

温度对岩石导电性的影响及其与地震的关系

陆 阳 泉

(兰州地震研究所)

组成地壳表部岩石的导电性在自然埋藏状态下主要取决于岩石的结构、构造和矿物成分以及岩石所处环境的温度、压力、孔隙溶液的含量、浓度及其化学成分。不同含湿量的各种岩石在外力作用下视电阻率的变化特征国内外已积累了较丰富的实验资料。但是,温度对岩石电阻率的影响这一不可忽略的重要因素目前尚未引起广泛重视,特别是在地震预报中的应用研究得更少。我国广大地震工作者在地震实践中发现了震前地下温度场的局部变化及其对视电阻率的影响,为我们研究温度场变化、岩石导电性与地震的关系提供了线索。

本文综合了岩石导电性与温度关系的某些实验结果,得出在温度作用下岩石电阻率有如下特征:岩石电阻率随温度升高而下降;电导率曲线发生转折以及具有相当显著的数量变化。同时对导电机制进行了简单讨论。岩石导电性与温度关系的这些变化规律与地震预报的关系极为密切,文中指出我国近年来几次大地震前地下温度场变化幅度达 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以引起百分之几到百分之十几的电阻率变化,它可能成为震前地电异常的原因之一,在进行地震——地电关系解释时应予以注意。

一、岩石导电性与温度实验的主要结果

近年来关于岩石导电性与温度关系的实验研究开展得较为普遍。这里仅以图表形式给出对沉积岩、火成岩、变质岩等各类岩石和矿物研究的部份实验结果。从这些结果中我们不难看出它们在温度作用下电性变化的某些共同规律。

首先,由图1—2可以看出,随着温度的升高所有岩石的电阻率都下降。但是,对于不同岩石来说,温度和电导率增量的曲线过程是不同的。

当温度在 $20\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内时,含水岩石的电阻率与温度关系 $\rho = f(t)$ 遵从温度对溶液电阻率影响的变化规律:

$$\rho = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_t(t - 18^{\circ})}$$

式中 ρ 为温度 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溶液的电阻率; ρ_{18} 为 $t = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溶液的电阻率; α_t 为电导率温度系数,平均为 $0.025/\text{度}$ 。

当温度在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时具有半导体离子晶体导电的干燥岩石的电导率与温度关系的变化规律是:

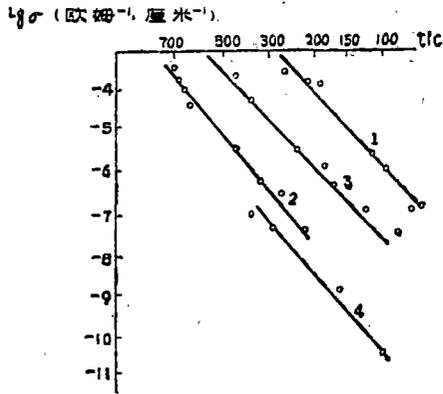


图1 岩石标本电导率与温度的关系
1. 杆栏岩 2. 玄武岩 3, 4. 辉绿岩

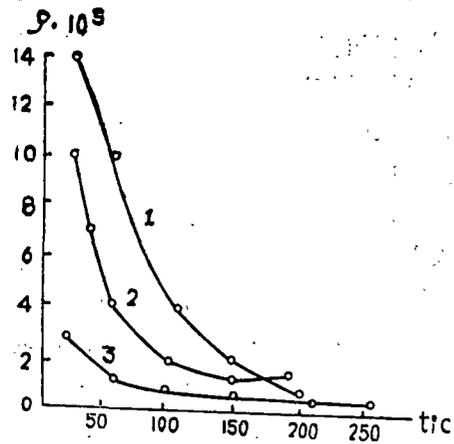


图2 电阻率与温度的关系
1. 辉长岩2384 2. 花岗岩2400 3. 花岗岩2401

$$\sigma_1 = \sigma_1 e^{-\frac{E_1}{KT_1}} + \sigma_2 e^{-\frac{E_2}{KT_2}}$$

式中 σ_1 、 σ_2 为常数，由载流子的可动性确定；K为玻尔兹曼常数： $K = 8.62 \times 10^{-3}$ 电子伏特/度·秒； E_1 、 E_2 为活化能。

