

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.06.012

沙漠腹地高速公路输沙沟设计及气流场分析

贾小龙^{1,2}, 罗延赤³, 丁新建³, 余国根², 孙跃轩³

(1. 宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏交建交通科技研究院有限公司, 宁夏 银川 750000;

3. 宁夏公路管理中心, 宁夏 银川 750002)

摘要: 为避免沙漠公路产生沙害问题, 依托乌玛沙漠高速公路防沙治沙工程, 围绕“输沙断面”的输沙理念, 基于风沙运动原理和流体力学(CFD)数字模拟原理, 开展输沙构筑物位置及尺寸对路基气流场特征和积沙特征的影响分析。研究表明, 当输沙构筑物距路基为5 m时, 路基整体受风蚀影响最小, 且坡脚和路面积沙量最少。当输沙构筑物距路基为3 m时, 路基背风侧积沙量最小。当输沙构筑物宽度为9 m时, 路基坡脚与坡面所受风蚀作用最小。当输沙构筑物宽度为6 m时, 行车道所受风蚀作用最小。同时, 当输沙构筑物等级为3级、宽度为9 m时, 能有效缓解输沙沟内输沙压力及风力堤处沙粒堆积, 但输沙构筑物宽度对路基积沙量影响较小。总的来说, 在实际工程中可根据不同地形、不同需求, 因地制宜地设定输沙构筑物参数进行防沙治理。

关键词: 防沙治沙; 输沙; 构筑物; 设计

中图分类号: U416.1+6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)06-0041-04

0 引言

沙粒在风动力下的运动特征主要有以下几种类型: 若沙地表面吹走的沙量大于沉降的沙量, 则产生风蚀; 若沉降的沙量大于吹走的沙量, 则产生堆积; 当沙量吹走与沉降大致相等时, 则产生蚀积平衡, 造成沙粒的非堆积搬运现象, 即输沙^[1-2]。目前, 防沙治沙工程以阻沙、导沙及输沙为主。其中, 输沙是最为符合自然规律的防沙理念, 将极大地改善自然环境, 具备显著的经济效益。在沙漠公路中开展输沙工作的关键在于, 通过控制风沙运动的若干因素, 并加以因势利导, 在路幅和路旁地带创造沙子吹蚀或非堆积搬运条件, 将沙丘(体)整体移动变为风沙流运动, 从而避免沙粒沉降, 确保公路畅通无阻^[3-4]。输沙工程措施主要有下导风、羽毛排和输沙断面等类型^[5]。

依托工程乌玛高速公路青铜峡至中卫段横穿腾格里沙漠腹地, 因腾格里沙漠主导沙丘为移动沙丘和半固定沙丘, 有着风向复杂、风速快的特点, 更宜使用输沙断面的形式进行输沙^[6]。本研究主要围绕防沙治沙工程中“输沙断面”的输沙理念, 在乌玛高速公路已有输沙沟的试验路段, 根据狭管效应对不同输沙沟位置(3 m、5 m与7 m)和3种输沙等级的

输沙沟进行设计模拟。

1 输沙构筑物设计原理

1.1 输沙构筑物设计原理

输沙工程中输沙与挡沙的原理为: 首先利用风力堤阻挡大部分风沙运动, 然后依靠输沙沟内气流环流产生的升力使沙粒运动, 继而采用沙沟源头段导风设施改变风力运动方向, 加快输沙沟内空气纵向流动速度, 使沟内有向前输运的动力, 从而将风力堤挡下的沙粒以非堆积搬运方式顺利疏导^[7]。

1.2 狭管效应

狭管效应, 又称峡谷效应或颈束效应(the effect of narrow), 是指气流受峡谷地形影响产生的自然现象。基于流量守恒的连续原理, 开阔地带上平缓气流流经地貌险峻的山谷时, 气流受到强烈的挤压, 且由于气流无法堆积, 风速会显著增加; 流出山谷时, 气流又逐渐趋于平缓。

狭管中风加速的近似公式可表示为:

$$V_2 = V_1 \frac{S_1}{S_2} + \frac{1}{\sigma} \frac{dT}{dt} \frac{A}{S_2}$$

式中: V_1 为狭管进口风速; V_2 为狭管内风速; S_1 为进入狭管前的扫风面积; S_2 为狭管的平均截面积; A 为气流在狭管中上升的垂直面积。

2 输沙构筑物设计

输沙构筑物的外观设计参数主要包括断面形式、尺寸与位置。

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 宁夏回族自治区科学技术厅重点研发计划项目(2121BEG02017-02); 宁夏回族自治区交通运输厅科技项目(202000174)

