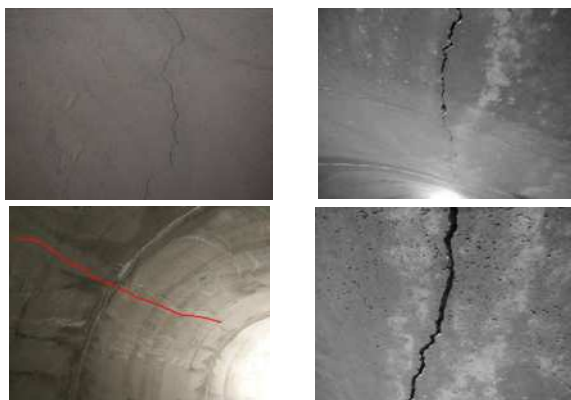
隧道建筑限界及内轮廓图(单位:cm)

(1) 隧道病害

主要集中在拱顶, 存以纵向裂缝为主, 主要集中在3个区域: ①K54+215~K54+260范围内拱顶纵向裂缝发展较多, 边墙斜向裂缝较多, 裂缝较密集, 以此处较为严重; ②K54+295~K54+305范围内环向及纵向裂缝较多且呈交叉状, 裂缝密集程度中等; ③K54+320~K54+360范围内拱顶纵向裂缝较多, 裂缝密集程度中等; 三个区域裂缝局部均存在少量错台现象, 拱顶纵向裂缝能够基本断续相连。主要病害原因分析如下:



K54+215~K54+260 裂缝分布图



2016年裂缝

2017年裂缝

1) 病害集中区域原设计为Ⅲ类, 岩性为砾岩, 呈中薄层状结构, 多有分离现象, Ⅲ类采用H15格栅钢架, 间距100cm, 二衬厚40cmC25素混凝土。勘察检测结果表明: K54+174~K54+265二衬混凝土强度偏弱, 其它检查段落基本正常, 二衬为素混凝土, 初支钢架分布不均。

2) 勘察取芯结果表明: 单个车道中心位置路面结构层、回填层、仰拱共计厚度1.5m左右, 其中K54+180、K54+300分别为0.95m、0.85m, 隧道底板岩层为强风化砂岩: 浅黄、褐红色, 原岩结构大部分已破坏, 岩芯呈半岩半土状、块状、裂隙发育, 岩质松软, 风化不均匀, 呈软硬交替状。透水性较强, 隧道底板结构层偏弱, 底板围岩的特性, 遇水易软化, 是导致两侧墙脚不均匀沉降的主要原因。



照片2-2 K54+180路面左侧



照片2-1 K54+225路面右侧



照片2-3 K54+300路面左侧



照片2-4 K54+350路面右侧

(2) 隧道路面

隧道路面均采用24cm厚混凝土路面, 检测中发现红土山隧道存在14处横向开裂, 4处网裂, 1处坑槽, 2处麻面, 1处纵向开裂。

(1) 水泥的水化热高、收缩性大, 也容易导致开裂和断板。

(2) 靠近施工缝附近裂缝主要原因是后施工水泥混凝土路面板块边缘底面杂物等清理不干净, 导致该处形成临空面, 或传力杆钢筋布置间距偏大或者钢筋偏小, 使得在车轮荷载反复作用下被挤压开裂。

(3) 红土山隧道K54+180~+200、K54+280~+350范围内路面开裂较多, 从取芯结果来看, K54+180、K54+300路面结构层、回填层、仰拱共计厚度总和分别为0.95m、0.85m, 结构层偏弱, 也从客观上导致裂缝的产生。

2 隧道衬砌结构力学特征

2.1 计算模型

针对红土山隧道现场损伤调研情况, 对隧道衬砌结构进行修复、补强, 本次损伤修复设计重点针对损伤严重的二次衬砌结构段进行。K64+791~K64+836区段内二次衬砌结构出现多条裂缝, 以纵向裂缝为主。按照隧道修复方案, 在此区段路面病害采用沥青混合料灌缝处理; 裂缝用水泥砂浆环氧树脂或裂缝修补胶涂刷处理; 且针对裂缝集中区段采取环向粘贴Q345-B型钢带(厚8mm), 墙脚施作锁脚锚杆(长3.5m), W型钢带沿隧道纵向均匀

