

# 路堑和隧道风雪流的风洞模拟实验研究\*

王中隆 潘退华  
(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

刘贤万  
(中国科学院兰州沙漠研究所)

## 提 要

本文总结了风雪流模拟实验应遵循的相似准则,以及在属于自模区风洞中的实验结果。给出了各种风向以及路堑、隧道两头路基型式和长短不同条件下,它们的积雪与流场结构特征,附面层分离和雪粒堆积的关系,找出了相应防治雪害的措施,为今后研究路堑、隧道积雪机理及其防治提供必要的依据。

**关键词** 风雪流 相似准则 自模区 流场结构 附面层分离

## 一、引 言

气流挟带着分散雪冰粒运行的多相流叫风雪流或风吹雪,简称吹雪。它在欧亚大陆、美洲北部和格陵兰、南极冰盖等地区分布广、危害较频繁严重<sup>[1]</sup>。风洞模拟实验可再现风雪流运动特征,进行防治措施的比选,大量节省研究经费,缩短研究周期和提高研究水平。自1934年以来,国外许多专家研究了各种模型雪的物理化学性质与吹雪实验相似理论,开展较系统的风洞实验<sup>[2,3]</sup>,促进了风雪流及其防治研究的发展,解决了一些经济和国防建设中急需的课题。

从1969年起,我们在兰州沙漠研究所截面积为 $100 \times 60\text{cm}$ ,实验段长1630cm的风洞中,进行了风雪流的形成、运行、不同型式和规格的路基雪堆积过程及其防治措施的模拟实验,为吹雪研究与大型防护工程设计提供了一定的依据<sup>[6]</sup>。随着山区经济的发展和公路、铁路的大量修建,吹雪危害的严重性将日益显现出来。特别是路堑和隧道由于其流场结构比较复杂,雪粒堆积具有独特的规律,防治又较其他型式的路段困难。因此,本文主要论述了这方面的内容,目的是为今后进一步研究日益增多的路堑、隧道积雪机理及其防治提供依据。

## 二、相似条件和模型雪

为了用缩小的模型在风洞中再现实际大气边界层和风雪流的运动特征,要求模拟实

\* 参加风洞实验的还有陈元、李长治等同志。袁裕泉同志审阅了全文并提出修改意见,特此致谢。

验满足一定的相似条件。主要包括几何相似,即模型与原型的几何形状相似;运动相似,可归结为流线的相同和风速垂直分布在两者间相似;动力相似,系指风洞边界层内与大气边界层内对应点上的力的方向相同,大小成比例,即要求表征这些力的物理参数相等。我们采用量纲分析方法来确定相似参数。根据风雪流运动及其防治工程的特点,可用下列函数关系式表示

$$\phi(V, \alpha, V_*, W, d, \rho, H, g, K, L, I, h, \mu) = 0 \quad (1)$$

式中:  $V$  为风速;  $\alpha$  是模型走向与风向的夹角;  $V_*$  是地表摩擦速度;  $W$  为颗粒运动速度;  $d$  是粒径;  $\rho$  为空气密度;  $H$  是颗粒跳跃高度;  $g$  为重力加速度;  $K$  是地表粗糙度;  $L, I$  和  $h$  为模型尺度;  $\mu$  是空气动力粘性系数。

由量纲分析,可得十个相似参数:  $\frac{Wd\rho}{\mu}$ 、 $\frac{W^2}{gd}$ 、 $\frac{V}{W}$ 、 $\frac{V_*}{W}$ 、 $\frac{H}{d}$ 、 $\frac{L}{d}$ 、 $\frac{I}{d}$ 、 $\frac{h}{d}$ 、 $\frac{K}{d}$  和  $\alpha$ 。在这些参数中,  $\frac{Wd\rho}{\mu}$  是颗粒雷诺 (Reynolds) 数,它和以洞体为特征尺寸的环境雷诺数一样,是流体运动性质的基本判据。由于我们的风洞环境雷诺数在  $10^5-10^6$ , 气流已是完全发展的湍流运动,与自然条件下是一致的,属于自模拟区(即相似自动满足);  $\frac{L}{d}$ 、 $\frac{I}{d}$ 、 $\frac{h}{d}$ 、 $\frac{K}{d}$ 、 $\alpha$  可在模型制作和排设时解决;  $\frac{W^2}{gd}$ 、 $\frac{V}{W}$ 、 $\frac{V_*}{W}$ 、 $\frac{H}{d}$  通过下述分析看出,在一定条件下,基本上可以满足。

