

文章编号: 1108 - 2786 - (2016) 1 - 1 - 11
DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000094

雪崩的形成机理研究

汶林科¹ 向灵芝² 蔡毅³ 苏凤环⁴ 严字忠³

(1. 武警警种学院交通系, 北京 102202; 2. 重庆交通大学岩土工程研究所, 重庆 400074;
3. 武警水电第九支队, 四川 成都 611136; 4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 雪崩灾害严重地威胁着山地旅游滑雪以及山区公路安全。因此, 开展雪崩的预测预警研究很有必要, 尤其是北京张家口联合申办 2022 年冬奥会成功, 滑雪场雪层的安全性必将成为举办者必须考虑的问题。雪崩的预测预警与地形、气象因子和积雪关系密切。雪崩形成区的坡度大多在 30 ~ 45°, 坡形态、地面粗糙度和下垫面也会对雪崩产生影响。气象因子中与雪崩有关的主要因子包括: 新雪、风和气温, 高的新雪降雪量和降雪密度可诱发新雪雪崩, 风向风速决定了积雪的再分配, 而气温对积雪的力学性质发挥着决定性作用。积雪中的连续性雪晶能形成软弱层, 是雪崩发生的必要条件。雪崩形成的步骤为三步: 软弱层破裂的产生、传播以及断裂的出现。其中软弱层中雪体低强度带对破裂的产生和传播发挥了关键性的作用。

关键词: 积雪; 雪崩; 积雪破裂

中图分类号: P931.4, P931.91, X4

文献标志码: A

雪崩灾害对山区居民以及旅游者的生命财产安全构成了较大的威胁。如 1970 - 05 - 31 秘鲁瓦斯卡兰山发生的雪崩共造成 20 000 居民死亡, 受灾面积达 23 km² [1]; 尼泊尔 2014 - 04 - 18 和 2014 - 10 - 15 发生雪崩, 超过 50 人遇难。Voight [2] 的统计显示, 美国每年由于雪崩致死的平均人数都超过了地震和泥石流。在我国西部也经常有雪崩致人死亡的报告, 如 2005 年青海门源雪崩造成 3 名游客死亡, 2012 年甘肃肃北县黑刺沟雪崩, 有 6 名矿工遇难; 1996 - 03 - 24 西藏波密县然乌雪崩造成 64 人遇难。近年来由于进藏旅游人数的剧增, 以及滑雪等休闲活动的兴起, 雪崩对人的威胁越来越大。

滑雪场作为一个存在潜在雪崩危险而且人员集中的区域, 其雪层的稳定性越来越受到人们的关注, 这也是目前雪崩危害研究的主要对象。因为雪崩致死率极高, 而且其黄金救援时间只有 30 min, 因此做好滑雪场雪层变化的预测预警, 相对于雪崩发生时

的应急救援更加重要。近年来滑雪场雪崩引发的人员伤亡灾害时有发生, 2011 - 03 - 19 新疆阿勒泰市将军山滑雪场发生雪崩, 1 名滑雪者被埋后窒息死亡, 2012 - 03 - 03 黑龙江大秃顶子山雪崩, 1 名滑雪者遇难。

2015 年北京张家口联合申办 2022 年冬奥会成功, 滑雪场雪层的安全性必将成为举办者必须考虑的问题。2014 - 04 - 10, 索契冬奥会主要赛场之一的玫瑰庄园滑雪场的一条中级赛道遭遇雪崩, 6 名滑雪者被吞噬, 其中 2 人死亡。作为 2015 年冬奥会的主要赛场的崇礼县万龙滑雪场, 2012 - 11 - 23 曾发生雪崩, 1 名女滑雪者被雪崩掩埋获救后全身多处骨折。有些冬奥会项目, 比如在高山超级大回转中运动员本身极有可能破坏雪层的稳定性而引发雪崩, 因此必须针对不同的奥运项目对雪道进行相关地规划。

1960 年代, 我国的科研工作者对新疆及藏东南

收稿日期(Received date): 2015 - 10 - 19; 改回日期(Accepted): 2015 - 10 - 25。

基金项目(Foundation item): 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ - EW - STS - 094)。[Science and technology service net project (KFJ - EW - STS - 094)。]

作者简介(Biography): 汶林科(1968 -), 男, 陕西眉县人, 博士, 副教授, 主要从事灾害方面的研究。[Wen Linke, male, doctor, associate professor, major in the study field of disaster.] E-mail: wenlinke@163.com

的雪崩做了大量卓有成效的研究工作。1967 年,中科院兰州冰川冻土研究所与多家单位联合组建了新疆雪灾考察防治工作队,对天山公路积雪及其灾害进行了全面考察与研究,并在天山西部巩乃斯河中游海拔 1 776 m 处建立了中国第一个积雪雪崩研究站,开展雪崩研究已 40 多年。20 世纪 70—80 年代,我国多家单位先后对喀喇昆仑山和横断山的雪崩、冰川泥石流、山洪,以及天山公路和川藏公路沿线雪害和雪崩进行了考察,并建立了半定位观测研究站。但进入 21 世纪以后,我国在雪崩研究方面投入的人力物力都明显偏少,研究成果已远远不能满足当前旅游休闲以及道路交通安全的需要。本文从科研及实际需要出发,对雪崩形成因素进行综述性分析,为当前我国雪崩研究提供参考意见。

1 影响雪崩暴发的基本因素

要做好雪崩的预测预警工作,首先要对雪崩暴发的机理及其影响因素有比较详细的了解。

雪崩具有明显的形成区、运动区和堆积区。其中形成区的雪层特征及其启动对于雪崩的暴发至关重要。雪崩按其形成区形态可分为松雪雪崩(loose snow avalanche)和板状雪崩(slab snow avalanche)。松雪雪崩是一种点状暴发的内聚力较小的雪崩,一般体积 $< 1 \text{ m}^3$;而板状雪崩是一种近似长方体的雪体面状破裂而暴发的雪崩,其宽度一般是厚度的 10 ~ 1 000 倍^[3],雪板的厚度一般都 $< 1 \text{ m}$ ^[4-5]。危害较大的雪崩一般都是板状雪崩。

雪崩最简单的形成模式是当坡面上雪层下滑力大于雪层自身强度时,雪层失稳,发生雪崩。雪层的重力可以分解为平行于坡面的应力和垂直于坡面的正压力。正压力以及雪的沉降有利于雪层的稳定,而下滑力(平行于坡面的分力与剪切力之和)及其产生的变形则会促使雪层失稳。雪体的强度包括雪的内聚力和雪层的摩擦力。

雪层的稳定性是雪崩预报的基础。目前的研究一般利用雪层的稳定度来表示雪层的稳定状况,其定义为 t 时刻地点 x 的稳定度为雪体强度 τ_f 与应力 τ 的比值^[6]:

$$S = \frac{\tau_f(\sigma, x, t)}{\tau(x, t)} \quad (1)$$

S 值越大,雪层越稳定,当 S 接近 1 时,则雪层处于不稳定的状态。由于雪层的强度和应力在时间

和空间尺度上变化很大,但式(1)确定的雪层稳定度没有考虑雪层应变及应变率等参数的变化;另外,雪层中破裂的产生及传播是雪崩的发生的必要条件,式(1)显然不足以反映雪层的物理和力学变化。Anderson^[7]提出雪层稳定度应重点考虑雪层应力、雪层破裂尺度以及雪层韧性(snow toughness)等参数的变化。雪层韧性是指雪层在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力,韧性越好,则发生脆性断裂的可能性越小。

