第7卷 第2期 冰 川 冻 土 Vol. 7 No. 2
1985年6月 JOURNAL OF GLACIOLOGY AND GEOCRYOLOGY June, 1985

天山乌鲁木齐河源1号冰川冰体流变的现场观测与试验研究

——人工冰洞研究之一

王仲祥 宋根海 李 纲
（中国科学院兰州冰川冻土研究所）

天山人工冰洞开掘在乌鲁木齐河源1号冰川西支末端（图1）。洞口高程3820米。有关冰洞开挖及最初的观测结果已作过简短报道[1]。1982年冬季再次将冰洞整修后着重进行了冰体流变的现场观测与冰的蠕变试验。

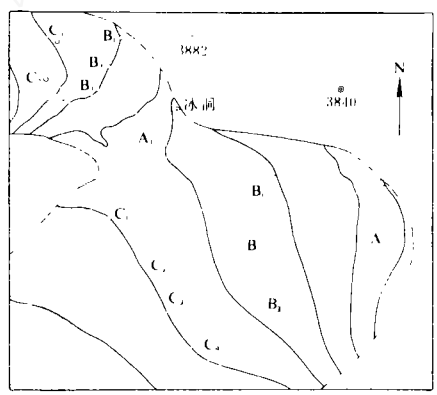

图1 1号冰川冰舌和冰洞位置

Fig. 1. The map showing the position of ice tunnel in No. 1 Glacier

整修后的冰洞全长为70余米，洞身走向为南东75°—85°—55°，断面为矩形，顶部拱起，高2.0—2.2米，宽1.5—1.8米，并在距洞口42米的D点处，向上开挖—7.5米高竖洞。冰洞整修完毕后，即在洞内顶部设置了7个控制测点，与洞外测量基点相联系进行冰洞的控制测量。相应的测点也同时布设在冰洞底部和冰川表面，以测量冰川的运动速度。

冰体流变采用垂直分布的位移桩和应变圆方法进行。蠕变试验在洞口底部取样后在后峡天山站内进行。温度测点分别埋设在冰洞的顶部、侧部和底部。以上各类测点与冰洞方位见图2。

本文着重给出应变桩观测结果，冰的蠕变试验与冰温资料，并就此作出简单分析。冰体流变规律是冰川运动学理论的核心部分，利用人工冰洞进行现场研究以及开展冰的蠕变试验，对于我们均属首次，浅陋和谬误之处敬请指正。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

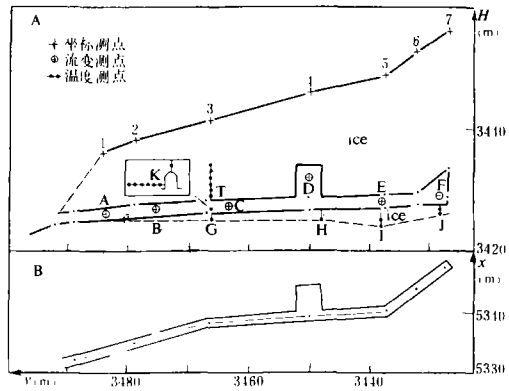

图 2 冰洞垂直剖面(A)、水平投影(B)及观测点位置

Fig. 2. The vertical section of ice tunnel (A) and its horizontal projection (B). The position of observation marks is also shown

冰体流变的现场观测

J. W. 格林（1955）提出的冰体流变幂数方程的一般形式为[2]：

$$\dot{\varepsilon} = A\tau^n. \tag{1}$$

式中：$\dot{\varepsilon}$ ——有效剪应变率；

τ ——有效剪应力；

A, n——冰体流变参数。

据此，则冰体流变的现场观测，在于取得垂直断面上各点或各微小单元体之间的相对位移量以及相应的剪应力。基于这一设想，在冰洞内D点7.5米高的竖洞侧壁上布设了一组由14个木桩组成的等间距垂线，测量冰川主流线垂直剖面上的水平位移量。