第一项符合于低温范围（ $< 700^\circ\text{C}$ ）内的导电机制，等二项适合于高温范围内的导电机制[1]。

其次，从图3—5可以看出，在温度变化过程中每一种岩石的电导率曲线都有某些转折

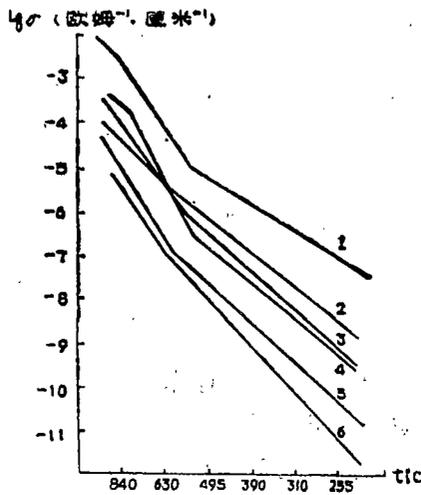


图3 火成岩电导率与温度的关系
1. 安山玄武岩 2. 辉长苏长岩 3. 闪长岩
4. 杆栏岩 5. 苦闪杆栏岩 6. 辉岩

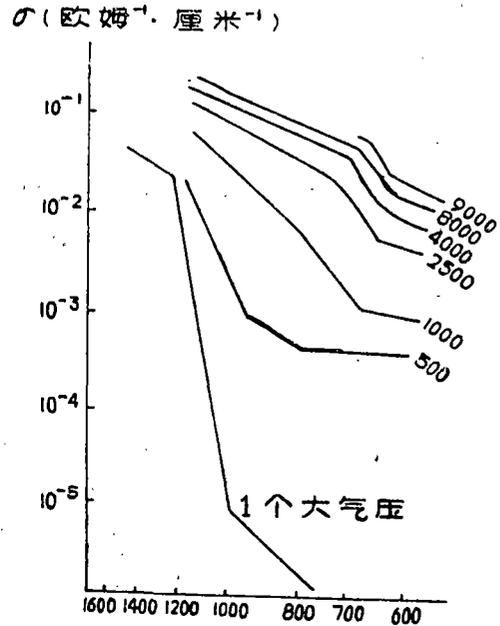


图4 在不同压力下加热至 1500°C 时花岗岩的电导率

(拐点), 特别是在高温时这种转折尤为明显。但是对于不同的岩石, 转折时所对应的温度也不同。例如花岗岩的电导率曲线第一次转折发生在 $t = 600^{\circ}\text{C}$ 时, 第二次转折发生在 $t = 750 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 时, 第三次转折发生在 $t = 840^{\circ}\text{C}$ (图 4)。又如安山岩、石英、纹长岩、安山-玄武岩、石英闪长岩等第一次转折发生在 $t = 450 \sim 550^{\circ}\text{C}$, 第二次转折发生在 $t = 970^{\circ}\text{C}$ 时, 第三次转折发生在 $t = 1250^{\circ}\text{C}$ (图 5)。

同时, 从实验中所获得的温度——电导率参数来看。温度引起岩石电阻率变化的数值是十分可观的。在许多文献中也指出, 高压能够使岩石的电导率增加一个数量级, 而各种岩石的电导率在 $t = 20 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 内可增加 10 个数量级或更多。因此, 在一定条件下, 岩石电导率的增大主要由温度所引起, 而压力起的作用相当小 [2]。

对于地震预报来说, 研究由温度改变引起岩石电阻率增量的相对变化是有意义的。

在这方面, 现有的一些实验结果为我们提供

了宝贵的资料。当温度每升高 1°C 时, 可引起水溶液或岩石电阻率下降百分之几到百分之几十甚至更大。例如, 当温度升高 1°C 时, 花岗岩的电导率增大 $1.5 \sim 15.5\%$; 辉长岩的电导率增大 $8.5\% \sim 4$ 倍; 正长岩的电导率增大 $3.7 \sim 12.0\%$ [3] (表 1)。

