

不同风向角条件下山区公路风吹雪特性及风洞相似试验方法研究

刘睿昕 刘健*

新疆农业大学 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830052

【摘要】：本文研究了不同风向角条件下山区公路的风吹雪特性，并通过风洞实验模拟分析了风速、风向和地形变化对积雪分布和堆积形态的影响。实验结果表明，风向角的微小变化对积雪堆积、雪粒的飘移轨迹以及风速的变化具有显著影响。随着风向的变化，积雪的结构和形态发生改变，进一步影响雪的稳定性和路面摩擦力。通过风洞实验，模拟了山区复杂地形下的风吹雪过程，为山区公路设计、管理和防灾提供了重要的数据支持。研究结果为山区公路风雪灾害的预防和应急管理提供了理论依据，能够有效优化道路设计，提升防雪能力，保障交通安全。

【关键词】：风吹雪；山区公路；风向角；风洞实验；雪堆积

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.006

引言

山区公路作为重要的交通枢纽，常常面临恶劣的气候条件，特别是风吹雪天气，给交通安全和行车效率带来巨大挑战。风吹雪现象的形成受风速、风向及地形等多重因素的影响，其中风向角对雪的堆积模式与风速变化有着至关重要的作用。传统的观测方法虽然能够捕捉到部分现象，但在复杂地形和气象条件下的表现仍难以全面了解。采用风洞实验模拟风吹雪过程，能够精确控制不同条件，揭示风吹雪的规律与特点，为山区公路的设计、运营管理和服务提供重要依据。

1 山区公路风吹雪特性分析

山区公路的风吹雪特性与平原地区存在显著差异，尤其在复杂地形和不规则的气流分布下，风的方向、速度以及地形变化都会影响雪的堆积、移动和沉积方式。在山区，风吹雪的形成不仅与大气流动密切相关，还受地形起伏、坡度、植被等因素的共同作用。山区公路周围的山脊、山谷、坡面等地形特征，常常导致风的流动发生局部加速或减缓现象，形成较为复杂的风场结构，进而影响雪粒的运动轨迹。

风速和风向角是影响风吹雪的重要因素。研究表明，风速较高时，吹雪现象更加显著，雪粒的飘移距离和堆积区域会有变化。风向角的变化对山区公路的风吹雪表现起到了关键作用。不同风向角下，风速和风压的变化导致雪的堆积方式呈现出明显不同的模式。在山谷中，迎风坡和背风坡的风力差异较大，使得积雪在不同位置出现了明显的堆积和松散现象。风向角变化会影响雪粒的飘移距离和雪层的厚度，进而改变公路的通行条件。通过对这些风吹雪特性的深入分析，能够更好地理解山区公路风吹雪的动态变化，制定出更加科学的应对策略。

山区公路的风吹雪问题不仅局限于雪的堆积，还涉及到积雪的滑移、消融及其对路面摩擦力的影响。风速和风向角的变化，往往使得部分路段积雪形成冰层，降低道路的摩擦力，严重影响交通安全。因此，准确掌握风吹雪的特性，特别是在复杂地形中如何模拟这些特性，对于确保山区公路的安全运行具

有至关重要的作用。在风洞实验中，通过模拟不同风向角条件下的风速变化，可以为实际路况提供有力的实验依据，进而优化山区公路的设计与管理方案。

2 风向角对风吹雪特性的影响

风向角对风吹雪特性有着深远的影响，尤其是在山区公路等复杂地形中，不同的风向角会引发明显的气流变化，从而改变雪的飘移模式和堆积情况。山区的地形起伏使得风的流动不再是简单的直线传输，风向角的微小变化都会对局部风场产生重大影响。在特定的风向下，风的流速可能会增加，产生加速效应，这样一来，雪粒被更远地吹送，积雪区域随之扩展，导致路面的积雪更加密集。另一方面，当风向角发生变化时，风力可能会减弱或发生转折，导致雪粒在特定位置堆积形成雪堤或雪堆，形成不均匀的积雪分布，严重时可能会导致某些路段积雪过厚，增加清雪的难度。

风向角的变化直接影响到风的气动效应，尤其是在迎风坡和背风坡的雪堆积特性上，变化尤为明显。迎风坡的风速通常较大，雪粒的飞行距离较长，积雪会相对分散；而背风坡则由于气流速度的减少，风的能量被减弱，雪粒往往被重新吹回，造成积雪的堆积。风向角的变化不仅改变了风速分布，还可能导致风压的变化，从而影响风吹雪的强度与范围。山区公路的多变地形导致了风的绕流效应，风向角的变化可能在山脊、山谷等特殊地形区域产生风场的局部涡旋，这一现象进一步加剧了积雪的聚集并增加了积雪层的厚度。

不同风向下的风吹雪特性与雪粒的物理特性之间有着密切关系。风力在特定风向角下能够改变雪粒的运动状态，增加其速度和动能，从而影响雪粒的撞击方式与堆积特性。在某些风向角下，风力的增强可能使雪粒的撞击更加剧烈，导致雪堆积更加不均匀，形成不同的积雪层次。这种积雪的变化直接影响其稳定性，可能在山区公路上形成滑雪层，导致道路摩擦力下降，增加交通事故风险。风向角的变化还可能改变积雪的形态和结构，产生不同类型的雪堆或雪墙，进而影响清雪的效率和道路通行能力。因此，准确掌握风向的变化规律对山区公路

