

# 天山乌鲁木齐河源1号冰川 人工冰洞初步观测

王 仲 祥

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

利用冰洞研究冰川内部特性的工作,早已为国外冰川学界所重视。自1942年以来,法、英、美、加拿大等国先后开展了内容广泛的冰洞研究,并取得了一批成果<sup>[1-4]</sup>。

1980年10月,在施雅风教授及谢自楚、黄茂恒的倡导和支持下,我国第一个人工冰洞在天山乌鲁木齐河1号冰川开掘成功。笔者和王文梯、李纲、宋根海等参加了最初的观测研究工作。

该冰洞位于1号冰川西支末端,最初掘进30米长,1981夏季再度掘进至90米。断面为城门洞形,高2.0米,宽1.5米,洞身走向南东75°转正东。洞底基本沿冰床坡度掘进,并保留薄层底冰。坡度2—8°,洞口高程3,820米(照片1、2、3)。

冰洞开挖后,即对其冰层特点,裂隙分布,及次生霜晶等一般特征进行了观察,并开展了冰川底部滑动与冰体流变的现场观测。

## 一、冰洞内的一般现象

1. 霜晶 冰洞开挖后,洞口段20米范围内的底冰及两壁下侧冰体在太阳辐射作用下,冰体蒸发,水汽上升,在冰洞顶部凝聚生成霜晶,并向两壁发展。霜晶个体根部较小,至顶端逐渐增大,成为横断面为六边形的“杯”状形态(照片4)。生长一个月后的霜晶个体长度一般为3—5厘米,最大7厘米。经过一个冬季后1981年5月观测时最大者可达40厘米。洞口处的霜晶个体最大,深入洞内后逐渐变小,而且霜晶自洞口开始发育后,其下限始终沿一水平线向洞内延伸,在洞深20米处消失。这反映出洞口段受外界影响,温度变幅大,因而升华-凝华作用强烈的特点。

2. 琥珀冰层 整个冰体无折射光影响时,呈无色透明状,很少有块石存在。但在洞口15米范围内的底层冰体中却夹有相当数量的碎屑。冰体洁净,碎屑清晰可见,此种冰体称为“琥珀”冰。1号冰洞内的“琥珀”冰存在于底层1.5米以下的范围内。碎屑直径一般为数厘米,少量在10厘米以上。碎屑棱角完好,多平置于冰层中,其长轴方向与冰体运动方向一致,呈最小阻力状态存在。

3. 气泡 与表层冰川冰中气泡不同,冰洞中所见下部冰层中的圆形气泡个体较小,并成层分布,气泡层向冰川上游呈12—18°倾角。个别层次倾角达30°。除圆形气泡外,

更有相当数量的气泡呈扁平椭圆状,其长轴为3—5毫米,宽约2毫米,但厚度极小,均不足1毫米。这主要是冰体正压力与水平运动长期作用的结果。

4.冰体内的杂质 冰层中均有细微土粒组成的团粒状物质存在,并成不连续的层状分布,其物质与冰川表面的污化物相类似,呈灰绿色。各层厚度不超过2毫米,层间距离不等。此外,冰洞左侧冰壁距洞口15米和16米处,分别有一层1—2厘米厚的亚砂土层,长度分别为1.3米和1.1米,一端与底碛相连,一端伸入冰内,向冰川上游成 $15^\circ$ 倾角。夹层中除细粒土外,还含有直径数毫米的岩屑。此类夹层的形成与冰层的剪切运动有关。

5.洞内裂隙 冰洞开挖20天后,洞内即出现大量裂隙,并均以楔形分布于底冰上,与冰川运动方向成 $60-80^\circ$ 夹角。个别裂隙进一步发展时,自底部沿两壁向上扩展成环形。底部裂隙最宽可达20厘米。此类裂隙主要是由于冰洞开挖后,残留底冰失去上部荷载和与冰川整体的联系,而两侧冰体的运动速度不一致所形成的。