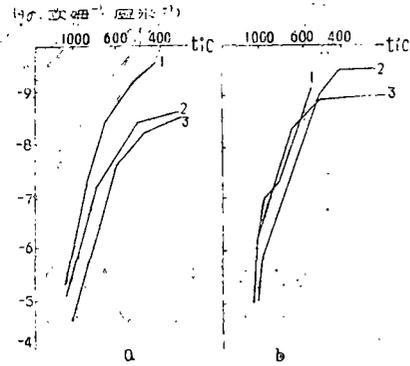


图 5

酸性和中性岩石电导率与温度的关系

高温下水饱和岩石的电导率 (欧姆⁻¹厘米⁻¹)

表 1

花岗岩 2400K* = 0.48%		花岗岩 2401K = 1.54%		辉长岩 2384K = 0.81%		正长岩 2403K = 2.22%	
t °C	σ	t °C	σ	t °C	σ	t °C	σ
18	9.8×10^{-7}	16	3.33×10^{-6}	26	7.14×10^{-7}	20	2.5×10^{-6}
32	1.37×10^{-6}	27	4.43×10^{-6}	56	9.71×10^{-7}	28	2.8×10^{-6}
52	2.23×10^{-6}	59	8.48×10^{-6}	108	2.38×10^{-5}	58	5.0×10^{-6}
102	5.56×10^{-6}	102	1.52×10^{-5}	156	5.0×10^{-6}	100	1.0×10^{-5}
150	7.82×10^{-6}	157	2.86×10^{-5}	208	1.0×10^{-5}		
203	9.27×10^{-6}	202	3.52×10^{-5}				
		268	5.88×10^{-5}				

* K = 孔隙系数

含热水溶液岩石的电阻率变化更大 [4], 如: 花岗岩在 83°C 热泉水中浸泡后电阻率下降 70%; 第三系砂砾岩标本电阻率下降 70%; 第三系砾石灰岩电阻率下降 70% (表 2)。

在温度作用下岩石电性为什么会有前述的各种变化特征呢? 这就自然地提出了岩石导电机制问题。虽然不同学者对不同岩石电阻率与温度关系的实验曲线提出了各种不同的理论解释, 但概括起来主要有两种观点:

对于含水岩石 (如处于地球上部的沉积岩, 特别是水成岩) 在温度和压力不是很高的条件下, 岩石中孔隙水对岩石的电导率有着极大的影响。同一种岩石, 因其湿度不同电导率

水与岩石电阻率变化表

表 2

试验项目	电阻率差异 (欧姆·米)		资料来源		从冷到热电阻率下降百分比
	冷	热	冷	热	
冷泉水(15℃)与热泉水(83℃)	62.4	13.0	自然冷泉	自然温泉	80%
第三系砂砾岩	28.3	7.3	野外露头9处	13块标本测定	70%
第三系含灰岩砾岩(80%砾石)	480	137	对称四级	9块标本测定	70%
花岗岩	7998	2388	6块标本测定	8块标本测定	70%

注：热标本是在83℃热泉水中浸泡几十小时而得

可差达6~7个数量级以上，孔隙中矿化水对岩石的电导率起主要作用。因而其导电性实质上是溶液电解质导电。所以，在不同条件下岩石电导率的差异主要取决于岩石的孔隙度，孔隙的形状和分布，岩石的水饱和程度以及水的矿化程度。在低温范围内，随着温度的增加溶液粘滞度减小，导致溶液离子的可动度增大，因而引起了电阻率的急剧下降。这就是所谓的溶液导电机制。

另一种是半导体导电机制。这种观点认为，水含量较低的干燥岩石（如火成岩等）在较高的温度条件下，其导电性主要由组成岩石的固体骨架所决定的，按其电导率的数值范围属于电性半导体，它与岩石的结构、构造和矿物成分密切相关。而岩石中的矿物组成主要是以原子或原子集团之间的离子键的形式相联系，因而形成了离子晶体。

离子晶体通常存在三种不同的导电机制：即热缺陷导电（离子导电），杂质导电和本征半导体导电。在不同的温度压力条件下不同的导电机制发挥其主导作用。实验中电导率——温度曲线的转折表明了在这个温度压力附近岩石中占主导因素的导电机制的改变。