布置,净间距80cm,拱顶、拱腰和拱脚下粘贴纵向W型钢带压条等,具体布设如图2.1-1所示。

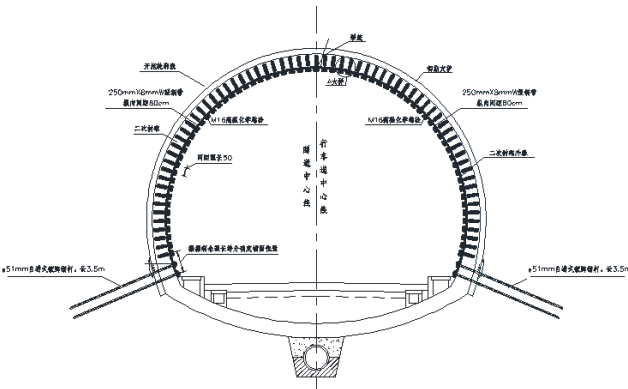


图 2.1-1 红土山隧道支护布设图

针对修复方案,本节建立相应数值模型,对隧道修复方案进行验证分析。由于支护W型钢带宽250mm,而计算分析K64+791~K64+836段隧道长45m,相对尺寸偏差大,为使计算结果合理,本节选取该区段内的某一断面进行模拟,分别分析支护前后隧道结构的受力特性,进而验证修复方案的支护效果。计算模型如图2.1-3所示,其中W型钢带采用shell结构单元模拟,锁脚锚杆采用cable单元模拟,其余单元与图2.1-2模型一致。

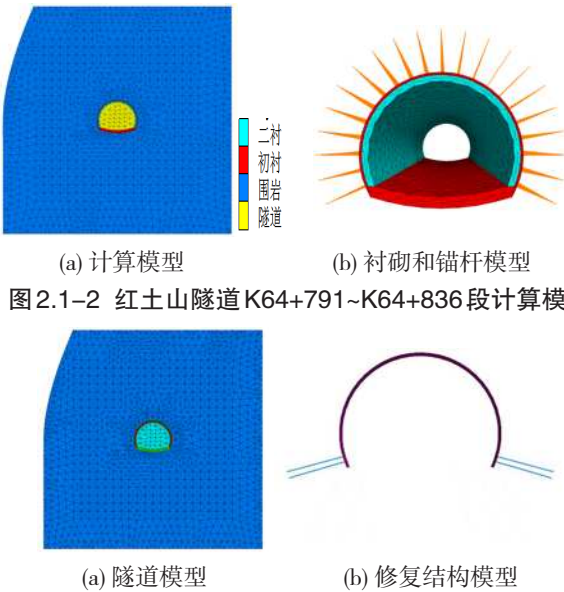


图 2.1-3 计算模型

2.2 计算参数

参考隧址区围岩地质条件,隧道设计文件及修复方案设计文件,综合选取数值模拟计算参数如表 2.2-1 所示。

表 2.2-1 围岩及支护结构参数

材料	弹性模量/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	密度/(kg/m ³)
III类围岩	11	1.1	45	0.28	2500
初衬	20	25.9	52.5	0.20	2800

续表:

材料	弹性模量/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	密度/(kg/m ³)
二衬	14	18.1	36.7	0.23	2800
锚杆	200	-	-	0.25	7900
W型钢带	200	-	-	0.27	-
钢管桩	200	-	-	0.27	7800
注浆导管	200	-	-	0.27	7600

2.3 计算结果分析

(1) 衬砌受力特征

本次对衬砌的受力特征模拟分析,主要研究衬砌的第一主应力,如图2.3-1所示。从图中可以看出,衬砌结构主要承受压应力,但在拱顶、仰拱处承受一定拉应力,修复前拱顶处最大拉应力约为1.25MPa,而修复后最大值变为1.11MPa,一定程度上改善了衬砌结构的受力状态,减少结构裂缝的出现和发展。