6.底碛 1号冰洞中观察到的底碛比较平整,未见有基岩暴露和巨大的块石突起。冰体与底碛平顺相接,界线分明,局部地段冰体与底碛间形成空穴(照片5)。底碛均呈冻结状态,含冰量约20—30%。已做筛分分析范围内的数据表明,它具有与流水沉积物不同的沉积特点。直方图和累计曲线图都反映出冰碛物的双峰特点,并符合压碎物的罗辛分布,但与正态概率偏离也不大。这说明该处底碛的粒度形成主要受冰川压碎作用控制,但不排除流水搬运的因素。

## 二、冰川滑动与冰体流变观测

1.冰川滑动 一般认为,冷冰川滑动时,其底部应有温冰层存在或滑动界面处于压融状态,反之则无滑动。冰洞滑动测点分别位于洞深17.5米和25米处,冰厚为16米,尚未达到压融点,但相邻位置测温表明,17米深处冰温为 $-1.2^\circ\text{C}$ ,可见底部冰层温度已接近融点。因而判断1号冰川底部可能存在温冰层,滑动测点则位于温冰层外缘。

滑动观测采用对接式位移桩。第I组测点位于17.5米处,上桩距冰底部边缘20厘米,用手摇钻钻孔后嵌入,下桩直接将钢锥打入滑动界面下10厘米处的底碛中。第II组测点位于25米处,上桩距冰体下沿10厘米,观测时用游标卡尺和直钢尺量测,表1给出了观测结果。据表1可知,1号冰川末端的滑动速度约为2米/年。

表1 滑动观测结果

(起始日期:1980.12.7;单位:毫米)

观测组号	1980年12月16日	1980年12月27日	1981年5月4日	1981年6月28日	日平均	备注
I	23.6	31.9	705.0	—	4.8	滑动走向与洞口走向一致,即 $SE75^\circ$
II	47.0	98.4	830.0	1180	5.8	

现今对于冷冰川滑动的报道甚少。盛行的滑动理论是已为试验所证实的Weertman(1957)提出的两种机制:(1)冰体绕过障碍物时在迎冰面的融化和在背冰面的再冻结,

也称控制障碍物尺寸大小的理论；(2)冰在障碍物附近应力加强而变形速率增大的机制。这两种机制的共同作用使得冰川底部产生滑动。大多数学者同意上述机制促进了冰体沿基面的滑动。1号冰川末端的滑动事实已无可怀疑，但其机制的探讨，还有待深入研究。

2.冰体流变的现场观测 冰洞内的流变观测采用垂直位移桩和圆形应变孔两种方法进行。

(1)位移桩：在洞深17.5米处垂直布设了5个测桩，量测各桩的水平位移量进而求得剪应变率( $\dot{\epsilon}$ )，相应的剪应力( $\tau$ )按下式<sup>[3]</sup>求得：

$$\tau = \rho g h \sin \alpha \cos \alpha \quad (1)$$

式中： $\rho$ ——冰的密度，取0.9克/立方厘米；

$g$ ——重力加速度；

$h$ ——冰厚；

$\alpha$ ——冰川表面坡度，取 $\alpha = 26^\circ$ 。

结果见表2。

表2 位移桩应变率计算表  
( $dt = 406$ 天)

冰厚 $h$ (cm)	剪应力 $\tau$ (巴)	剪应变率 $\dot{\epsilon}$ ( $10^{-8}$ 秒 $^{-1}$ )
1536	0.533	0.95
1563	0.543	1.14
1593	0.554	2.85
1611	0.560	2.61
1635	0.568	4.18

(2)应变孔：在与应变桩邻近位置上，垂直布置了4个直径32.6毫米的应变孔(照片6)，在洞深29米处布置了两个直径为600毫米的实心应变圆，变形过程见图1、2。变形孔仅考虑静水压力 $p$ <sup>[3]</sup>：

$$p = 0.9 h_i \times 10^{-3}. \quad (2)$$

闭合收缩率：

$$S = \frac{1}{dt} \cdot \frac{\delta}{a}. \quad (3)$$

式中： $dt$ ——时间；

$a$ ——应变圆初始半径；

$\delta$ ——变形后椭圆长短半径的变化量。

(3)式中 $\delta$ 按下式计算：

$$\delta = \frac{-(a_1 + b_1)}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + 4a} \quad (4)$$