设模型比尺为  $1:B (B > 1)$ , 则要求  $(H)_m = \frac{H}{B}$ 。  $( )_m$  表示模型量。据实验研究<sup>1)</sup>可得颗粒跳跃高度

$$H \propto \frac{Z'_0 \rho' d}{\nu \rho} \quad (2)$$

式中:  $Z'_0$  为颗粒跳跃初速度的垂直分量;  $\rho'$  是颗粒密度;  $\nu$  为空气运动粘性系数; 其他符号同前。  $\propto$  表示同量级,下同。

在实验时,采用空气为运动介质,并设在颗粒初速度一致条件下,则具有:

$$(\rho' d^2)_m = \frac{\rho' d}{B} \quad (3)$$

从同一研究得到

$$W = K t_m V^2 = K' t_m V_*^2 \quad (4)$$

式中:  $t_m$  是颗粒跳跃到最高点所需的时间; 而  $K = \frac{3\rho c_e}{4\rho' d}$ ;  $c_e$  为风压形状系数;  $K' = 14^2 K$ ; 其他符号如前所示。

因为时间尺度  $t_m$  和风压形状系数  $c_e$  不变, 故有  $(K)_m \propto \left(\frac{1}{\rho' d}\right)_m$ ,  $K \propto \frac{1}{\rho' d}$ 。于是  $(W)_m \propto (K' V_*^2)_m \propto (K V_*^2)_m \propto \left(\frac{V_*^2}{\rho' d}\right)_m$ 。

当采用  $(d)_m = \frac{d}{10}$ 、 $(V_*)_m = \frac{1}{5} V_*$  时, 则可得  $(\rho')_m = \frac{100}{B} \rho'$ ,  $(W)_m \propto \frac{B}{250} W$

1) 刘贤万, 颗粒运动及其数理简析, 全国第一届力学年会论文, 1980。

和  $(F_r)_m = \left(\frac{W^2}{gd}\right)_m \propto \frac{B}{6250} \frac{W^2}{gd} = \frac{B^2}{6250} F_r$ , 这里  $F_r$  为颗粒的弗劳德 (Froude) 数。

因此,若取  $B = 80$ , 则以上各参数基本上得到满足。即当粒径缩小 10 倍,  $V_*$  缩小 5 倍, 采用 1:80 的模型比尺, 且使用比原型雪密度略大  $(\rho')_m = 1.26\rho'$  的模型雪, 就能满足与颗粒跳跃高度成比例和对颗粒沉积起重要作用的弗劳德数相等的相似条件。需说明的, 由于摩阻的降低, 颗粒密度加大, 实验只能模拟较大风速时的颗粒运动及工程效益。这次实验因洞体尺寸所限, 模型比尺采用 1:100。

野外观测得到, 气温在  $-6^\circ\text{C}$  以下时, 刚下的新乾雪 (粒径小于 1.0mm, 平均密度  $0.06\text{g}/\text{cm}^3$ ) 1m 高处起动风速为  $2\text{m}/\text{s}$ , 细雪 (粒径小于 0.5mm, 平均密度  $0.18\text{g}/\text{cm}^3$ ) 则要  $4\text{m}/\text{s}$  才能起动, 至于老的细粒雪 (粒径 0.5—1.0mm, 平均密度  $0.23\text{g}/\text{cm}^3$ ) 则需 6—8m/s 方能起动。就一般而言, 气温从  $-23^\circ\text{C}$  上升到  $-6^\circ\text{C}$  时, 起动风速在  $4\text{m}/\text{s}$  左右。为此, 在风洞中进行了硼砂、麸皮、木屑等对比试验, 以便选择模型雪。由表 1 看到, 硼砂密度大, 粒径小, 起动风速较大; 木屑粒径大, 密度小, 起动风速与硼砂相近; 而麸皮的粒径和密度介于两者之间, 其起动风速却最小。经综合考虑, 我们选用能较好满足相似条件的麸皮与硼砂, 作为模型雪开展了风洞模拟实验。