D点冰川总厚度约22米，位移桩控制高度为7米，约占该点冰川厚度的三分之一，各桩间距约50厘米。量测时在上部1号桩上悬挂一垂球，待垂球稳定后固定在底部，用直钢尺量测各桩与垂线间的水平距l。两相邻桩与垂线的水平距差值Δl即为两点间的相对位移。如图3所示，若两点间垂直距离为Δh，时间为Δt时，如果位移发生在流动方向上，

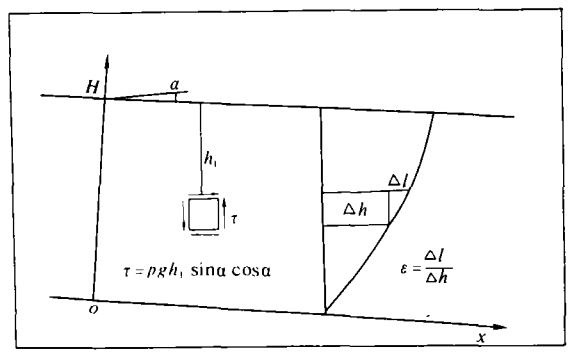

图 3 剪应力与应变计算坐标示意图

Fig. 3. The schematic drawing for calculation of shear stress and strain

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

则其应变率ε 可用下式表示：

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{\Delta h} \cdot \frac{1}{\Delta t} \tag{2}$$

相应的剪应力τ 可近似地按下式求得：

$$\tau = \rho g h \sin\alpha\cos\alpha \tag{3}$$

式中：ρ —— 冰的密度，取$\rho = 0.9$ 克/立方厘米；

g —— 重力加速度；

h —— 冰厚度；

α —— 冰面坡度，取$\alpha = 15°$ 。

D点位移桩于1983年1月13日设置完毕，分别在4月17日、9月9日和11月28日进行了三次观测。各次观测与计算值列于表1。

将表1中相应的$\dot{\varepsilon}$ 和τ 按格林定律拟合时，三次观测值分别得到如下结果：

Ⅰ　$A_1 = 6.03 \times 10^{-15}\ s^{-1}\ (kPa)^{-n}$　$n_1 = 3.42$

Ⅱ　$A_2 = 2.51 \times 10^{-13}\ s^{-1}\ (kPa)^{-n}$　$n_2 = 2.52$

Ⅲ　$A_3 = 4.17 \times 10^{-12}\ s^{-1}\ (kPa)^{-n}$　$n_3 = 1.74$

各次相关系数为：0.61、0.73、0.76。

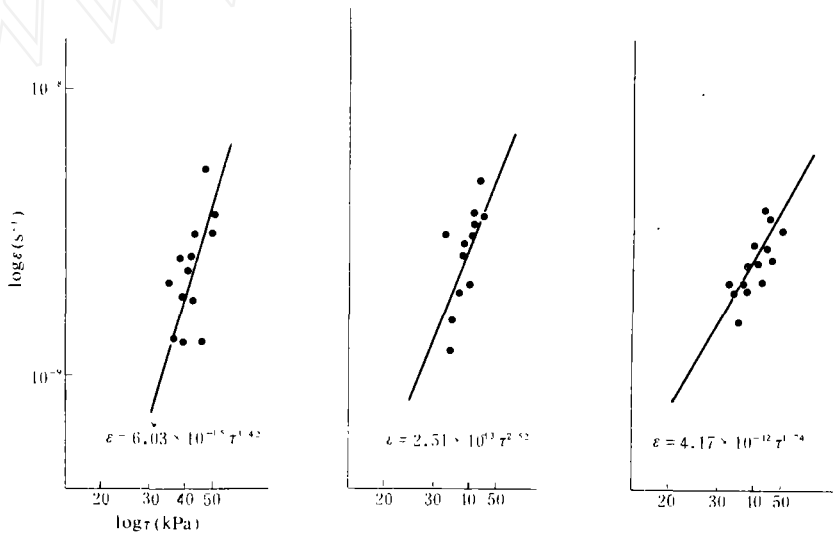

图4　冰洞实测$\log\tau$—$\log\dot{\varepsilon}$曲线

Fig. 4. The measured τ versus $\dot{\varepsilon}$ logarithmically

图4给出了$\log\tau$—$\log\dot{\varepsilon}$ 曲线。可以看出，第一次观测值较为散乱，观测误差是原因之一；而各次观测1号桩的$\dot{\varepsilon}$ 值一律偏高，则可能与其所处的顶部位置有关。

