

风洞实验方法在沙漠学研究中的应用^{*}

贺大良 刘贤万

(中国科学院兰州沙漠研究所)

提 要

风沙运动和防治风沙、风雪流工程等的模拟实验研究表明,风洞实验技术应用于沙漠学研究中,进行半定量、定量的测量,可以提高研究水平,更好地解决生产实践任务。

世界上建成第一个风洞至今已有一百多年的历史。百年来,风洞实验技术由为航空和军事服务,逐步发展为广泛应用于许多学科领域的一门新的实验科学——风工程学。只要是有关风的问题,都可以用风洞实验来进行研究;沙漠科学中有很多课题与风有密切关系。早在本世纪四十年代, R. A. Bagnold^[1] W. S. Chepil^[2]等人就开始利用风洞进行风沙运动的实验研究; A. H. ЗНАМЕНСКИЙ^[3]还专门设计和建造了沙风洞,开始了将空气动力学的理论和方法用于研究风沙现象的新阶段。

为使我国的沙漠学研究得到先进实验手段的武装,在已故中国科学院竺可桢副院长的关怀和支持下,于1959年开始在地理研究所筹建沙风洞,六十年代初,兰州冰川冻土沙漠研究所成立后,1963年,沙风洞在兰州建成投入使用。沙风洞是一个直流闭口吹气式低速风洞,全长37.78米(图1)。矩形横断面面积 100×60 厘米²;风向基本平直,风速从2米/秒到40米/秒连续可调;紊流强度在0.4%以下。实验段长16.23米,四壁平滑,由多层胶合板和玻璃窗构成。实验段前部设有供沙装置;中部设一360°转盘;以模拟风向改变;后部尚有三节沙槽,装有衡量磅秤。

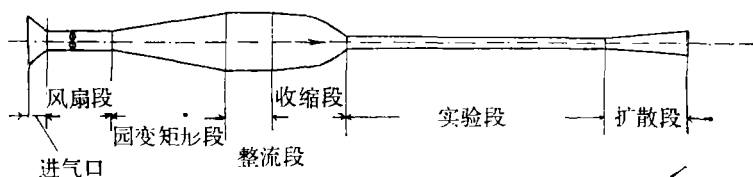


图1 沙风洞结构纵剖面示意图

Fig.1 Outline of the wind tunnel

本文1982年5月4日收到,1983年4月11日收到修改稿。

* 参加风洞实验研究的还有吴正、凌裕泉、邹桂香、李长治、高有广、陈福生等同志。

沙风洞建成后,进行了风沙运动,铁路、公路风沙防治,风雪流工程的模拟试验等实验研究,得到了某些规律性的认识,也解决了一些生产问题。本文就近年来试验的某些结果,对风洞实验技术在沙漠研究中的应用作一些探讨。

一、相似条件与实验方法

有关风沙物理学的研究内容^[3]及某些可以直接置于风洞内试验的工程实物(原型),可采用天然沙(原型沙)在风洞中做实验,而不考虑模型律。但多数工程,都要涉及到相似问题。风洞模拟实验的可靠性,决定于实验条件与野外实际情况的相似性。要使模型实验与自然现象完全相似,必须满足三个条件^[4]:几何相似、运动相似和动力相似。但是要做到这一点却是很困难的。如风沙工程的几何相似要求模型缩小多少倍,沙粒也要相应缩小多少倍。而实际上沙粒的粒径很小(在1.0—0.05毫米的范围内),据实验,很细的颗粒(临界粒径约为0.08毫米)由于受附面层的掩护和表面吸附水膜粘着力的作用,不易起动;即使受外力起动,运动性质也将发生变化。沙粒在风力作用下主要是贴近地面的跃移运动;当粒径缩小到小于0.05毫米后就成了粉尘,粉尘的自由沉速小,一旦起动,其运动形式就变成随风悬浮状态^[5]。这样一来,往往会带来物理过程的改变。这种模型实验,当然不能正确地反映原来的自然过程。因此,常常不得不用原型沙做模型实验。而用原型沙就加进了不完全相似的因素,产生了与模型不成比例的畸变。

鉴于风沙工程问题的完全相似模拟不可能,只有采用近似相似的方法。如(1)增大模型尺寸以减少因不完全相似而带来的误差;(2)采用系列模型法,用不同比例尺的模型进行实验,将实验结果外推到野外实际中去。由于室内实验不可能作到完全相似,总会给实验结果带来某些歪曲,因此决不可忽视野外工作,实践才是检验真理的唯一标准。只有两者互相比较,互相补充,才能得出相对正确的结果来。