总之, 我们的风洞实验基本上满足了相似条件, 达到了解决实际问题所要求的精度。

表 1 硼砂、麸皮和木屑的粒径、密度及其起动风速  
Tab. 1 Particle diameter and Density of borax, Bran, Sawdust and Their threshold wind velocity

物 质	粒径 (mm)	<0.1	0.1— 0.25	0.25— 0.5	0.5—1.0	1.0—2.0	>2.0	合计	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	起动风速 (m/s)	
										高度 (cm)	
										0.5	20
硼 砂	重量 (g)	44	395	49	12			500	0.80	3.5	4.5
	百分比 (%)	8.8	79.0	9.8	2.4			100			
麸 皮	重量 (g)	2	38	228	126	6		400	0.29	2.3	3.6
	百分比 (%)	0.5	9.5	57.0	31.5	1.5		100			
木 屑	重量 (g)	19	72	45	36	20	8	200	0.23	3.4	4.5
	百分比 (%)	9.5	36.0	22.5	18.0	10.0	4	100			

### 三、路堑、隧道的吹雪堆积

路堑模型纵剖面长 71cm, 路堑一端有长 16cm 的路堤和长 3cm 零点路基, 另一端路堤长度为 3cm。隧道模型横剖面, 路面宽 8cm, 隧道前路堑底宽 13.5cm。隧道长 35cm, 其两端为路堑, 一端由长 5cm 的零点路基进入长 37cm 的路堑, 另一端路堑长 16cm。

就某一特定的地形、路基而言,吹雪对道路的危害程度主要取决于风向、风速及雪源的多少。为了研究风向与路堑、隧道走向的关系,我们把上述模型整体安放在距风洞实验段进口 10m、直径为 1m 并可自由转动  $360^\circ$  的圆盘上。此处附面层发展已经稳定,厚度约 15cm。因为模型放在洞底,所以来流是剪切流,剪切流的风洞实验比均匀流风洞实验更符合真实情况,并经测定证明,风速随高度分布为对数,这与我们在野外测得的吹雪中风速随高度呈对数型是一致的<sup>[7]</sup>。

风洞实验和野外观测表明,零点路基、低路堤或过高路堤、背风或迎风半路堑等型式路段,当其走向与风向的夹角越小,雪害越轻,顺风时一般无雪害,而路堑和隧道却不同。

从在雪源、吹雪时间及指示风速基本一致条件下所做路堑走向与风向夹角不同的各组实验中得到,无论两者夹角如何,路堑都会形成吹雪堆积,只是其积雪的位置、范围及严重程度有所差异。顺风路堑进、出口附近先后积雪,随着两头积雪逐渐增厚和向路堑中部延伸,路堑内雪阻渐趋严重;当两者夹角增大而小于  $45^\circ$  时,进、出口附近也都有积雪,且进口积雪较出口多。同时两头积雪均向堑中延伸,进口延伸速度远较出口快,最后在堑内形成一条近呈 S 型的长雪带;在夹角大于  $45^\circ$  但小于  $75^\circ$  时,除进、出口有少量积雪外,吹雪主要堆积在上风面堑坡上并逐渐形成雪舌或雪檐,随堑坡雪舌或雪檐前移,路面产生明显雪阻;当路堑走向与风向垂直时,吹雪大部堆积在上风面堑坡顶并很快形成雪檐,随着雪檐继续前移,路堑渐被雪埋没。