作者简介: 贾小龙(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路工程新材料研发工作。

2.1 输沙构筑物断面形式

根据输沙工程的输沙原理及狭管效应,输沙沟采用最深点居中的深沟形式设计,并在输沙沟近路基段设置1 m高的风力堤以拦截沙粒。同时,各变化点处均应抹圆呈流线型,避免气流分离造成的积沙现象。在整个输沙沟挖成后,需以卵砾石等覆盖风力堤。综上,输沙构筑物断面形式由输沙沟和风力堤平顺衔接构成,如图1所示。

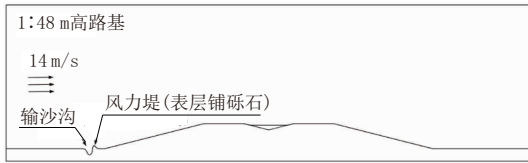


图1 输沙构筑物断面形式示意图

2.2 输沙构筑物位置

基于风沙运动原理和流体力学(CFD)数字模拟原理,利用Fluent软件,采用欧拉多相流模型和标准k-ε模型,进行输沙沟位置对路基气流场影响的数值模拟,以确定输沙构筑物位置参数。

通过腾格里沙漠沙粒特征分析,确定数值模拟中材料参数如下:粒径取0.1 mm沙粒作为固相,沙粒密度2 650 kg/m³,气流参数1.225 kg/m³,沙粒体积浓度0.000 1,风速14 m/s。路基及输沙构筑物模型参数设置如下:路基边坡1:4,填筑高度8 m;输沙沟直径2 m,深2 m;风力堤高1 m;输沙构筑物与路基间距分别为3 m、5 m和7 m。

2.2.1 气流场特征

在输沙构筑物距路基3 m、5 m和7 m时,3种模型气流速度云图和速度分布如图2所示。

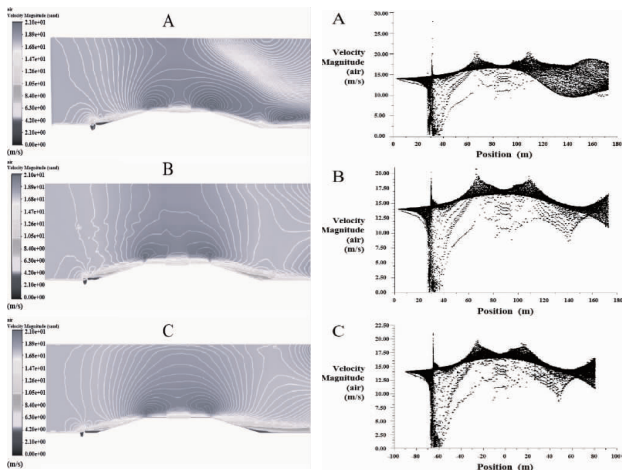


图2 输沙沟距路基3 m、5 m和7 m模型气流速度云图和速度分布

图2显示,输沙沟位置差异不会对气流运动整体特征产生显著影响,但会对气流速度的局部增减变化量有一定影响。整体来看,气流从入口处流经风

力堤、迎风侧坡脚、迎风坡路肩、中央分隔带、背风坡路肩、背风坡脚至出口处的流速变化分别为初始风速→递减→骤减→递增→递减→递增→递减→回归初始风速。这表明增设输沙工程设施可使风速递减的区域增大,有利于减轻路基路面的风蚀现象。

对比图2中A、B、C可得,在迎风侧坡脚处,图2A颜色更深,代表风速更低,对坡脚的风蚀作用越小。在迎风侧坡面处,图2B的灰色面积大于图2A和图2C,说明输沙沟距离5 m时坡面风速较低,路肩处所受风蚀作用较小。在行车道处,图2B的浅色区域更多,说明此处的所受的磨蚀作用较小。在背风侧,图2B与图2C灰色区域较多,表明此处气流大幅减速。同时,图2C出现深色区域,说明此处有可能出现涡流,发生掏蚀情况。