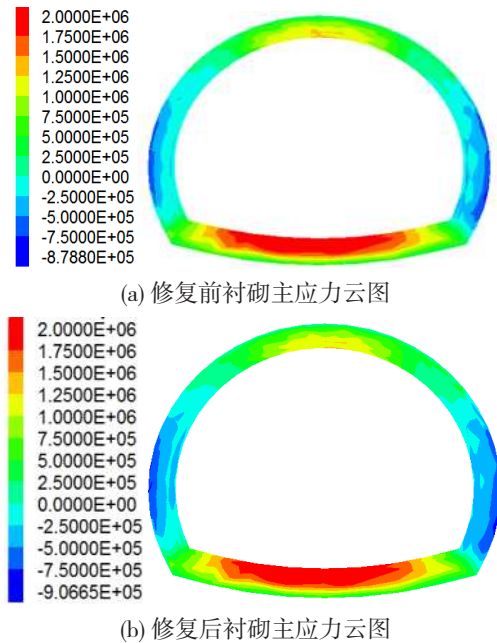
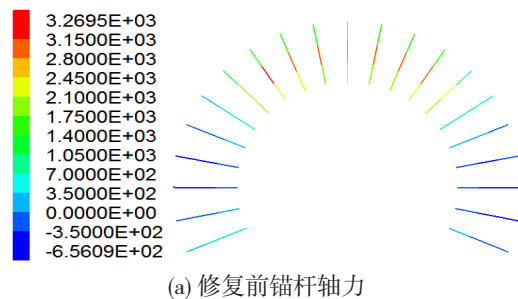


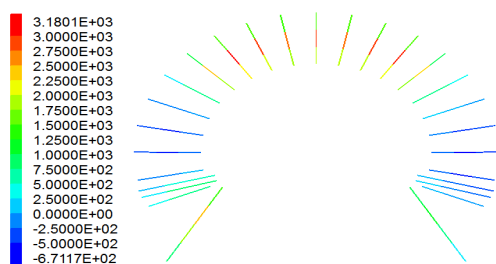
图 2.3-1 衬砌第一主应力图

(2) 锚杆受力特征

隧道开挖过程中锚杆支护按照隧道支护设计文件中的要求施作,间距(纵×环)1×1m,长度3m,修复前后锚杆轴力情况,如图2.3-2所示。



(a) 修复前锚杆轴力



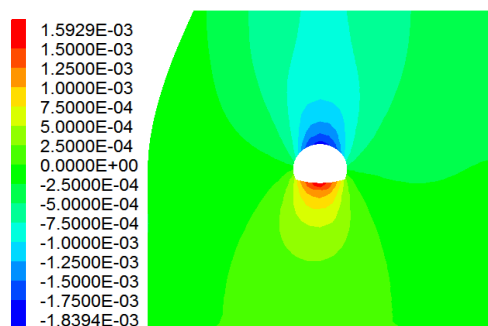
(b) 修复后锚杆轴力图

图 2.3-2 锚杆轴力图

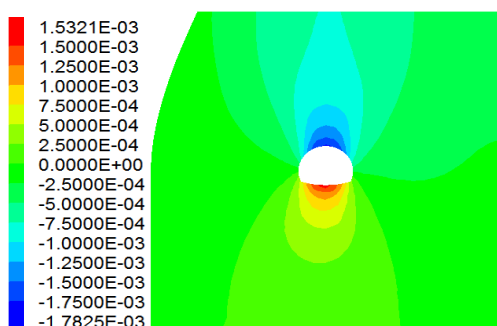
从图中可以看出，拱顶处锚杆轴力最大，其次为拱腰，且锚杆中部轴力大两端轴力小，以受拉为主，锚杆受力合理。修复前锚杆最大轴力3269.5N左右，修复后锚杆最大轴力3180.1N左右（锚杆极限抗拉强度200kN）。可知采取修复措施后，减小了锚杆受力，且在整个施工过程中，研究断面处的锚杆轴力较小，有较大的安全储备，能有效控制围岩变形。

(3) 隧道变形特征

隧道在研究区段K64+791~K64+836内的二衬出现一定纵向裂缝，为验证修复方案效果，本节主要分析隧道的竖向位移，如图2.3-3所示。由图可知，在上覆岩层自重荷载作用下，修复前隧道拱顶最大沉降值约为1.84mm，修复后最大沉降为1.78mm，均满足工程要求。



(a) 修复前隧道竖向位移



(b) 修复后隧道竖向位移

图 2.3-3 竖向位移云图

针对红土山隧道二次衬砌的损伤调研现状，对二衬结构进行修复或补强，本次损伤修复方案重点针对损伤严重的K64+791~K64+836区段的二次衬砌结构进行。按

照隧道修复方案，在此区段二次衬砌裂缝范围内表面粘贴W型钢带，墙脚处施作锁脚锚杆进行修复。本节建立相应数值模型，对此区段隧道修复方案进行验证分析，得出主要结论如下：

