

# 高速远程滑坡 流体动力学理论的研究

胡厚田 等 著



西南交通大学出版社

# 高速远程滑坡 流体动力学理论的研究

胡厚田 刘涌江 著  
邢爱国 白志勇

国家自然科学基金资助研究项目  
(批准号 49872087)  
西南交通大学出版基金资助出版

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

## 内 容 简 介

大型高速远程滑坡规模大、速度快、滑程远、能量大、破坏力强、运动形式多样(滑动、飞行、流动等),具有明显的流体化特点。本书以云南头寨沟滑坡为原型,在现场详细调研的基础上,用流体动力学理论,通过滑带土孔隙水压力试验、玄武岩的物理力学试验和高速摩擦试验、大型风洞实验室滑坡凌空飞行的模型试验、滑坡岩体高速碰撞的模型试验,对高速远程滑坡的流体动力学理论进行了系统研究;对高速远程滑坡运动全过程进行了离散元数值模拟;用二相流理论对远程碎屑流运动进行了理论分析;对头寨沟滑坡全程运动进行了实例分析;初步构建了大型高速远程滑坡流体动力学理论研究体系。

全书共 10 章。在大型高速远程滑坡的流体动力学理论研究方面有所创新,得出了 20 点有益的结论,可供有关地质、工程地质、环境灾害地质研究者和高校师生参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

高速远程滑坡流体动力学理论的研究 / 胡厚田等著.  
成都:西南交通大学出版社,2003.5  
ISBN 7-81057-710-7

I. 高... II. 胡... III. 滑坡-流体动力学-理论研究 IV. P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 008768 号

---

### 高速远程滑坡流体动力学理论的研究

胡厚田 刘涌江 著  
邢爱国 白志勇

\*

责任编辑 刘莉东  
封面设计 肖勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码:610031 发行部电话:87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

西南交通大学印刷厂印刷

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9.875

字数:223千字 印数:1—500册

2003年5月第1版 2003年5月第1次印刷

ISBN 7-81057-710-7/P·006

定价:19.50元

## 序

高速远程滑坡规模巨大、发生突然、所造成的灾害严重。因而备受国内外众多地质、工程地质、环境灾害地质研究者的关注。自上世纪 30 年代初 A. Heim 关于瑞士阿尔卑斯山区 Elm 崩塌—碎屑流的研究论文发表以来,国外已有众多关于这种特殊地质现象研究的论著陆续发表。我国 1943 年曾发生阻断黄河数日的青海查纳滑坡—碎屑流,1983、1989、1991 年又相继在甘肃洒勒山、重庆市溪口和云南昭通头寨沟发生滑坡—碎屑流,造成数百人员伤亡。由于这些重大灾害事件的影响,使我国研究者对这种现象进行了深入研究,也有众多论著发表。对其危害性及形成、运动机制的认识也不断深化。这一特殊持续时间短暂的地质作用可分解为相继发生的高速滑(崩)落、滑(崩)落岩体的碎裂解体、碎裂解体岩块的流体化和快速流动三个过程,已成为多数研究者的共识。关于高速滑动机制,则有高势能向动能的突然转化,超孔隙水压力效应,气(或高温汽化蒸汽)垫效应等多种假说。关于高速碎屑流动,也有粉尘效应、解体块体间碰撞动量传递效应等假说。所有这些假说都是以某些实例现象分析为基础,通过推理和理论假设而构建的,缺乏必要的试验验证。胡厚田教授所完成本项研究工作的突出贡献之一正是以试验验证为主线,完成了多项具开创性的试验工作。这些试验工作有:玄武岩的高速摩擦试验,以研究和验证玄武岩表面摩擦系数随法向压力增大而减小,以及高速摩擦岩体表面快速升温而导致的汽化效应;不同剪切速率的三轴剪切试验,以研究和验证孔隙水压力随剪切速率的增大而增高所产生的超孔隙水压力效应;风洞内的模型试验,以研究和验证滑体凌空飞行时空气动力学效应和求取空气动力学参数;高速碰撞模型试验,以研究和验证滑动岩体碰撞的解体破碎效应和部分破碎岩石的加速运动效应。本项研究的另一个突出贡献则是构建了地质原型研究,多种模型试验,运动全过程数值模拟,碎屑流流体动力学理论分析,紧密结合的完整的高速远程滑坡流体动力学研究的理论方法体系,并得出了多个有重要意义的结论。在本研究领域前进道路上树立了新的里程碑。本项研究成果作为专著出版,定能极大地推动相关研究的发展,特为之序。

胡厚田

2002.12

# 前 言

20世纪60年代以后,在世界范围内陆续发生过许多大型高速滑坡,给人类造成很大灾难。最著名的如意大利瓦衣昂滑坡(1963)、中国湖南塘岩光滑坡(1961)、四川南江白梅垭滑坡(1974)、陕西宁强石家坡滑坡(1981)、甘肃东乡洒勒山滑坡(1983)、云南昭通头寨沟滑坡(1991)、西藏易贡滑坡(2000)等。在世界范围内出现了大量有关大型高速远程滑坡的研究成果,我国很多著名工程地质专家和学者也对大型高速滑坡进行过十分有价值的研究,对大型高速远程滑坡的理论研究有重要帮助。尽管国内外研究成果很多,但多数仍属结果分析、理论假设或现象推理。而试验研究和深入的理论研究甚少,为大家公认的理论不多。

