

乌鲁木齐河源1号冰川含岩屑冰川冰 的恒应力蠕变试验^①

李 纲 王茂海 黄茂桓 王文悌

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000)

提 要 在天山乌鲁木齐河源1号冰川底部取冰样12个, 加工成直径113 mm, 长200 mm的试样, 在 $-1 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 和0.42 MPa(其中一试样为0.84 MPa)的条件下, 作恒应力单轴压缩蠕变试验, 试样岩屑含量为0.01—2.50%的体积比。试验得出最小应变率出现在应变为1%左右, 流动参数 A 与纯冰实验结果相近, 未发现岩屑含量对冰的蠕变有明显影响。

关键词 蠕变 含岩屑冰川冰 乌鲁木齐河源1号冰川

为研究冰川或冰盖的运动规律, 进行数学模拟, 需要进行冰的流变学实验, 求得冰的流动参数。为此不少学者对人造冰和天然冰进行了大量的实验研究, Budd等(1989)作了全面评述。我国曾对南极天然冰进行过反复压缩—退火实验(Huang *et al.*, 1991), 也开展了人造冰的蠕变实验(李纲等, 1992; 黄茂桓等, 1994)。但对我国的冰川冰只作过一些简单的实验(王仲祥等, 1985), 有待深入研究。

在乌鲁木齐河源1号冰川(简称1号冰川)西支人工冰洞观测研究中, Echelmeyer等(1987)发现, 冰川底部含岩屑的冰层为一软弱层。在一厚0.35 m的含碎屑冰层, 其温度约为 -2°C , 测得平均剪切应变率为 $2.30 \times 10^{-6} \text{d}^{-1}$, 而与此相邻的上面洁净的冰层内测得平均剪切应变率为 $2 \times 10^{-4} \text{d}^{-1}$ 。如果忽略两处剪应力之差别, 则可算出两者有效粘度差115倍, 即由于含岩屑冰的有效粘度大大降低, 剪应变率大大提高, 致使该处厚度不足冰川总厚度2%的含岩屑底层发生的变形, 占冰面上测出冰川运动的60%。本次实验目的在于用实验的手段检验含岩屑是否提高应变率及提高程度。

试验在WZ-7恒应力蠕变试验机上进行, 试验机安装在冷室内。对该机性能及工作原理李纲等(1992)已作介绍, 本文不再赘述。

1 试样采集及加工

本次试验所用冰样取自1号冰川西支末端(原冰洞旧址)底部的冰川冰, 在不同位置采用蒸汽钻切取大块样, 作为粗样, 共取3次, 每次4个样。表1列出12个试样的

^①本文于1994年1月14日改回; 属国家自然科学基金资助项目的子课题。

冰、砂土、气泡的含量。其中3号和13号为同一个试样。

蠕变实验结束后,将试样融化,回收岩屑。1—4号试样为一组,5—8号试样为另

表1 试验所用冰样的冰、砂土、气泡的含量

Table 1 Components of ice, sand and air in the tested specimens

试样号	W (g)	I_m (g)	V_1 (cm^3)	V_2 (cm^3)	V_3 (cm^3)	V_1/V (%)	V_2/V (%)	V_3/V (%)	I_m/W (%)
1	1 765	1.0	75.966	1 923.664	0.370	3.80	96.18	0.02	0.06
2	1 765	9.8	82.302	1 914.068	3.630	4.12	95.70	0.18	0.56
3	1 800	16.4	48.888	1 945.038	6.074	2.44	97.25	0.30	0.91
4	1 790	1.6	49.154	1 950.273	0.593	2.46	97.51	0.03	0.09
5	1 865	50.4	2.489	1 978.844	18.667	0.12	98.94	0.93	2.70
6	1 875	81.6	14.053	1 955.725	30.222	0.70	97.79	1.51	4.35
7	1 890	134.1	35.502	1 914.831	49.667	1.78	95.74	2.48	7.10
8	1 895	107.2	10.678	1 949.618	39.704	0.53	97.48	1.99	5.66
9	1 775	0.5	64.700	1 935.115	0.185	3.24	96.76	0.01	0.03
10	1 755	3.0	88.311	1 910.578	1.111	4.42	95.53	0.06	0.17
11	1 735	0.6	108.393	1 891.385	0.222	5.42	94.57	0.01	0.03
12	1 800	0.7	37.582	1 962.159	0.259	1.88	98.11	0.01	0.04
13	1 800	16.4	48.888	1 945.038	6.074	2.44	97.25	0.30	0.91