雪崩的暴发与雪这种特殊的物质的性质有着密切的关系,积雪同时具有弹性和塑性的特征,弹性塑性的强弱与积雪的类型、粒径、温度、含水量等有关。除抵抗塑形变形的韧性外,积雪还具有抵抗弹性变形的刚度。如果降雪强度很大或者由于滑雪引起雪面负荷快速增加,当应变率 $> 10^{-3} / \text{s}$ 时,积雪更多地表现为一种脆性,可近似的看作一种弹性材料;而当应变率 $< 10^{-5} / \text{s}$ 时,积雪更多地表现出延展性和粘弹性,可以认为是一种介于固体和液体的材料,雪体表现出不同性质的积雪的应变率大约为 $10^{-4} / \text{s}$ ^[8]。

王彦龙^[9]认为积雪是一种高温下的岩石,在温度较高时会发生雪晶之间的烧结现象(sintering)。烧结是指雪晶微粒之间胶结在一起的热力学过程^[10]。烧结本来是一个工业名词,指的是将粉状物加热到熔点,使之变为致密体的过程。雪和冰可能是自然界无需外界加热即可发生烧结的天然材料,这主要是由于雪冰的熔点低,如果将两块雪体放置在一起,即使没有加热加压,它们也会在几分钟之内融合在一起。

雪崩的形成非常复杂,首先它是多个因素综合作用的结果,目前公认的影响因素有 4 个:3 个自然因素(地形、降水和雪层)和 1 个人为因素。1954 年 Awater 提出了影响雪崩暴发的 10 个气象及雪层因子^[10]。因为各个因子对雪崩的作用是不同的^[11-13],如果能把不同权重的影响因子进行综合分析,就可以对雪层的稳定性进行判断,从而达到预测雪崩的目的。

1.1 地形

地形是雪崩预测中唯一恒定不变的参数。绝大多数的雪崩的形成区坡度都在 $30 \sim 45^\circ$ ^[14],就干雪雪崩而言,其发生的坡度一般都在 30° 以上。由于目前的研究在统计雪崩形成区坡度时存在空间尺度上的差异,使得许多雪崩形成区的临界坡度无法进

行比较,比如很小面积内的较大的坡度不能体现整个形成区的坡度情况。Schweizer等^[5]建议雪崩发生的临界坡度应该是形成区内 $>20\text{ m}$ 空间尺度上的最大坡度。他们还统计了发生于瑞士和加拿大由于人为激发的809次雪崩的形成区坡度,其中值为 39° ,第25个百分位的坡度值为 37° ,第75个百分位点的坡度值为 41° ,这和Perla^[4]统计的自然雪崩没有明显的差异。但Ammann^[15]的研究显示,1999年阿尔卑斯山几次特大灾难性雪崩形成区的坡度 $<30^\circ$ 。

因为雪崩一般发生在 30° 以上的坡面,而且坡度与雪崩的频率和规模存在着相关关系,Munter^[16]和Meister^[17]认为可以建立坡度与危险度之间的关系,并建议坡度 $>40^\circ$ 的地区不再适合用作滑雪场。

坡的形态对雪崩的形成和激发有着非常显著的影响。目前虽然还没有掌握微地形对雪崩影响的规律^[18],但雪崩的形成区一般都位于凹型坡内^[19-20],而凸形坡和鼓丘作为应力集中的地区,一般会促使雪崩的形成。

数字地形模型(DTM)和地理信息系统(GIS)的使用,使得潜在雪崩形成区的辨识成为可能。通过与其他沟槽雪崩历史记录的比照,还可以对这些沟槽雪崩的性质以及运动学特征进行计算^[21-22]。因为雪崩形成区坡度计算模型的分辨率一般在 20 m 以上,因而对雪崩预测有重要作用的微地形不能在模型中得到很好的体现。最早利用这种方法进行雪崩形成区区划的是法国建立的雪崩专家系统^[23]。但到目前为止,雪崩形成区的识别仅局限在坡度 $30^\circ\sim 50^\circ$,以及无森林植被覆盖的地区。为了提高GIS对雪崩形成区的辨识水平,一些其他的地形参数也必须加以考虑,如:横断面的坡形态(凹凸)、坡向以及与山脊的距离等。Maggioni等^[24]在瑞士达沃斯的研究发现,坡面为凹形且坡度为 36° 时,暴发雪崩的频率最高。

坡面的粗糙度对雪崩的形成也有显著的影响,其最主要的作用是影响连续性软弱层的形成。无雪的坡面一般需要 $0.3\sim 1\text{ m}$ 的降雪来平滑坡面。在分析新雪雪崩时,前期的降雪会显著减少引起新雪雪崩的临界雪量^[21]。当雪层较薄时,下垫面的粗糙度可以显著影响雪层的演化,在基岩出露或者有岩层覆盖的地表,较薄的雪层可以产生较大的温度梯度,并促使面状雪晶的形成,从而使雪层的稳定度下降^[25]。

坡面的植被也会对雪崩的形成产生影响。森林会显著减少雪崩的发生,当每公顷坡面树径 $>16\text{ cm}$ 的树木超过200株时,雪层会变得极不规则,雪崩一般不会发生^[26-28],这是因为树木的截留不仅妨碍了积雪中软弱层的形成,而且改变了暴风雪时新雪的沉降和再分配。McClung^[20]指出,断裂层厚度超过 1 m 的大型板状雪崩由于没有受到明显的植被干扰,其软弱层一般都呈现出连续的状态,雪板的宽度和长度可分别达到 10 m 和 $10\sim 20\text{ m}$ 。

1.2 气象因子

对雪崩能造成显著影响的气象因子主要是新降雪(新雪)、风和气温。

1.2.1 新雪

降雪量是大型灾难性新雪雪崩的最重要的预报因子以及划分这类雪崩危险度的重要指标^[29]。如果 3 d 新降雪厚度 $>1\text{ m}$,则暴发大型雪崩的危险极高。如果 3 d 新雪积累量在 $30\sim 50\text{ mm}$,则通常有可能会暴发一场自然雪崩。但是即使新雪量很大,一组雪崩沟槽暴发雪崩的概率也会低于 50% ^[30],说明仅凭新雪厚度一项指标还不足以预报新雪雪崩。