作者在国家自然科学基金项目《大型高速岩质滑坡全程流体动力学机制的研究》中,以云南头寨沟滑坡为原型,在深入现场调研的基础上,用流体动力学理论,通过滑带孔隙水压力试验、玄武岩的物理力学性质试验和高速摩擦试验、大型风动实验室的滑坡凌空飞行的模型试验、滑坡岩体高速碰撞的模型试验,对高速远程滑坡运动全过程进行了离散元数值模拟,对高速远程滑坡流体动力学理论进行了系统研究;用二相流理论对远程碎屑流运动进行了理论分析,对头寨沟滑坡全程运动进行了实例分析,初步构建了大型高速远程滑坡流体动力学理论研究体系。全书共十章,可划分为五部分。第一部分主要阐述了国内外研究现状,研究的目的意义,研究内容,拟解决的关键问题,试验方案及技术路线。第二部分对大型高速远程滑坡原型——云南昭通头寨沟滑坡的工程地质条件及特征进行研究。第三部分是本书的重点,着重对大型高速远程滑坡的摩擦特性、启程阶段孔隙流体压力效应、近程阶段滑体飞行的空气动力学效应、滑坡岩体高速碰撞效应进行研究。第四部分对大型高速远程滑坡进行了理论研究,包括对滑坡远程阶段的碎屑流运动理论分析,建立了固液二相流和固气二相流的运动方程;对大型高速滑坡碎屑流运动全过程进行了离散元数值模拟,再现了大型高速滑坡岩体失稳破坏后大变形阶段的运动全过程;对头寨沟滑坡原型流体化过程进行了实例分析。第五部分结论与展望,对大型高速远程滑坡的流动力学理论研究得出20点有益的结论,并对今后研究提出展望。

本书得到国家自然科学基金(49872087)和西南交通大学出版基金的资助,在此一并表示感谢。对西南交通大学土木工程学院领导及同志们的支持和帮助表示感谢。

感谢著名的工程地质学家张倬元教授为本书作序。

胡厚田

2002年11月18日

3A02/05

# 目 录

1 绪 论	
1.1 研究的目的是和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 国外研究现状	2
1.2.2 国内研究现状	3
1.3 本书研究内容、研究思路及方法	6
1.3.1 研究内容	6
1.3.2 研究方法和拟解决的关键问题	7
1.3.3 试验方案及技术路线	9
2 头寨沟大型高速滑坡工程地质条件及特征研究	
2.1 引 言	10
2.2 滑坡区地质环境条件研究	10
2.2.1 地形地貌	10
2.2.2 地层岩性	11
2.2.3 地质构造	11
2.2.4 新构造运动	12
2.2.5 水文地质	12
2.2.6 气象及其他环境条件	13
2.3 滑坡区岩体力学特性的试验研究	15
2.3.1 岩石常规三轴全过程变形及强度特性	15
2.3.2 岩石的抗剪强度参数	18
2.4 滑坡活动阶段的划分及其运动特征	18
2.5 滑坡分区及其形态特征	19
2.5.1 滑坡发生区	20
2.5.2 滑坡飞行区	21
2.5.3 滑坡碎屑流运动堆积区	21
2.6 小 结	23
3 大型高速岩质滑坡摩擦特性的试验研究	
3.1 引 言	24
3.2 高速摩擦试验	25
3.2.1 试验设计	25

3.2.2	仪器标定 .....	27
3.2.3	试验方法 .....	27
3.2.4	试验结果及分析 .....	27
3.3	玄武岩表面摩擦特性的统计分析 .....	32
3.3.1	摩擦系数与法向压力关系的统计分析 .....	32
3.3.2	摩擦系数与滑动速度关系的统计分析 .....	33
3.4	小 结 .....	34
<b>4</b>	<b>大型高速岩质滑坡孔隙流体压力效应研究</b>	
4.1	启程活动阶段孔隙水压力效应研究 .....	35
4.1.1	引 言 .....	35
4.1.2	三轴剪切试验 .....	35
4.1.3	启程活动阶段孔隙水压力计算的理论研究 .....	37
4.2	启程活动阶段孔隙水汽化效应研究 .....	38
4.2.1	引 言 .....	38
4.2.2	启程活动阶段滑面瞬态温度分布 .....	38
4.2.3	头寨沟大型高速岩质滑坡孔隙水汽化效应研究 .....	46
4.3	小 结 .....	49
<b>5</b>	<b>大型高速滑坡近程飞行阶段空气动力学效应研究</b>	
5.1	引 言 .....	51
5.2	仅考虑重力时滑坡体的飞行规律 .....	51
5.3	空气动力学理论概述 .....	52
5.4	空中飞行滑坡体受力分析 .....	56
5.5	飞行滑坡体空气动力学效应的风洞试验研究 .....	57
5.5.1	相似参数 .....	57
5.5.2	试验内容及方法 .....	59
5.5.3	模型设计 .....	59
5.5.4	试验结果分析 .....	61
5.6	空中飞行滑坡体空气动力学效应的数值计算 .....	66
5.6.1	流体力学有限元法概述 .....	66
5.6.2	数值分析模型建立 .....	68
5.7	考虑空气动力学效应时滑坡体的飞行规律 .....	73
5.8	小 结 .....	75
<b>6</b>	<b>滑坡岩体高速碰撞效应研究</b>	
6.1	引 言 .....	76
6.2	岩体损伤对其力学性能的影响 .....	78
6.2.1	损伤概述 .....	78