(1) 隧道在上覆岩层自重荷载作用下，有一定变形，但总体数值很小；衬砌结构的受力分布合理，拱顶和仰拱处出现一定拉应力，但总体满足稳定性要求。且采用粘贴W型钢带等修复措施后，一定程度上改善了二衬结构的受力状态，减小了衬砌裂缝的出现和发展。

(2) 研究断面处的锚杆结构，拱顶处锚杆轴力最大，且锚杆中部轴力大两端轴力小，锚杆受力合理，且修复前后锚杆轴力均有较大的安全储备，能有效控制围岩变形。修复方案能够满足规范规定的稳定性要求。

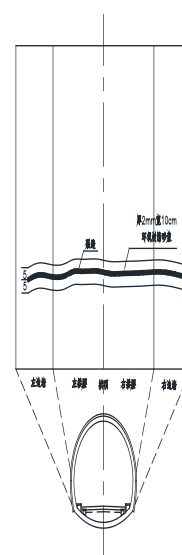
3 复杂山岭临河隧道加固治理设计

3.1 裂缝封闭加固处理

(1) 裂缝宽度 $W \leq 0.3\text{mm}$ 环向裂缝、边墙纵向裂缝、边墙斜向裂缝。

1) 在裂缝两边各5cm范围内用钢丝刷将混凝土表面杂物清除，用丙酮清洗干净，然后用压缩空气将裂缝内粉尘吹干净。

2) 用环氧树脂砂浆涂刷裂缝，涂刷速度不宜太快，来回涂刷，尽量使浆液渗透到裂缝中去。



裂缝宽度 $W \leq 0.3\text{mm}$

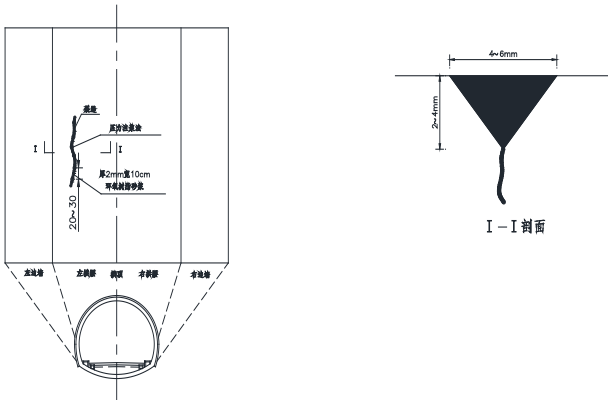
(2) 裂缝宽度 $0.3 < W < 3.0\text{mm}$ 环向裂缝、纵向裂缝、斜向裂缝，施工中纵向裂缝不刻槽。

1) 以一定的压力（应按产品使用说明书的规定，一般为 $0.2 \sim 0.4\text{MPa}$ ），将低黏度、高强度的裂缝修补胶注入裂缝腔内。

2) 注射前，应对裂缝周边进行密封，一般情况下可

按以下步骤进行:

清缝处理、粘结注射器底座、密封、密封检查、注胶、封口处理。



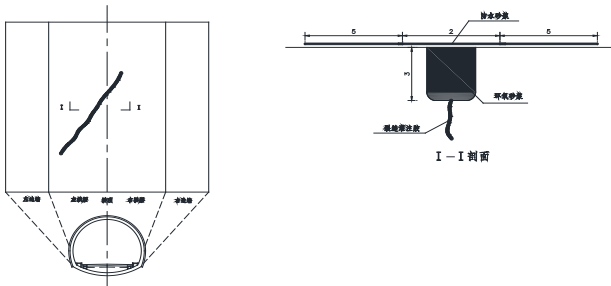
裂缝宽度 $0.3 < W < 3.0\text{mm}$

(3) 裂缝宽度 $W \geq 3.0\text{mm}$ 环向裂缝、纵向裂缝、斜向裂缝, 施工时纵向裂缝不刻槽。

1) 以一定的压力(应按产品使用说明书的规定, 一般为 $0.2 \sim 0.4\text{MPa}$), 将低黏度、高强度的裂缝修补胶注入裂缝腔内。

2) 注射前, 应对裂缝周边进行密封, 一般情况下可按以下步骤进行:

开槽及清缝、粘结注射器底座、密封、密封检查、注胶、U型槽处理。



裂缝宽度 $W \geq 3.0\text{mm}$

3.2 严重裂缝加固处理

K64+791~K64+836 区段采取环向粘贴 Q345-B 型钢带(厚 8mm)^[2], 墙脚施作锁脚锚杆(长 3.5m), 环向采用高强化学螺栓间隔弧长 50cm 进行锚固。