影响新雪雪崩的因素是降雪强度和密度,因为新降雪沉降的速率会影响雪层应力与雪层强度之间的平衡。如果新降雪的速率 $>2.5\text{ mm/h}$,则新降雪不足以快速的产生内聚力以增加自身的雪体强度。在降雪过程中存在着积雪由于降雪沉降引起的沿坡向向下的应力增加与雪体强度增加之间的较量,前者使雪体失稳,后者则增加雪层的稳定性。这种较量除与降雪强度有关外,还与新雪的密度有关^[31-32]。高的降雪强度易引发雪崩,而高密度的降雪则容易使新雪雪晶之间快速连结,从而增加雪体的强度以及雪层的稳定性。Jamison^[33]指出,海洋性气候下由于新雪密度大,新雪的密度是预测雪崩的重要因子。Mueller^[34]指出,一次降雪过程中新降雪密度的增加(即高密度降雪位于低密度雪层之上),新雪雪崩的暴发概率很大。

对于滑雪引发的雪崩,在一定的风速风向、气温以及地表状况下,不大的新雪厚度也容易因为人为因素的激发而产生^[16]。一般新雪厚度在 $10\sim 20\text{ cm}$ 时,滑雪引发的雪崩的概率较小,而当新雪厚度达到 $30\sim 50\text{ mm}$ 时,人为因素极易引发雪崩。

1.2.2 风

风是仅次于新降雪的对雪崩产生影响的气象因

子。风吹雪可以在一些地方以更快的速率沉降下来,而风速的变化使风吹雪形成的雪层在密度和硬度上都呈现很大的变化,也使雪层中的应力在某些局地聚集,从而增加雪层的不稳定性。de Quervain^[11]指出风吹雪相对于自然沉降的积雪更加破碎,因而风吹雪形成的雪层更容易发生雪崩; Meister^[35]通过研究风速与新降雪密度、气温等的关系,提出了相反的观点,即风吹雪形成的雪层硬度更大,粘滞性更好,雪层更不容易发生雪崩。无论是 de Quervain 还是 Meister,都未对风吹雪雪层的断裂力学性能进行分析。

很多模型模拟了风吹雪的侵蚀和堆积^[36-40],但就风吹雪对于雪崩的重要性而言,Lehning 等^[40]指出其中的 4 个过程值得重点研究:第一是陡峻地形的风场,第二是降雪过程中新雪的沉降规律,第三是沉降雪的再分配,第四是侵蚀和堆积区雪层各自的性质变化与发展规律。

就堆积而言,Gauer^[37]指出山脊两侧风吹雪的沉降性质具有很大的差异。由于存在湍流涡旋,使风吹雪在背风坡沉降下来,但这种涡旋只存在特定的风速和风向之下,对比背风坡和平地的风吹雪沉降,相同的风速条件下,背风坡要比平地的积雪多 20%~30%,局地的变化对沉降量的影响也很大。Doorschot 等^[36]的研究显示,接近山脊的背风坡风吹雪的沉降量要比山脊平坦的区域多 4 倍。Fohn^[41]和 Meister^[42]提出了背风坡风吹雪沉降的经验公式,在平均风速 $< 20 \text{ m/s}$ 时,背风坡日风吹雪的厚度与日平均风速的 3 次方成正比。

就风吹雪的侵蚀及风雪流起动而言,相对于山势平缓的地区,山势陡峻地区风吹雪的悬移要比跃移重要得多,这主要与山势陡峻地区风速向上的分量更大有关^[37]。Gauer^[38]的研究指出,随着风速的增大,风吹雪的通量也增大;但当风速增大到一定值时,风吹雪的通量反而会下降,风吹雪与风速的幂函数关系由 4 次方变为 2 次方,研究证明风吹雪的通量值在风速 $20 \sim 25 \text{ m/s}$ 时达到极值。Doorschot 等^[36]研究也有相似的结果,在风速较小时由于近地层空气中的雪容易达到饱和状态,从而妨碍了风吹雪的起动,不利于风吹雪的产生,这种情况在降雪时尤为明显,在降雪时空气中雪的饱和度明显偏大,因而积雪的再分配受到抑制,降雪大多在局地沉降。

目前许多模型在模拟风吹雪影响下山脊线两侧雪的厚度时,结果都不甚理想,这也给风吹雪雪层雪

崩的预测增加了不确定性^[40]。当前判断风吹雪雪层厚度时,最主要的方法还是借助于 GIS 的经验方法^[43-44],有经验的雪崩预报员也可以通过分析雪崩的移动距离和雪崩量,判断雪崩形成区风吹雪的厚度和质量。Lehning 等^[39-40]和 Hirashima^[45]利用模拟的雪面状况以及山脊部的风速,建立了一种可以表征典型背风坡的风雪流指数。表层积雪的可流动性(snow mobility)除与风速有关外,还与雪晶的粒径以及雪晶之间的胶结有关。

1.2.3 气温

气温对雪崩的形成具有决定性的作用,特别是在没有降雪的前提下气温对雪崩作用尤为明显。因为气温能通过不同的方式影响雪层的稳定性,因而气温对雪崩的作用机理非常复杂,比如暴雪过程中或者暴雪后的升温对积雪的稳定性有很大影响。因为雪的热传导性较差,气温升高主要影响的是表面的雪层,位于下部的软弱层并未受到影响^[46]。快速的升温降低了降雪的程度,但雪板之下的软弱层强度并未受影响,引起雪层不稳定的主要原因是升温使雪层表面沿坡面向下的形变增加,从而增加了雪板与其下部软弱层之间的应变及其应变率。

作为一种特殊的材料,雪的各种力学性质高度依赖于温度的变化^[47]。McClung 和 Schweizer^[48]总结了气温对积雪硬度(hardness)、断裂韧性(failure toughness)和抗剪强度(shear strength)的影响(表 1)。受温度影响的雪的物理性质分为相互对立的两类: A. 变质和蠕变,其中积雪变质依赖于气温、雪体的温度梯度; B. 力学性质和积雪强度。力学性质是指除变质以外的其他性质,如积雪硬度(雪层抵抗表面压力的能力)、刚度(积雪抵抗弹性变形的能力)、韧性(积雪抵抗塑性变形及断裂时吸收能量的传播能力)。其中 A 中的物理性质变化对温度的反应具有滞后性,而 B 式中力学性质变化具有即时性。

Schweizer^[49]在低温实验室对野外取得的雪样进行了不同温度的抗剪强度的测量,发现雪体刚度(初始切线模量)对温度的变化最为敏感。Camponovo 等^[50]、Schweizer 等^[51]利用 Bohlin CVR50 流变仪对雪体的粘弹性进行了测量,发现动剪模量(dynamic shear modulus)在 $-20 \sim 6^\circ\text{C}$ 之间与绝对温度的倒数成线性的负相关关系(阿伦尼乌斯关系),而当温度从 -6°C 升到 0°C 时,模量的下降速度加剧。动剪模量对于雪层负荷(如滑雪者)破坏软弱层

表 1 气温升高对积雪稳定度的影响
Tab. 1 Influence of rise of air temperature on snow stability

雪体性质或过程	升温时变化	响应时间	稳定度变化
雪体刚度或硬度	显著减小	立即	减小
韧性	增加	立即	减小
软弱层强度/交界面	轻微减小	立即	减小
胶结的形成(变质)	胶结形成的速度增加,雪体强度增加	延迟	增大
蠕变	增大蠕变的速率并促使雪层沉淀及密实化,进而增加雪体的硬度和强度	延迟	增大
雪层温度(温度梯度)	减小雪体温度梯度,改变雪晶类型,增强雪体强度	延迟	增加