6.2.2	损伤变量 .....	78
6.3	碰撞原理 .....	81
6.3.1	碰撞的力学特征及模型 .....	81
6.3.2	碰撞问题中的动力学定理 .....	83
6.3.3	恢复系数 .....	84
6.3.4	碰撞过程中的动能变化 .....	86
6.3.5	两物体的斜碰撞 .....	87
6.4	岩体碰撞解体效应 .....	88
6.4.1	岩体碰撞的能量分析 .....	88
6.4.2	岩体解体破碎 .....	93
6.5	碎裂岩体碰撞效应试验研究 .....	96
6.5.1	试验内容及方法 .....	96
6.5.2	试验结果分析 .....	98
6.6	小 结 .....	103
<b>7</b>	<b>碎屑流运动理论分析</b>	
7.1	碎屑流运动特点 .....	105
7.2	两相流理论概述 .....	105
7.3	颗粒在流体中的受力分析 .....	106
7.3.1	颗粒受到的阻力 .....	107
7.3.2	颗粒受到的升力 .....	109
7.3.3	坡面颗粒受力分析及运动状态 .....	110
7.4	固液型碎屑流 .....	111
7.4.1	固液型碎屑流与泥石流之异同 .....	111
7.4.2	流速分布 .....	113
7.4.3	固液型碎屑流运动方程 .....	117
7.4.4	固液型碎屑流运动模型 .....	119
7.5	固气型碎屑流 .....	120
7.5.1	概 述 .....	120
7.5.2	Boltzmann 方程 .....	120
7.5.3	干碎屑流运动方程 .....	122
7.6	小 结 .....	123
<b>8</b>	<b>大型高速滑坡碎屑流运动全过程离散元数值模拟</b>	
8.1	离散单元法基本原理 .....	124
8.2	基本假定 .....	124
8.3	基本方程及其求解 .....	125
8.3.1	物理方程 .....	125
8.3.2	运动方程 .....	127



8.3.3 求解方程 .....	127
8.4 模型及参数 .....	128
8.5 计算结果分析 .....	129
<b>9 头寨沟大型高速岩质滑坡流体化过程实例分析</b>	
9.1 近程飞行阶段的空气动力学效应 .....	135
9.1.1 不计空气动力学效应时滑坡的运动 .....	135
9.1.2 考虑空气动力学效应时滑坡的运动 .....	135
9.2 滑坡体与山梁的碰撞效应分析 .....	137
9.2.1 碰撞后滑坡体平均速度的计算 .....	137
9.2.2 部分岩块加速运动效应分析 .....	137
9.3 碎屑流运动分析 .....	139
9.4 小 结 .....	140
<b>10 结论与展望</b>	
10.1 主要结论与成果 .....	142
10.2 展 望 .....	145
参考文献 .....	147

# 1 绪 论

## 1.1 研究的目的和意义

20 世纪 60 年代以后,在世界范围内陆续发生过许多大型高速滑坡,给人类造成很大灾难。这类滑坡大多具有极高的滑速和极远的滑程。在平缓的地面上,滑速有的超过 100 km/h,滑程可达几公里,甚至十几公里。由于高速远程滑坡引起的气浪和碎屑流化将受害区扩展到滑坡形成区以外很远处,致使造成很大的灾害。例如,1963 年 10 月 9 日意大利威尼斯省瓦依昂河下游的托克山斜坡,在瓦依昂水库开始蓄水时坡体整体性高速下滑,激起了巨大的涌浪,致使坝内所有设施遭受破坏;对岸朗格尼亚镇、下游皮拉哥城和维拉诺尼镇、上游拉瓦佐镇均遭涌浪袭击而摧毁,死亡 2 400 余人,整个水库完全破坏,造成震惊世界的灾难性事故<sup>[1]</sup>。在我国,特别是在西北和西南地区,这类大型高速滑坡也多次发生。如 1983 年 3 月 7 日发生的甘肃东乡洒勒山大型高速滑坡,在不到一分钟的时间里滑出 1 600 m,摧毁 4 个村庄,伤亡 278 人,最高滑动速度达 30 m/s。1991 年 9 月 23 日发生的云南昭通头寨沟大型高速岩质滑坡,总体积大约  $1\ 800 \times 10^4 \text{ m}^3$  的滑体高速下滑,仅在 2~3 分钟时间内冲入盘河,滑体的最大移动距离达 3.65 km。这场罕见的巨型滑坡—碎屑流灾害,造成了极为惨重的人员伤亡和损失,共有 216 人死亡,202 间房屋被摧毁,94 户村民半数以上无家可归,300 头牲畜被埋,覆盖农田 300 亩,经济损失达 200 余万元<sup>[2]</sup>。2000 年 4 月 9 日发生在西藏易贡藏布下游的扎木弄巴特大规模滑坡,波及长度 2 600 m,堵塞长度 1 500 m,形成高 130 m 的天然坝,堵断易贡错(湖)的出口,使正常流量  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  左右的易贡藏布断流,而中、上游的地表径流和冰雪融水又不断地注入,使得库容  $75.4 \times 10^8 \text{ m}^3$  的易贡错水位每天以 50 cm 的涨幅上升,直接威胁着湖区周围藏、汉等多民族居民和享誉中外的易贡茶基地<sup>[3]</sup>。另外还有 1965 年云南禄劝普渡河谷大型高速滑坡;1980 年湖北宜昌盐池河磷矿灾难性高速崩滑体;1981 年 8 月 23 日发生在石家坡的高速滑坡,最终发展为多冲程碎屑流;1974 年四川南江的白梅垭滑坡及瑞士 Elm 岩崩—碎屑流。所有这些大型高速滑坡,在其运动过程中(特别是在远程活动阶段)无一例外地表现出流体化的特点。