的风吹雪防治至关重要，有助于优化路面设计、加强清雪机制和防灾设施建设，确保交通安全。

3 风洞试验方法与模拟过程

风洞试验作为研究风吹雪现象的有效方法，能够在可控环境下模拟不同气候条件下的风速、风向及积雪行为。通过风洞实验，可以精确模拟山区复杂地形下的风吹雪过程，特别是在不同风向角和风速条件下，积雪的分布、雪堆的形态以及风速的变化规律。风洞试验通常采用尺度模型和相似原则，将实际山区公路的地形进行缩放，通过调整风洞中的流速、风向和温湿度等参数，尽可能还原真实环境中的风吹雪现象。这种模拟方法能够帮助研究人员更加清晰地了解不同气候条件对山区公路的影响，进而为风吹雪的防治提供科学依据。

在风洞实验过程中，模拟的关键在于风速、风向角以及地形特征的合理设置。通过调整风速，可以研究风速变化对积雪形态及雪堆积的影响，而改变风向角则有助于揭示风吹雪在不同方向上的差异。通过在风洞中设置不同的地形模型，可以模拟山脊、山谷等地形特征对气流的影响，进而分析积雪的堆积过程。实验中选用不同材料模拟雪粒的物理特性，使实验结果更贴近实际情况，为实际工程应用提供了有价值的数据支持。

风洞试验的模拟过程不仅依赖于对风速和风向角的精确控制，还包括对气流场的精确测量。实验中，通过风速计、压力传感器和温湿度传感器等设备，实时监测风场的变化情况，并记录积雪在不同条件下的演变过程。通过对不同风向下积雪的堆积形态，研究人员可以得出风向角对积雪分布的具体影响，进而为山区公路的设计提供指导。风洞实验的另一大优势是能够多次复现相同实验条件，使得不同因素之间的相互作用能够得到有效分析，避免了在自然环境中进行实验时存在的不可控因素。

风洞试验模拟的结果往往通过分析积雪的堆积厚度、覆盖面积以及积雪的流动特性等参数来进行评估。这些实验数据可以为山区公路的设计提供实际依据，帮助决策者在规划公路时充分考虑风吹雪的影响，合理安排路面的坡度、设置防风设施，确保道路的通行安全和效率。风洞试验还可以为积雪清理、雪灾防治等方面提供科学依据，帮助相关部门制定更加有效的应急预案。

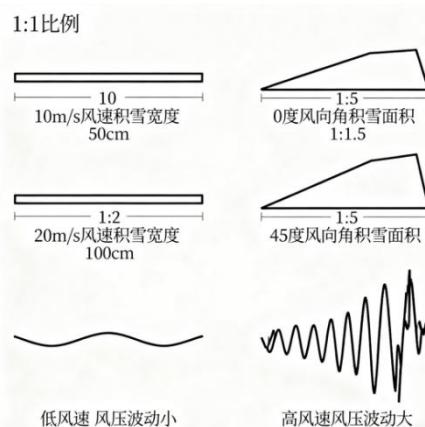
4 实验数据分析与结果验证

实验数据分析是评估风吹雪特性和风洞模拟结果的重要环节。通过收集不同风向角、风速和地形条件下的实验数据，能够全面了解风吹雪在山区公路上形成的规律。实验数据包括风速、积雪厚度、积雪覆盖面积以及积雪的移动轨迹等，这些数据为验证风洞实验的准确性提供了依据。通过对这些数据的统计分析，研究人员可以明确风速和风向角对雪堆积、雪粒运动以及道路积雪的具体影响。

风洞试验中，采用多个风速和不同风向角进行实验。实验数据显示，当风速达到一定临界值时，雪粒开始明显飘移，且飘移距离与风速成正比。具体数据表明，在风速为 10 m/s 时，积雪的堆积区域宽度大约为 50 cm，而在风速增加至 20 m/s 时，积雪区域则扩大到 100 cm 左右。通过对不同风速下积雪的分布情况进行分析，可以看出风速对积雪堆积形态的影响显著，较高的风速使得积雪沿风向分布更加均匀，但堆积区域较为广泛，反而可能增加道路清理的难度。

风向角的变化对积雪堆积的影响也在实验中得到了明确体现。当风向角为 0 度（即风向与道路平行）时，积雪的分布呈现出较为均匀的情况，积雪主要集中在道路两侧。而在风向角为 45 度时，风的斜向作用使得雪粒的飘移路径发生改变，导致积雪主要集中在风的迎面区域。这一现象的实验数据显示，积雪在风向角为 45 度时的堆积面积是 0 度情况下的 1.5 倍，堆积高度也显著增加。这个结果表明，风向角的改变不仅会影响积雪的堆积量，还会改变积雪的空间分布，进而对公路的通行产生不同程度的影响。