以及断裂层的传播及扩大,有非常重要的作用。温度越低,动剪模量越大,滑雪者对雪层下部的软弱层的破坏越小。当温度升高时,雪体刚度(抗弹性形变的能力)变小,雪层强度减小,但是雪层的韧性增强,也就是说雪体在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力增强了。比如,对于湿雪雪层而言,滑雪者的局地负荷增加或者用炸药爆破排险并不能激发雪崩的发生。

辐射也能对雪层的稳定性产生影响,辐射的作用在于能快速有效的加热雪层。雪层模型以及高质量的观测数据的应用,使我们能够了解辐射对雪层、雪层表面软弱层的影响机理^[52-53]。任何时刻不同坡度、坡向、海拔的热量平衡也能通过这些模型进行计算^[54]。12 月和 1 月期间阴坡以及晴朗的天气条件下,热量平衡主要以雪面的向上的长波辐射为主,这种作用显著影响了雪面的升温 and 雪层的稳定性,但是目前的雪崩预测还没有考虑到这些方面^[55]。

1.3 积雪

积雪是板状雪崩形成的最关键的因子。自然形成的积雪往往像三明治一样呈现明显的层状,每一层都对应着一次降雪或者风吹雪事件。任意两个雪层的界面都是上层雪层在未覆盖下层雪层时与空气的接触面,因而会受到当时气象因子的影响,各个雪层在雪晶类型、粒径和硬度等物理力学性质都会有自己的特点。一般雪层在出现这两种状况时雪崩有可能发生:一是两个雪层没有很好的结合,两个雪层之间会形成雪崩的滑动面;第二是某一雪层的强度比其紧邻的上面和下面雪层的强度都要弱,形成了所谓的软弱层(weak layer)。

如果雪层中没有软弱层,再多的新雪或者风吹雪堆积,再高的温度也不能对雪层的稳定性产生影响。因此雪层的软弱层是雪崩发生的必要条件,而非充分条件。软弱层可分为连续性雪晶的软弱层和

非连续性雪晶的软弱层。

1.3.1 雪晶类型

1. 连续性雪晶(persistent weak layer)

雪降落于地表以后,由于外界温度条件不同,雪晶变化的过程也存在明显的差异。当温度梯度 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,温度梯度引发的水汽迁移使空气中的水汽在雪晶表面凝华,同时下部的水汽在雪晶的底面,小雪晶消失,大雪晶生长形成面状雪晶,这即是引起雪崩暴发的连续性雪晶。

软弱层中的雪晶中面状雪晶(faceted crystal)占了很大比例。面状雪晶主要包括表霜(surface hoar,图 1)和深霜(depth hoar)等,这些雪晶可以在雪层中存在一个月甚至更长时间,因此 Schweizer 等^[5]称之为连续性雪晶。面状雪晶具有各向异性,不能在沉积过程中增加雪层强度,不易与相邻的雪层胶结,具有低的断裂韧性、抗剪能力差、高负荷下不容易胶结的特性,常常成为雪崩形成时的软弱层。连续性雪晶的形成主要与温度梯度有关。Fohn^[56]和 Hachikubo^[57]测量和模拟了表霜的形成过程,表霜以及近表层雪晶的面状化大多与雪层的温度梯度有关。向上的长波辐射使雪层表面温度降低,而空气温度较高,从而形成上高下低的反向温度梯度,雪面的低温使水汽压处于过饱和状态,水汽向雪面凝华,进而促使雪层表面以及近表层雪晶的重结晶及面状化。McClung 等^[58]研究表明,表霜形成的温度梯度在 $100\sim300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。当雪层中温度梯度达到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,雪晶粒径的生长速度可以达到 $0.1\text{ mm}/\text{d}$ 。表霜一般形成于寒冷晴朗的夜晚,风速也不应太大,强烈的空气流动会破坏空气与雪面的温度梯度,不利于水汽在雪面的凝华。

Birkeland^[59]指出,除表霜形成之外,近表层雪晶的面状化过程是形成雪层软弱层的最活跃的过程。面状化过程是近雪层表面在温度梯度(下高上

低)作用之下,雪层中水汽由雪层下部较暖的雪层向温度较低的近雪层表面较冷的部分(长波辐射降温所致)迁移的过程。近雪层表面由于水汽的过饱和和雪晶会生长而形成面状雪晶以及软弱层。

如果由于某些原因较冷雪层出现在雪层中央时,雪层的软弱层称为深霜,在地面与雪层之间的下高上低的正向温度梯度下,雪层内水汽会在较冷雪层出现雪晶凝华及重结晶,雪层下层高温处升华,上层低温处凝华,从而形成软弱的深霜层,形成深霜的温度梯度一般在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上。



图 1 表霜形态

Fig. 1 Surface hoar

Schweizer 等^[5]的统计结果显示,186 次由滑雪者激发的雪崩中,有 70% 的雪崩的软弱层由连续性雪晶构成。雪崩断裂的剖面的分析显示,软弱层的粒径与硬度与周围的其他雪层存在明显差异,因此可以利用雪层的这些性质及其他雪层试验把雪层的稳定性划分为 5 个等级^[60],并可以利用这些性质对雪崩的发生进行预测^[61]。对比稳定雪层与不稳定雪层,不稳定雪层中粒度及硬度差异都要比稳定雪层的大^[62]。

2. 非连续性雪晶(non-persistent weak layer)

当温度梯度 $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,大的表面积与体积比会使雪晶处于不平衡状态,因而雪晶的六角会迅速发生分解,随后分解的雪晶会逐渐圆化^[63]。整个雪晶的变化除了与温度梯度有关外,受气温的影响也很大,气温高时圆化的过程较快,雪晶会快速由凹状变为凸状,雪层的强度(内聚力)也会因雪晶之间连结的建立而增强。

软弱层还包括非连续性雪晶,这主要是指新雪。新降雪强度很弱,与其他雪层相比,密度明显偏小,

与其下层的雪晶连结尚未建立,因此稳定度较差。但当新雪被掩埋数天以后,雪层会很快与其他雪层融合,稳定度增加,因此被称为非连续性雪晶。由非连续性雪晶构成软弱层的雪崩一般对滑雪者的危害较小。

1.3.2 积雪的力学性质

雪体强度方面,Jamieson 等^[64-66]对照了由滑雪诱发雪崩以及自然雪崩的软弱层雪体强度(包括抗剪强度以及抗张强度),它们之间的雪体强度并没有明显的差异。Jamieson 等^[67]提出了一种概念模型,来解释被新雪掩埋的表霜的雪体强度变化与雪晶之间的连结,以及雪晶机械组成之间的关系。Jamieson 等^[65]指出,掩埋表霜的雪体强度自被新雪掩埋之日起,大约每天可以增加 100 Pa 。Jamieson 等^[68]研究表明,某一雪层的抗剪强度与其上的积雪负荷高度相关。软弱层雪体强度的增大过程,主要是在覆盖于其上积雪负荷下雪晶之间的烧结^[69],在一定的负荷压力之下,雪晶之间连结的规模和数量都增加了。强降雪能快速增加雪层的负荷,但快速的负荷增加并不能瞬间增加雪层稳定性。雪晶之间连结的建立需要时间,其强度的增加往往会滞后于强降雪负荷的增加^[70]。