在温度作用下，随着温度的升高（特别是高温阶段）粒子的活化能也增大，其结果引起原子晶格热振荡的振幅增大而使它们之间的相互作用力减小，从而增加电荷携带者——载流子的迁移率而提高岩石的导电性。

二、温度场变化对岩石电阻率的影响及其与地震的关系

一个破坏性地震的孕育过程，即能量积累和岩石破裂的过程，是一个力学过程。震源区岩石的力学性质直接影响到地震孕育，能量积累速度和释放时间与方式；而岩石的力学性质又与其所处的温度状况密切相关。

一般来说，浅源破坏性地震多发生在10—30公里范围内的地壳中，而对这一范围内岩石电性起主导作用的因素是温度。由实验可知，岩石电阻率和温度成指数关系，不大的温度变化就可引起岩石电阻率的剧烈下降，这就为用电阻率法监视震前地下温度场变化提供了理论前提。

地下温度场和地震是否有关呢？英国的阿姆斯特德指出：“地热区一般总是在地震带内出现，但不一定靠近火山”。“在这些地震带内地壳的薄弱性使深部的热能够上升到地表附近〔6〕。”苏联学者也指出：“温度场的变化，膨胀系数的变化和一系列其他变化，可引起

应力场的局部变化，由于应力的局部异常而有地震的活动性。”“温度场的局部变化可能成为地震的一种原因”〔6〕。日本的早川正己和饭塚进等人进一步指出了地热应力场与地震机制的联系，提出了热应力龟裂在发震机制上的作用〔7〕。从前人的研究可以看出，地下温度场变化和地震似有某些联系。在我国近十多年来的几次大震总结中也证明了震前温度场的局部变化。举例如下：

(1) 1966年3月22日邢台7.2级地震前后，山东省肥城县气象站地下1.6米深处二月份平均地温变化情况是〔8〕：1962年为6.4℃，震前为8.6℃，震后为7.1℃

(2) 1969年7月18日渤海7.4级地震前后，山东省肥城县气象站地下1.6米深处6月份平均地温是〔8〕：1963年为16.4℃，震前为19.3℃，震后为17.4℃。

(3) 1970年1月5日通海7¼级地震后开始观测的云南省宜良汤池水文站温泉水温一般稳定在70℃左右，至1972年底附近地区共发生≥5.0级地震8次，其中6次有明显反应。水温异常特点是在震前跳动，异常幅度一般在1~2℃，最大达3.0℃，绝大部分是水温下降。与此相对应的是深层地温上升，异常幅度达2℃〔9〕。

(4) 1976年7月28日唐山7.8级地震前地温变化情况为：唐山于7.23—7.25日在80公分深处地温上升1.5℃；昌黎于7.23—7.24日在80公分深处地温上升1.2℃；柏各庄于7.23—7.25日在80公分深处地温上升0.7℃。玉田于7.23—7.25日在80公分深处地温上升0.6℃。并且地温变化的特点是：80公分深处比40公分深处的地温变化大；地温异常等值线以唐山为中心，其升温范围也与唐山余震活动范围基本吻合（图6）〔10〕。有趣的是，南北道视电阻率异常强度等值线也以唐山为中心，其分布范围也与唐山余震活动范围基本一致（图7）。

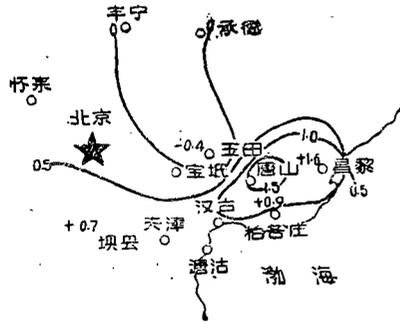


图6 1976年7月23—25日80公分地温变化值

(5) 1975年2月4日海城7.3级地震前虽然没有搜集到有关地温资料的具体数据，

但有些值得注意的现象可能与地下温度场的变化有关〔11〕。如岫岩县前营公社“七一”水库入

冻以来湖面结冰近半米厚，但在元月28日下午发现在湖背面阴处冰面化开4平方米的冰孔，化开处水深11米，底部水温2.5℃，较远处1℃，距化开面70米处冰厚0.42米。震前虽已是隆冬季节，但天气异常暖和，据记载：地面大开化次数较多，近地面有蒸汽现象；大震前1小时左右地面到处冒气，有臭鸡蛋味，有划火柴味。震前雾气糟糟，雾中有硫磺味；地炮炸开处炸开前有烘热感觉……等等。