根据大型高速滑坡活动的时间和空间,可将其划分为启程、近程、远程三个相互连续的活动阶段。在启程阶段,这类滑坡一般都能获得较大的速度,加之多数滑坡剪出口附近滑床水平或略向上翘,从而导致滑坡体在近程活动阶段呈现飞行运动。在飞行阶段,由于沟谷形态的限制,滑坡体可能会受到沟谷两侧山体的阻挡而发生一次甚至多次碰撞,从而使滑坡主体的运动轨迹呈“之”字形。其结果,一是使裂隙化岩体破碎,为以后的碎屑流提供物质基础;二是使滑坡体的运动方向发生改变,表现出多冲程现象;三是在碰撞作用下,由于能量传递,部分岩体获得高速,呈现出加速运动效应。碰撞能量越大,加速效应越显著,滑坡体运动的距离也就越远。如四川南江白梅垭滑坡,坡体与沟壁相撞达数次,致使层状岩体充

分解体。在远程运动阶段，由于岩体已破碎成碎屑颗粒及末状粉尘，这些粉尘加上高速滑坡体所捕获的压缩空气共同形成隙间流体，该隙间流体能对带动它一起向前运动的粒径较大的碎屑颗粒产生一定的浮力，从而使碎屑颗粒能呈流动状态向前高速流动，即碎屑流。正是由于碎屑流的产生，使得滑坡体能够运动很远的距离，即远程效应。结果使造成的灾害区扩展至很大的范围。因此，研究滑坡碎屑流的形成机理及其运动特征及运动方程，计算其流动速度及运动距离，确定其可能的停止区域，对于预测灾害范围，达到减灾防灾的目的具有非常现实的意义，同时对于大型高速滑坡的理论研究也有重要的意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

P. E. Kent 于 1966 年提出“圈闭空气导致流体化论”。该理论认为，破碎后的滑坡碎屑体在运动过程中排出的空气快速向上运动，使碎屑体的各块体保持扩张状态。这种扩张状态导致块体间的摩擦系数降低，使碎屑体流态化，碎屑因而能够越过平坦的地面作高速、远距离的运动。

Melosh 分别于 1979 年和 1986 年提出“声波场诱导感声流体化论”。该理论用声波流体化机制来解释地震断层、冲击坑塌落和远距离滑坡等地质作用。该理论认为，这些现象中明显存在的低强度归因于瞬时的强大声波场诱导的“感声流体化”结果。并认为，感声流体化碎屑表现为一种牛顿流体。这种机制描述高频振动，它有可能在一瞬间解除岩体的压力，使运动卸荷区得以发生。

Davis 等人也提出了“底部高剪切速度导致流体化论”。该理论的本质是基于这种概念：输入到颗粒状材料物体中的高能引起各颗粒间很高的冲击接触压。冲击压在统计学上是分离性的，物体发生膨胀，内部的抗剪阻力因此而降低，此时物体在重力作用下便能够发生流动。该理论认为，高速的碎屑体底部和静止的下伏物质之间的高相对速度即是能量来源。Davis 还曾用装入塑料盘内机干砂的单向振动试验和拜格诺德试验成果来论证其设想。

上述这些理论大都建立在滑坡体作高速运动的基础之上的。对于滑坡产生的高速机理，相应也出现了许多理论。主要有：

① 拜格诺德 R. A. 曾提出过“无粘性颗粒流雨”。美籍华人许靖华<sup>[4]</sup> (K. J. Hsu, 1975) 根据岩崩碎屑流堆积物的几何形态类似于泥石流、熔岩流和冰川堆积，以及它们可以沿着平坦的路径运动异常远的距离，并借助于其冲力涌向高处等，从而提出“无粘性颗粒流说”。实际上将岩崩碎屑流比作大量聚集的无粘性颗粒在流体介质中流动。许氏认为，速度极高的隙间粉尘即粗石块之间存在的岩粉和细颗粒物在高速滑坡运动过程中充当了隙间流体，起着同液体和气体一样的作用。他曾进行了大量的实验试图证明这种假说，很遗憾只有一次获得了预期的结果，且实验材料采用的是不同稠度的膨润土悬浮物，这种材料能否模拟高速滑坡尚且值得怀疑。

② R. L. Shreve (1968) 提出<sup>[5]</sup>，当大型滑坡体快速滑出时，若遇到适当的地形，滑坡体会捕获和压缩原斜坡前方来不及排出的空气而形成气垫层，使滑体能够像气垫车一样漂浮。气垫层不仅能对滑坡体起一定的支撑作用，而且还会使滑坡体像飞机一样“飞”起来。他推

测, 异常小的摩擦系数是捕获空气体积的一种度量, 更大的滑坡体可以捕获更多的空气。P. Habib 等人于 1975 年提出, 大规模岩体在滑道上滑动时, 重力所做的功消耗在滑道上将产生热量。如果剪切速度足够大, 释放的热量可以将岩石中的水转变为蒸汽, 构成一气垫层。这种气垫层支撑着滑体, 并且起着对运动的润滑作用。如果滑道很深且为一个平面, 则滑体可被视为一个刚性体, 完全由蒸汽压力支撑。摩擦阻力随法向压力的降低而降低。如果阻力为零, 则滑体可获得一个很大的速度, 这是它可以爬上河谷对岸或者翻过一个山丘的原因。

③ Mencl 等人在研究中强调空隙水压力对滑体的承托作用, 认为在滑速很高时, 滑面通过的含水岩层中空隙水压力会急剧增高, 使有效正应力大幅度降低, 甚至趋于零。Muller 等强调饱水粘性土的触变作用。后来 Muller<sup>[6]</sup> 又以瓦依昂大型滑坡为例做过水的作用使摩擦力突然丧失的试验。

④ Voight 和 Faust 认为, 在流体饱和的滑坡滑带内所发生的摩擦热能够使空隙流体压力增高。摩擦系数值大, 原始孔隙度高和滑动位移大, 以及滑带厚度小和可压缩性低都会促进流体压力升高。在滑动速度快以及壁部岩石渗透性剪胀作用低的条件下, 流体压力的升高能够迅速降低滑动过程中的摩擦强度, 因此适度的滑动在某些条件下可转化成灾难性下滑。还有人甚至认为摩擦热引起的空隙水的体积变化就足够作为一种减小摩擦的机制。

