

文章编号: 1674—8247(2023)06—0051—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.010

基于固液两相流作用下分层限位器结构的数值研究

宁楠 孙衍鹏 贾娟娟

(四川联畅工业设计有限公司, 成都 610031)

摘 要:本文采用有限元软件 ANSYS 对电缆槽内分层限位器抗冲击性能进行仿真,通过改变固液两相流速、固相质量流量等变量,研究了分层限位器结构的动力响应,结果表明:(1)在承受固液两相流冲击时,流速、固相质量流量越大,分层限位器承受的平均冲击力越大,产生的等效应力峰值也越大,构件发生不可恢复的塑性变形概率更高;(2)在不同流速冲击下,分层限位器各层限位器的位移整体从上到下逐渐增大,底层限位器的位移相比顶层限位器呈倍数增长;而随着多次撞击中冲击能量的不断消耗,各层限位器产生的位移逐渐减小直至稳定。

关键词:电缆槽;冲击;分层限位器;固液两相流

中图分类号: U22

文献标志码: A

Numerical Study on the Structure of Layered Limiters under the Impact of Solid-liquid Two-phase Flow

NING Nan SUN Yanpeng JIA Juanjuan

(Sichuan Lianchang Industrial Design Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper applied the finite element software ANSYS to simulate the impact resistance of layered limiters in cable troughs. The dynamic response of the layered limiter structure was studied by changing variables such as the speed of the solid-liquid two-phase flow and the mass flow rate of the solid phase. The results show: (1) When under the impact of a solid-liquid two-phase flow, the larger the flow speed and solid-phase mass flow rate, the greater the average impact force endured by the layered limiter. This results in larger peak equivalent stresses, which increases the probability of irreversible plastic deformation in components. (2) Under different flow speed impacts, the displacement of each layer of limiter in the layered limiter structure increases progressively from top to bottom, with the displacement of the bottom limiter showing a multiple increase compared to the top limiter. However, with the continual consumption of impact energy during repeated impacts, the displacement produced by each layer of limiter gradually decreases until it stabilizes.

Key words: cable trough; impact; layered limiter; solid-liquid two-phase flow

电气化铁路施工尤其是四电施工中需要敷设大量的线缆,以保障列车的安全运行。为避免线缆潮湿导致漏电或加速老化,铁路区间主要利用水沟电缆槽来架设线缆。电缆槽的宽度通常为 200~300 mm,

深度通常为 300 mm,扣除线路设备及线缆接头占用的空间后,槽内用于线缆敷设及线缆间相互隔离的空间非常有限。当线缆平行铺设且间距较近时会滋生串扰问题,严重时会影响信号的正常传输,导致设备损坏^[1]。

收稿日期:2023-01-06

作者简介:宁楠(1995-),女,助理工程师。

引文格式:宁楠,孙衍鹏,贾娟娟. 基于固液两相流作用下分层限位器结构的数值研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(6):51-56.

NING Nan, SUN Yanpeng, JIA Juanjuan. Numerical Study on the Structure of Layered Limiters under the Impact of Solid-liquid Two-phase Flow[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6):51-56.

此外,水沟电缆槽本身的薄壁结构、隧道衬砌与电缆槽结合面处理不到位、以及隧道排水体系顺接不到位也将导致电缆槽底部及沟身开裂渗水^[2]。为避免线缆密集、无序堆放在电缆槽底部,设计专用敷设线缆的分层限位器已迫在眉睫。

我国电气化铁路常常穿越山区建设,受到山区复杂的地质条件以及地震影响,铁路沿线会发育大量的泥石流沟,易爆发泥石流。泥石流是一种有较高容重、饱含砂、砾的固液两相流体^[3-5]。泥石流产生的冲击力可能会使分层限位器结构损伤,导致其零部件相互错位,严重时失去夹持功能,使线缆掉入槽底,发生信号中断等事故。分层限位器属于新产品,应用在电缆槽的年限尚短,现有研究主要集中在其能否承载线缆,尚未有关于其受泥石流冲击的研究。