W·S·B·帕特松(1980)将一些冰川的研究结果汇总于表2。

我们将三次的观测结果进行一次拟合，得到：

$$A = 6.45 \times 10^{-13}\ (kPa)^{-n} \qquad n = 2.22$$

与表2比较，n值偏低，A值则高，但实际结果仍然偏高，即1号冰川底部有较高的应变率。A值偏高则与冰体温度有关，这将在下面进一步讨论。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 位移桩观测与计算表

Table 1. The measured data of displacement marks and their related indexes

测桩号 (No.)	测桩高程 (m)	测桩间距 (mm)	Ⅰ 4月17日 (94天) 冰厚 (m)	剪应力 (kPa)	相对位移 (mm)	应变率 ($\times10^{-9}s^{-1}$)	Ⅱ 9月9日 (238天) 冰厚 (m)	剪应力 (kPa)	相对位移 (mm)	应变率 ($\times10^{-9}s^{-1}$)	Ⅲ 11月28日 (319天) 冰厚 (m)	剪应力 (kPa)	相对位移 (mm)	应变率 ($\times10^{-9}s^{-1}$)
1	3833.31													
		500	16.07	35	8	2.10	15.37	33	30	3.10	15.33	33	28	2.16
2	3833.81													
		511	16.57	36	2	0.51	15.87	34	12	1.21	15.83	34	26	1.96
3	3832.30													
		490	17.04	37	5	1.33	16.34	35	15	1.58	16.30	35	20	1.57
4	3831.81													
		500	17.57	38	5	1.31	16.87	36	19	1.96	16.83	36	28	2.16
5	3831.31													
		500	18.07	39	10	2.62	17.37	38	26	2.69	17.33	37	26	2.01
6	3830.81													
		500	18.57	40	7	1.82	17.87	39	25	2.58	17.83	38	32	2.47
7	3830.31													
		500	19.07	41	9	2.36	18.37	40	28	2.89	18.33	40	38	2.93
8	3829.81													
		498	19.57	42	7	1.84	18.87	41	20	2.07	18.83	41	33	2.55
9	3829.32													
		498	20.06	43	10	2.63	19.36	42	30	3.11	19.32	42	28	2.17
10	3828.82													
		498	20.56	44	12	3.15	19.86	43	33	3.42	19.82	43	37	2.86
11	3828.32													
		500	21.06	46	5	1.31	20.36	44	35	3.62	20.32	44	50	3.86
12	3827.82													
		500	21.56	47	20	5.24	20.86	45	47	4.86	20.82	45	48	3.70
13	3827.32													
		500	22.06	48	12	3.15	21.36	46	35	3.62	21.32	46	34	2.62
14	3826.82													
		470	22.55	49			21.85	47			21.81	47		
15	3826.35													

注：1）由于冰洞与冰川主流线方向存在20°夹角，应变率计算均作了角度改正。

2）桩设置时间为1983年1月13日。

表 2　某些冰川冰钻孔中的流变参数(0 ℃)
Table 2. Flow law parameters from borehole at 0 ℃

冰　川	$As^{-1}(kPa)^{-n}$	n	资　料　来　源
Salmon	8.85×10^{-15}	2.8	Mathews, 1959
Athabasca	5.56×10^{-18}	4.2	Paterson and Savage, 1963
Athabasca	1.05×10^{-15}	3.13	Paymond, 1973
Blue	5.06×10^{-20}	5.2	Kamb and Shreve, 1966
Blue	4.38×10^{-15}	3.3	Shreve and Sharp, 1970