雪板后缘的脆性断裂及断裂的传播是雪板雪崩的重要组成部分,而脆性断裂和积雪的抗张强度关系密切。抗张强度高度依赖于积雪的密度,不同外界条件下积雪密度变化很大,因而其抗张强度也表现出极大的变率^[64]。Kirchner^[71]指出,积雪质量轻、强度低的特性证明其是世界上脆性最强的物质之一,低温实验室的悬臂梁试验可以用来测算雪板的张力和软弱层的剪切力韧性^[72-73]。Johnson^[74]研究同类的试验发现,相对于陡峻的雪崩形成区而言,发生在坡度较缓地形上的雪崩雪板更加密实,厚度和硬度更大。

1.3.3 积雪及雪体

积雪通常都包含很多的雪层,每一个雪层都与当时的降雪、消融、风的侵蚀和堆积以及雪的变质作用相对应,因而每一个雪层都会与其上下的雪层呈现出不同的特征。研究积雪雪层特征及其变化规律,对于准确的预测雪崩有非常重要的意义。Durand 等^[54]在考虑坡度坡向的基础上,利用简单的雪层演化模型来预测雪层的稳定性。Lehning 等^[39-40]以雪层的微结构变化为基础开发的 SNOW-PACK 模型,可以对雪层的演化进行拟合。Hirashi-

ma 等^[45]对 SNOWPACK 进行了改进,并对日本新潟县津南地区的积雪的稳定度进行了模拟,取得不错的结果,但该模型对某些雪晶类型以及两个雪层之间抗剪强度方面仍存在很大的误差。总体来说,积雪剖面的演化可以通过气象因子以及雪层的厚度、密度以及温度得到很好的模拟。如果有雪层的观测作为边界条件,利用雪晶的类型和级配雪层,可以对积雪各层的演化规律进行准确的计算。但是引起雪崩的主要因子是积雪中的软弱层,利用气象因子以及积雪表面物质平衡的计算,无法对雪层中软弱层的变化规律进行准确的模拟。

2 雪崩的发生机理

雪崩机理的研究主要集中在危害较大的板状雪崩。板状雪崩形成区可包括后缘、侧缘和前缘三部分(图2),作用于雪板的力有4种:1)雪板后缘的张力;2)作用于雪板两个侧缘的力,主要是剪切力;3)雪板前缘对雪板的挤压力;4)雪板下部雪层对雪板阻滞的力。当这4种力大于积雪自身的强度时,雪崩便暴发了^[12]。显而易见,雪板与其下部雪层之间剪切力的变化是雪层间破裂产生的主要原因。

由于板状雪崩的危险性,到目前为止还没有对这类雪崩的发生过程近距离的直接观测。但一些间接的观测可以帮助我们了解雪崩发生的基本过程,比如用炸药激发的雪崩发生可以利用录像或者影音设备获得。

雪板雪崩的形成可分为三个步骤。

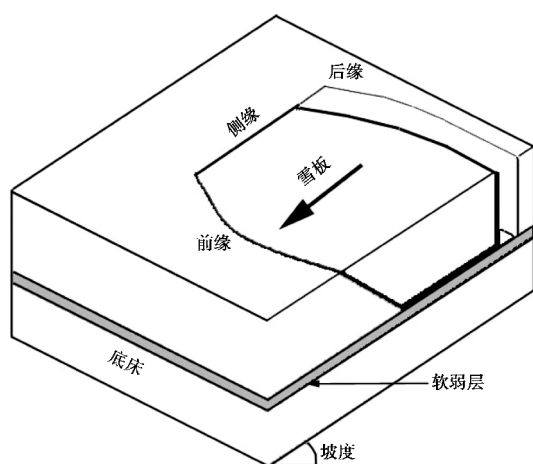


图2 雪板雪崩的主要构成^[4]

Fig.2 Slab avalanche nomenclature^[4]

2.1 软弱层破裂的产生

许多破裂模型(如 Bader 等的模型^[75])都有一个先决条件,即在原本均匀分布的积雪中出现了软弱层。软弱层的抗剪强度不足以抵抗其上部雪层负荷产生的剪切应力,形成了所谓的雪层强度亏损带以及局部破裂现象。McClung 等^[58]也强调了软弱层中雪体低强度区的作用,但目前的研究除雪面负荷增加而产生的应变软化还无法解释亏损带剪切应力集中的现象。而 Schweizer^[76]认为破裂属于微观过程,雪晶细微结构的改变也非常重要,它可以使雪和冰之间连结断裂。人为因素和自然因素都可以激发雪层中破裂的产生,人为因素包括滑雪者以及雪崩排险时的炸药爆炸;自然因素包括降雪事件和风吹雪的堆积。绝大多数的干雪板状雪崩都是由于极端的降雪^[58]。一旦破裂达到一定规模,则破裂在没有其他外力的作用下会向其相邻的位置迅速传播并扩大。Johnson 等^[77]的研究显示,在平缓坡度下测试其传播的速度大约为 $20 \text{ m/s} (\pm 2 \text{ m/s})$ 。

2.2 软弱层破裂的扩大

如果破裂尺寸达到一定的规模,不需要任何其他负荷破裂就可以向软弱层中的所有方向辐射传播,就如同石头扔进水面产生的涟漪一样。破裂的临界尺寸一般 $10 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$,如滑雪活动瞬间增加雪面荷载而产生的破裂, 10 cm 就有可能快速传播,但由自然降雪产生的破裂其自由传播的空间尺度有可能达到 10 m ^[76]。van Herwijnen 等^[78]利用高速摄像机研究破裂传播的方向,发现破裂除在平行于坡面方向的扩大以外,还存在垂直于坡面方向的塌陷,平行于坡面方向的位移与坡度有关,而垂直于坡面方向传播的位移介于 $0.1 \sim 1.7 \text{ cm}$ 之间,位移的大小与坡度无关。

2.3 断裂的出现

雪板雪崩的暴发需要的断裂包括4个方面:雪板后缘的张断裂、两个侧缘的剪切断裂、雪板前缘的挤压断裂以及雪板与其下部雪层的剪切断裂(图2)。3种断裂出现的次序及对雪崩暴发的作用目前还存在很大的争论。Haeferi^[79]认为,雪崩后缘的张断裂是最先出现而且最重要的断裂。Bradley^[80]则强调了雪崩前缘挤压断裂对于雪崩的贡献。20世纪70年代以后,普遍的观点认为雪板下部软弱层抗剪强度的减小是断裂出现的最根本原因^[81],在雪板失去剪切支撑后,雪板后缘的张性断裂首先出现,其次是雪板与其下部软弱层的剪切断裂。