在无沙情况下,我们主要考虑模型尺度上的几何相似和气流运动相似(模型与实物的流场及运动速度场成几何相似)。由于我们所试验的工程模型,多是具有棱角转折的物体,只要风洞的雷诺数足够大(10^6 以上),就可达到与雷诺数无关的自模拟区。如我国兰新线和南疆铁路部分路段穿过特大风区,经常影响列车安全运行;为防止大风吹翻列车,在风洞里做了翻车临界风速的模拟实验。在实验中,制作1/50和1/100两种车厢模型,采用表压分布法,实测出风作用在车厢模型各部位上的压力;然后将此压力与已知的车厢重力抗衡,从中计算出临界风速。这里起主导作用的是惯性力和粘性力,应满足雷诺数守恒:

$$R_e = \frac{LV}{\nu} = \text{常数}$$

车厢模型用人字形棚顶,因而附面层的分离始终发生在棱角的转折处。从实验的结果可见,无论何种模型,也无论多大风速,压力系数均很好地一致^[6]。这样,不但使问题大大简化了,而且加强了实验的可靠性。使实验结果可以方便地直接外推到任何尺寸、任何风速下的车厢原型,而不必经过换算。

同样，防护林模型实验也可利用这一原理。树木的枝条可看做是棱角转折点，附面层分离大都发生在此处。实验发现室内模型与野外流场大致相似^[7]，从而给防护林问题的研究提供了途径。

在有沙情况下，实验通常分两步做。先测出不加沙模型的流场，根据流场分布，估算出沙的吹蚀、堆积特征。在流场中，低于起沙风的区域，应是沙堆积区，而高于起沙风的地方应为吹蚀区；然后，再做吹沙实验，进行各种模型的沙子吹蚀、堆积形态及蚀积量的测量。综合流场分析和沙子蚀积状况的测定，比较其防护效果，从中选取最佳方案。

二、风沙和防沙工程的风洞模拟实验

（一）风沙运动的实验研究

为精确地记录沙粒运动的微观过程，用普通和高速电影摄影机在风洞中对风沙运动进行动态摄影实验。实验用沙是粒径为1—2毫米的均匀天然石英粗沙。沙子平整地铺在风洞地板上，厚约5厘米。风洞指示风速为 1.8×10^3 厘米/秒。普通电影摄影机和高速电影摄影机的拍摄频率分别为35幅/秒和2000幅/秒。人工照明，用1300瓦碘钨灯，由上部采光。光线通过狭缝垂直射入沙面，形成宽为1—2厘米的光带，其方向平行于风沙运动方向。光带后用黑色平绒作背景。

实验结果表明^[8]，风沙运动的主要形式是沙粒的跃移运动。根据7颗沙粒高速电影资料的计算表明，沙粒的冲击力可达 10^3 克·厘米/秒²。迎面阻力可以大于或等于沙粒重量，而外力却只有沙粒重量的几十分之一至几百分之一。由此可见冲击力在沙粒跃移运动中起了非常重要的作用。实验也进一步查明，风沙运动是一个贴近地表的迅速旋转的变速运动，对于平均粒径为1.5毫米，密度为2.6克/厘米³的均匀天然石英沙来说，其旋转速度为 10^2 — 10^3 转/秒，旋转是沙粒运动的普遍形式。沙粒的平均运动速度比气流速度小一个数量级，但其速度变化率可达 10^3 — 10^4 厘米/秒。

此外，在风洞中用普通像机，对平均粒径为0.17毫米的天然混合沙的起跳角和降落角进行了拍摄和统计分析，以验证各种起跳原因的可能性¹⁾。进行了湍流猝发机制的实验观测，探索其对沙粒起跳过程的影响。还应用激光多卜勒测速仪，对沙粒运动的速度、加速度、粒数随高度分布进行测量试验²⁾。

（二）风沙电实验

我国沙区通讯线路目前大都仍用裸线，每当风天起沙时，往往产生强大的静电电压，在甘肃民勤县观测站上，曾测到2700伏电压。这种现象给通讯质量及线路维修带来不少危害。为了摸清风沙电产生的原因和影响因素，我们与邮电科学研究院合作，在风洞中进行了风沙电的实验研究³⁾。

