

湖山铀矿重型卡车回头曲线道路破坏原因及应对措施*

王文韬, 闫国斌, 黄磊, 刘玉龙, 汪志平, 曾冰勇, 杨向乐

(中广核铀业发展有限公司, 北京 100029)

摘要:露天矿山回头曲线道路是影响矿岩运输的关键路段。为提高道路回头曲线路况水平,解决该处道路凹凸不平、车辙深坑等破坏问题,以纳米比亚湖山铀矿为工程背景,分别计算、验证各个回头曲线处道路的路基强度、路面强度、超高设置,并结合生产情况提出相应管理措施。研究表明:地表钙结砾岩路基承载能力为1026.754 kPa大于其实际承载荷载825.0506 kPa,因此钙结砾岩路基无需换填;由路面厚度来表征道路强度大小,以各路段的车辆类型、交通量、道路设计为基本输入参数,Z1S3坑口、Z2S3坑口、6号排土场出入口回头曲线路面的最小厚度分别修正为231.91 cm、182.22 cm、185.53 cm,Z2S2坑口回头曲线路面厚度不需调整;超高、车速、拐弯半径应满足 $\tan\alpha = v^2/(Rg)$,且车速应控制在10 km/h,Z1S3坑口重车道与轻车道、Z2S2坑口重车道、Z2S3坑口重车道、6号排土场出入口重车道与轻车道的回头曲线超高分别修正为2.4:100, 1.6:100, 2.7:100, 3.3:100, 1.6:100, 2.5:100;管理措施包含加强养护、规范驾驶、规范铲装三方面内容。研究结果在矿山道路安全性、使用寿命、运输效率、综合成本等方面有明显改善,可为国内外露天矿山回头曲线道路设计优化提供借鉴。

关键词:露天矿山;回头曲线;路基强度;回弹弯沉值;超高

中图分类号:TD57;TD561 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)05-0166-08

0 引言

露天矿山道路设计宜采用较大的转弯半径,但在实际生产中,受复杂地形或其他条件限制,不得不采用较小转弯半径时,应当对此处道路进行优化设计和施工,以保证运输效率和行车安全^[1]。通常道路回头曲线转弯半径较小,所受拉剪应力较大,对路面结构和强度有较高要求,是影响矿山运输的关键路段。回头曲线如果设计施工不合理、维护不及时,路面严重破坏造成车辆颠簸,将明显降低司机驾驶舒适度,影响卡车正常的运行速度,降低运输效率,

加剧轮胎损耗,增加运输成本,严重时,会造成设备故障,带来重大安全隐患,甚至引发安全事故。

目前,国内外学者在回头曲线道路方面开展了较多的研究工作,并形成了相应行业规范。《厂矿道路设计规范》(GBJ 22—87)给出了各级矿山道路的计算行车速度、圆曲线半径和超高的推荐值,以及路基、路面的强度和结构设计要求^[1];黄仰贤^[2]从力学原理、经验方法、试验设备等方面全方位总结了当前道路的分析理论和设计方法,提供了自行开发的计算机程序和大量实例;邱锦标^[3]根据德兴铜矿采区运输道路现状和道路质量对汽车运输的影响及存在的问题进行分析,提出露天矿山道路设计与施工方案;刘建国等^[4]从车辆运动对道路的破坏进行力学分析,并考虑了相关影响因素,提出了提高道路质量的经验措施。上述成果为露天矿山回头曲线道路的后继研究提供了有效的输入,但由于其研究对象多为一般矿山道路或城市道路,且随着矿山重型卡车的发展,相关规范已不能满足生产需要。因此,有必要针对露天矿山重型卡车道路回头曲线等易坏路段开展专门研究。

湖山铀矿自2014年采剥作业以来,随着采矿生产进行,道路也在不断向坑内延伸,道路回头曲线的数量也在增加。受益于当地无霜冻且干旱少雨的气候条件,湖山铀矿道路修建无需考虑冻融、排水影响,道路整体状况良好,但在道路回头曲线处存在明显破坏情况,车辙破坏问题较为典型。本文通过分析其破坏机理,提出针对性措施并实施,有效改善了卡车在回头曲线处的运行状况,提升卡车的运输效率,降低了运输成本,减少了事故发生概率。

1 湖山铀矿回头曲线道路概况

湖山铀矿地处纳米比亚中西部的沿海沙漠地

* 收稿日期:2023-11-13

作者简介:王文韬(1992—),男,河北邢台人,硕士,工程师,主要从事露天采矿技术工作,E-mail:cumtwwt@126.com。

通信作者:刘玉龙(1983—),男,陕西延安人,博士,研究员级高级工程师,从事露天采矿管理工作,E-mail:zhongguoliuyulong@163.com。