⑤ T. H. Erisman 于 1978 年提出, 由于摩擦生热及高压, 岩石自身会熔化而形成润滑剂。或岩石分解产生大量二氧化碳气体, 可以起到气垫层那样的作用。

⑥ Kerner 等人提出了相对比较简单的岩石自我润滑学说。他们认为, 速度增大时, 摩擦系数反而减小, 是大型滑坡速度异乎寻常的原因。

以上所有这些理论大都能合理地解释某些特定条件下发生的高速滑坡的机理或滑坡远程运动形式, 它们在一定程度上对大型高速滑坡的研究起到了推动作用。但它们都是基于不同假设的基础上得出由于摩擦系数的降低而使大型滑坡获得高速, 都是将滑坡岩体作为整体来研究的, 而并没有考虑某些大型滑坡在运动过程中与途中山体、或在落地时与地面因碰撞而解体破碎后的运动, 对滑坡体的碰撞解体过程更是没有涉及, 因而还没有大型高速滑坡碎屑流形成过程及运动机理的研究文献出现。

### 1.2.2 国内研究现状

我国很多著名的工程地质专家和学者也都对大型高速滑坡进行过十分有价值的研究。

胡广韬教授 1988 年在专著《动力滑坡学》中, 提出并论述了有关“滑坡动力学”的二十余项关键性理论、观点和问题。即滑坡营力因素的历史转化性、滑坡动态阶段的差异性、滑坡形成位置的选择性、坡基型剧动式滑坡的功能均衡与滑体的超稳功能、坡基型剧动滑坡的超稳性与其“复活”的条件特殊性、大型高速滑坡的多级冲程与多序次、高速滑坡的启程剧动与行程高速的机理、多冲程滑坡功能转化与滑体稳定性向量问题、多冲程滑坡的超前溅泥气浪与边缘旋流、滑坡危岩体弹性应变能的聚集、高速滑坡启程弹冲速度、地质环境中斜坡破坏的变异等。最主要的研究成果表现在: ① 提出并系统地论述了高速滑坡的启程剧动与行程高速的机理, 从根本上区分了高速滑坡滑动全过程不同阶段所具有的不同的动力学效应; ② 提出启程剧动的“临床弹性冲动加速效应”, 并阐述了斜坡岩体锁固段弹性冲动的力学模型, 提出了峰残强降加速效应; ③ 对于滑坡体行程过程中的持速机理, 他对前人的研

究成果进行了总结。指出：大型高速滑坡在启动后之所以能保持高速运动，甚至“飞行”，不外乎以下几种效应，即滑坡体势动能转化加速效应、滑床气垫擎托持速效应、滑床触变液化持速效应和滑程碎屑流持速效应。胡广韬在《滑坡动力学》一书中，补充了20世纪90年代他本人及其研究生关于滑坡动力学的研究成果，在理论上进一步阐述、论证了有关“滑坡动力学”的二十余项理论、观点和问题<sup>[7]</sup>，从而使滑坡动力学进一步发展和完善。

殷跃平2000年在《西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究》一文中对2000年4月9日晚，西藏林芝地区波密县易贡藏布河发生的巨型高速滑坡进行了分析描述，认为该滑坡经历了高位滑动—碎屑流—土石水气浪—泥石流—次级滑坡等过程，具复合性。并将该滑坡的运动全过程分为四个不同的阶段，即：崩滑阶段、碎屑流阶段、土石水气混合流阶段及抛撒堆积阶段。在碎屑流阶段和土石水气混合流阶段，气垫层作用及气浪作用明显<sup>[8]</sup>，因而具有显著的流体化特征。

贺可强、安振远<sup>[9]</sup>1996年在《崩滑碎屑流的形成条件及形成类型》一文中认为碎屑流是一种高速松散固体流，是与崩滑相伴生的一种独立的地质灾害。其形成条件既不同于滑坡，又不同于泥石流，具有自身的形成条件、运移规律及运动特征。碎屑流的运动形式以流动为主，具有流速快、成灾范围大、遇阻时可改变其流向和多冲程等运动特点。同时认为，崩滑碎屑流不存在滑移面，受三个基本条件的控制，即固体物质条件、边界条件及潜在聚能条件。并描述这种固体流在滑坡或崩塌等形成过程中，由于高速差异滑移速度和相互碰撞呈平移剪切移动、跳跃或滚动等综合运动形式。这种综合流动形式形成机理主要受控于以下几个方面：即碎屑流形成的临界坡度、滑移速度、堆积层结构强度、坡体物理力学性质、滑面边界条件限制及坡体堆积层的粒度等。并在对碎屑流的野外地质特征研究的基础上，根据物质类型、解体形式等对碎屑流进行了较为详细的分类。

陈自生和张晓刚<sup>[10]</sup>1994年在《1994-04-30四川省武隆山鸡冠岭滑坡→崩塌→碎屑流→堵江灾害链》一文中认为该灾害链由滑坡激化崩塌，崩塌体加积于滑坡体之上，两者结合之后再解体、破碎而成碎屑流。并对碎屑流的形成条件、形成过程、成灾特点进行了简单描述，并对最终可能造成的灾害作出了预测。