实验采用天然沙和原型导线在风洞中进行。通过实验初步查明：（1）导线的覆被程度

1) 贺大良，同前片，跃移沙粒的起跳角和降落角，1981年。

2) 刘贤万、高征锐等，应用激光测速仪研究风沙流运动的初步试验，1981年。

3) 凌裕泉等，风沙电的初步实验研究，1974年。

对风沙电有重要影响,在不同风速和沙量的情况下,普通塑料线的静电压仅为裸线的18.5%—41.8%;带有很厚聚氯乙烯包皮的铜导线,其电压仅为裸线的5.8%—9.9%。(2)风沙电电压与风速大小有明显的关系。这是因为风速加大后,起沙量随之大大增加;因为,沙粒之间以及沙粒与导线之间摩擦起电的机会就增多。(3)风沙电电压与导线长度成较好的正比关系;也与导线的走向和风向的交角有关,当正交时电压最大。(4)不同线质(铜线、铁线、铝铁线)的风沙电电压有差别,但差别不大。

上述规律就为风沙电防护措施提供了有力依据。如在风沙地区应采用覆被较好的包皮线;设计线路时尽可能减少穿越流沙地区的线路长度,并力求避免线路与风向正交布设等等。

(三) 防沙(雪)工程模拟试验

风沙、风雪流埋压公路和铁路,中断交通,造成严重危害。近十年来,我们先后与铁道部第一设计院、铁道部铁道科学研究所及新疆公路局等单位协作,对铁路、公路工程防治风沙、风雪流进行了比较系统的实验研究。

风沙实验采用包兰铁路沙坡头地区腾格里沙漠的原型沙;风雪流则用锯木屑轻质模型雪进行试验。

1. 下导风栅板工程

气流中搬运的沙子(雪)主要是集中在贴地面的气流层内(贴地层)。贴地层气流运动的状况,决定沙子(雪)的吹蚀、搬运和堆积过程的发展。贴地层(流体力学上又叫附面层)实验指出,当气流沿曲率变化较大的物体运动时,由于负压强梯度的存在,使气流产生逆向的涡旋运动,离开物体表面而发生分离。附面层的分离,形成涡旋,大大增加了局部阻力,使气流速度急剧下降,从而削弱了气流搬运沙子(雪)的能量,导致沙(雪)的堆积。

采用下导风栅板工程,是为了借助于它的分流来加大贴地层的风速,去克服因局部地形突然变化所引起的附面层分离,以达到防止路面积沙(雪)的目的。

下导风栅板应用于防治公路、铁路沙(雪)害,在国外文献中早有提及^[9,10];但其防护机制、下导风栅板工程各要素的选择和组合等问题的研究还很不够。我们试图应用附面层分离理论,通过风洞实验研究,提出一个经济有效的导风栅板工程诸要素的选择方案。

(1) 附面层分离区的测定 公路及边坡附面层分离现象,是在风洞中采用总静压管法来测定的。静压孔开在模型表面上,总压则借助于头部很尖的扁平细管来测量。

半填半挖路基的实验结果表明,背风地段附面层分离区出现在公路后坡及边沟上和下风侧边坡下。迎风地段如图2a所示,分离区明显地出现在迎风侧路肩和后坡的公路外侧。图2b是加了工程的,则清楚的看到原有二个分离区已被消除了。这正是下导风栅板工程防止沙(雪)埋危害道路的机制。

实验研究证明,分离区的大小,即涡旋的尺度是随风速的增大而减小和变薄的,但涡旋中心强度反而加强;随地形曲率的增大,涡旋的尺度和强度都增大。

(2) 下导风栅板工程诸要素的选择

流场测定 众所周知,在物体表面上,当出现风速廓线与该点的高程坐标相合,即

$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0} = 0$ 时,这一点就是所谓的分离点。所以我们可以用简便的近地面层风速梯度

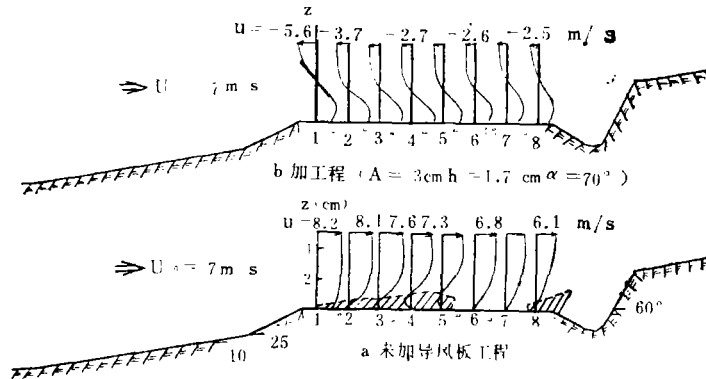


图 2 迎风地段公路模型附面层测定 (模路型面宽16厘米)