区,位于大西洋沿岸雾区外围,属于干旱温和的沙漠气候,降雨稀少,年平均降雨量约为 10 mm,终年温和,年平均气温为 18~22 ℃。地表覆盖层以下,岩石强度高,岩体整体性好,围岩稳固,且水文地质条件好,无灾害性地下水或裂隙涌水^[5]。受益于当地气候、地质条件,湖山铀矿道路无冻融、水浸现象,有利于道路修筑与维护。

湖山铀矿目前有 Z1 和 Z2 两个在产矿坑,均为分期开采,全年采剥总量约 1.1 亿 t,采用公路运输方式,主要运输设备包括自有大型矿用卡车小松 960E(载重 327 t)和中型矿用卡车 TR100(载重 90 t)、SRT950C(载重 95 t)。生产实践表明,道路破坏较为严重的路段均位于矿坑与地表交界的回头曲线处,该处车辆采用小转弯半径转向,轮胎对路面的拉剪破坏应力较大,使局部道路形成车辙深坑,而其他道路状况整体良好。采用无人机获取地表文件,各回头曲线道路位置如图 1 所示。

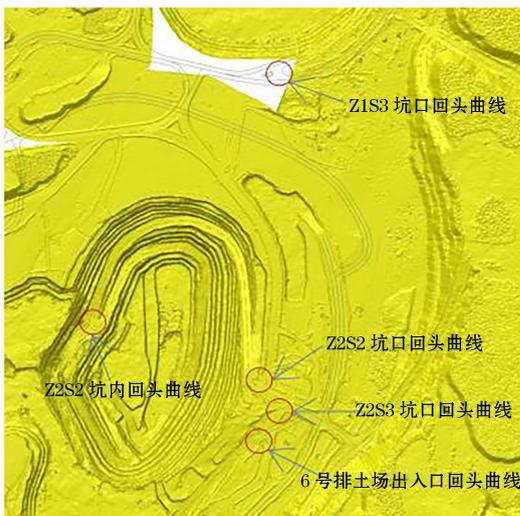


图 1 回头曲线位置

Fig.1 Location of reverse curves

2 道路回头曲线破坏的原因分析

经查阅相关文献及设计规范^[8],笔者对湖山铀矿道路回头曲线处车辙剪切等破坏现象进行了深入观察和系统研究,认为造成回头曲线道路破坏的原因应从路基强度、路面强度、道路超高、管理措施等 4 个方面进行逐一分析和验证。

首先,论证路基强度是否满足要求,路基是道路的基础,承受和向下传递行车载荷,作为路面的支撑结构物,必须具有足够的强度,若路基承载能力大于

其实际承受载荷,则路基强度满足生产要求,否则需要使用更高强度的材料对路基进行换填处理。

其次,考虑路面强度是否满足要求,路面强度通过路面材料和铺设厚度表征,为了节约修路成本,避免矿外材料采购和运输费用,路面材料一般就地取材,由剥离区废石经矿山自有骨料破碎站加工获得,因此路面强度仅通过路面铺设厚度表征,按照柔性道路弯沉指标要求,路面厚度应使允许回弹弯沉值大于理论弯沉值^[1-2],否则需要增加厚度以满足要求。

再次,应优化回头曲线处道路横向外侧高差,即超高,使其与车速、半径互相匹配。理想的超高应使车辆弯道行驶过程中产生的离心力与重力沿轴向的分力相互抵消,使地面作用于轮胎的轴向受力为 0,以消除轴向剪切破坏,否则车辆将对路面产生轴向作用力,造成回头曲线处受力增大。

最后,经观察现场生产情况,发现在铲装作业环节存在车辆超载、偏载现象,导致卡车对道路的作用力出现局部应力过大;在运输环节存在部分司机频繁刹车的不良驾驶习惯,对路面产生瞬时加速度,造成面层材料剥离;同时路面碎石清扫、洒水养护等缺乏有效监督和考核,管理工具选项较为单一。

3 道路回头曲线破坏的应对措施

3.1 路基强度

通过计算和对比作用于路基上表面的实际载荷和路基自有承载能力,来验证路基强度是否满足要求,如不满足,则需要对软弱路基进行换填处理^[6-7],计算逻辑如图 2 所示。

(1) 道路结构现状。湖山铀矿用矿车卡运输道路设计参数自下而上分别为:夯实的原岩路基、1 m 厚粒径未筛分的砾岩基层、350 mm 厚粒径为 95~130 mm 的砾岩基层、150 mm 厚粒径为 25~32 mm 的砂砾岩面层^[5],如图 3 所示。