式中： $a$ 、 $a_1$ 和 $b_1$ 分别为变形前后的长短轴长度。

表 3 给出了计算结果。

表 3 应变圆变形率计算结果  
( $dt = 229$ 天)

孔 号	$h$ (cm)	$p$ (巴)	$\delta$	$S$ ( $\times 10^{-8}$ 秒 $^{-1}$ )
1	1510	1.332	6.18	1.92
2	1550	1.368	6.80	2.11
3	1590	1.403	6.78	2.10
4	1630	1.438	16.3	5.05
5	1930	1.703	12.3	2.09
6	2000	1.764	15.5	2.63

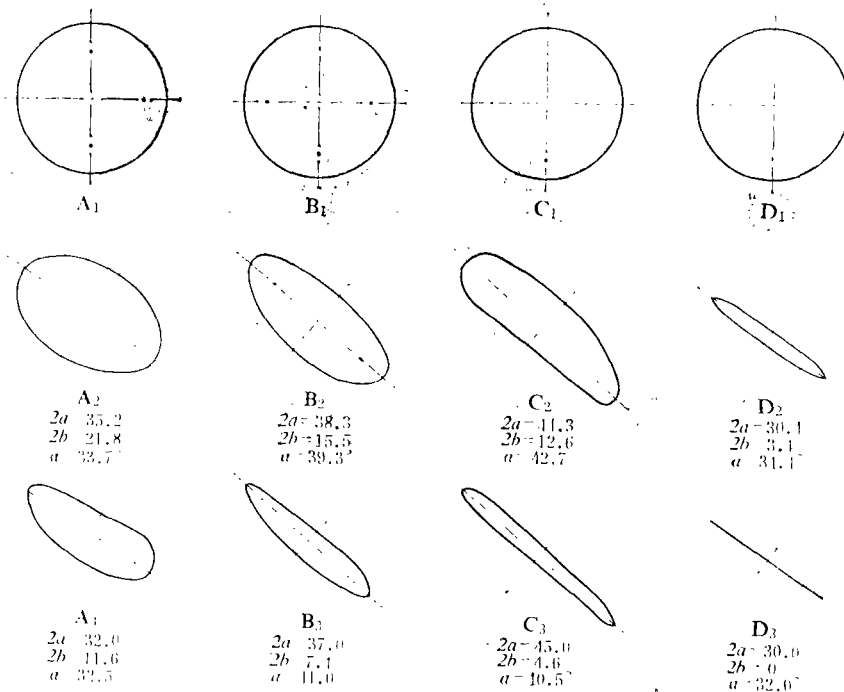


图 1 圆形孔在剪应力作用下的变形  
(单位: mm)

迄今对于冰川底部冰体流动的现场研究工作甚少,可资比较的仅有G.Holdsworth等在南极Meserves冰川上的部分资料(表4)[3]。两冰川测点均位于或接近“琥珀”冰层内,1号冰川底部冰层在低应力情况下应变率均高于Meserves冰川,影响冰体流变规律的因素是很多的,冰晶结构、冰内杂质、冰川类型及冰床特性等,这些都可能导致冰体流变速率的差异。

我国冰洞研究还处于最初阶段。笔者衷心期望获得各方的指导帮助。冰洞的开掘已

表 4 南极 Meserve 冰川应变孔变形率  
( $dt=310$ 天)

编 号	$h$ (cm)	$p$ (巴)	$\delta$	$S$ ( $\times 10^{-9}$ 秒 $^{-1}$ )
1	2415	2.06	0.46	3.54
2	2460	2.10	0.41	2.94
3	2540	2.17	/	
4	2610	2.23	0.49	3.55
5	2650	2.26	0.67	4.80
6	2740	2.34	0.89	6.47
7	2860	2.44	1.00	7.25