基于此,为研究分层限位器的抗冲击性能,本文采用单向流固耦合方法模拟泥石流定向冲击分层限位器,研究分层限位器结构承受的冲击力、应力和位移,以期为后续研发提供指导。

1 研究对象

1.1 分层限位器的提出

隧道电缆沟槽一般为通信信号槽、电力电缆槽、排水槽三槽合一,且为双侧电缆沟槽,电力电缆槽置于边墙侧,通信、信号电缆槽置于道床侧,排水槽置于两槽之间。隧道电缆沟槽沿铁轨方向的分布如图1所示。夹持槽内线缆的现有产品通过挂钩来悬挂线缆,但挂钩仅可悬挂一根线缆,且适应线缆直径的范围较小。分层限位器是在既有产品的基础上,设计出的新型产品。分层限位器采用了分层和可调节适配线缆缆径的技术,每层限位器可架设多根线缆,层级模块不仅能控制线缆离地高度,使线缆在电缆槽内分层有序排列,而且可使相邻线缆的间距满足信号正常传输。

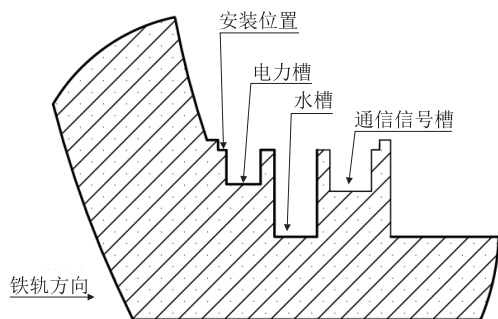


图1 分层限位器安装位置示意图

1.2 分层限位器的设计要点

分层限位器的结构如图2所示,其结构优势主要

包括:(1)通过在基座上设置一个或多个卡座,使得一个基座上可以悬挂多个线缆;同时卡座可以沿基座滑动,使得卡座之间的距离可调,能够适应不同直径的线缆;(2)在实际应用中,根据线缆的使用数量以及布置方式,灵活选择基座与卡座的数量,但安装后相邻两个基座之间的高度差需大于线缆的直径,否则会挤压线缆;(3)分层限位器采用射钉将安装基座的弯角固定基座固定于线缆槽壁,使光电缆敷设在线缆槽壁,实现了光电缆的空间隔离,不占用线缆槽底部空间,方便后期电缆和电缆支架的维修。卡座与基座采用PA66材料,紧固装置和弯角固定基座采用不锈钢材料。分层限位器层数决定主要尺寸,此处仅罗列图2所示的三层结构主要尺寸,长 $173 \pm 3 \text{ mm}$,宽 $28 \pm 1 \text{ mm}$,高 $245 \pm 4 \text{ mm}$;安装间距: $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$;使用环境温度: $-40^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$;电气性能:击穿电压 $\geq 35 \text{ KV}$,电气强度 $\geq 17 \text{ KV/mm}$,体积电阻率 $\geq 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$,表面电阻率 $\geq 10^{13} \Omega$ 。

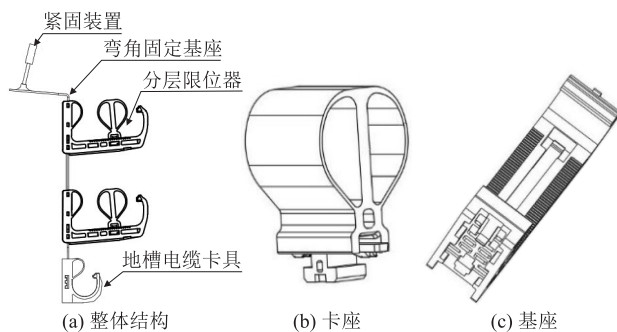


图2 分层限位器的模型图

2 槽内两相流计算分析方法

2.1 流固耦合求解模型

一定速度的泥石流即固相两流冲击分层限位器时,构件会产生变形或运动。流固耦合力学是专门研究固体在流场作用下的各种行为的一门学科。本文将基于流固耦合理论来预测分层限位器受到固液两相流作用后的结构特性。对于小变形问题,流体的平衡微分方程可表示为^[6]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + q_v \quad (1)$$