(2) 车辆载荷作用范围。查阅小松 960E 重型卡车使用说明书以及压力扩散相关文献可知,小松 960E 在满载的情况下,后轴双轮胎轨迹当量圆直径为 1.874 m,前轴轮胎轨迹当量圆直径为 1.302 m,砂砾岩面层压力扩散角取值 30°,砾岩基层压力扩散角取值 6°^[9-10],则重车后轴轮胎作用于路基上表面的当量圆直径为 2.330 m,重车前轴轮胎作用于路基上表面的当量圆直径为 1.759 m。而小松 960E

后轴轮胎轨迹中心距离为 5.64 m,前轴轮胎轨迹中心距离为 6.30 m,前后轴距为 6.65 m,故小松 960E 前后左右 4 个轮胎作用于路基表面的荷载范围互相

独立。进行受力计算时,仅考虑重车后轴单侧轮胎作用范围即可,最终得出重车后轴轮胎作用于路基上表面的当量圆面积为 4.264 m²。

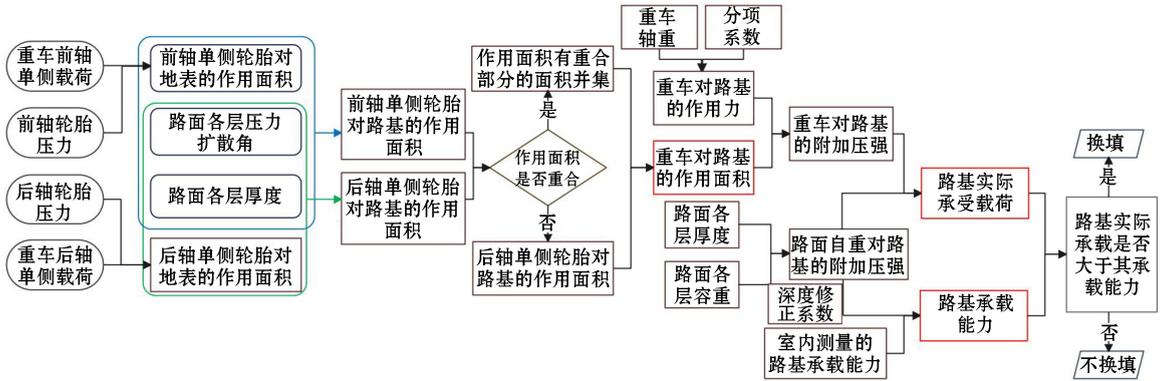


图 2 路基换填计算逻辑
Fig.2 Calculation logic of subgrade replacement

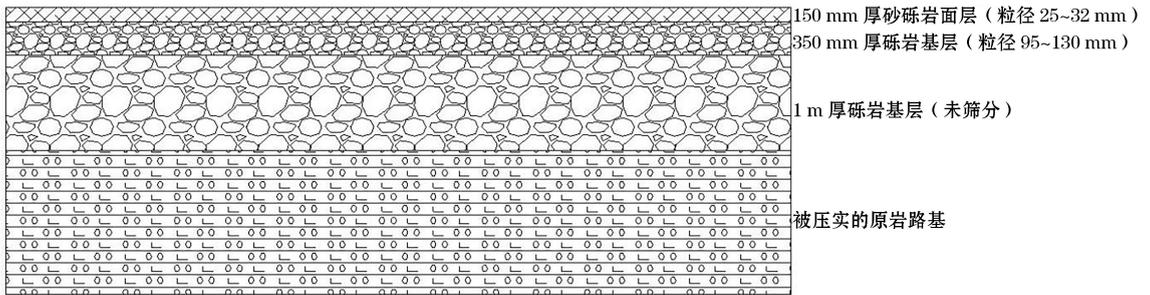


图 3 道路设计参数
Fig.3 Designed parameters of the mine road

(3) 路基实际承受载荷。钙结砾岩路基实际承受载荷由上部路面结构自重附加力和重车附加力构成^[11]。150 mm 厚砂砾岩面层材料重度为 19.6 kN/m³,1.35 m 厚砾岩基层材料重度为 17.64 kN/m³,因此,在 4.264 m² 的作用范围内,上部路面结构自重附加荷载为 26.754 kPa。小松 960E 满载情况下后轴重 385.968 t,后轴单侧载荷为 1891.2432 kN,由于车辆载荷包括冲击力和离心力,在计算时需考虑分项系数,取 1.8^[11],因此,在 4.264 m² 的作用范围内,重车附加荷载为 798.2966 kPa。地表钙结砾岩路基实际承受载荷为二者之和 825.0506 kPa。