3 结论及建议

3.1 结论

1. 20 世纪 90 年代以后雪崩的研究取得了很大的进展

雪崩的发生与积雪特殊的性质关系密切,积雪在不同温度、水分以及荷载的情况下可表现出不同的粘性、弹性等力学性质以及雪层强度,也决定了雪崩与坡度、雪层以及气象因子之间有着非常密切的关系。

2. 雪崩的形成区都有一定的特征

形成区坡度一般介于 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。坡度小,雪崩发生的频率较小,但规模较大。地面的粗糙度也会对雪崩的启动产生显著影响,森林植被对雪崩的暴发有显著的阻碍作用。

3. 气象因子对雪崩的形成有着非常重要的影响

新雪的降雪量及降雪强度都是导致的雪崩的重要因素。降雪强度能显著影响雪晶之间的连结和雪层的应变率,进而影响积雪的强度。风吹雪通过对积雪进行再分配来影响雪崩,迎风坡侵蚀而背风坡沉降,但风吹雪通量和风速并没有显著的正相关关系,这主要与空气中风吹雪的饱和度有关。温度对雪崩的影响比较复杂,气温升高可以降低雪体强度,但也能增加雪体的韧性。

4. 雪体中的连续性雪晶对雪崩影响很大

连续性雪晶往往形成雪体中的软弱层,特别是表霜在被后续降雪埋藏后,往往会形成雪崩的滑动面。

5. 雪崩形成主要包括 3 个步骤

3 个步骤为破裂的产生、传播及断裂的出现,其中雪体中抗剪强度的不均匀分布,对雪体破裂的产生和扩大有很重要的贡献。

3.2 建议

目前我国在雪崩方面的研究工作相对偏少,不能满足滑雪休闲以及公路交通安全的需要。就围绕雪崩的影响因素,我们认为可以在以下方面开展工作。

1. 积雪力学性质及其时空变化规律

不同地形及气象条件对积雪各雪层的力学性质有很大影响^[82],因此,在低温条件下研究温度和水汽梯度对连续性雪晶形成的影响一直是雪崩研究的重点之一。

降雪自降落地面开始,其力学性质,如雪晶类型、粒径、硬度、温度、密度、厚度以及含水量都在发生变化,即使没有后续的降雪,其力学性质的某些变化也会导致雪崩发生。就某一个雪崩的形成区而言,也存在阴坡和阳坡、迎风坡和背风坡的差异,这些差异也导致了在同一沟道内积雪力学性质的巨大变化,积雪力学性质的时空会对雪崩的形成产生很大的影响。

2. 新雪雪崩对不同性质雪板的敏感性

新雪雪崩高度依赖于降雪量、降雪强度和老雪层的性质。新雪雪崩作为我国北方滑雪场普遍存在雪崩类型,研究在不同下垫面新雪的稳定性是可行的研究内容。作为 2022 年冬奥会的举办地,张家口滑雪场的新雪雪崩值得特别关注。

3. 滑雪对雪层稳定度的影响

根据 McClung 的统计,超过 80% 的滑雪场雪崩都由人为因素引起。滑雪场的积雪一般为干雪,滑雪者通常会在 $0.03 \sim 0.3$ s 的时间内向积雪施加正压力,其作用的面积通常不会超过 1 m^2 ;当积雪为 50 cm 厚度的新雪时,滑雪者通常会施加额外的大约 0.5 kPa 的压力;而当新雪超过 1 m 时,滑雪者对雪层的额外压力很小。滑雪者对积雪的作用机理是触发新雪的脆性断裂并促使断裂在雪层中传播,进而引发雪崩。对于不同性质、类型积雪形成的雪崩,滑雪者对雪崩激发作用的强弱是不同的。因而围绕张家口滑雪场,我们很有必要对滑雪者影响雪层稳定性时积雪的厚度中位数、积雪雪晶类型和粒径差异、硬度、温度进行研究。

4. 雪崩的预测预警研究

因为雪崩灾害救援的黄金时间只有 30 min,因此灾害暴发后的致死率很高,所以做好雪崩的预测预警是滑雪场安全方面首先要考虑的问题。雪崩预测的指标包括 3 级:第一级指标是雪层稳定度的最直接信息,与雪崩的关系最为密切,主要包括:某一沟槽雪崩的历史记录、雪层力学性质、稳定度试验[常用的是滑动试验(Rutschblock test)和坍塌实验(Collapse test)]以及积雪中的裂隙。第二级指标信息与雪崩的关系不如第一级指标密切,主要包括积雪剖面、雪层温度、雪晶粒径和类型、密度硬度等。因为第一级、第二级指标需要近距离接触潜在雪崩的积雪,观测存在一定的危险性,因此这些信息一般不容易得到。最容易得到的信息属于第三级信息,主要是气象信息,包括降水、风速风向、气温、辐射、

天气预报等。第三级信息是和雪崩有关的间接信息,也是雪崩预测中经常用到的信息。利用第三级信息和部分第一和第二级信息,运用最近邻方法(nearest neighbor)、判别分析以及决策树方法(classification trees)可以对雪崩发生的可能性进行预测。

致谢:感谢武警水电九支队首长在论文写作过程中给予的支持和帮助。

参考文献(References)