注: W 为试样总重量; V 为试样总体积($2\,000\text{ cm}^3$); I_m 为砂土重量; V_1 为气泡体积; V_2 为纯冰体积;
 V_3 为砂土体积。

表2 试验试样粒度分析

Table 2 Grain composition of the tested specimens

粒 度		1—4号样		5—8号样	
(φ)	(mm)	(%)	累计(%)	(%)	累计(%)
1.0	0.50	5.53	5.53	3.73	3.73
2.0	0.25	19.05	24.58	24.73	28.46
3.0	0.125	15.75	40.33	20.80	49.26
3.5	0.088	3.10	43.43	3.63	52.89
4.0	0.063	8.02	51.45	8.08	60.97
5.0	0.031	13.80	65.25	10.70	71.67
6.0	0.0156	9.56	74.81	9.30	80.97
7.0	0.008	10.15	84.96	5.96	86.93
8.0	0.0039	6.39	91.35	5.32	92.25
9.0	0.002	3.40	94.75	2.66	94.91
10.0	0.001	2.15	96.9	2.22	97.13
>10.0	<0.001	2.40	99.3	2.24	99.37

一组, 进行粒度分析, 分析结果列于表 2。由表 2 可见, 试样中岩屑以中砂、细砂和粉砂为主, 含少量粘土。

粗样用钻机加工成直径 113 mm, 长 220 mm 的圆柱体。精修两个断面, 使之成为长 200 mm 的实验标准试样。

2 试验结果与分析

本次试验除了 13 号样采用 0.84 MPa 的恒应力值外, 其余样品均采用 0.42 MPa 的恒应力值。实验温度控制在 $-1 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内。因此本实验与以往实验相比具有样品尺寸大(更能较全面反映天然冰的实际情况)、温度高、应力中等的特点。

压缩蠕变过程表明, 开始加载后出现数小时的加工硬化, 结果在 0.5—2% 轴向应变时出现一最小应变率, 然后经过一加速蠕变阶段向第三蠕变阶段过渡。Glen 总结了冰的流动规律, 给出了下列经验关系式:

$$\dot{\varepsilon} = A\tau^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为剪应变率; τ 为剪切应力; n 为常数; A 为与冰温、冰晶体大小和取向、杂质含量等因素有关的参数。此式即为冰的格伦定律 (Parterson, 1981)。

在压缩蠕变试验中, 试样经数小时的加工硬化后出现一最小应变率 $\dot{\varepsilon}_{\min}$, 是冰样的重要力学特征之一。本次试验中 13 个试样在达到最小应变率时的有关参数均列于表 3 中。由表 3 中可见, 由于冰试样的结构、气泡含量及杂质的不同, $\dot{\varepsilon}_{\min}$ 、达到 $\dot{\varepsilon}_{\min}$ 时所用

表 3 蠕变试验基本数据^①
Table 3 Main experimental data

试样号	$\dot{\varepsilon}_{\min}(10^{-7}\text{s}^{-1})$	$t(\text{h})$	$\varepsilon_{\min}(\%)$	$A^{\frac{1}{3}}[(10^{-15}(\text{kPa})^{-3}\text{s}^{-1})]$
1	0.63	12	0.7	3.827
2	0.56	5	0.2	3.401
3	0.03	103	0.4	0.182
4	0.21	50.5	1.0	1.276
5	1.25	8.8	1.0	7.592
6	0.35	27.3	0.7	2.126
7	0.35	60	1.9	2.126
8	0.11	124	1.1	0.668
9	0.26	30	0.8	1.579
10	0.15	80.9	1.0	0.911
11	0.80	28.1	1.5	4.859
12	0.14	84	0.8	0.850
13	1.81	2.5	0.5	10.99

①作用恒应力为 0.42 MPa, 但 13 号试样为 0.84 MPa; ② A 值按式(1)取 $n=3$ 计算得。

的时间(t)、 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 所对应的轴向应变值(ϵ_{\min})有所不同。试样的 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 越低,所需的时间越长。从表 3 中亦可见到试样达到 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 对 13 个样品来说变化不大,大约在 1% 左右。

将冰的格伦定律应用于单轴压缩情况下达到 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 时,我们有:

$$\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\dot{\epsilon}_{\min} = A\left(\frac{\sigma}{\sqrt{3}}\right)^n \quad (2)$$

式中: σ 为轴向应力。

$$\text{取 } n = 3 \text{ 时, } A = \frac{9}{2} \frac{\dot{\epsilon}_{\min}}{\sigma^3} \quad (3)$$