(4) 路基承载能力。路基自有承载能力由单轴抗压强度经深度修正后得到^[9]。根据《湖山轴矿工程地质勘查报告》研究成果,钙结砾岩单轴抗压强度测试结果差异很大,变化范围为 1~50 MPa,且随赋存深度增加而增加,因此,上部钙结砾岩路基单轴抗压强度取值为 1 MPa。路基上部的面层、基层结构

加权平均重度为 17.836 kN/m³,深度修正系数取值为 1.0^[9]。因此,经深度修正后的路基承载能力为 1026.754 kPa。

可见,地表钙结砾岩路基实际承受载荷 825.0506 kPa 小于其承载能力 1026.754 kPa,故钙结砾岩路基满足实际生产需求,无需进行换填。

3.2 路面强度

在路面材料确定的情况下,通过路面厚度来表征路面强度。按照柔性路面典型结构与弯沉指标相结合的计算方法^[1],在已知标准车单轮胎迹当量圆、交通量、面层类型、路面和路基回弹模量^[12-13]等参数的情况下,可计算得到路面允许回弹弯沉值和载荷作用下现行路面的理论弯沉值。通过比较二者,来验证现行路面厚度是否可以满足路面强度要求,即保证允许回弹弯沉值大于理论弯沉值,否则要求对路面厚度进行适当调整,以达到技术要求。计算逻辑如图 4 所示。

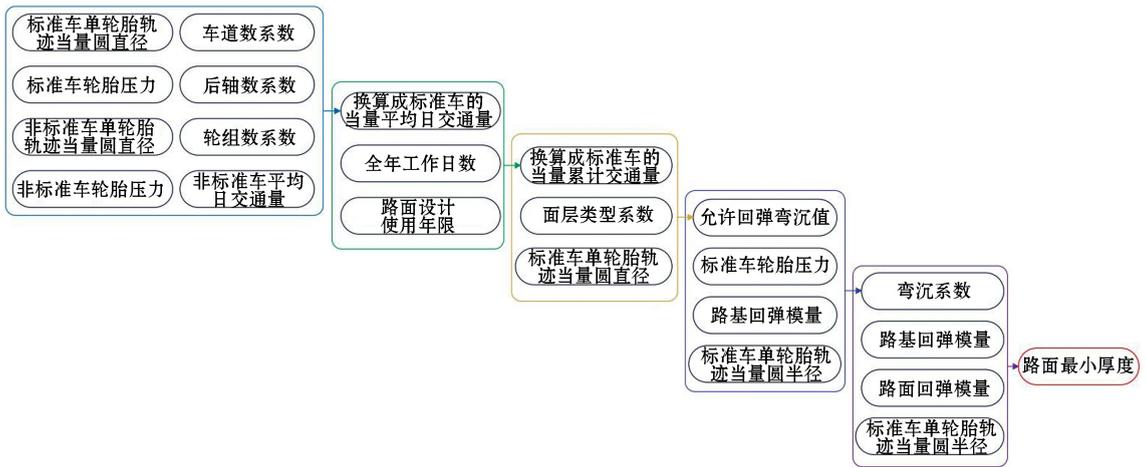


图4 路面厚度测算逻辑

Fig.4 Calculation logic of pavement thickness

3.2.1 标准车交通量

为了便于理论计算,需要将在被验证的矿山道路上通行的各类车辆的交通量换算成标准车的交通量^[1],计算公式如下:

$$n_1 = n_2 \eta c_1 c_2 \left(\frac{p_2 d_2^{1.4}}{p_1 d_1^{1.4}} \right) \quad (1)$$

式中, n_1 为换算成标准车的当量平均日交通量; n_2 为被换算的非标准车的平均日交通量; η 为车道数系数,单车道时,取值为1.25,双车道时,取值为1; c_1 为后轴数系数,单后轴时,取值为1,双后轴时,取值为2; c_2 为轮组数系数,单轮组时,取值为0.25,双轮组时,取值为1; p_1 为标准车的轮胎压力,MPa; p_2 为被换算的非标准车的轮胎压力,MPa; d_1 为标准车的单轮胎轨迹当量圆直径,cm; d_2 为被换算的非标准车的单轮胎轨迹当量圆直径,cm。

$$N_j = \sum n_1 \quad (2)$$

式中, N_j 为换算成标准车的各类汽车当量平均日交通量之和。

$$N = \sum_{j=1}^T N_j t \quad (3)$$

式中, N 为路面设计使用年限内,换算成标准车的各类汽车当量累计交通量; t 为全年工作日数; T 为路面设计使用年限,高级路面,可采用10;次高级路面,可采用6,但沥青碎(砾)石表面处治,宜采用5;中级路面,可采用5。当道路服务年限小于路面设计使用年限时,路面设计使用年限应与道路服务年限相同。