- [1] 沈永平,王国亚,魏文寿,等. 冰雪灾害[M]. 北京:气象出版社, 2006: 53-75 [Shen Yongping, Wang Gyuoya, Wei Wenshou, et al. Snow and ice disasters [M]. Beijing: meteorological Press. 2006: 53-75]
- [2] Voight B. Snow-Avalanche Hazards and Mitigations in the United States [M]. The National Academies Press, Washington D C, 1990: 84
- [3] Perla R I. Avalanche release, motion and impact [G]// Colbeck S C. Dynamics of Snow and Ice Masses, Academic. San Diego, California. 1980: 397-462
- [4] Perla R. Slab avalanche measurements [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14: 206-213
- [5] Schweizer J, Jamieson J B. Snow cover properties for skier triggering of avalanches [J]. Cold Regions Science and Technology, 2001, 33: 207-221
- [6] Schweizer J, Jamieson J B, Schneebeli M. Snow avalanche formation [J]. Reviews of Geophysics, 2003, 41(4), doi: 10.1029/2002RG000123
- [7] Anderson T L. Fracture mechanics: Fundamentals and applications [M]. CRC Press, Boca Raton, Florida. 1995: 688
- [8] Narita H. Mechanical behavior and structure of snow under uniaxial tensile stress [J]. Journal of Glaciology, 1980, 26(94): 275-282
- [9] 王彦龙. 中国雪崩研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. [Wang Yanlong, Avalanche study in China, [M]. Beijing: Ocean Press. 1992.]
- [10] German R M. Sintering theory and practice [M]. John Wiley and Sons Inc. New York, U. S. A. 1996.
- [11] Atwater M M. Snow avalanches [J]. Scientific American. 1954, 190(1): 26-31
- [12] de Quervain M R. Problems of avalanche research [G]// Symposium at Davos 1965 - Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches. IAHS Publication, 1966, 69: 1-8
- [13] Perla R. On contributory factors in avalanche hazard evaluation [J]. Canadian geotechnical journal, 1970, 7: 414-419
- [14] Goddard P. Avalanche awareness in the New Zealand Backcountry. New Zealand Alpine Club [M]. Christchurch, 2008.
- [15] Ammann W. Der Lawinenwinter 1999 - Ereignisanalyse [G]// Swiss Fed. Inst. for Snow and Avalanche Reserch. SLF, Davos, Switzerland, 2000: 588
- [16] Munter W. 3x3 Lawinen - Entscheiden in kritischen Situationen [M]. Agentur Pohl und Schellhammer, Garmisch Partenkirchen, Germany, 1997: 220
- [17] Meister R. Country-wide avalanche warning in Switzerland [G]// Proceedings of the International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, U. S. A. Int. Snow Sci. Workshop 1994 Organ. Committee. 1995: 58-71
- [18] Bozhinskiy A N, K S. Losyev. The Fundamentals of Avalanche Science [G]// Mitt. Eidg. Inst. Schnee Lawinenforsch. SLF, Eidg. Inst. fur Schnee und Lawinenforsch. SLF, Davos, Switzerland, 1998: 280
- [19] Gleason J A. Terrain parameters of avalanche starting zones and their effect on avalanche frequency [G]// Proceedings of the International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, U. S. A. 1995: 393-404
- [20] McClung D M. Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation by logging [J]. Annals of Glaciology, 2001, 32: 223-229
- [21] Stoffel A, Meister R, Schweizer J. Spatial characteristics of avalanche activity in an alpine valley - A GIS approach [J]. Annals of Glaciology, 1998, 26: 329-336
- [22] Gruber U, Bartelt P, Haefner H. Avalanche hazard mapping using numerical Voellmy - fluid models [G]// in 25 Years of Snow Avalanche Research, Voss, Norway, Hestnes E, Geotech. Inst., Oslo, Norway, 1998: 117-121
- [23] Buisson L, Charlier C. Avalanche starting-zone analysis by use of knowledge-based system [J]. Annals of Glaciology, 1989, 13: 27-30
- [24] Maggioni M, Gruber U. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency [G]// Proceedings of the ISSW 2002, Stevens J R. Ministry of Transportations, Snow Avalanche Programs, Victoria, B C, Canada, 2002: 97-103
- [25] Arons E M, Colbeck S C, Gray J. Depth hoar growth rates near a rocky outcrop [J]. Journal of Glaciology, 1998, 44(148): 477-484
- [26] Frey W, Frutiger H, Good W. Openings in the forest caused by forest replenishment and their influence on avalanche danger [G]// Fujimori T, M. Kimura. Human Impacts and Management of Mountain Forests, For and Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki, Japan, 1987: 223-238
- [27] Gubler H, Rychetnik J. Effects of forests near the timberline on avalanche formation [G]// H. Bergmann et al. Symposium at Vienna 1991 - Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas, IAHS Publ. 1991, 205: 19-37
- [28] Schneebeli M, Meyer-Grass M. Avalanche starting zones below the timber line - Structure of forest [G]// in Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, Colo. Avalanche Inf. Cent., Denver, Colorado, 1993: 176-181
- [29] Fohn P, Stoffel M, Bartelt P. Formation and forecasting of large (catastrophic) new snow avalanches [G]// Stevens J R Proceedings of the ISSW 2002, Int. Snow Sci. Workshop Can., B C Ministry of Transportation, Snow Avalanche Programs, Victoria, B C Canada, 2002: 141-148
- [30] Schaer M. Avalanche activity during major avalanche events - A case study for hydroelectric reservoirs [G]// Sivardiere F. Les apports de la recherche scientifique a la securite neige, glace et ava-

- lanche, Actes de Colloque, Chamonix, France, Grenoble, France, 1995: 133 – 138
- [31] Conway H, Wilbour C. Evolution of snow slope stability during storms [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 30: 67 – 77
- [32] Endo, Y. Time variation of stability index in new snow on slopes [G]// *Proceedings of the Japan – U. S. Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control*, Tsukuba, Japan, National Research Inst. for Earth Science. and Disaster Prevention Science. and Technology Agency, Tsukuba, Japan, 1991: 85 – 94
- [33] Jamieson J B. Avalanche prediction for persistent snow slabs [D]. Dep. of Civ. Eng. Univ. of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 1995: 258
- [34] Mueller M. Snow stability trends at Wolf Creek Pass, Colorado [G]// *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana. U. S. A., Montana. State University, Bozeman*, 2001: 147 – 152
- [35] Meister R. Density of new snow and its dependence on air temperature and wind [G]// *Sevruck B. Correction of Precipitation Measurements, Zurcher Geographische Schriften, Geogr. Inst., Eidg. Hochsch. Zurich, Zurich, Switzerland*, 1985: 73 – 79
- [36] Doorschot J, Raderschall N, Lehning M. Measurements and one – dimensional model calculations of snow transport over a mountain ridge [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 32: 153 – 158
- [37] Gauer P. Blowing and Drifting Snow in Alpine Terrain [G]// *A Physically – Based Numerical Model and Related Field Measurements, Mitt. Eidg. Inst. Schnee Lawinenforsch, Swiss Fed. Inst. for Snow and Avalanche Res. SLF, Davos, Switzerland*, 1999, 58: 128
- [38] Gauer P. Numerical modeling of blowing and drifting snow in alpine terrain [J]. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(156): 97 – 110
- [39] Lehning, M, Doorschot J, Bartelt P. A snow drift index based on SNOWPACK model calculations [J]. *Annals of Glaciology*, 2000, 31: 382 – 386
- [40] Lehning M, Doorschot J, Raderschall N. Combining snow drift and SNOWPACK models to estimate snow loading in avalanche slopes. *Snow Engineering – Recent Advances and Developments* [G]// *Hjorth – Hansen E. et al. Proceedings of the Fourth International Conference, Trondheim, Norway, Balkema, Brookfield, Vt.*, 2000: 113 – 122
- [41] Fohn P M B. Snow transport over mountain crests [J]. *Journal of Glaciology*, 1980, 26(94): 469 – 480
- [42] Meister R. Influence of strong winds on snow distribution and avalanche activity, *Annals of Glaciology*, 1989, 13: 195 – 201
- [43] Purves R S, Barton J S, Mackaness W A. The development of a rule based spatial model of wind transport and deposition of snow [J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 26: 197 – 202
- [44] Mases M, Buisson L. Frey W. Empirical model for snowdrift distribution in avalanche-starting zones [J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 26: 237 – 241
- [45] Hirashima H, Nishimura K, Yamaguchi N. Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 51: 191 – 203
- [46] Sturm M, Holmgren J, König M. The thermal conductivity of seasonal snow [J]. *Journal of Glaciology*, 1997, 43(143): 26 – 41
- [47] McClung D M. Effects of temperature on fracture in dry slab avalanche release [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B10): 21907 – 21920
- [48] McClung D M, Schweizer J. Skier triggering snow temperatures and the stability index for dry slab avalanche initiation [J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(150): 190 – 200
- [49] Schweizer J. Laboratory experiments on shear failure of snow [J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 26: 97 – 102
- [50] Camponovo C, Schweizer J. Rheological measurements of the viscoelastic properties of snow [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 32: 44 – 50
- [51] Schweizer J, Camponovo C. The temperature dependence of the effective elastic shear modulus of snow [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 35: 55 – 64
- [52] Bader H, Weilenmann P. Modeling temperature distribution, energy and mass flow in a (phase-changing) snowpack. I. Model and case studies [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1992, 20: 157 – 181
- [53] Brun E, Martin E, Simon V. An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting [J]. *Journal of Glaciology*, 1989, 35(121): 333 – 342
- [54] Durand Y, Giraud G, Brun E et al. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting [J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(151): 469 – 484
- [55] Fierz C, Pluss C, Martin E. Modelling the snow cover in a complex Alpine topography [J]. *Annals of Glaciology*, 1997, 25: 312 – 316
- [56] Fohn, P M B. Simulation of surface-hoar layers for snowcover models [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 32: 19 – 26
- [57] Hachikubo A. Numerical modelling of sublimation on snow and comparison with field measurements [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 32: 27 – 32
- [58] McClung D M, Schaerer P. *The Avalanche Handbook* [M]. 3rd ed. The Mountaineers Books, Seattle. 2006.
- [59] Birkeland K W. Terminology and predominant processes associated with the formation of weak layers of near-surface faceted crystals in the mountain snowpack [J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 1998, 30(2): 193 – 199
- [60] Schweizer J, Wiesinger T. Snow profile interpretation for stability evaluation [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2001, 33: 189 – 188
- [61] Schweizer J, Jamieson J B. A threshold sum approach to stability evaluation of manual snow profiles [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 47: 50 – 59
- [62] Schweizer J, Jamieson J B. Snowpack properties for snow profile interpretation [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, 37, 233 – 241
- [63] Akitaya. *Studies on depth hoar* [M] *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, 1974: 42 – 48