试验中所使用的 13 个试样在达到 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 时的 A 值亦列在表 3 中。由表 3 可见,除 3 和 13 号试样外,各试样的 A 值虽略有不同,但变化不大,其平均值为 $2.66 \times 10^{-15} (\text{kPa})^{-3} \text{s}^{-1}$ 。此值与 Steinemann 所给出的 -1.9°C 和 40—90 kPa 应力范围下的 A 值 $3.7 \times 10^{-15} (\text{kPa})^{-3} \text{s}^{-1}$ (Paterson, 1981) 相接近。

各试样体积含砂量详见表 1。将试样与其中体积含砂量为 0.01—0.18% 的各试样的蠕变曲线绘于图 1 中(图 1—3 中数字为试样号),体积含砂量比为 0.93—2.48% 的各试样的蠕变曲线绘于图 2 中,并进行对比。尽管它们之间的体积含砂量比相差几倍至几百

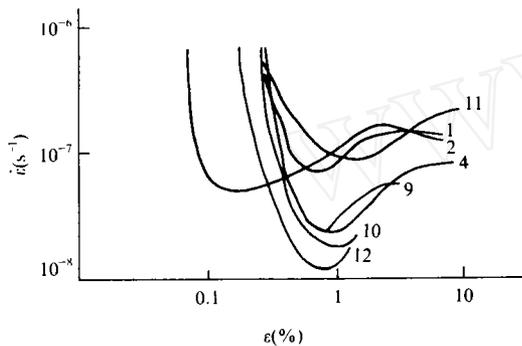


图 1 试样含砂体积比为 0.01—0.18% 的 $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系

Fig. 1 $\dot{\epsilon}$ - ϵ relationship of specimens with debris content of 0.01—0.18% by volume

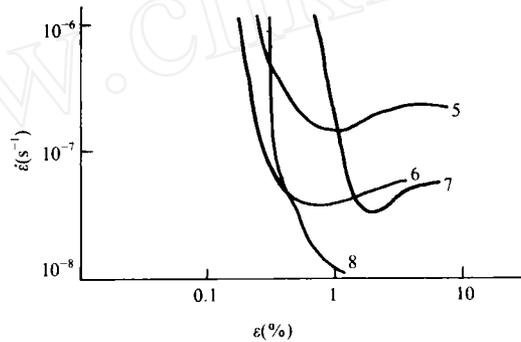


图 2 试样含砂体积比为 0.93—2.48% 的 $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系

Fig. 2 $\dot{\epsilon}$ - ϵ relationship of specimens with debris content of 0.93—2.48% by volume

表 4 6 个长期蠕变试验数据

Table 4 Experimental creep data of 6 specimens of which tertiary flow stage was approximately reached

试样号	$\dot{\epsilon}_{\min} (10^{-7} \text{s}^{-1})$	$\dot{\epsilon}_{\max} (10^{-7} \text{s}^{-1})$	$\dot{\epsilon}_{\max} / \dot{\epsilon}_{\min}$	$\epsilon_{\text{end}} (\%)$
1	0.63	1.46	2.3	9.0
2	0.56	1.25	2.2	8.2
4	0.21	0.76	3.6	8.1
5	1.25	2.36	1.9	10.5
7	0.35	0.63	1.8	7.1
11	0.80	1.98	2.5	9.1

倍, 但两图的最小应变率没有出现明显差异。这说明在所研究体积含砂量的范围内(0.01—2.48%), $\dot{\epsilon}_{\min}$ 不随含砂量的增减而明显改变。

在 1—10% 的应变区间内, 应变率不断增大。有 6 个试样的终应变(ϵ_{end})达到 7.1—10.5% 时出现一最大值 $\dot{\epsilon}_{\max}$ (表 4), 进入一个大致恒定的第三流动阶段。表 4 列出 6 个试样 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 和 $\dot{\epsilon}_{\max}$, 并由此计算出各自的 $\dot{\epsilon}_{\max} / \dot{\epsilon}_{\min}$ 的比值, 其平均值为 2.4。其 $\dot{\epsilon}-\epsilon$ 关系见图 3。