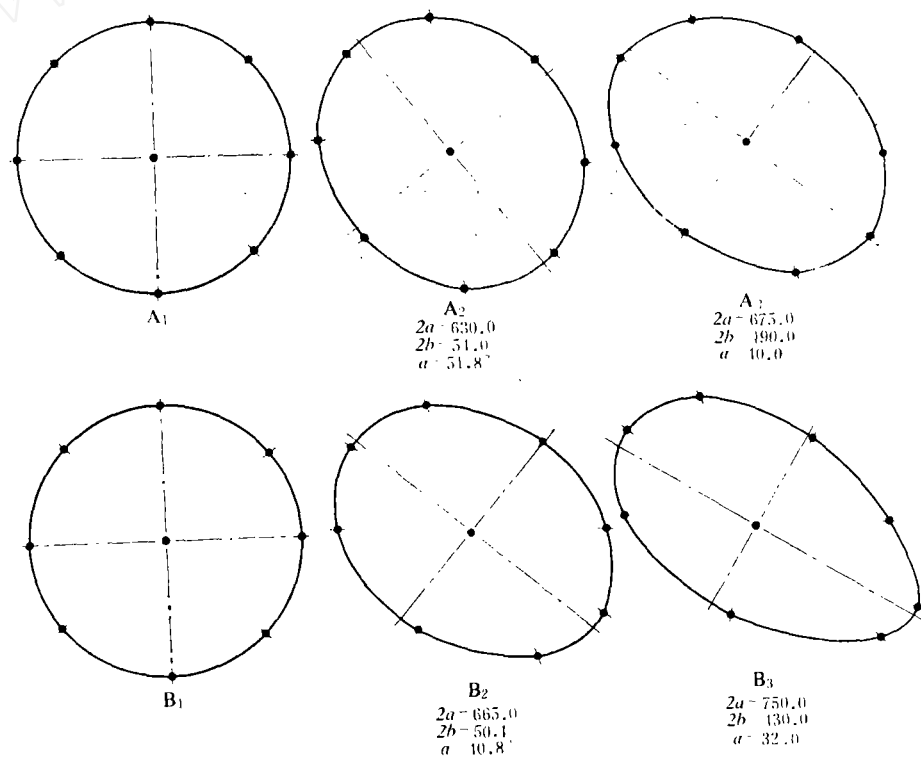


图 2 实心圆在剪应力作用下的变形  
(单位: mm)

为我们提供了有益的启示和方便的条件。相信随着研究工作的逐步深入,将可能对冰体流变规律、滑动机制、冰晶结构以及冰床特性等重要问题做出有益的贡献。

## 参 考 文 献

- [1] Robert Vivian, 1980, The Nature of the Ice-rock Interface: The Results of Investigation on 2000 m<sup>2</sup> of the Rock bed of Temperate Glaciers, *Jour.of Glaciol.*, Vol.25, No.92.
- [2] S.C.Colbeck and R.J.Evans, 1973, A Flow Law for Temperate Glacier Ice, *Jour.of Glaciol.*, Vol.12, No.64.
- [3] C.Holdsworth and C.Bull, The Flow law of Cold Ice, Investigations of Meserve Glacier Antarctica. International Symposium on Anterctic Glaciological Exploration. Hanover. New Hampshire USA 3—7 Sept 1968.
- [4] R.Haefoli, Observations in Ice Tunnels and the Flow Law of Ice, Ice and Snow, the Massachusetts Institute of Technology press, Cambridge. Massachusetts, 1963.

(本文于1982年6月12日收到)