冰的蠕变试验

冰川冰的蠕变试验目的，是希望排除某些现场因素的干扰，从而确定冰流规律中的参数A和n值，并与现场研究结果相比较。

冰的蠕变试验通常采用两种方法：1）恒定荷载试验；2）恒定蠕变率试验。由于后者在操作和实验条件上均难以达到，一般多采用恒定荷载试验方法。

本次试验采用自行研制的恒定荷载蠕变试验机(图5)，共进行了14次单轴压缩试验，冰样取自冰洞底部同一地点。试件断面制成正方形，宽高比为1∶4，试验时将冰样置于试验机正中，两端接触面均需水平，局部微小凹陷用注射器注水填平，以保证试样端面与荷载压板完全接触。荷载压板均经省级计量局标定，观测采用一等百分表进行。试验应力范围为71—408kPa。试验时温度变化在-18— -1 ℃，其中大部分试验在-5— -15 ℃之间完成，个别试验温度较高。试验时间最长为262小时，一般不少于147小时，均达第二蠕变阶段。图6是典型的$\dot{\varepsilon}-t$曲线。可以看出，当冰样开始受力时，应变率随时间变化迅速降低；之后逐渐趋于稳定，这就是第二蠕变阶段；当应力持续作用，达到第三蠕变

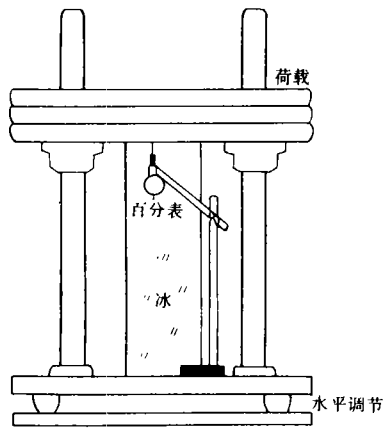

图 5　蠕变试验机示意图
Fig. 5. Schematic drawing of creep test equipment

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

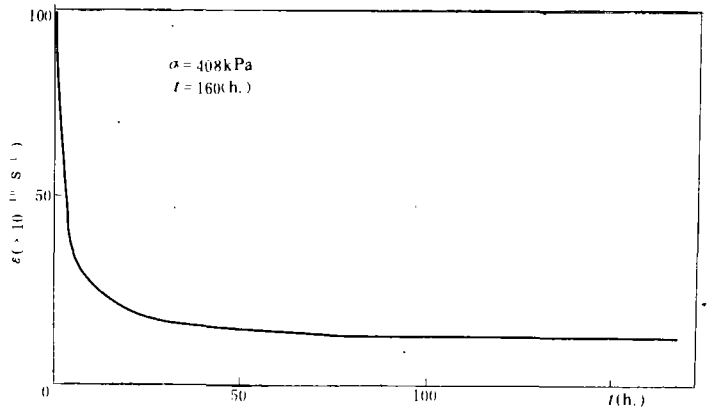

图 6 典型单轴压缩$\dot{\varepsilon}-t$过程线

Fig. 6. Typical $\dot{\varepsilon}-t$ curve of uniaxial compression

阶段时，应变率又迅速回升，冰体破坏。我们所做的14个试验中，仅有一例达第三蠕变阶段。对于研究应力持续作用的冰川而言，第一蠕变阶段并不重要，而在于第二蠕变阶段。但实际上，第二蠕变阶段的准确判定是十分困难的，因为所谓稳定蠕变阶段的应变率并非定值，只是其变化较小而已。我们采用格林定律拟合时，对ε的选择只能在其变化最小的区间进行选取，并使相同应力条件下的试验尽可能选取大致相同的时间长度。其中1、2、13号试验由于时间太短和很快达到第三蠕变阶段不具有代表性，予以舍弃。