式中: ζ ——孔隙介质体积变化量;

q_i ——介质中的流量(m/s);

q_v ——流体强度($1/\text{s}$)。

对充水介质,有:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: M ——比奥模量(N/m^2);

P ——孔隙水压力(Pa);

α ——比奥系数;

ε ——体积应变;

β ——膨胀系数($1/^\circ\text{C}$);

T ——温度($^\circ\text{C}$)。

动量平衡方程为:

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (3)$$

式中: ρ ——体积密度(kg/m^3), 且 $\rho = (1-n)\rho_s +$

$n\rho_w$;

ρ_s 、 ρ_w ——固体和液体的密度;

n ——孔隙率;

$g_i (i=1,2,3)$ ——重力加速度在局部坐标投影(m/s^2);

$v_i (i=1,2,3)$ ——截止速度在局部坐标投影(m/s)。

2.2 计算域离散

单向流固耦合仿真分为两步,第一步对建立的流域进行瞬态流体动力学计算,得到水与泥沙定向冲击分层限位器后的流动特性;第二步为分层限位器的瞬态结构仿真,得到分层限位器承受特定冲击后的结构特性。因此,需分别对流域与结构域进行单独的网格划分。分层限位器周围流动复杂,采用结构化网格难以得到高质量网格,其周围需采用四面体网格进行离散,较远处的流域采用六面体结构化网格离散。整体流域以混合网格进行划分,可节约计算时间,提高模拟精度。分层限位器的结构域采用一阶四面体网格划分。

2.3 边界条件及求解算法

分层限位器固定在类似矩形腔体的地槽内,因此将其入口截面的边界条件设定为平均流速,方向垂直进口平面,无热量传递,设定两种介质的密度值为常数;根据动量守恒,出口截面的流动充分发展,所有变量的法向梯度等于零,故采用压力出口边界条件,设定压力值为 0 MPa。壁面边界即近壁区采用标准壁面函数法进行处理,由于介质与壁面接触的界面不存在滑移,故壁面采用无滑移边界条件。利用 SIMPLEC 算法求解动量方程中速度和压力耦合,对动量、湍动能和耗散率采用 Second Order Upwind 进行离散。在整个计算过程中,瞬态模拟以稳态模拟结果为初始值。总时长设定为 1.2 s,时间步长为 0.002,每个时间步长的迭代次数为 30 次,各时间步长的收敛残差为 10^{-5} ,每隔 40 子步保存一次数据,用于后续分析。

涉及到固液两相介质以及结构的材料设置,详细参数如表 1 所示。

表 1 材料的物理特性表

名称	材料	杨氏模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg/m^3)	屈服极限 强度/MPa
卡座与基座	PA66	3.5	0.35	1 140	135
紧固装置、 弯角固定基座	不锈钢	193	0.31	7 930	586
固相	大块石	50	0.3	2 500	—
液相	水	—	—	997	—

2.4 计算工况

颗粒输送体积分数的定义为输送的固相颗粒体积占固液两相流体体积的百分比,公式如下:

$$\left. \begin{aligned} C_v &= \frac{M_s}{M_s + M_l} \times 100\% \\ C_v &= \frac{\frac{M_s}{\rho_s}}{\frac{M_s}{\rho_s} + \frac{M_l}{\rho_l}} \times 100\% \\ C_v &= \frac{V_s}{V_s + V_l} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: M_s ——固相质量;

M_l ——液相质量;

ρ_s ——固相密度;

ρ_l ——液相密度;

V_s ——固相体积;

V_l ——液相体积;

C_v ——固相体积分。

为剖析流速及固相颗粒浓度对分层限位器结构特性影响,共选取 9 种工况进行瞬态两相流计算,如表 2 所示。

表 2 计算工况表

工况编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
流速/(m/s)	6	12	18	6	12	18	6	12	18
固相体积分 数/%	14.6	14.6	14.6	25.8	25.8	25.8	48.2	48.2	48.2
固相质量 流量/(kg/s)	300	300	300	500	500	500	700	700	700