路堑前路堤长短对吹雪堆积状况也有影响。路堑前若路堤短(长 3cm),路堑出口处积雪深度大(3.5cm)。反之,路堑前路堤较长(16cm),则出口处雪深较小(2.7cm)。此外,在路堑底宽不变时,随着路堑深度增加,堑内积雪趋于严重。

隧道积雪主要在其进、出口及两端路堑内。雪堆积状况随隧道走向与风向夹角而变。如两者夹角小于  $45^\circ$  时,雪主要堆积在隧道进口前的路堑内;随其夹角不断增大,隧道两端路堑积雪渐趋相近并向其进、出口处延伸。而吹雪进入隧道,则多发生在其走向与风向平行或近垂直的情况下。

顺风隧道前为 37cm 的长路堑积雪状况。当铺雪 6000g、吹风 5min 和风速为 7.8m/s 时,路堑至隧道进口前 4cm 全部积雪,最大雪深达 6.3cm。在同样条件下,顺风隧道前若为 16cm 的短路堑时,则其积雪明显减少。

还需指出,随着雪源增加,路堑和隧道积雪趋于严重。雪铺设位置不同,它们积雪状况也不一样。如垂直于风向的路堑,将 6000g 雪一种铺在上风面堑坡脚,另一种铺设在上风面堑坡顶,在同样吹雪时间和风速条件下,前者路堑内路面仅有少量积雪,而后者堑内路面积雪多达 1550g,形成严重雪阻。

#### 四、路堑和隧道的流场特征

路堑、隧道走向与风向的夹角及其断面规格决定着流场结构,而流场结构又与路堑、隧道雪堆积部位和形态及数量密切相关。弄清流场特征是很重要的。我们在风洞中使用皮托管和微压计测定流场,各组测量都在同一指示风速条件下进行的。

图 1 表明,顺风路堑中的风速明显大于其进、出口,因此吹雪首先堆积在路堑进、出口

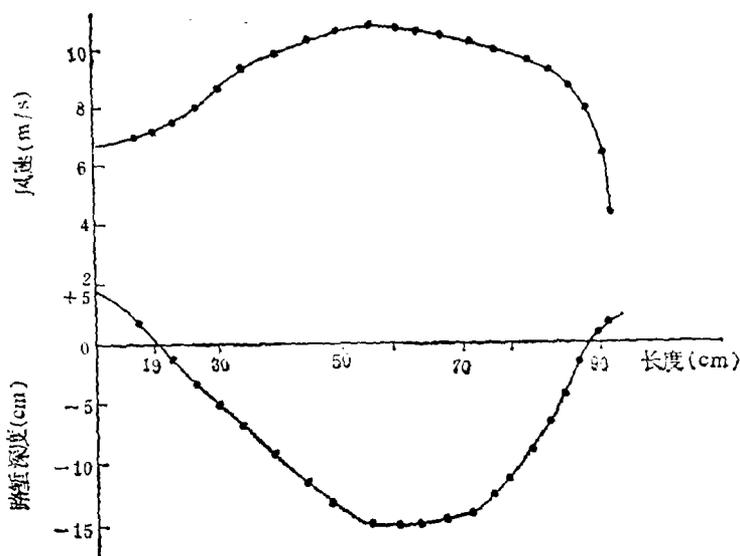


图1 顺风路堑及其前后路中0.5cm高处风速的变化

Fig. 1 Variation of wind velocity in the direction of wind cut and its near at 0.5cm of road middle