Fig.2 Determination of the boundary layer of the highway model in the windward section (road width of the model being 16 cm)

的观测，来大致的判定分离的出现。

实验模型置于附面层稳定的区段中。远方轴线风速控制为10米/秒，气流速度用毕托管测定。

测量的部分结果见图3。从图中可以看到在10公分高程内，下导风栅板工程的前后有五个重新组合的能区。板顶和板后有一个增速区和一个减速区，而贴地面层，从导风栅板前算

表 1 导风板下口高度不变、吹括宽度随板面宽度的变化 (风速: 6.8米/秒)

Tab.1 Height of the lower mouth remains unchanging while the blowing width varies with the fence length in the wind-leading belt (wind velocity 6.8m/s)

板宽 (厘米)	2	3	4	5	6
吹刮宽度 (厘米)	13.0	15.0	16.0	17.5	19.0

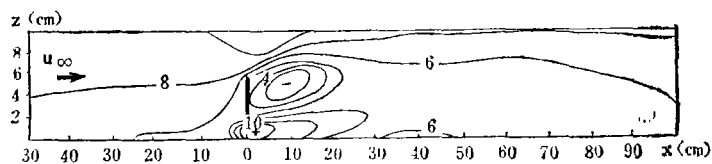


图 3 下导风工程纵剖面流场测定图

($U_{\infty} = 10\text{m/s}$, 工程 $H = 4\text{cm}$, $h = 2\text{cm}$, $\alpha = 90^\circ$ 等速度线)

Fig.3 Determination of the stream field of the blower fence profile

($U_{\infty} 10\text{m/s}$ $H = 4\text{cm}$ (fence height) $h = 2\text{cm}$ (height of the lower mouth) $\alpha = 90^\circ$)

起，有一减、一增再一减的三个速度区五个能区都随主导风栅板诸要素：倾角 α 、下口高度 h 和板面宽度 H 的变化而变化，而且它们是互相制约的。

2. 侧导羽毛排

采用数排或数十排栅板，下端固定在地面上彼此错开一定距离，布置成羽状就是侧导羽毛排。其作用是改变风沙、风雪流的流向，引导沙、雪粒至被保护物范围以外堆积。侧导羽毛排有闭口式和开口式两种。主导气流不能直接穿过板间孔隙、由板前向板后流动的叫闭口式；主导气流能够由板前直接穿过板间空隙向板后流动的叫开口式。

吹刮面宽度 吹刮面宽度是指导风栅板下口投影点至下风风速恢复到同一高程的板前远方风速处的距离。

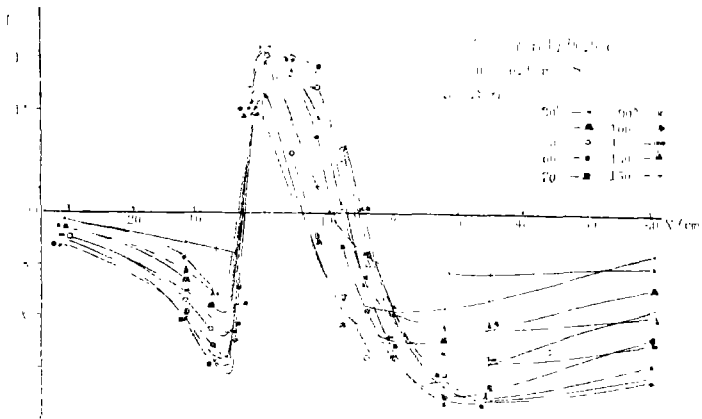


图 4 下导风工程风速纵剖面随倾角的变化 ($A = 4\text{cm}$, $R = 2\text{cm}$)
Fig.4 profile of wind velocity varies with the dip angle,
($A = 4\text{cm}$ $R = 2\text{cm}$)

从图 4 我们可以看到，100 度的吹刮宽度最大；其值为 15.3 厘米，而后向两边递减。说明以近于直立倾角的效果为最好；对偏离直立角度的同一角度来说，后倾板面比前倾优越。

对板面与下口组合的吹刮宽度，板面越宽，吹刮宽度越大（表 1）；下口越高，板前、板后的阻减越小。板面与下口高度之比，以 1:0.7 左右为好，其吹刮宽度达到一个极值。吹沙（雪）形态试验结果在野外得到很好验证。