3 分层限位器抗冲击性能分析

3.1 固液两相绕流分层限位器的运动特性

固液两相流中石块的冲击是造成分层限位器结构破坏的重要因素之一。石块产生的动能与速度和质量正相关,当石块冲击构件时,其携带的能量一部分会被构件自身刚度抵抗消掉,未被抵消的能量可使其产生内应力或变形^[7]。以石块质量流量和两相流

流速作为变量,探讨结构受到的冲击力大小,并分析两种变量对构件造成的具体损伤。

9种工况下分层限位器整体结构受到平均冲击力随时间的变化规律如图3所示。

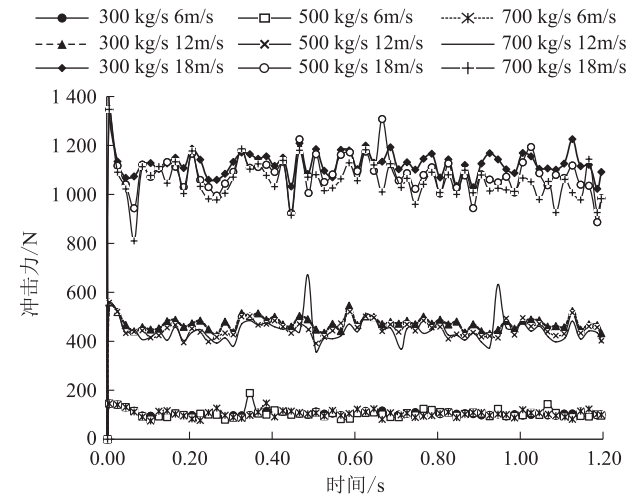


图3 冲击力时程曲线图

由图3可知,石块质量及流量保持不变的情况下,分层限位器承受的平均冲击力随固液两相流流速的增加而增加。在流速为6 m/s时,分层限位器受到的平均冲击力波动幅度较小,石块的质量流量改变对冲击力无明显影响,水携带的石块冲击动量相对较小,能量大部分都被构件吸收,对分层限位器造成的损伤较低;低速情况下,相比冲击物质量的影响,冲击物速度对构件造成的损伤更明显。

随着流速逐渐提高,尤其以18 m/s流动时,3条冲击力时程曲线的波动程度十分明显,且震荡幅值随着石块质量流量增加而增大;因流速增大,分层限位器承受的冲击时间间隔缩短,同等时间内,水与石块冲击分层限位器的频次增多,加上石块质量流量增加,冲击动量增大,构件吸收冲击动能的能力减弱,其绝大部分动能被直接作用到构件上,导致冲击力不仅增大,还发生了明显的波动。两相流以较高流速且固相含量较大时绕流分层限位器,更易引起构件产生剧烈的震荡,其表面损伤的概率也会急剧升高。

3.2 固液两相冲击下分层限位器应力分析

分层限位器受到固液两相流冲击时,构件各部位会产生应力。由于每层限位器受到冲击力有所不同,产生的等效应力也有差别,9种工况下3层限位器的等效应力时程曲线如图4所示,仅取0.16 s进行分析,图中“上”、“中”、“下”分别指代第1层、第2层、第3层的限位器。