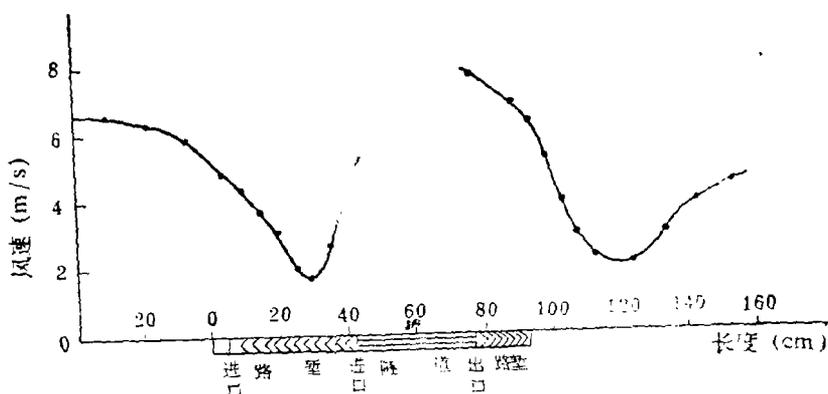


图2 顺风隧道及其前后路中1.0cm高处风速的变化

Fig. 2 Variation of wind velocity in the direction wind tunnel and its near at 1.0cm of road middle

附近,然后逐渐向路堑中部延伸。由图2可见,当隧道走向与风向平行时,隧道前的路堑风速明显减小,在隧道进口附近开始迅速增大,并在出口之前达到最大值,而一旦吹出出口后则急剧下降,接着又逐渐回升至自然风速。前述积雪状况与流场中的涡旋减速区相一致。

图3、4是垂直于风向的路堑流场。由于路堑上、下风面堑坡及拐点的存在,风向变化复杂多样,路堑内还出现了三个强的涡流区,使其流场结构明显不同于转弯绕流路段、背风或迎风半路堑(图5)等路段。当风雪流吹经上风面堑顶向下时,随着路堑断面的骤

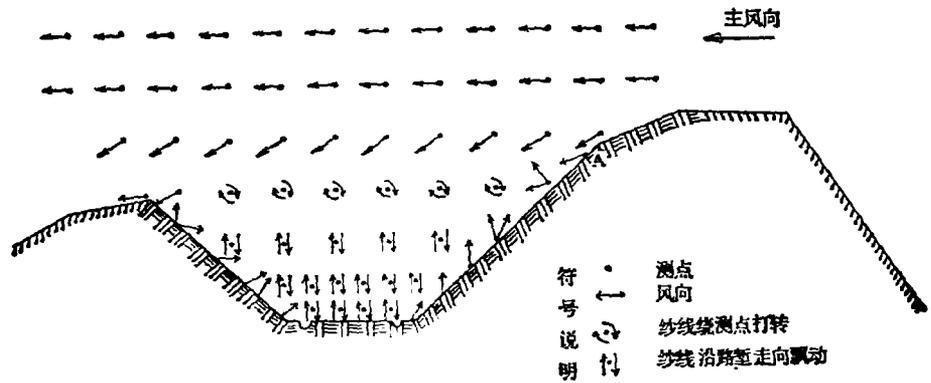


图3 垂直于风向的路堑的风向变化

Fig. 3 Variation of wind direction in a cut vertical to wind direction

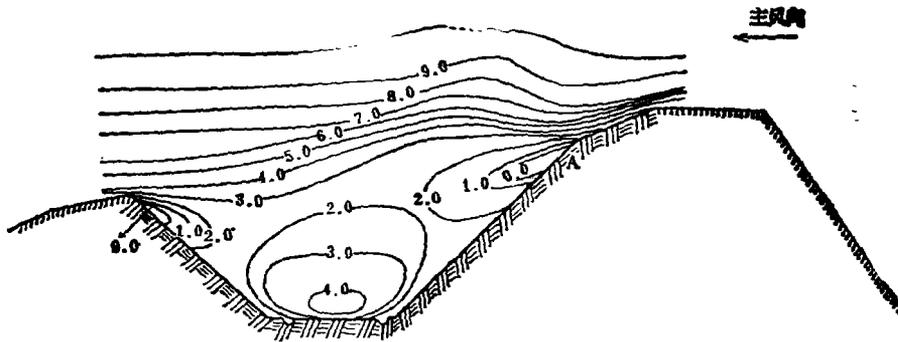


图4 垂直于风向的路堑风速等值线

Fig. 4 Isolines of wind velocity in a tunnel vertical to wind direction

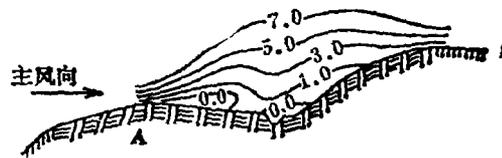


图5 垂直于风向的迎风半路堑风速等值线

Fig. 5 Isolines of wind velocity in a windward one-sided cut vertical to wind direction