通过湖山矿调度系统,查询得到2022年全年如图1所示的地表回头曲线的重车类型和交通量,并通过上式计算,得到各地表回头曲线在路面设计使用年限内,换算成标准车的各类汽车当量累计交通量,见表1。

表1 标准车当量累计交通量

Table 1 Equivalent cumulative traffic volume of the standard truck

道路位置	重车类型	2022年平均日交通量/辆	N_j /(辆/日)	N /辆
Z1S3 坑口回头曲线	960E	376.4	376.4	686 930
Z2S2 坑口回头曲线	960E	103.4	103.5	188 922
	TR100	11.9		
Z2S3 坑口回头曲线	960E	243.2	243.2	443 840
6号排土场出入口回头曲线	960E	295.5	295.5	539 361

3.2.2 允许回弹弯沉值

回弹弯沉值反映了路基或路面结构的整体刚度和强度,与材料类型、含水率、压实度等密切相关^[1]。由于重载作用,当现行路面的理论回弹弯沉值超过允许回弹弯沉值,则路面变形不可恢复,表示道路被

破坏。允许回弹弯沉值的计算公式如下:

$$l_R = \frac{A}{N^{0.2}} \cdot \left(\frac{d_1}{d_j} \right)^{0.46} \quad (4)$$

式中, l_R 为允许回弹弯沉值,cm; d_j 为解放CA-10B型汽车的单轮胎轨迹当量圆直径,17.98 cm; A 为面

层类型系数。

面层类型系数的取值范围见表 2。湖山铀矿地表道路面层采用级配碎(砾)石,因此面层类型取 1.932,作为标准车的小松 960E 满载情况下后轴单轮胎轨迹当量圆直径为 132.52 cm。各地表回头曲线允许回弹弯沉值,见表 3。

表 2 面层类型系数

Table 2 Coefficient of pavement type

面层类型	面层类型系数 A
沥青混凝土、热拌沥青碎石	1.371
冷拌沥青碎(砾)石、沥青贯入碎(砾)石	1.528
沥青碎(砾)石表面处治	1.633
泥结碎(砾)石、级配碎(砾)石	1.932

表 3 允许回弹弯沉值

Table 3 Allowed rebound deflection

道路位置	允许回弹弯沉值 l_R/cm
Z1S3 坑口回头曲线	0.329
Z2S2 坑口回头曲线	0.426
Z2S3 坑口回头曲线	0.359
6 号排土场出入口回头曲线	0.346

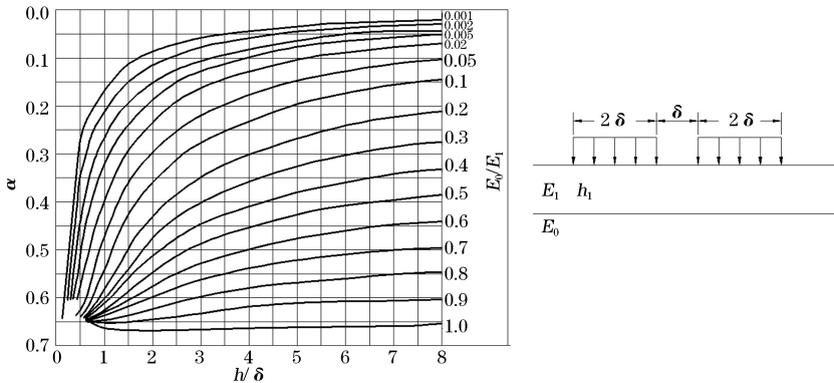


图 5 双层体系双圆轮隙中心处表面弯沉系数诺谟图

Fig.5 Nomogram of the surface deflection coefficient at the center of the double circular wheel gap of the double layer system

表 4 路面厚度测算

Table 4 Calculation table of pavement thickness

道路位置	路面设计厚度/cm	路面最小厚度/cm	增加厚度/cm
Z1S3 坑口回头曲线	150	231.91	81.91
Z2S2 坑口回头曲线	150	99.39	0
Z2S3 坑口回头曲线	150	182.22	32.22
6 号排土场出入口回头曲线	150	185.53	35.53