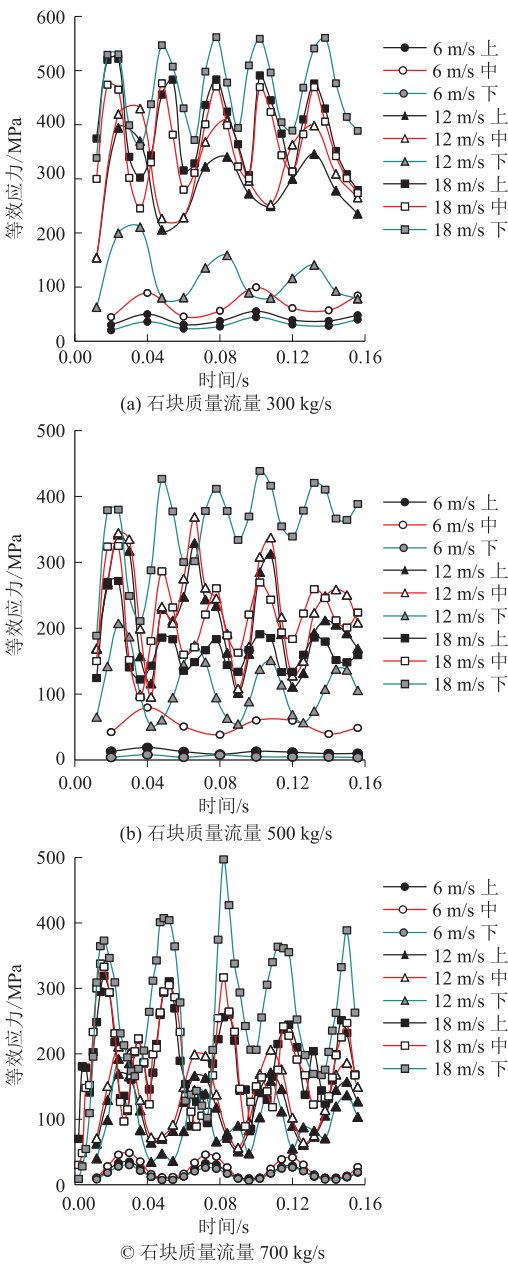


图4 等效应力时程曲线图

在0.16s内,石块质量流量固定不变时,限位器产生的等效应力峰值和流速正相关,流速越高,限位器承受的冲击频次更高(波动周期小),其发生疲劳损伤的概率更高。不同的是固液两相流速低于12 m/s时,第2层限位器产生的等效应力波动幅度最大;而流速增大到18 m/s,等效应力波动最剧烈的则是第3层限位器。主要是由于流速较小时,水携带的石块大量悬浮在流域中间,这些石块携带巨大的冲击能量撞击第2层限位器,导致其等效应力增幅最大;而流速升高后,石块的流动愈加复杂,绝大部分石块可快速沉降至流域下方,不间断的冲击第3层限位器,致使其应力增幅比其他两层更大。在流动过程中石块含量

一定时,相比第2层与第3层限位器,第1层限位器的强度相对较高,发生疲劳损伤破坏的可能性最低。

当流速保持恒定时,限位器的等效应力峰值与波动周期随石块质量流量增加先减小后增大,说明石块质量流量增加对于限位器力学性能是有弊的。在质量流量为700 kg/s时,相比最小质量流量下产生的等效应力,其峰值增大约44%,说明构件吸收的能量较小,承受的冲击能量较大,构件强度较低,极易产生不可恢复的塑性变形,发生破坏;加上承受周期性的持续冲击,导致分层限位器表面疲劳损伤加剧,构件的稳定性受到严重影响。