然扩大,贴地附面层在A点处产生分离,涡旋阻力急剧增加,使大量雪粒以雪檐形式堆积在A点的涡旋减速区附近。而路堑中部却出现了较强的横向和纵向迴流,使其堑中风速随高度的变化如图6所示,导致堑底暂不积雪。此后,A点贴地附面层分离区随雪檐不断前移,加之下风面堑坡的阻塞作用,使堑内中部的迴流区逐渐减小,路堑渐被雪所埋没,造成极严重雪阻。

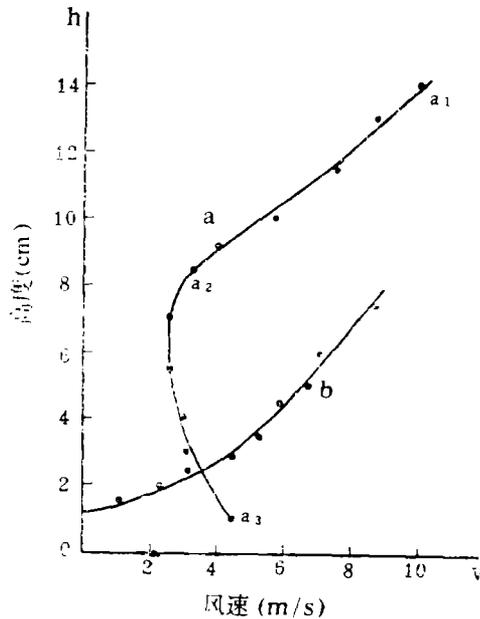


图 6 垂直于风向的路堑(a)和迎风半路堑(b)路中风速随高度的变化

Fig. 6 Variation of wind velocity with height of road middle in a cut (a) and windward one-sided cut (b) vertical to wind direction

由上述可见,路堑和隧道的流场结构是比较复杂的,从而形成吹雪堆积上一些特有的规律,导致雪害预防或治理较其他型式的路段困难。

## 五、路堑和隧道雪害的防治

路堑、隧道的雪害应以预防或工程治理为主,机械除雪效率低。在风雪地区,合理选择路堑与隧道的位置、走向并充分利用有利地形搞好横、纵断面设计,将会起到回避或大量减轻积雪危害的作用。如在线路不过分偏离总方向的前提下,力求路堑、隧道与风向有较大的夹角;路堑上、下风面不宜过陡,堑坡脚与路基间应留有一定距离;路堑和隧道的进、出口尽量采用路堤型式。若因地形而隧道进、出口不得不采用路堑时,则力求路堑短;位于吹雪极严重且距离较长路段,在设置相应措施阻止雪进入的前提下,可选用隧道型式通过。

对已修成路堑和隧道,应因地制宜采用:①当路堑、隧道走向与风向夹角小于 $45^\circ$ 时,在其上风面边坡一定距离处设置羽毛排侧导板或侧导土石堤,使雪粒沿人为控制的方向运行及堆积,而不从进口或出口处吹入路堑与隧道内。其次,在路堑上风面设置垂直于风向的防雪栅或集雪沟(采用沟墙相结合)等,以阻止雪粒堆积在路面上。至于设计封闭式或开放式羽毛排侧导板,以及防雪栅、集雪沟的条数距离等视地形、移雪量和本身的规格系数定;②近垂直于风向的路堑、隧道,主要是在路堑上风面根据移雪量大小,设置相应规格防雪栅或集雪沟、墙相结合的阻雪措施,或者加宽路堑、开挖储雪场使其临界储雪量大