综上所述,当其他条件一致时,输沙构筑物距离路基5 m是路基整体所受风蚀影响最小的工况。

2.2.2 积沙特征

针对上文得出的风蚀与风速关系,进一步分析输沙构筑物位置对路基积沙特征的影响。在数值模拟中选取积沙时间t=10 s,路基积沙云图如图3所示。

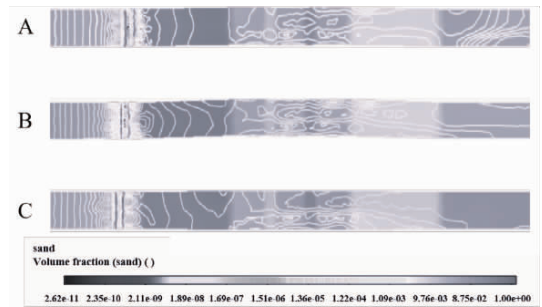


图3 输沙沟距路基3 m、5 m、7 m模型沙粒体积浓度

图3中A、B、C表明,不同输沙沟位布置下路基的积沙分布特征基本一致,主要处于输沙沟内、风力堤背风侧和背风侧坡面。不同特征位置表面的沙粒体积浓度见表1。

为方便描述,本文将输沙工程距离路基3 m、5 m、7 m的模型分别称为工况1、工况2、工况3。由表1可知,3种工况在输沙沟位置处均有大量积沙。其中,工况1在风力堤处积沙现象严重;在迎风侧坡脚处及迎风侧行车道处,工况2的积沙最少;在迎风侧坡肩及背风侧行车道处,3种工况积沙量基本一致;背风侧坡面、坡脚及沙平面处工况1的沙粒体积浓度均最小。

结合上文气流场特征,进一步分析积沙分布原因可得,风力堤与迎风侧坡脚处由于距路基较近,风沙速过快,沙粒与迎风侧坡面发生激烈碰撞,反弹部

表1 不同输沙沟位置下路基表面沙粒体积浓度

距离/m	沙粒体积浓度/%									
	输沙沟	风力堤	迎风侧坡脚	迎风侧坡肩	迎风侧行车道	中央分隔带	背风侧行车道	背风侧坡面	背风侧坡脚	背风侧沙平面
3	550.00	360.00	0.94	1.00	0.79	1.43	1.47	1.14	1.20	0.90
5	630.00	130.00	0.20	0.80	0.74	0.62	1.70	1.80	1.70	1.70
7	630.00	150.00	0.36	0.85	0.80	1.00	1.60	1.70	1.80	2.10

分沙粒后,又与新的沙粒产生碰撞,导致积沙过多。在行车道处工况2的积沙量最少,是因为工况2风速变化最小,在远大于起沙速度的情况下,沙粒发生碰撞的次数较少。在背风侧工况1积沙量最小,是因为工况1背风侧风速较大,大量沙粒被风吹走,过沙较快。

综上,输沙构筑物距离路基5m时,坡脚、路面等积沙量最小;输沙构筑物距路基3m时,背风侧积沙量最小。

2.3 输沙构筑物尺寸

输沙构筑物尺寸参数包括宽度和深度。因增加输沙沟深度不符合经济效益的要求,故本文不对输沙构筑物的深度予以研究。同时,考虑狭管效应的影响,对输沙构筑物尺寸设计以扩充输沙沟数量的方式开展。基于此,本文构建了3个等级的输沙沟模型,其中一级、二级和三级分别由1个、2个、3个输沙沟结合而成,其宽度分别为3m、6m、9m。路基及风力堤模型同上文,输沙构筑物与路基间距设置为3m。

2.3.1 气流场特征

3种等级输沙沟尺寸下,模型的气流速度云图及速度分布如图4所示。

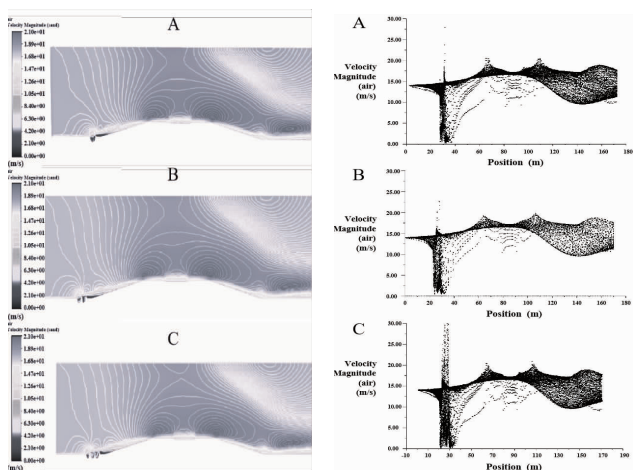


图4 一级、二级、三级输沙沟下路基气流速度云图及气流速度分布图

由图4可得,不同等级输沙构筑物在距离路基3m处,路基气流场变化基本一致。由图4中A、B、C可得,迎风侧坡面的气流减速区域面积随输沙沟宽

度的增大而增大,当输沙沟尺寸为三级时,迎风侧坡面和坡肩所受风蚀最小;行车道气流减速区在输沙沟等级为二级时达到最大,产生的风蚀作用最小;背风侧坡面风速在不同输沙沟等级下基本一致;对于背风侧沙平面,当输沙沟宽度为3m时,气流减速区域最小。