陈自生和杨文1994年在《1994-03-20四川省高县白崖崩塌性滑坡》一文中对1994年3月20日发生于四川省高县白庙乡芙蓉村的崩塌性滑坡进行了描述。方量约为110万m<sup>3</sup>的崩落岩土沿斜坡下段陡坡运动，随即解体、破碎，转化为碎屑流，又随石炭湾沟向西继续流动约650m。他们认为，滑体物质的主体顺坡向西运动而成碎屑流，除滑床遭铲刮外，沿途地表物质也被捕获，致使碎屑物质方量大增。碎屑物质在流动过程中受地形影响，沿沟发生了3次大的转向。另外，由于在沟的内部存在较多的粘土物质，它对碎屑流的前缘具有明显的铺垫作用，从而更有利于后续碎屑流的运动。

姜云和尹金平<sup>[11]</sup>1992年在《华蓥山溪口滑坡—碎屑流》一文中将滑坡—碎屑流按其运动特征分为三个区，即滑坡源区、碎屑流流通区、碎屑流堆积区。他们对碎屑流的形成条件进行了分析，认为形成碎屑流除需具备一定的动力条件（速度）外，外部条件也起着决定性的作用，表现在：①滑体与山包的正面碰撞使物质进一步解体和碎屑化；②山包与平面之间的深沟形成封闭气体，为碎屑流的运动提供气垫效应，并使碎屑流与空气充分混合；③较为平直的“V”形沟谷，为其运动提供了良好的通道，使之能够持续高速运动。

钟立勋<sup>[12]</sup>1992年在《我国一次罕见的滑坡—碎屑流》一文对云南昭通头寨沟大型高速滑坡的碎屑流运动进行了研究。认为该滑坡岩体在运动过程中撞击山头后，变成十分破碎的岩

石碎块,并以强大的动能沿着头寨沟沟谷向下游方向流动达 2.8 km(呈干燥状),直至盘河岸边,碎屑物质才停止下来。他根据现场考察发现了许多碎屑物质快速流动的现象:① 滑体撞击并削掉了 10 余个山嘴,酷似冰川的刨蚀作用;② 碎屑物结构紊乱、无层序,碎屑一般直径 5~10 cm,呈干燥状态,既无滑动迹象,又无泥石流液体流动特征;③ 沟谷中呈现不同组分的纵向物质序列,前缘堆积物高于四周,像一座土坝。无喷射和散布的碎屑,亦无液体流动痕迹。沟谷中碎屑物多处出现向前凸起的纵向波状地形,显示了流动的碎屑波的作用;④ 规模巨大的碎屑物之所以能够在(纵向)平缓的沟谷出乎意料远距离(超过 2.5 km)运动,完全来源于巨大的动能。因粉尘和细小碎屑的存在,大大降低了摩擦阻力。因此,他认为,这不是一般的滑坡,而是由滑坡转化为碎屑流,不同于滑坡—泥石流。他将形成滑坡—碎屑流的过程概括为三个阶段:即整体滑动阶段;滑体碰撞山脊、碎裂解体阶段;碎屑流动、直至停止阶段。

除此之外,刘汉超教授、张倬元教授<sup>[13]</sup>、孙玉科教授<sup>[14]</sup>、胡海涛院士、徐邦栋教授<sup>[15]</sup>、方玉树<sup>[16]</sup>、王思敬院士<sup>[17]</sup>、晏同珍教授<sup>[18]</sup>、胡广韬教授<sup>[7]</sup>以及潘家铮院士<sup>[19]</sup>、郭崇元<sup>[20]</sup>、徐峻岭<sup>[21]</sup>、王成华<sup>[22]</sup>等都对大型高速滑坡形成机理及滑坡动力学等进行过深入研究,对大型高速滑坡的理论有重要帮助。上述有关大型高速滑坡形成机理及其动力学的研究成果无论是在基础研究方面,还是在应用基础研究方面均属国内外滑坡研究的前沿课题。

尽管国内外研究大型高速滑坡机理的成果很多,但多数成果仍属结果分析,理论假设或现象描述及其推理等。深入理论分析、实验研究及定量研究成果较少,至今为大家公认的理论 and 成果不多。因此,对于大型高速滑坡导致碎屑流的研究理论目前尚存在许多不足,主要表现在以下几个方面:

① 对于绝大多数最终导致碎屑流的大型高速岩质滑坡,在启程阶段就已获得了较高的速度,并在随后的近程活动阶段表现出持速效应。如前所述,虽然胡广韬等对大型岩质滑坡的启程高速机理及 R. L. Shreve、Mencl、Voight、Faust 和 T. H. Eismann 等对近程活动阶段的持速效应进行了一定的分析,但大多属于理论假设,试验验证及深入的理论研究却几乎没有。

② 作为大型高速岩质滑坡碎屑流形成过程的一个重要环节,滑坡岩体的碰撞破碎为碎屑流的形成提供了必要的物质条件。而对于岩体破碎虽然在爆破及采矿领域的研究成果较多,如杨军、张继春、张奇等人对岩体在爆破作用下的破碎情况分别进行了研究,并应用分形理论对岩体破碎后的块度分布进行了预测;徐小荷、屠厚泽等人也分别研究了岩体在破碎机械作用下的破碎机理,同时也应用能耗理论预测了岩体破碎后的平均块度。但是,这些理论并不能很好地适用于滑坡岩体在碰撞作用下的破碎情况,而对岩体在碰撞作用下的破碎机理及破碎后块体的运动情况却很少有人进行过深入的理论分析及试验研究。