3.3 超高

超高是指车辆在圆曲线上行驶时,受离心力作用会产生横向滑移^[1,15]。为抵消该离心力,在满足设计速度和经济成本的条件下,保证车辆能安全、稳

3.2.3 路面最小厚度

理论回弹弯沉值反映了在现有车辆参数、道路参数条件下,经过理论计算,得出的道路在载荷作用下的回弹弯沉值。如果理论回弹弯沉值大于允许回弹弯沉值,则应增加路面厚度,以达到回弹弯沉值要求。将允许回弹弯沉值代入式(5),结合双层体系双圆轮隙中心处表面弯沉系数诺谟图(见图 5),即得到路面最小厚度^[1],计算公式为:

$$W_0 = \frac{2 P_1 \delta}{E_0} \alpha \tag{5}$$

式中, W_0 为理论回弹弯沉值,cm; P_1 为标准车的轮胎压力,MPa; δ 为标准车的单轮胎轨迹当量圆半径,cm; E_0 为路基回弹模量,MPa; α 为弯沉系数; E_1 为路面回弹模量,MPa; h 为面层厚度,cm。

通过查表法^[14] 获得地表路面回弹模量为 300 MPa,地表钙结砾岩路基回弹模量为 120 MPa,小松 960E 轮胎压力取值 0.7 MPa,则各地表回头曲线路面最小厚度见表 4,经与路面设计厚度 1.5 m 对比,Z2S2 坑口回头曲线路面强度满足要求,其余 3 个均需不同程度地增加路面的厚度。

定、舒适地通过圆曲线,在该路段横断面上设置外侧高于内侧的单项横坡。超高常用百分比表示,即水平方向前进 100 m,垂直方向抬升的高度。

理想的超高应使车辆行驶过程中产生的离心力与重力沿轴向的分力互相抵消,使道路作用于轮胎轴向的力为 0,超高、车速、转弯半径应满足 $\tan\alpha = v^2 / (Rg)$,车辆水平方向、竖直方向受力分析,如图 6 所示。超高与线速度的平方成正比,与转弯半径成反比。经调研,认为在回头曲线处车速稳定在 10 km/h 较为合适,在不改变现有回头曲线转弯半径的情况下,仅通过修正超高来达到通行要求,最为

经济可行。

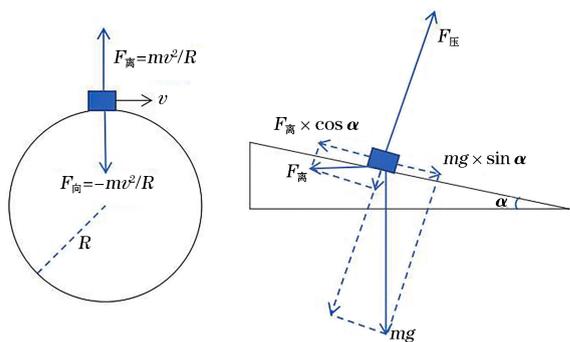


图6 受力分析

Fig.6 Force analysis of the truck

6号排土场出入口回头曲线超高设置最为典型。现行的6号排土场出入口回头曲线重车道转弯半径

为50.0 m,轻车道转弯半径为32.5 m,按照10 km/h的线速度计算,重车道理想超高应设为1.6 : 100,轻车道理想超高应设为2.5 : 100。经现场GPS实测,6号排土场出入口回头曲线重车道实际超高为2.7 : 100,轻车道实际超高为3.3 : 100,略大于理想超高。车辆在以10 km/h的速度通过该回头曲线路段时,轮胎将受到平行于车轴向上的摩擦力,加剧了道路面层和轮胎的损耗。因此,应当适当削减超高并及时维护,以利于车辆通行。

经理论计算和现场GPS实测,得到各回头曲线转弯半径、理想超高和实际超高,各回头曲线实际超高与理想超高均有一定误差,应进一步修缮各回头曲线的超高设置,各回头曲线的转弯半径、理想超高、实际超高及应对措施见表5。

表5 各回头曲线理论计算和现场实测结果

Table 5 Theoretical calculation and field measurement results of each reverse curve

超高位置	转弯半径/m	理想超高	实际超高	措施
Z1S3 坑口回头曲线重车道	33.8	2.4 : 100	2.7 : 100	削减
Z1S3 坑口回头曲线轻车道	51.3	1.6 : 100	0.5 : 100	增加
Z2S2 坑口回头曲线重车道	30.0	2.7 : 100	0.9 : 100	增加
Z2S3 坑口回头曲线重车道	24.0	3.3 : 100	4.7 : 100	削减
6号排土场出入口回头曲线重车道	50.0	1.6 : 100	2.7 : 100	削减
6号排土场出入口回头曲线轻车道	32.5	2.5 : 100	3.3 : 100	削减