于该段移雪量 120%。此外,在路堑或隧道进、出口上风面,设相应的侧导措施防止绕流雪粒进入也是比较重要的;对较开阔浅路堑或隧道进、出口为浅而短的路堑,使用下导风防雪效果更佳<sup>[4]</sup>。如风洞实验表明,当路堑上风面边坡拐点高 5cm,堑顶铺雪 6000g 时,在路边设置导板长 4cm 和下口高 1.8cm 的直立下导风,吹风 3.5min 后,路面一直保持无雪。

有条件地区营造防雪林,对防治路堑或隧道雪害同样是经济有效措施。但是,防雪林的布设与其他型式路基有所不同,特别在林带位置、排列方式、断面形状及高度上。布设和管理不当,常会起不到应有效果。

## 六、结 语

风洞模拟实验结果的可靠性取决于许多因素,包括相似准则选取、模拟方法、测试技术以及数据处理等方面<sup>[5]</sup>。由于条件所限,加之其复杂性,我国风雪流风洞模拟实验研究进行较少,还需要继续探讨和完善。

在路堑或隧道的选设与防雪措施布置上要综合考虑。既要收集该地区风雪等资料,从路堑、隧道的流场和雪堆积规律出发,又要熟悉各种防雪措施的作用机理、影响因素、使用范围及经济效益。只有这样,才能因地制宜经济有效的防治雪害,保持道路畅通,否则起不到应有效果。1984 年在某公路风向与道路近垂直的背风半路堑,曾修建了一段防雪走廊(形式与隧道同)来治理雪害,但没有采取相应措施阻止吹雪横向绕流进洞口,其顶部槽形板与侧墙结合处又留有空隙,造成吹雪竖向绕流灌入,导致防雪走廊全部被雪堵死,这个教训值得注意。

## 参 考 文 献

- [1] Radok, U., Snow drift, *Journal of Glaciology*, 19(81), 123—129, 1977.
- [2] Odar, F., Simulation of drifting snow, Research Report 174. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1965.
- [3] Iversen, J. D., Drifting-snow similitude-transport-rate and roughness Modeling, *Journal of Glaciology*, 26(94), 393—403, 1980.
- [4] Wang Zhonglong and Chen Yuan, Research on Prevention of Snow-drifts by blower Fences, *Journal of Glaciology*, 26(94), 435—445, 1980.
- [5] Kind, R. J., Snowdrifting: A Reviews of Modelling Methods. *Cold Regions Science and Technology*, (12), 217—228, 1986.
- [6] 王中隆,我国雪害及其防治研究, *山地研究*, 1(3), 22—31, 1983.
- [7] 王中隆等,天山地区风雪流运动特征及其预防研究, *地理学报*, 37(1), 51—64, 1982.

## SIMULATION RESEARCH OF SNOW DRIFT ON THE CUT AND TUNNEL IN WIND-TUNNEL

Wang Zhonglong Pan Xiahua

*(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences)*

Liu Xiawan

*(Lanzhou Institute of Deserts, Chinese Academy of Sciences)*

### Abstract

It is a quicker, better and more economical way to research snow drift and its control by modelling experiments in the wind-tunnel. The exact similitude is required for performing modelling test. This paper summarizes the similarity criteria and 10 parameters, as well as results got from the test in wind-tunnel of self-simulation.

Accumulation of snow drift occurs in boundary layer separation areas where the eddy resistance increases rapidly. In the case of roads, different fields of flow on different land-forms near the roadbed may give rise to different processes and quantities of drifting snow. Structure of flow fields and drift accumulation on cut and tunnel are rather complicated, so their snow control is more difficult than on other roadbeds. This paper reports the methods and problems in need of special attention, which is helpful in choosing courses, road-bed design and prevention of drifting snow in places with cut and tunnel.

更正: 本刊 43(2), p. 162 “四、北京夏昼和夏秋城市……”中的夏秋应改夏夜。