③ 对于大型高速岩质滑坡远程活动阶段所呈现的碎屑流运动,我国的殷跃平、贺可强、安振远、陈自生、钟立勋等及美籍华人 K. J. Hsu 等分别进行了不同程度的研究,并取得了一定的进展,开创了碎屑流运动研究的先河,但大多是属于理论假设和总体分析。根据胡厚田教授的研究,大型高速远程活动阶段的碎屑流运动,实际上是一种特殊的二相流,并可根据具体环境分为干碎屑流(固气型碎屑流)和湿碎屑流(固液型碎屑流)。因此,碎屑流在其运动过程中,固体颗粒与隙间流体之间必产生相互作用。而目前在碎屑流运动的研究成果中,却很少见到有深入研究固体碎屑颗粒与隙间流体各自的运动状态及它们相互作用机理的内容。

综上所述,对该问题的研究目前尚属于结果分析、理论假设或现象推理,而实验研究

和深入的理论研究甚少,为大家公认理论和成果不多。特别是对大型高速滑坡从启程高速、近程飞行、直到远程碎屑流运动全过程的系统研究,几乎还是空白,而没有详细、系统的研究成果,更没有形成一定的理论。

### 1.3 本书研究内容、研究思路及方法

上述大型高速滑坡均具有速度高、滑程远、能量大、破坏力强等特点,其运动形式多样(滑动、飞行、滑流、流动等),是一个包括多种功能转换过程的复杂多旋回体系。它们的发生,使越来越多的人认识到,对于大型滑坡,仅仅判断其稳定性及预测其发生时间是远远不够的,还必须预知其滑速和滑程,以便为环境规划、保护以及评价提供可能引发地质灾害的依据。而滑坡的速度和滑程除与滑坡发生时的动力学特性有关外,还与滑坡体的运动形式密切相关。

对大型高速滑坡在远程活动阶段运动形式的研究,胡厚田教授(2000)在主持的题为《大型高速岩质滑坡全程流体动力学机制的研究》的国家自然科学基金项目研究过程中发现,几乎所有大型高速岩质远程滑坡的运动都具流体化运动的特征。并且,几乎所有的大型高速远程滑坡的滑体都毫无例外地由具有一定结构的岩体转变为流体化的湿碎屑流或干碎屑流。湿碎屑流或干碎屑流与流体或固体不同,严格来说湿碎屑流和干碎屑流都是二相流,而且是特殊的二相流。湿碎屑流是固液二相流,它与泥石流不同,泥石流搬运介质是水,固体物质是被搬运物,而湿碎屑流中的固体是在惯性力作用下运动,它的运动速度远大于水流速度,碎屑流与水流相遇之后二者产生耦合,速度可能很大。如南江白梅垭湿碎屑流速度高达60 m/s。这种湿碎屑流运动规律和运动距离都不能按泥石流考虑,应研究建立新的理论。干碎屑流是固气二相流,在滑体解体之后,形成了高度分散的碎屑体,在碎屑体的孔隙中裹挟了大量空气,由于高速向前运动,与空气产生了复杂的流体动力学现象。从而使得碎屑体和地面之间的运动不是通常想象的固体摩擦运动,也不同于固气二相的风沙运动。因为风沙运动的搬运介质是风,而碎屑流运动主要是在惯性力作用下,运动主体是碎屑。这一思路的提出,在一定程度上揭示了大型高速滑坡碎屑流运动的本质。

#### 1.3.1 研究内容

大型高速岩质滑坡流体化理论的研究,应包括启程高速的流体动力学机理、近程高速飞行的空气动力学效应、碰撞解体破碎、碎屑流流态化过程及碎屑流阶段运动全过程的动力学作用机理。基于此,本书在现场详细调查的基础上,阐述了头寨沟滑坡形成的环境条件,滑坡各个活动阶段的特征。通过岩石高速摩擦试验,研究了滑坡启程阶段滑面高速摩擦的规律;研究了启程阶段孔隙流体压力效应;通过风洞试验及数值模拟,研究了大型滑坡启动后于空中飞行阶段的空气动力学效应;应用能量分析法研究了高速飞行滑坡体与阻挡山体发生碰撞时的能量分配关系,并在此基础上研究了滑坡岩体解体破碎过程及破碎后的块度预测;在岩体碰撞试验的基础上研究了滑坡岩体经碰撞解体后部分块体的减速运动效应及加速运动效应;对大型高速滑坡岩体失稳破坏后大变形阶段的运动过程、与小山头碰撞后的解体破碎以及破碎后不同块体的运动全过程进行了离散元数值模拟,形象地再现和验证了滑坡岩体因碰撞而产生的减速运动效应及加速运动效应;在分析碎屑流中固体颗粒与隙间流体相互作用

的规律基础上,研究了干、湿碎屑流的流动特征及运动方程。本书的主要研究内容包括:

(1) 头寨沟滑坡工程地质条件及特征的研究

- ① 地质环境条件和岩体力学条件的研究。
- ② 头寨沟滑坡活动阶段的划分及其运动特征。
- ③ 头寨沟滑坡分区及其形态特征。

(2) 高速远程岩质滑坡启程活动阶段摩擦特性的试验研究

- ① 玄武岩表面特征、运动速度、法向压力等因素对摩擦系数的影响。
- ② 不同试验条件下玄武岩表面摩擦特性的统计分析。

(3) 高速远程岩质滑坡启程活动阶段孔隙流体压力效应研究

① 启程活动阶段滑带孔隙水压力效应研究:滑带土孔隙水压力与剪切速率的关系;在三轴剪切试验的基础上,提出滑带孔隙水压力的计算式。

② 启程活动阶段滑带孔隙水汽化效应的研究:滑坡高速滑动过程中滑面瞬态温度分布规律研究;头寨沟滑坡摩擦热传导深度的确定;气垫层的形成条件及其作用的研究;头寨沟滑坡滑带孔隙水汽化效应研究。