3.4 管理措施

保持道路的良好路况,除了技术手段,很大程度上取决于管理措施落实到位。除了加强道路养护本身的管理措施之外,司机驾驶水平、规范装载同样很重要。

(1) 加强养护。确保道路维修质量和频率满足通车要求,尤其保证路基、路面各层的压实度达标,对破损路面及时修补,同时优化作业质量标准和验收考核制度,确保道路经常处在良好状态下。

(2) 规范驾驶。卡车司机超速行驶、频繁刹车等不良驾驶习惯对路面产生极大的破坏力,应通过理论和实践培训,来培养司机良好的驾驶习惯。

(3) 规范铲装。超载、偏载对道路和轮胎破坏尤其严重,要确保在铲装环节,矿岩不超载、不偏载。

3.5 实施效果

湖山铀矿回头曲线道路通过路面厚度优化、合理设置超高以及优化管理等综合措施,在道路安全性、使用寿命、运输效率、综合成本等方面有明显改善。通过提高该处道路的平整度,减少了行驶颠簸,避免了车辆偏载和轴向受力,减小了爆胎和车辆侧翻的风险,有效改善了回头曲线道路的行车安全。

通过优化路面厚度,提高了道路的承载能力,增强了其耐久性,延长了其使用寿命,对于频繁通行重型矿用卡车的矿山道路而言尤其重要。车辆能以10 km/h的速度匀速通过小半径回头曲线处道路,同时由于道路强度提高、维护频次减少,降低了车辆绕行的频次,有效地提高了车辆在该处的运输效率。减少了该处道路的通车油耗、轮胎损耗,降低了维护频次和工程量,有效降低综合成本。

4 结论

矿山路况是露天矿生产管理的核心内容,良好的路况可以提升司机驾驶舒适度、提高卡车运输效率、减少轮胎损耗及油耗、减少交通事故发生概率,保障矿山安全、稳定、高效运行。而道路回头曲线通常是整个矿山道路的薄弱环节,湖山矿回头曲线道路需要从以下4个方面重点关注。

(1) 湖山矿钙结砾岩路基实际承受载荷为825.0506 kPa,小于其承载能力1026.754 kPa,故现有路基满足实际生产需求,无需换填。

(2) 湖山矿需通过调节路面厚度来改善路面强

度,路面厚度随车辆类型和交通量的不同而有所区别。经计算,现场道路各回头曲线处的路面最小厚度应为 Z1S3 坑口 231.91 cm、Z2S2 坑口 99.39 cm、Z2S3 坑口 182.22 cm、6 号排土场出入口 185.53 cm,相较回头曲线处的路面设计厚度,Z1S3 坑口需增加 81.91 cm、Z2S2 坑口不需增加、Z2S3 坑口需增加 32.22 cm、6 号排土场出入口需增加 35.53 cm。

(3) 综合考虑超高、车速、转弯半径因素后,湖山矿道路各回头曲线处的理想超高应为:Z1S3 坑口重车道 2.4 : 100、轻车道 1.6 : 100,Z2S2 坑口重车道 2.7 : 100,Z2S3 坑口重车道 3.3 : 100,6 号排土场出入口重车道 1.6 : 100、轻车道 2.5 : 100。相较于各回头曲线处超高的现状,Z1S3 坑口重车道应削减 0.3 : 100、轻车道应增加 1.1 : 100,Z2S2 坑口重车道应增加 1.8 : 100,Z2S3 坑口重车道应削减 1.4 : 100,6 号排土场出入口重车道应削减 1.1 : 100、轻车道应削减 0.8 : 100。

(4) 落实关键举措,定期对道路进行养护和维修,规范驾驶员的驾驶行为和习惯,减少超速和频繁刹车,规范铲装,减少超载、偏载现象。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 厂矿道路设计规范:GBJ 22—87[S]. 北京:中国计划出版社,1987.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of road in factories and mining areas: GBJ 22—87[S]. Beijing:China Planning Press, 1987.
- [2] 黄仰贤.路面分析与设计[M].北京:人民交通出版社,1998.
HUANG Yangxian. Pavement analysis and design [M]. Beijing:China Communication Press, 1998.
- [3] 邱锦标.露天矿山道路设计及施工[J].采矿技术,2012(3): 42-46.
QIU Jinbiao. Road design and construction of open pit mine [J]. Mining Technology, 2012(3): 42-46.
- [4] 刘建国,王智,李平.矿山道路损坏机理分析及提高道路质量的途径[J].露天采煤技术,2001(4):57-59.
LIU Jianguo, WANG Zhi, LI Ping. Analysis of damage mechanism of mine road and the ways to improve road quality[J]. Open Coal Mining Technology, 2001(4): 57-59.
- [5] 中广核铀业发展有限公司.湖山铀矿建设经验汇编[M].北京:中国原子能出版社,2020.
CGNPC Uranium Resources Co., Ltd. Compilation of construction experience of the Hushan Uranium Mine[M]. Beijing:China Atomic Energy Press, 2020.
- [6] 中华人民共和国交通运输部.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing:China Communication Press, 2015.