- [64] Jamieson J B , Johnston C D. In - situ tensile tests of snowpack layers [J]. *Journal of Glaciology* ,1990 ,36(122) : 102 - 106
- [65] Jamieson J B , Johnston C D. Snowpack factors associated with strength changes of buried surface hoar layers [J]. *Cold Regions Science and Technology* ,1999 ,30: 19 - 34
- [66] Jamieson J B , Johnston C D. Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers[J]. *Annals of Glaciology* 2001 ,32: 59 - 68
- [67] Jamieson J B , Schweizer J. Texture and strength changes of buried surface hoar layers with implications for dry snow - slab avalanche release [J]. *Journal of Glaciology* ,2000 ,46(152) : 151 - 160
- [68] Jamieson J B , Geldsetzer T , Stethem C. Forecasting for deep slab avalanches [J]. *Cold Regions Science and Technology* ,2001 ,33: 275 - 290
- [69] Gubler H. Strength of bonds between ice grains after short contact times [J]. *Journal of Glaciology* ,1982 ,28(100) : 457 - 473
- [70] Chalmers T S. Forecasting shear strength and skier - triggered avalanches for buried surface hoar layers [D]. M. S. thesis , Univ. of Calgary , Calgary , Alberta , Canada. 2001: 109
- [71] Kirchner H , Michot G , Suzuki T. Fracture toughness of snow in tension [J]. *Philosophical Magazine A* ,2000 ,80(5) : 1265 - 1272
- [72] McClung D M , Schweizer J. Fracture toughness of dry snow slab avalanches from field measurements [J]. *Journal of geophysics Research* ,2006 ,111 , F04008 , doi: 10. 1029/2005JF000403
- [73] Kirchner H , Michot G. Schweizer J. Fracture toughness of snow in shear and tension [J]. *Scripta Materialia* ,2002 ,46(6) : 425 - 429
- [74] Johnson B C. Remotely triggered slab avalanches [D]. M. S. thesis , Dep. of Civ. Eng. Univ. of Calgary , Calgary , Alberta , Canada. 2000: 98
- [75] Bader H , Salm B. On the mechanics of snow slab release [J]. *Cold Regions Science and Technology* ,1990 ,17: 287 - 299
- [76] Schweizer J. Review of dry snow slab avalanche release [J]. *Cold Regions Science and Technology* ,1999 ,30: 43 - 57
- [77] Johnson B C , Jamieson J B , Stewart R R. Seismic measurement of fracture speed in a weak snowpack layer [J]. *Cold Regions Science and Technology* ,2004 ,40(1 - 2) : 41 - 45
- [78] van Herwijnen A , Jamieson B. High - speed photography of fractures in weak snowpack layers [J]. *Cold Regions Science and Technology* ,2005 ,43: 71 - 82
- [79] Haefeli R. Some mechanical aspects on the formation of avalanches [J]. *Physics of Snow and Ice Conference proceedings* ,1967 ,1 (2) : 1199 - 1213
- [80] Bradley C. The location and timing of deep slab avalanches [J]. *Journal of Glaciology* ,1970 ,9(56) : 253 - 261
- [81] Perla R , Lachapelle E. A theory of snow slab failure [J]. *Journal of Geophysics research* ,1970 ,75: 7619 - 7626
- [82] Feick , S , Kronholm K , Schweizer J. Field observations on spatial variability of surface hoar at the basin scale [J]. *Journal of Geophysical Research* 2007 ,112 (F2) . F02002. DOI: 10. 1029/2006JF000587

Research on the Formation Mechanism of Avalanche

WEN Linke¹ , XIANG Lingzhi² , CAI Yi³ , SU Fenghuan⁴ , YAN Zizhong³

(1. Department of Road Transport the Institute of Military Branches of Chinese Armed Police Force Beijing 102202 ,China;

2. Institute of Geotechnical Engineering Chongqing Jiao tong University Chongqing 400074 ,China;

3 . The 9th Branch of Hydroelectricity Troops of Chinese armed Police Force ,Chengdu 611136 ,China;

4. Institute of Mountain hazards and Environment ,CAS ,Chengdu 610041 ,China)

Abstract: Avalanche are a major natural hazard ,endangering human life and infrastructure in mountainous areas throughout the world ,as well as the ski and transportations in these regions. As an effective way of disaster mitigation ,avalanche forecasting is closely related to the formation factors as terrain ,meteorological factors and snowpack. the slope angle of starting zone lie between 30° to 45° ,terrain shape ,roughness and vegetative cover can also exert influence on avalanche. The main meteorological factors that usually influence avalanche include new snow ,wind and temperature. Among these factors ,high snowfall amount and intensity can induce new avalanche. Wind speed and direction determine the reaccumulation of snowpack; temperatures decide the mechanical properties of snow. Among the snow crystal forms ,the persistent forms play a critical role in avalanche formation. There are three fundamental step in avalanche formation: failure initiation ,failure self-propagating and weak layer fracture. During the formation of the avalanche ,the existence of shear deficit zone is extremely important.

Key words: snow; avalanche; snowpack failure