3.3 固液两相冲击下分层限位器位移分析

各层限位器受到固液两相流冲击时,各部位会沿着冲击力的方向产生位移。不同速度下三层限位器位移随固相质量流量变化的时程曲线如图5所示。

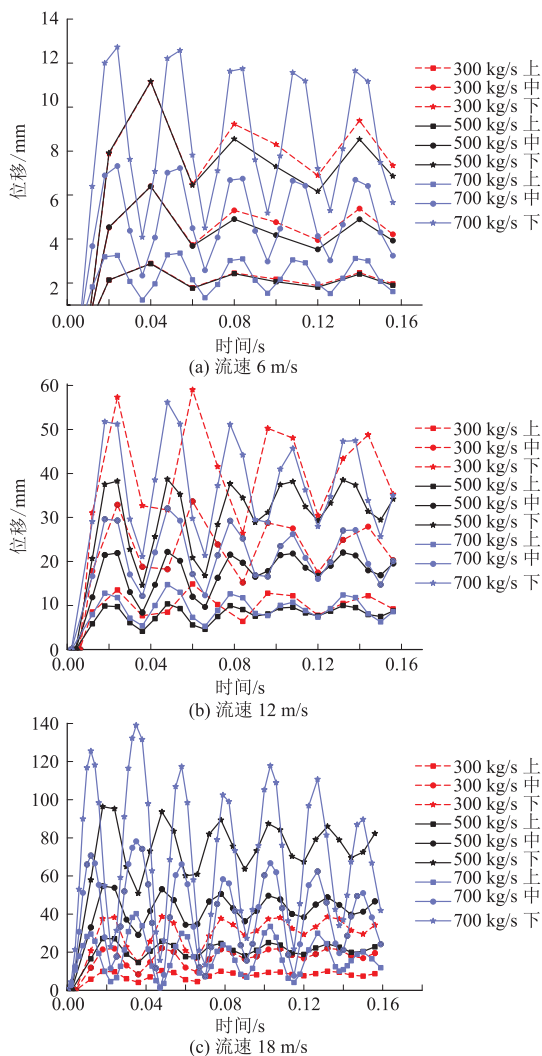


图5 不同速度下的位移时程曲线图

由图5可知,流速保持不变,限位器的位移从上至下逐渐增大。不同速度下,各层限位器的位移均在

第1次被撞瞬间达到峰值,但随着时间的推移,位移幅值逐渐衰减。流速为6 m/s时,在300 kg/s与500 kg/s两种质量流量的石块冲击下,各层限位器位移相差较小,波动周期一致。当质量流量增加到700 kg/s时,各层限位器的位移峰值最大,各时间点增长率不一致,增加5%~52%,且波动周期同比减小0.021s。在流速12 m/s下,各层限位器产生的位移峰值随石块质量流量的增加先减小后增大,波动周期则减小,在质量流量为700 kg/s时,限位器来回振荡的幅度最大,稳定性最弱,最易发生限位器与缆脱离等事故。当流速增加到18 m/s时,位移峰值在700 kg/s的工况下最大;0.16 s内,各层限位器承受5~7次冲击,冲击次数随着质量流量增加而增加,是因冲击物质量流量增大,冲击动能增大,各层限位器承受的冲击力也随之增大,同等时间内,冲击时间缩短,石块与各层限位器进行了“多次接触”,随着多次撞击,固液两相携带的能量不断被消耗,导致位移峰值逐渐减小。

4 结论

本文以流固耦合理论为基础,对分层限位器进行动力响应仿真,分析不同速度、固相质量流量的固液两相流冲击下分层限位器结构动力响应,得出主要结论如下:

(1) 分层限位器承受的平均冲击力随固液两相流流速增加而增加;固液两相流以较高流速且固相含量较大时绕流分层限位器,易引起构件产生剧烈的震荡,表面损伤的概率也会急剧升高。

(2) 固相质量流量固定不变时,限位器产生的等效应力峰值和流速正相关;在不同流速的固液两相冲击下,三层限位器产生的等效应力值以第1层限位器最小,说明第1层限位器抗冲击性能较高,发生疲劳损伤破坏的可能性最低。

(3) 当流速保持恒定时,限位器的等效应力峰值与波动周期随石块质量流量增加先减小后增大,说明石块质量流量增加对分层限位器力学性能有不利影响。

(4) 流速保持不变,限位器的位移从上至下逐渐增大;石块质量流量增加会导致分层限位器的位移增大、稳定性变差,其中下层限位器的稳定性受到的影响最大。

参考文献:

- [1] 崔勇,黄鑫,杨晓凡. 电缆槽对电缆间串扰的影响研究[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(5): 108-115, 123.

CUI Yong, HUANG Xin, YANG Xiaofan. Research on the Influence of Cable Trough on Crosstalk between Cables [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(5): 108 – 115, 123.

[2] 储茂成. 铁路隧道水沟电缆槽渗水原因及预防治理措施[J]. 云南水力发电, 2020, 36(9): 69 – 73.

CHU Maocheng. Causes of Seepage in Cable Channel of Railway Tunnel and Preventive Measures [J]. Yunnan Water Power, 2020, 36(9): 69 – 73.

[3] 李明清. 成兰铁路泥石流防治措施[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 90 – 93.

LI Mingqing. Prevention and Control Measures for Debris Flow on Chengdu-Lanzhou Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 90 – 93.