- [7] 中华人民共和国交通运输部.公路路基施工技术规范:JTG F10—2006[S].北京:人民交通出版社,2006.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for construction of highway subgrades: JTG F10—2006 [S]. Beijing: China Communication Press, 2006.
- [8] 陈钦,陈海源,王晓辉,等.山区公路回头曲线车辆横向加速度特性研究[J].科学技术与工程,2022,22(34): 15372-15381.
CHEN Qin, CHEN Haiyuan, WANG Xiaohui, et al. Vehicle lateral acceleration characteristics of mountain highway turning curve [J]. Science technology and Engineering, 2022, 22(34): 15372-15381.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings JGJ 79—2012 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013.
- [11] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specification for design of highway bridges and culvers: JTG D60—2015[S]. Beijing:China Communication Press, 2004.
- [12] 叶斌,叶为民,曹俊.一种基于回弹模量的路基质量控制施工方法:201310422791.2[P].2016-05-18.
YE Bin, YE Weimin, CAO Jun. A method of subgrade quality control and construction based on resilient modulus: 201310422791.2[P]. 2016-05-18.
- [13] 石鸿,谷志文,王选仓.公路路基回弹模量承载板试验方法研究[J].公路,2008(9):118-123.
SHI Hong, GU Zhiwen, WANG Xuancang. Study on the test method of elastic modulus bearing plate of subgrade[J]. Highway, 2008(9): 118-123.
- [14] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社,2017.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing:China Communication Press, 2017.
- [15] 杨少伟.道路勘测设计[M].北京:人民交通出版社,2004.
YANG Shaowei. Road survey and design[M]. Beijing:China Communication Press, 2004.

Damage Reasons and Countermeasures for the Switch-Back Curve Road of Heavy Truck in Hushan Uranium Mine

WANG Wentao, YAN Guobin, HUANG Lei, LIU Yulong, WANG Zhiping, ZENG Bingyong, YANG Xiangle
(CGNPC Uranium Resources Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: The switch-back curve roads of open-pit mines are the key section which affects the transportation. In order to improve the road condition level of the switch-back curve roads and solve the damage problems of sags crests and track rut-deep, taking Hushan Uranium Mine in Namibia as the engineering background, the subgrade strength, pavement strength and superelevation setting of each switch-back curve road were calculated and verified respectively, and the corresponding management measures were put forward according to the production situation. The results show that the bearing capacity of calcium conglomerate subgrade on the surface is 1026.754 kPa, which is greater than its actual bearing of 825.0506 kPa, so there is no need to replace the calcium conglomerate subgrade. The pavement strength can be represented by the pavement thickness. Based on the truck types, traffic volume and road design of each road section as the basic input parameters, the minimum pavement thickness of the switch-back curve located on the pitheads of Z1S3, Z2S3 and the passageway of No.6 dump are respectively amended to 231.91 m, 182.22 m, and 185.53 m, and the pavement thickness of switch-back curve located on the pithead of Z2S2 does not need to be adjusted. The superelevation, speed and turning radius at each switch-back curve should satisfy $\tan\alpha = v^2 / (Rg)$, and the speed should be remained at 10 km/h. The superelevation of the switch-back curve located on the heavy and empty lanes of Z1S3, the heavy lane of Z2S2, the heavy lane of Z2S3, and the heavy and empty lanes of No.6 dump are respectively amended to $2.4 : 100$, $1.6 : 100$, $2.7 : 100$, $3.3 : 100$, $1.6 : 100$, and $2.5 : 100$. The corresponding management measures have been put forward from three aspects: strengthening maintenance, regulating driving and standard shovel. The results have significantly improved transportation safety, service life, transportation efficiency and comprehensive costs of mine roads, and can provide a reference for the design optimization of switch-back curve roads of open-pit mines at home and abroad.

Key words: Open-pit mine, Switch-back curve, Subgrade strength, Rebound deflection, Superelevation