在单轴压缩时的格林定律可表示为：

$$(\sqrt{3}/2)\ \dot{\varepsilon} = A(\sigma/\sqrt{3})^n \ . \qquad (4)$$

式中：σ ——压应力；

$\dot{\varepsilon}$ ——压缩应变率[3]。

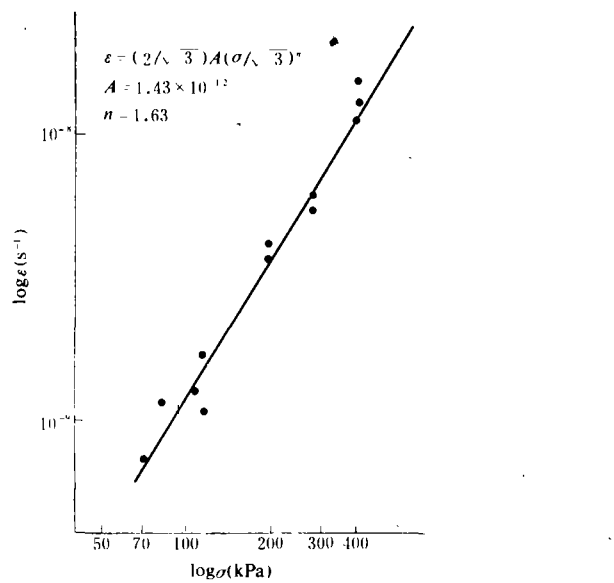

图 7 试验$\log\sigma-\log\dot{\varepsilon}$曲线

Fig.7. Experimental σ versus $\dot{\varepsilon}$ logarithmically, of uniaxial compression

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

按此式拟合后得到：

$$A = 1.43\times10^{-12}\ s^{-1}\ (kPa)^{-n} \qquad n = 1.63$$

图7给出了$\log\sigma$—$\log\dot{\varepsilon}$试验曲线，试点分布有较好的规律性，n值也与文献给出的试验数值较接近，表3给出了这些试验结果。

表3　冰体蠕变试验参数

Table 3. Values of flow law parameter n from experiment

试　验　者	应　力(kPa)	温　度(℃)	n	年　代
格　林	100—1100	-0.02—-12.8	3.2	1955
施大因曼	70—2000	-1.9—-21.5	1.85—4.2	1958
麦罗尔，梯斯塔	43—9.3	-2.06	1.8	1969
科伯克，伊文思	<100		1.2	1973

注：此表转引自李吉均编《冰川与冰川地貌》第二部分，1981年油印本。

关于冰体流变与底部滑动的讨论

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。1号冰川曾被看作是亚大陆型冰川，属冷冰川类型。近来由于冰川温度研究的深入，对于1号冰川性质的认识已有所改变，倾向属于大陆多温型冰川[1]。1981年我们在冰洞内测得该冰川存在滑动以来，曾力图获得更多的证据。1983年2月至11月在冰洞内G、H、I、J 4个位置上钻孔测量底部温度，这4个钻孔均达到冰与底碛界面上。采用石英晶体温度计进行观测，其精度为 ±0.01℃。观测结果列入表4，最高温度可达0.24℃，最低温度为-2.85℃，可见低层温度很高。1983年9月在冰洞后部的微小裂隙中发现有向上涌水现象，上列测孔在钻孔时均发现有底部空穴。图8给出了冰洞内气温过程线及距洞口27米冰洞侧壁6米深范围内的温度变化，可知冰壁浅层温度亦不低于2.3℃。以上均为产生滑动的有利因素或表明滑动存在提供了证据，因此，对于1号冰川底部存在滑动的事实已不应怀疑。

表4　冰洞内冰川底部温度

Table 4. The temperature inside the bottom ice in the tunnel

序　号	G	H	I	J
测点深度(m)	0.9	2.3	3.0	1.75
最高温度(℃)	0.41	0.53	0.24	0.30
最低温度(℃)	2.88	1.22	0.62	0.32