[4] 袁东,冯涛,林之恒,等. 泥石流灾害对新建康定车站的影响研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 88 – 94.

YUAN Dong, FENG Tao, LIN Zhiheng, et al. Study on Influence of Debris Flow Disaster on New Kangding Station [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 88 – 94.

[5] 尹忠辉. 高速铁路隧道工程水沟电缆槽一次成型施工技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(12): 1175 – 1182.

YIN Zhonghui. Technology for Concreting of Integrated Drainage Ditch and Cable Channel of High-speed Railway Tunnels in one Operation [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(12): 1175 – 1182.

[6] 徐建国,于松聆,王刚,等. 基于流固耦合理论的隧道围岩稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 62 – 67.

XU Jianguo, YU Songling, WANG Gang, et al. Stability Analysis of Tunnel Surrounding Rock Based on Fluid-solid Coupling Theory [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(4): 62 – 67.

[7] 王秀丽,杜媛媛,冉永红,等. 泥石流冲击荷载下圆钢管的破坏机理分析[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(3): 132 – 138.

WANG Xiuli, DU Yuanyuan, RAN Yonghong, et al. Analysis of Failure Mechanism of Circular Steel Pipe under Impact Load of Debris Flow [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(3): 132 – 138.

(上接第34页)

式,焊接作业耗费了大量的时间。建议在今后的设计方案中加大地脚螺栓的埋深,并考虑预留长螺纹配合相应护套埋在基础中,即使发生地脚螺栓被部分抽出或剪断的情况,也能保证抢修立杆的拉拔力,并且在切割掉上部弯曲变形的螺栓后依然留有足够长的螺纹紧固螺帽。

(2)研究采用套筒连接的两段式地脚螺栓,在保证整体强度的情况下,在套筒处人为设置强度薄弱点,当地脚螺栓发生严重破坏时,能统一从套筒处断裂,在更换套筒及上部的地脚螺栓后能尽快恢复,从而避免对基础或地脚螺栓造成永久性伤害。

(3)此次抢修中发现下锚柱处的基础及螺栓破坏尤为严重,建议今后在进行接触网支柱布置时,邻近锚柱的中间柱基础按备用锚柱基础进行考虑,当发生事故锚柱基础被严重破坏后,还能利用备用锚柱基础。

(4)高速铁路一般采用整体道床,且目前大量线路采用高架桥的方式。一旦接触网支柱基础发生永久性破坏,短时间内想要恢复基础完成立杆将存在极大的困难。本次应急抢修提示我们,应进一步研究当高速铁路发生事故引起接触网设备大面积损坏时,无砟区段采用临时支柱抢通线路的专业设备及技术方案。

4 结束语

当铁路接触网设备发生大面积破坏时,接触网基

础的临时恢复是接触网抢修中的重难点,且由于高速铁路采用整体道床、桥隧比高的特点,给接触网的抢修工作带来了巨大的挑战。未来将针对此次应急抢修中暴露出的难点进一步探索,优化应急抢修方案,提升接触网的应急抢修能力,为我国高速铁路的发展保驾护航。

参考文献:

[1] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2003.

YU Wanju. High-speed Electrified Railway Catenary [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.

[2] Q/CR 9523 – 2018 高速铁路电力牵引供电工程细部设计和工艺质量标准[S].

Q/CR 9523 – 2018 Details Design and Workmanship Standard for Traction Power Supply System of High-speed Railway[S].

[3] TB 10758 – 2018 高速铁路电力牵引供电工程施工质量验收标准[S].

TB 10758 – 2018 Standard for Acceptance of Traction Power Supply Works in High-speed Railway[S].

[4] TB 10621 – 2014 高速铁路设计规范[S].

TB 10621 – 2014 Code for Design of High Speed Railway[S].

[5] 陈泰宁. 基于关键路径法的高速铁路接触网故障抢修策略研究[J]. 中国铁路, 2021(3): 84 – 88.

CHEN Taining. Research on Emergency Repair Strategy of HSR OCS Based on Critical Path Method [J]. China Railway, 2021(3): 84 – 88.