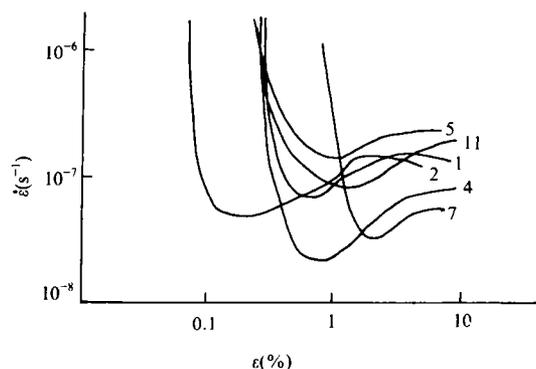


图 3 6 个到达第三流动阶段试样的 $\dot{\epsilon}-\epsilon$ 关系

Fig. 3 $\dot{\epsilon}-\epsilon$ relationship of 6 specimens of which tertiary flow stage were approximately reached

3 讨论和结论

本试验采用大试样、中等应力和高温等条件, 使试验条件更接近天山乌鲁木齐河源 1 号冰川底床附近的实际情况。

Jacka 等(1984)对原来为随机结构的多晶冰进行单轴压缩实验后指出, $\dot{\epsilon}_{\min}$ 出现在八面体剪应变大概为 0.8% 时。然后, 在约 8% 的八面体剪应变时出现 $\dot{\epsilon}_{\max}$, 其后进入近似恒定的第三蠕变阶段。该第三蠕变阶段至少持续到 32% 的八面体剪应变。在温度为 -3.0°C 和 0.2 MPa 的八面体剪应力下, Jacka 等发现, $\dot{\epsilon}_{\min}$ 约为 $2 \times 10^{-8} \text{s}^{-1}$, 只有第三蠕变率的三分之一。

本次试验对 12 个含杂质量及气泡各不相同的试样进行单轴压缩实验的结果表明, 其蠕变特性与 Jacka 等所得相类似。其 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 大约出现在 1% 左右。流动参数 A 值与纯冰实验结果相似。 $\dot{\epsilon}_{\max}$ 同 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 的比值为 2.4。此比值偏小, 可能同众多的实验的终应变未超过 10%, $\dot{\epsilon}_{\max}$ 未能真正实现有关。

综上所述, 试样杂质含量在本实验所采用的范围(0.01—2.50% 的体积比)内, 对冰的蠕变率没有明显影响。Echelmeyer 等(1987)发现含岩屑冰层软弱, 很可能是化学杂质所致(黄茂桓等, 1994)。

实验数据较为分散, 可能与冰川冰的结构异向性和不均匀性有关, 也可能与岩屑在

冰内分布不均匀有关。此外实验温度波动也有所影响。用人造冰实验, 提高温度控制精度应是今后努力方向。

致谢: 试验得到天山冰川观测实验站大力支持, 孙维贞负责粒度分析, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 王仲祥、宋根海、李纲, 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. *冰川冻土*, 7(2): 123—132
- 李纲、王茂海、黄茂桓、王文梯, 1992. 掺粉沙对冰蠕变影响的实验研究. *科学通报*, 37(10): 924—926
- 黄茂桓、李纲、王茂海, 1994. 含杂质冰近触点恒应力蠕变实验. *自然科学进展*, 4(2): 205—208
- Budd W F, Jacka T H, 1989. A review of ice rheology for ice sheet modelling. *Cold Regions Science and Technology*, 16: 107—144
- Echelmeyer K, Wang Zhongxiang, 1987. Direct observation of basal sliding and deformation of basal drift at subfreezing temperatures. *Journal of Glaciology*, 33(113): 83—98
- Huang Maohuan, Wang Wenti, Li Jun, Li Gang, 1991. Repeated compression—annealing experiments on anisotropic core ice. *Antarctic Research*, 2(1): 22—29
- Jacka T H, Maccagnan M, 1984. Ice crytallographic and strain rate changes with strain in compression and extension. *Cold Regions Science and Technology*, 8: 269—286
- Paterson W S B, 1981. *The physics of glaciers* (2nd edition). Pergamon Press, 20—41

Constant Stress Creep Experiments on Ice Containing Debris of Glacier No.1 at the Headwaters of the Urumqi River

Li Gang, Wang Maohai, Huang Maohuan and Wang Wenti

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

12 specimens were taken from the base of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River and machined to be 113 mm in diameter and 200 mm in length. Their debris contents were 0.01—2.50% by volume. The experiments were treated as uniaxial compressive creep ones with constant stress under the conditions of $-1 \pm 0.3^\circ\text{C}$ and 0.42 MPa (0.84 MPa for one specimen). It was found that minimum strain rate appeared at the strain of 1 % or so and the parameter of flow law, A, approximately equals to that of clean ice. Positive dependence of ice creep on debris content have not been observed.

Key words: creep, glacial ice containing debris, Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River