风洞试验中所用羽毛排的模型比尺为 1:30，透风率为 50%，单排长 15 厘米，高 5 厘米。

从试验中观测设置羽毛排后风速变化情况和堆积形态，分析排向与风向交角 θ 的变化对导沙（雪）效果的影响来看（图 5b）：（1）羽毛排的侧导作用主要在于不断加速的侧导气流。（2）闭口式羽毛排，主要气流在板前犬致沿排头联线向下风方向运行，越接近排尾，风速越大；风沙（雪）流沿此高速运行，在排尾形成较平直的垄状积沙（雪）；开口式羽毛排，主要气流顺板面由板前穿过板间空隙进入板后向尾部吹送，紧靠板面形成一高速区，离

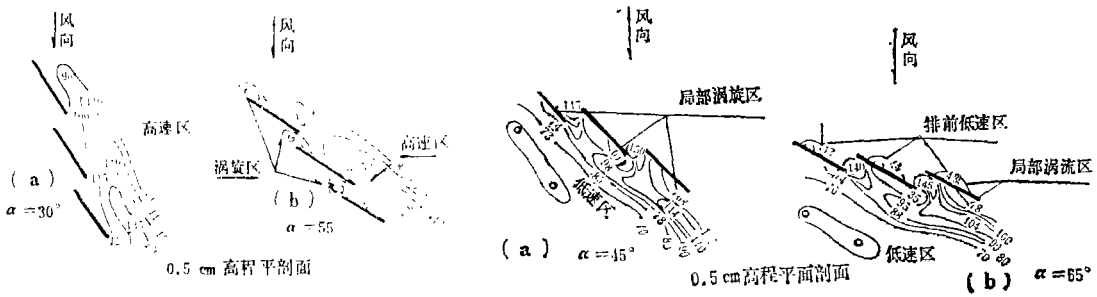


图 5 a. 闭口式羽毛排风速增减率(%)等值线(比例尺1:10)
b. 开口式羽毛排风速增减率(%)等值线(比例尺1:10)

Fig.5 a. Isogram of the increase and decrease rates (%) of closed feather rows.
b. Isogram of the increase and decrease rates (%) of opened feather rows.

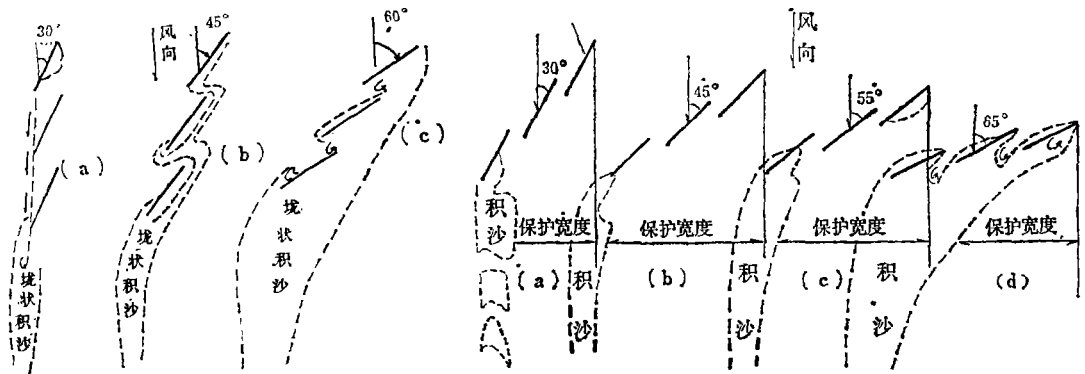


图 6 (a) 闭口式羽毛排在不同交角时堆积形态示意图
(b) 开口式羽毛排在不同交角时堆积形态示意图

Fig.6 a. Diagram of sand accumulation form at different intersection angles of closed feather rows
b. Diagram of sand accumulation form at different intersection angles of opened feather rows

板面再远一些为低速区,板前板后都有积沙(雪),但主要堆积区在侧导板的后方,并在排尾汇成沙(雪)堤。(3)羽毛排可应用于风向比较单一的风沙流或风雪流地段;闭口式宜与风向成 $30^\circ-40^\circ$ 的交角,排间距离约为排长的 $2/5-1/2$,两排接头处可错开一定距离;开口式羽毛排,宜与风向成 $40^\circ-50^\circ$ 的交角,排间距离约为排长的 $1/3-2/5$,两排接头处,既不错开,又不重叠。