施工工艺: 二衬表面进行处理→定位钻孔→黏贴剂的配置→粘贴 W 型钢带→加压拧紧锚固螺栓→检查粘贴质量→防腐处理。^[3]

(1) 二衬表面处理: 混凝土表面要清除破碎部分, 并凿平凿毛, 再用钢丝刷或压缩空气清楚浮尘, 粘贴前再用丙酮擦一遍, 对于混凝土表面的凹陷过大的部位, 应用高强砂浆将表面处理平整。

(2) 定位钻孔

钻孔: 钻孔时应用冲击钻钻孔, 以确保孔的表面有足够的粗糙度;

清孔: 用毛刷清理孔壁上的浮皮, 然后用压缩空气吹净孔内的灰尘及混凝土碎屑, 同时保持孔内干燥。

注胶: 采用专用植筋胶从孔的底部开始注射直至填满孔的 2/3。

锚固: 将高强度锚固螺栓缓缓旋入孔中, 当有部分胶浆溢出时即可保证锚固螺栓植入部分完全粘结。

固化: 在固化前不可对螺栓施加任何荷载。

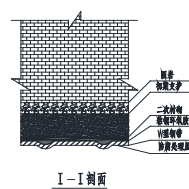
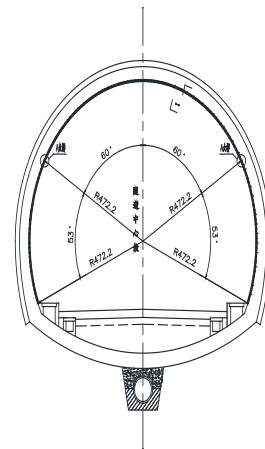
(3) 粘结剂的配置: 粘结剂采用粘贴钢带专用结构胶, 配置比例严格按照产品施工规范要求。

(4) 粘贴 W 型钢带: 采用涂拌法粘贴, 现在混凝土和钢板表面涂一层专用结构胶, 厚度一般以 2mm 为宜, 用抹刀刮平, 将气泡挤出。随后将 W 型钢带贴在混凝土帖面上, 进行加压成型, 使多余的胶液沿钢带板边缘挤出, 使钢板贴在混凝土面上。

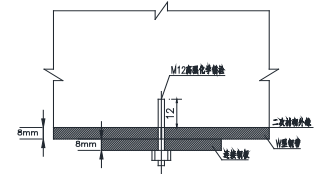
(5) 加压拧紧锚固螺栓: 待钢带粘贴后立即旋紧锚固螺栓螺母进行加压。

(6) 检查粘贴质量: 粘贴成型后涂胶饱满度检查, 用手锤沿粘贴面敲击钢带, 如无空洞声表示已粘贴密实, 否则及时填入胶接剂充填。

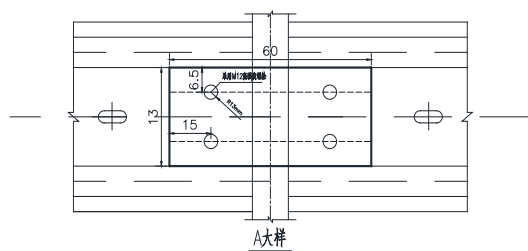
(7) 防腐处理: 涂刷前先将钢带除锈, 使钢带表面呈金属光泽, 采用丙酮除油污, 进行严格清洁处理并干燥后涂刷防腐剂。



I-I剖面



连接锚固螺栓大样图



W型钢带构造图



现场处治照

4 结论

(1) “W型钢带+锁脚锚杆+高强化学螺栓”结构补强措施在红土山隧道衬砌病害处治过程中取得了良好的效果，尤其W型钢带厚度提升到8mm，丰富了复杂山岭临河隧道病害处治工艺。

(2) 工程实践表明，“W型钢带+锁脚锚杆+高强化学螺栓”结构补强措施既能提高结构承载能力又满足了建筑界限要求，为后续隧道病害处治提供了工程经验。

参考文献：

[1]孙维国. 隧道洞身W钢带加固施工工艺研究[J]. 城市建设理论研究, 2014, 000(009):1-6.

[2]煤炭科学研究总院北京开采研究所. MT/T 861-2000 矿用W型钢带[S].北京: 国家煤炭工业局, 2000.

[3]赵铭伟. 隧道衬砌粘贴W钢带加固方案设计及施工技术要点[J]. 山西交通科技, 2017(3):4.