1）任贾文，天山乌鲁木齐1号冰川温度分布及其某些特征（待刊）

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

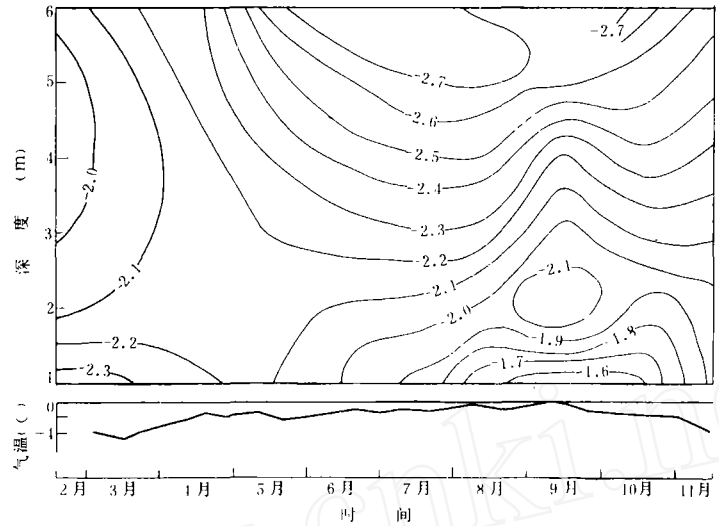

图 8 冰洞内 K 点冰温等值线图

Fig. 8. Temperature diagram at point K inside the ice tunnel

据冰川表面 4 号测点测得该点年运动速度为4.87米(据235天资料推算)；取$A = 6.45 \times 10^{-13}\ (\mathrm{kPa})^{-n}$ 和$n = 2.2$，按格林定律和(2) 式计算得到该点年变形量Δl值为0.68米。上述两者差值应为冰川底部滑动量，也就是说冰川该处的年滑动量约在4 米左右。1981年我们曾在冰洞内测得底部滑动速度为2.1米/年。在近期的工作中又发现，冰洞内不同点的滑动速度存在着明显的差异，而同一点的速度也不是稳定的。这就说明该处 2—4 米/年的底部滑动速度是可能的。

结 论

根据以上资料及简单分析，得出以下两点认识：

1. 1 号冰川底部冰层流变较快，实测参数A加n 值略为偏高，可能反映了该冰川底部的流变事实，单轴压缩试验求得的A 和n 值与目前国际通用参数值较为吻合，有一定的参考价值。

2. 1 号冰川底部冰层属于高温冰范畴，底部存在滑动，但其量值范围和冰川垂直运动速度分布图式尚需进一步深入研究。

致谢：此项研究工作在黄茂桓副教授指导下进行的，本所仪器室特为此赶制了石英晶体温度计，谨致感谢。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献

〔1〕王仲祥，1983，天山乌鲁木齐河源1号冰川人工冰洞初步观测，冰川冻土，5卷1期。

〔2〕Glen, J. W., 1955, The Creep of Polycrystalline, Proc. -R, Soc. London Sen A 228.

〔3〕Paterson, W. S. B., 1981, The Physics of Glaciers, (2nd ed.) Pergamon Press.

（本文于1984年8月15日收到）

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Observation and Experiment on inner Flow Characteristics of Glacier No. 1 in the Urumqi River Headwaters, Tianshan

——Investigation on Artificial Tunnel, Part 1

Wang Zhongxiang, Song Genhai and Li Gang

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica)

Abstract

In order to investigate the inner flow characteristics of continental type glacier, an artificial tunnel was dug.

14 observation marks were fixed on a vertical line in the side-wall of section D inside the ice tunnel. This section was in a vertical shaft 7 m high. Measuring the glacier thickness and observing the horizontal displacement of the observation marks, 3 times in 1983, we could estimated the stress and strain in this section, and then got the flow law parameters $n = 2.22$ and $A = 6.45 \times 10^{-3}$ s^{-1} $(kPa)^{-n}$.

Uniaxial compression tests under the stress condition from 71 to 408 kPa and the temperature condition from −18 to 1℃ were carried out more than 147 hours. Samples were taken from the ice tunnel. It was considered that the secondary creep period was attained at last, then the flow law parameters of $n = 1.63$ and $A = 1.43 \times 10^{-12} s^{-1}$ $(kPa)^{-n}$ were obtained.

Ice tunnel was surrounded by warm ice with a temperature not lower than −2.3℃ in the section, 27 m from the entry. The water sprung up from the bottom had been seen. It was possible that a basal sliding with a velocity of 2—1 m year was taking place.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net