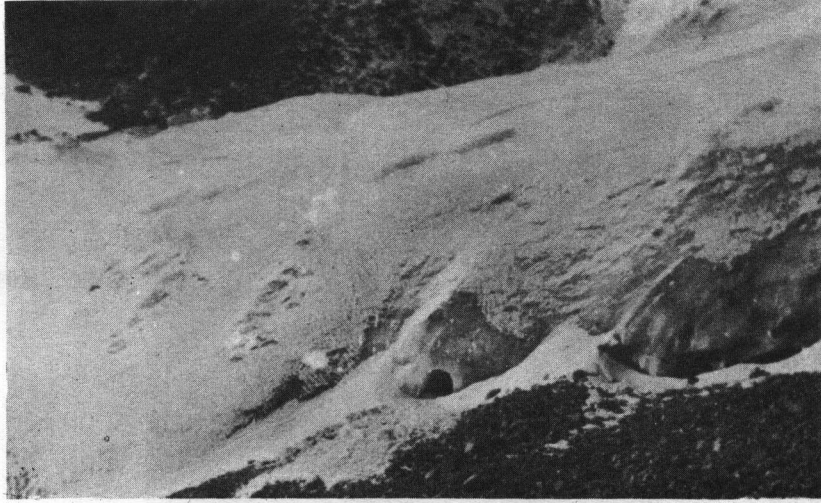
## A PRELIMINARY SURVEY ON THE ICE CAVE OF THE GLACIER NO.1 AT THE SOURCE OF URUMQI RIVER, TIAN SHAN

Wang Zhongxiang

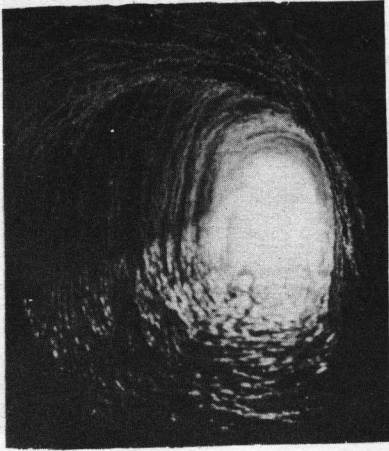
(Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Sinica)

### Abstract

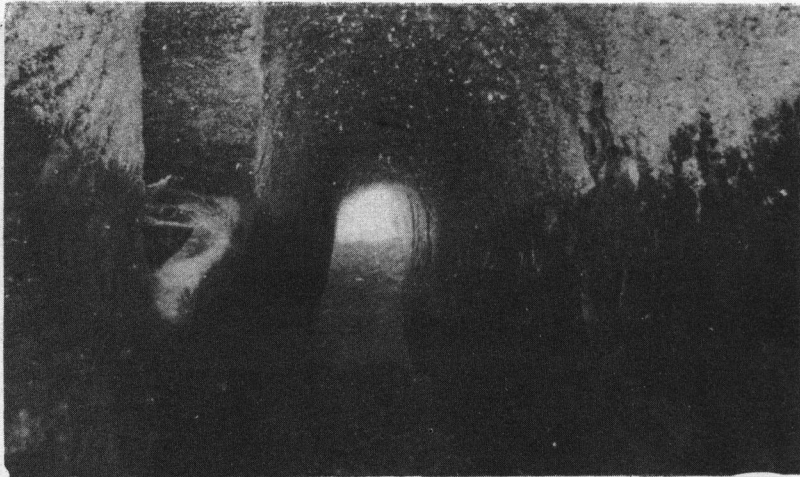
The first man-made ice cave of our country has been dug at the end of the No.1 glacier of Urumqi river source, Tian Shan, in October, 1980. It is 2.0m in height, 1.5m in width and 90m in length. It can be seen that the air bubble, clay and granule material in the glacial ice are distributed in discontinuous layers. Amber ice is present in the bottom below 1.5m. Cup-shaped secondary frost crystal is developed at the top of the cave 20m high. A survey using a butt joint displaceable stake shows that there is a glacial slide on the glacial bed with a velocity of 1.75-2.12 m a year. According to the temperature of the ice layer and other phenomena, we can imagine that perhaps a warm ice layer is present at the bottom of the glacier. The level holes on the ice wall and the survey from the movable stake shows that there is a fast strain rate for the bottom ice layers.