综上,不同输沙构筑物宽度下,路基不同位置处所受风蚀均有所差异。因此,对于不同地形,可设定不同输沙构筑物进行防治。

2.3.2 积沙特征

在数值模拟中选取积沙时间 $t=10s$,分析输沙构筑物尺寸对路基积沙特征的影响,路基积沙云图如图5所示。

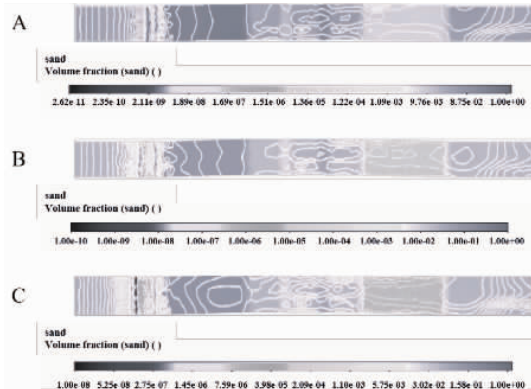


图5 一级、二级、三级输沙沟路基沙粒体积浓度

如图5所示,一级输沙沟内和风力堤处的沙粒堆积最多,三级输沙构筑物处的沙粒堆积最少,说明输沙沟数量及宽度的增加能有效缓解构筑物的输沙压力及风力堤处沙粒堆积。不同输沙沟等级下路基表面沙粒体积浓度值见表2。

如图5所示,不同等级输沙构筑物下,路基表面沙粒体积浓度基本相同,且在迎风侧基本无积沙。从中央分隔带至背风侧,路基表面积沙量小幅提高。

通过对比图5中A、B、C可得,当输沙构筑物宽度为6m时,坡脚与坡面处积沙量最小;当输沙构筑物宽度为3m时,行车道积沙量最小。

3 结论

(1)根据输沙工程的输沙原理和狭管效应,输沙

表2 不同输沙沟等级下路基表面沙粒体积浓度

单位:%

等级	沙粒体积浓度									
	输沙沟	风力堤	迎风侧坡脚	迎风侧坡肩	迎风侧行车道	中央分隔带	背风侧行车道	背风侧坡面	背风侧坡脚	背风侧沙平面
一级	550.00	360.00	0.94	1.00	0.79	1.43	1.47	1.14	1.20	0.90
二级	620.00	190.00	0.68	0.94	0.98	1.60	1.60	0.98	1.24	1.10
三级	630.00	160.00	0.8	0.98	1.00	1.60	1.40	1.00	1.26	0.80

构筑物断面形式以输沙沟和风力堤平顺衔接构成为宜。

(2)当其他条件一致时,输沙构筑物设置在距路基5 m处,路基整体受风蚀影响最小,且坡脚和路面积沙量最少;输沙构筑物距路基3 m时,路基背风侧积沙量最小。

(3)从坡脚与坡面所受风蚀作用来看,输沙构筑物宽度宜设置为9 m。从行车道所受风蚀作用来看,输沙构筑物宽度宜设置为6 m。当输沙构筑物等级为三级、宽度为9 m时,能有效缓解输沙沟内输沙压力和风力堤处沙粒堆积。总的来说,输沙构筑物宽度对路基积沙量影响较小。

(4)在实际工程中可根据不同地形、不同需求,因地制宜地设定输沙构筑物参数进行防沙治理。

参考文献:

- [1] 钱亦兵,吴兆宁,杨海峰,等.古尔班通古特沙漠南部风沙土粒度分布的空间异质性[J].干旱区地理,2009,32(5):655-661.
- [2] 李从娟,雷加强,徐新文,等.古尔班通古特沙漠土壤水分与化学性质的空间分布[J].生态学报,2014,34(15):4380-4389.
- [3] 何清,杨兴华,霍文,等.库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J].中国沙漠,2009,29(1):18-22.
- [4] Fan X L, Tian M Z, Liu S W. Aeolian Geomorphology Resources and Projects Development Suggestion in the Badain Jaran Desert [J]. Advanced Materials Research, 2014, 838-841:1324-1330.
- [5] 宁凯,李卓仑,王乃昂,等.巴丹吉林沙漠地表风积砂粒度空间分布及其环境意义[J].中国沙漠,2013,33(3):642-648.
- [6] 杨昊天,李新荣,闫培洁,等.腾格里沙漠土壤类型空间分布特征[J].中国沙漠,2020,40(4):154-162.
- [7] 杨三强,刘涛,郝培文.沙漠公路堤输沙性能风洞试验[J].中国公路学报,2011(1):7.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com