(4) 大型高速岩质滑坡近程活动阶段空气动力学效应研究

- ① 大型高速岩质滑坡近程活动阶段凌空飞行的机翼效应研究。
- ② 大型高速岩质滑坡近程凌空飞行阶段空气动力特性的风洞模型试验研究。
- ③ 大型高速岩质滑坡近程活动阶段凌空飞行过程中滑坡体周围压力及流速分布的数值模拟研究。

④ 在以上几项研究的基础上,分析大型高速滑坡体近程凌空飞行阶段的运动方程,从而确定其凌空飞行时间、飞行速度及飞行距离的计算公式。

(5) 滑坡岩体高速碰撞效应研究

① 研究影响滑坡岩体碰撞解体破碎的因素。

② 应用碰撞原理研究滑坡岩体与阻挡山体发生碰撞时的能量分配规律,并在此基础上研究滑坡岩体碰撞解体后的平均运动速度和运动方向。

③ 应用能量原理分析和确定滑坡岩体用于破碎解体的能量大小,并在此基础上应用功耗原理研究滑坡岩体破碎后的平均块度大小,从而最终研究滑坡岩体的解体破碎效应。

④ 通过岩体碰撞试验,分析滑坡岩体解体破碎后不同速度段的体积分布规律,并在此基础上研究滑坡解体破碎后部分块体的加速运动效应。

(6) 碎屑流运动理论的研究

① 分析两相流中颗粒的受力情况,研究固体颗粒受到来自流体的升力和阻力的计算公式。

② 分析固液型碎屑流流速分布和浓度分布的方程式,以及湿碎屑流流动过程中的弛豫现象,研究固液型碎屑流的运动方程。

③ 根据固气型碎屑流的运动特点,分析固气型碎屑流的 Boltzmann 方程,并在此基础上研究干碎屑流的运动方程。

### 1.3.2 研究方法和拟解决的关键问题

大型高速远程岩质滑坡运动速度快、滑程远,在整个运动过程中,有高速滑动、凌空飞行、强烈碰撞、高速碎屑流等多种运动形式。包括各种功能的强烈转换,也包括各种复杂



的物理力学现象。因此，涉及工程地质学、热力学、传热学、摩擦学、断裂力学、损伤力学、静力学、固体动力学、流体力学、空气动力学、二相流体动力学等多种理论知识。本研究采用理论分析、试验研究和数值模拟相结合的方法，研究滑坡各阶段的流体动力学机理，结合碎屑流的形成条件、形成过程、运动形式、堆积形态等特征，建立大型高速远程岩质滑坡碎屑流形成及运动规律的理论框架。

大型高速岩质滑坡能否最终演变成碎屑流的形式，存在如下一些决定性的因素：

(1) 滑坡体启程的运动速度和近程活动阶段的凌空飞行速度

碎屑颗粒是碎屑流形成的物质基础，因而，滑坡岩体的充分解体破碎是碎屑流形成的先决条件，而大型滑坡体的启程运动速度和近程的飞行速度决定了其所具有能量的大小。根据岩体破碎的功耗原理，岩体碰撞时的能量越大，其解体破碎得越充分，也就越易形成碎屑流；反之，其运移速度越小，所具有的动能也就越小，滑坡岩体将得不到充分解体破碎，因而也就越难形成碎屑流。

(2) 组成滑坡岩体的岩性特征和结构特征

滑坡岩体的岩性及结构特征决定了其在发生碰撞时解体破碎的难易程度。岩性特征决定了岩石本身的强度，而岩体内因节理、裂隙等的发育而形成的结构特征，决定了宏观岩体强度。岩体中节理、裂隙等结构面越发育，岩体结构越破碎，其损伤程度也就越大。这不仅会使其强度大为减小，同时还会影响其在碰撞过程中的能量分配。受损伤程度越大，碰撞时分配到的能量就越多，岩体也就解体破碎得越充分。

(3) 与之发生碰撞的阻挡山体的岩性特征及结构特征

虽然碎屑颗粒来源于滑坡岩体，阻挡山体不提供或极少提供碎屑颗粒。但是，其岩性特征及结构特征（宏观上表现为弹性参数和损伤变量）对碰撞时的能量分配存在着极大的影响。其岩性越软弱，节理、裂隙等越发育，碰撞时所分配的能量就越多；相反，滑坡岩体所分配的能量将会越小，也就越不易解体破碎而形成碎屑流。

(4) 易于碎屑流运动的有利地形条件

一定的坡度条件可以克服沿途阻力、延长滑程、使流态化更加充分。而居高临下的地形能加速流态化过程，尤其是滑坡体凌空飞行、冲撞地面更能加速流态化过程。

综上所述，本项目拟解决的关键性问题有以下几个：

① 滑带孔隙水压力突然增大对启程高速作用的研究。

② 饱水滑带在强烈高速摩擦时产生高温，使孔隙水汽化，产生巨大汽化压力，对启程高速影响的研究。

③ 近程飞行阶段空气动力学效应的研究：在风洞试验及数值模拟的基础上，重点分析空气动力效应对滑体飞行速度、飞行时间、受力状态等的影响，并进行相应的数值模拟与计算。

④ 滑体与阻挡山体发生碰撞时的能量分配关系的研究：能量的大小决定着岩体的解体破碎程度，从而最终影响碎屑流的形成及运动状态。

⑤ 通过岩体碰撞试验，研究滑坡岩体碰撞解体破碎后的运动情况，特别是部分岩体的加速运动效应。

⑥ 固液二相流中液相与碎屑颗粒相互作用关系及运动表达式的研究。

⑦ 高速运动条件下，固气二相流中碎屑颗粒的速度与浓度分布的研究，并根据 Boltzmann 方程研究干碎屑流的运动方程。