下导风栅板工程和侧导羽毛排,在新疆天山地区公路和乌(鲁木齐)伊(宁)公路上进

行了防治风吹雪和沙埋的野外试验,证明其输导沙、雪的效果是比较好的^{〔11、12〕}。

在公路、铁路工程防治沙(雪)害的研究方面,我们还进行了公路不积沙断面型式,草方格沙障和阻沙栅栏^{〔1〕},以及桥涵、隧道、站场房屋对积沙的影响和防沙工程的风洞模拟试验^{〔2〕},其中有的措施已在实际应用中取得了较好的效果^{〔13〕}。

三、结 论

风沙运动及防沙(雪)工程等的试验研究表明,风洞实验技术应用于沙漠研究,不受自然条件的限制,能大大缩短研究周期,大量节省时间、人力和物力;便于使用较精密的测试仪器,进行半定量、定量的测量,可以提高研究水平,有利于解决生产实践问题。

参考国外同类风洞的资料,我所风洞除继续深入进行风沙物理学和防沙工程的模拟实验外,还可以应用于地理学研究的许多领域,主要有:

1. 土壤风蚀的实验研究:影响土壤风蚀的因素以及防止风蚀措施的研究等。
2. 农业气象的实验研究:如风对农作物倒伏、落花、落果的影响的研究等。
3. 土壤水分蒸发和包括植物蒸腾在内的植物风生理的实验研究。
4. 林带、林网及其防风沙效益的实验研究等。

有些项目正在探索,今后将陆续报道。

参 考 文 献

- 〔1〕 R.A.拜格诺:风沙和荒漠沙丘物理学,科学出版社,1959年。
- 〔2〕 W.S.Chepil: Dynamics of Wind erosion; I. Nature of movement of soil by wind, soil sci., vol.60, No.4, 1945.
- 〔3〕 A.И.兹那明斯基:沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题,科学出版社,1960年。
- 〔4〕 沈自求:相似理论及其在化工中的应用,高等教育出版社,1959年。
- 〔5〕 H.E. Reineck, I.B. Singh: 陆源碎屑的沉积环境,石油工业出版社,1980年。
- 〔6〕 贺大良、陈福生等:大风地区翻车风速的风洞实验:中国科学院兰州沙漠所集刊,第2号,科学出版社,1982年。
- 〔7〕 中国科学院兰州沙漠所风洞实验室等:林带防风作用的风洞实验初报,中国林业科学,第4期,1978年。
- 〔8〕 凌裕泉、吴正:风沙运动的动态摄影实验,地理学报,第35卷第2期,1980年。
- 〔9〕 H.A.彼得普梁多夫:铁路防沙,人民铁道出版社,1958年。
- 〔10〕 M.T.波塔帕夫:铁路防雪,人民铁道出版社,1958年。
- 〔11〕 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所冰川室:风雪流及其防治方法,人民交通出版社,1978年。
- 〔12〕 新疆生物土壤沙漠研究所沙漠室:聚风板在公路输沙中的作用,沙漠的治理,科学出版社,1976年。
- 〔13〕 吴正等:沙漠地区公路工程,人民交通出版社,1981年。

1) 沙漠所、兰州铁路局科研所等:栅栏阻沙试验研究,1981年

2) 刘贤力、姜正午:铁路防沙工程风洞模拟试验初步报告,1980年

EXPERIMENTAL METHODS OF WIND TUNNEL IN THE STUDY OF DESERTS

He Daliang Liu Xianwan

(Lanzhou Institute of Desert Research)

Abstract

This paper introduced the large wind tunnel in our institute. According to the similarity theory of two phase flow, we expounded the applying range in geography and the limit in open field of the experiments of a wind tunnel. Ranolds number must be increased under the situation without sand-bearing wind. Only when Ranolds number is above 10^6 , a model with angular turns (such as the ceiling of a vehicle and tree branches of a shelterbelt) may not be affected by the model size and the change of wind velocity, and thus the experimental result can be applied to open field. If there is windborne sand, due to the limited scale of sand particles (sand particles of model being no smaller than 0.08 mm), the distribution of erosion and deposition areas can be estimated by the stream field distribution of experiments. we made experiments of large scale model to reduce error caused by uncompleted similarity.

This paper also dealt with the main experimental results after our wind tunnel had been built. we also studied the lifting off mechanism of sand particles by using 2000 pps high Speed photography. It indicates that impact is very important for thd up lifting of sand. For communications and telecommunications, the phenomenon of sand-driving wind and barriers for derivating wind downward in order to prevent windborne sand and snow drift have been studied. We have also proposed several protecting measures, which have gained good results.