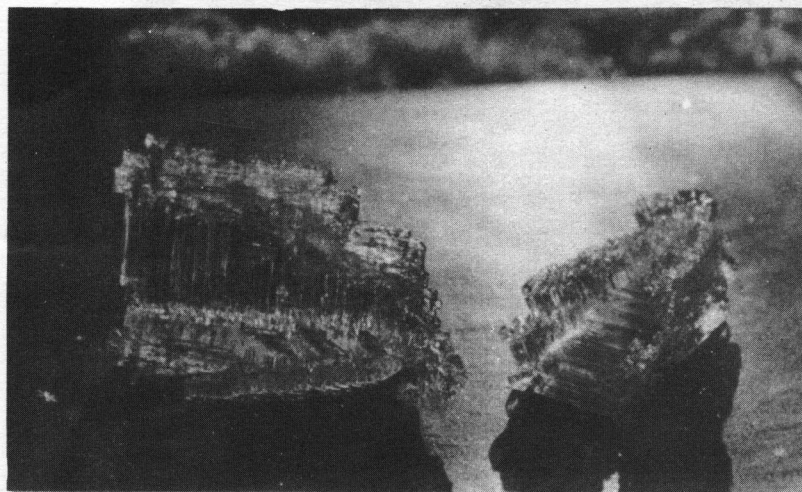
照片1 冰洞位置——乌鲁木齐河1号冰川西支末端(海拔3800米)



照片2 冰洞

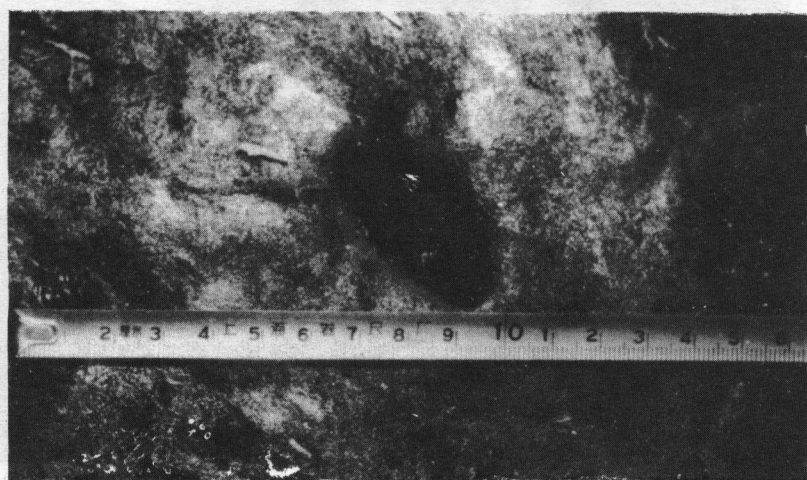
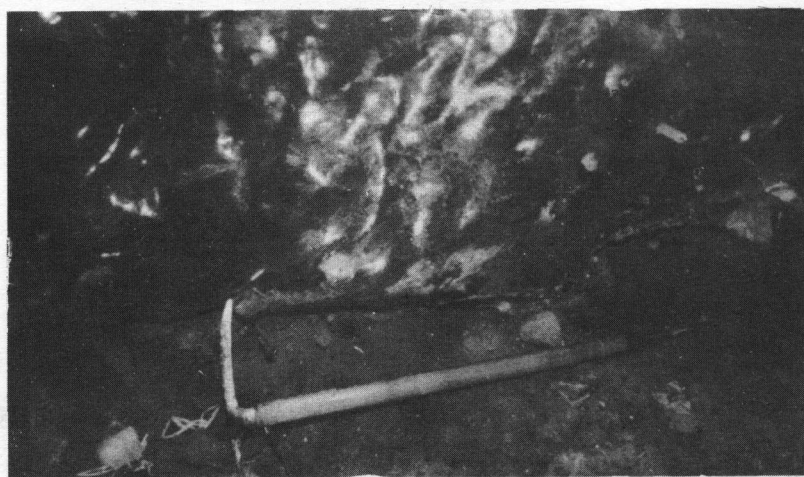


照片3 冰体的横向剪变形和裂隙，顶部为霜晶，下界为一水平线



照片4 冰洞内的霜晶

照片5 清晰的底部  
滑动界面



照片6. 在剪应力作用  
下，圆形孔变  
成了椭圆形