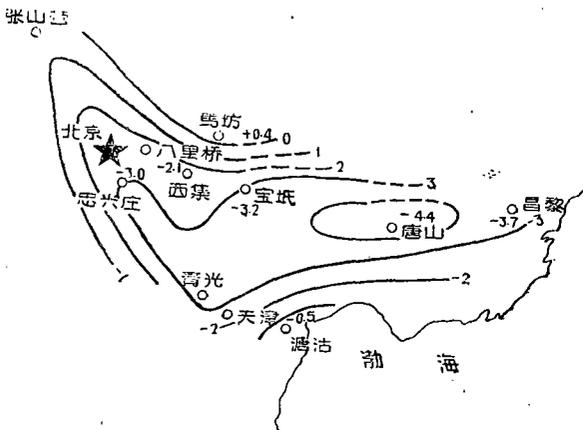


图7 京津唐地区视电阻率异常强度等值线图

大震前湖面出现的“冰孔”；地

面的“大开化”，“蒸汽现象”，“冒气”，“臭鸡蛋味”，“硫磺味”，“烘热”等现象虽各自都有不同的解释，但地热效应是一个不可忽略的因素。正如英国的E·布拉德所指出的那样，当熔融岩石到达地球表面时将产生一系列复杂的过程：压力将降低，溶液中的气体及液体将逸出，在特殊情况下将放出热水和蒸汽，并由“蒸汽蒸馏”带走各种各样的其他物质；在此过程中可能形成元素硫的沉积，并且可能出现气态的硫化物，如 H_2S 和 SO_2 〔6〕等。

事实上，大震前地面所涌出的水蒸汽，硫化物等不一定直接来源于深部熔融的岩体，也可能来自地下水的循环。熔岩充满着节理和裂缝，水在这里被加热并带着溶解的物质一起上升。当达到地表时，它可能是蒸汽或者是热水，也可能是气与水的混合物。

从以上事例可以看出，大地震前地下温度场的局部变化是可能的，一般表现为震前地温上升（温泉水温有时下降），震后下降，幅度可达 $1\sim 2\text{ }^\circ\text{C}$ 或更多。地下温度场的这种改变足以引起岩石（或土体）视电阻率发生百分之几到百分之十几的变化幅度*，这是一个值得重视的可观的异常，为我们研究大地震前地下温度场变化和电阻率异常与地震关系提供了依据，同时也启示了我们，岩石标本的温度实验同压力实验一样重要，当条件具备时，开展深层地温观测和岩石的高温高压综合实验研究是完全必要的。

参 考 文 献

1. Э.И. Пархоменко, Электрические свойства горных пород, №, 93—104.
2. А.Т. Бонбаренко, Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях, №, 192—199.
3. Э.И. Пархоменко, З.Б. Стефанкевич, И.М. Высокова, О роли влаги в электропроводности кристаллических пород при повышенных давлениях и температурах, физика земли, 1972, №, 5, 84—91.
4. 《地下热水普查勘探方法》 水文地质工程地质研究所 1973年
5. [英] Н.С.Н.阿姆斯特德 《地热能》 1973年
6. физ. Основание поиска методов прогнозов землетрясений. М. 1970, 127—133.
7. 早川正已 饭塚进 地震波速变化的机制 日本《地震》双月刊〔29〕4 339—353
8. 关于气象因素与地震关系的初步探索 山东省肥城县气象站 地震战线, 1972年第5期
9. 温泉水临震前的反应 昆明地震大队宜良地震台汤池水文站 地震战线 1972年第10期
10. 唐山7.8级地震气象总结 唐山地震工作队 1976年10月
11. 辽宁海城7.3级地震初步总结 海城地震工作队 1975年4月

* 《昌黎台形变电阻率与地震及地热的关系》，河北省地震局分析预报室昌黎地电台1978年5月（油印本）