除了积雪分布，风压的变化也对积雪的形成和清除过程起着至关重要的作用。实验中使用了压力传感器来监测风压在不同条件下的变化情况。数据表明，风速较高时，特别是在山脊地带，风压的变化更加剧烈，这些变化对积雪的清除造成了极大的挑战。通过对风压数据的分析，发现风速越高，风压的波动越明显，导致雪堆的形成位置发生变化，部分积雪被重新吹散，增加了雪堆的清理难度。通过实验数据的详细分析，可以得出风向角、风速与积雪堆积之间的定量关系，从而为山区公路设计提供更加准确的依据。实验结果表明，风向角和风速对积雪的分布具有显著影响，而风压的变化则加剧了积雪清除的复杂性。这些数据的积累和分析不仅为山区公路的设计提供了重要参考，也为风雪灾害的防治和应急管理提供了理论支持。通过与实际情况的对比，风洞试验结果得到了验证，进一步提高了模拟方法的可靠性和应用价值。



5 对山区公路设计与管理的建议

山区公路设计与管理的有效性在于对风吹雪现象的深入

理解与应对。考虑到山区复杂的地形、气候以及风速和风向的变化，设计时应特别关注如何减少风吹雪带来的负面影响。针对风吹雪的特性，设计方案应采取系统化、全方位的应对策略，包括路面结构、坡度设计、排雪系统以及防风设施的综合应用。针对风吹雪的影响，应合理规划公路的坡度和路面结构。山区公路往往面临较为复杂的地形，坡度过陡或过缓都会加剧积雪的堆积或滞留现象，特别是在大风天气中，积雪可能迅速覆盖道路，导致交通受阻。路面设计需要考虑到雪的清除和融化，适当的坡度可以促进雪的自然滑移，同时增强路面的排水能力，防止积雪转化为冰层，确保路面摩擦力。设计过程中可结合风向角和风速数据，优化路段的坡度，减少雪堆积的区域。

风洞实验的结果表明，风向角的变化对积雪的堆积有显著影响，特别是在风力较强的区域，风力方向的改变会使雪的堆积分布发生变化。山区公路的路线规划应充分考虑地形与风向角之间的关系，尽可能避免长时间暴露在强风的山脊地带。合理选择公路走向可以有效减少风向变化对积雪的影响，避免出现积雪堆积过于集中的现象，确保道路的畅通性。在设计过程中，还应加强防风设施的配置，尤其是位于易受风吹雪影响的高风险区域。风挡墙、绿化带等防风设施的合理设置能够有效地改变局部风速和风向，减缓风吹雪的影响。对于积雪较为频繁的地区，应考虑在道路两侧设置防雪屏障，形成雪屏结构，从而减少雪粒的飞散与堆积，保证路面的清洁度和通行能力。此外，防风林带也可以通过降低风速，减轻风吹雪带来的积雪

压力，提高道路的可用性。

针对风速与积雪分布的关系，还需要加强排雪系统的设计。山区公路应配备高效的排雪系统，以应对积雪堆积导致的交通障碍。排雪系统不仅要具备快速清理积雪的能力，还要在设计时考虑到风向与风速的不同，确保雪的集中堆积点能够及时排除，避免积雪在某些路段长期堆积，导致路面结冰和滑移。合理布局排雪管道和雪堆清除系统，可以使公路管理部门在暴风雪天气下快速应对，确保道路畅通。除了路面设计和设施配置，山区公路的管理部门还应通过气象监测和风洞模拟等手段，不断优化防雪策略，及时了解气候变化和风速风向的预测，提前部署防雪工作。对于风吹雪影响较大的地区，及时发布预警信息并采取临时封路或交通管制等措施，以保障通行安全。结合风洞实验和实际路况，制定科学合理的应急预案，有助于减少风雪天气对交通安全的威胁。

6 结语

本研究深入探讨了风向角对山区公路风吹雪特性的影响，结合风洞实验数据对积雪分布、风速变化及积雪清除进行了系统分析。通过对山区公路设计和管理提出的针对性建议，本文为提高山区公路抗风雪能力、优化设计方案提供了科学依据。实验结果表明，风向角、风速及地形特征在风吹雪形成中的重要作用不可忽视，未来的山区公路建设和维护应进一步关注这些因素，以保障交通安全和畅通，减少风雪灾害的影响。

参考文献：

- [1] 王伟,张华.风吹雪对山区公路交通安全的影响分析[J].公路交通科技,2023,40(2):115-122.
- [2] 李刚,张铭.基于风洞试验的山区公路风雪影响模拟研究[J].风工程与振动控制,2023,33(4):78-85.
- [3] 王鹏,刘勇.风速与风向对山区公路积雪分布的影响[J].交通运输工程学报,2024,24(1):92-100.
- [4] 刘丽,赵云.风洞实验方法在风吹雪模拟中的应用[J].土木工程与建筑学报,2023,41(5):203-210.
- [5] 陈峰,张杰.山区公路风吹雪特性及防控对策[J].气象与环境科学,2022,33(3):142-149.