

寒区滑坡冻融破坏机制研究

王晓春^{1,2} 聂德新²

(1. 中科院力学所 LNM, 北京 100080; 2. 成都理工大学环境与土木学院, 成都 610059)

摘 要: 本文主要讨论三个问题。第一个问题是寒区环境地质条件。第二个问题是低温对工程材料和地质材料的影响。大多数材料在 0°C 以下具有特殊的物理力学性质, 其强度、刚度、弹塑性、延伸率、导热性以及抗热冲击断裂性都有很大的变化。最后讨论寒区人工边坡和自然边坡的冻融破坏机制。

关键词: 滑坡, 冰冻, 低温融化, 侵蚀, 膨胀压力, 热应力

1 寒区环境地质条件

寒区多属于高纬度地区或低纬度、高海拔地区, 环境地质条件复杂。寒区的环境地质的稳定性主要受气候变化的控制。而太阳辐射因素、大气环流因素和地质地理因素(包括纬度、高度、水陆分布、洋流、大地形等)又相互联系、相互影响共同支配着气候的变化。

太阳辐射的强弱直接影响地区气候的形势, 各地气候差异与大气环流的关系密不可分, 而地质地理因素又可以影响太阳辐射和大气环流的强度, 因此地质地理条件本身也是影响气候的重要因素。例如太阳辐射能的分布与地球纬度呈相关关系。在影响气候的地质地理因素中, 高度对气候的影响较纬度显著, 人们可以在高山地区通过观察植物的生长情况, 对当地的气候分带进行识别和判断。

在雪线以上, 空气稀薄, 阳光充足, 岩石的寒冻风化强烈, 山体斜坡处于持续的地质改造之中。在雪线以下, 有时则可见到从茂密的热带森林一直到寸草不长的近冰川地带的连续的植物带分布在同一地区的不同高度处。在雪线附近, 昼夜和季节的更替通常引起地表土周期性的冻结和融化。在这些区域, 可观察到雪蚀蠕变、热融沉陷等寒区特有的地质现象。如果这些现象与人类生活、生产活动发生相互影响, 则成为不可忽视的地质灾害^[1]。

寒区复杂多变的自然条件和相对脆弱的生态环境, 必然给当地的经济建设和资源开发带来额外的困难, 其中环境低温、冰冻侵蚀、结晶侵蚀以及冻融交替变化是寒区特殊的不利环境条件, 冰冻侵蚀和结晶侵蚀是岩石寒冻风化的主要原因。环境低温则使寒区地质体的材料性质与破坏原因区别于别的地区。

2 低温对工程材料和地质材料的影响

大多数材料在德拜温度以下具有特殊的物理力学性质, 其强度、刚度、弹塑性、延伸率、比热容、导热性以及抗热冲击断裂性都有很大的变化。一般说来, 固体材料在低温下的机械强度比常温下大。当温度降低时, 材料中原子的振动随之减小, 由于原子热运动的减低, 将材料原子拉开相同的距离需要更大的应力。因此, 材料的屈服强度将随着温度的下降而增加, 这对于大多数工程材料是正确的。

根据非线性连续介质热力学的观点, 物体的温度和应力是相互耦合的, 在变温幅度很大的情况下, 材料参数还是温度的函数, 即材料参数不再是常数。当温度降低时, 几乎所有金属材料的弹性模量都会增大, 这正好与固体材料在低温下具有较高拉压强度相对应。理论研究指出, 当温度降低时, 弹性模量呈单调增加, 在较高温区成线性变化, 在绝对零度时, 其变化率等于零, 弹性模量与温度的这种变化关系可用下列半经验公式表示为

$$E_T = E_0 - S / [\exp(t/T) - 1]$$

式中 E_0 为绝对零度时的弹性常数, S 为常数, T 为热力学温度 t 为爱因斯坦特征温度, 大多数固体物质的

基金项目: 国家自然科学基金(基金号: 40072090)、国土资源部年轻教师和学科发展基金、中科院力学所 LNM 开放课题基金资助项目

作者简介: 王晓春(1960.1), 男, 博士, 副教授, 从事力学和寒区地质工程研究

t 值一般在 100 ~ 300K 之内^[2]。

温度对材料机械性质的影响还表现在材料延伸率的变化。塑性材料与脆性材料的分界线为 5% 的延伸率，即断裂前延伸率大于 5% 的材料称为塑性材料，小于 5% 的材料叫着脆性材料。碳钢的塑性随着温度的下降，其延伸率从 25% ~ 30% 跌到 2% ~ 3%。材料由韧性状态向脆性状态转变的温度叫韧-脆转变温度。对于中、低强度材料，脆性断裂往往发生在低温——接近材料的韧-脆转变温度。对于高强或脆性材料，它们的韧-脆转变温度较高，即使不是在低温下，也可能发生低应力脆断。构件自身存在的工艺缺陷或各种损伤、在服役过程中产生的疲劳裂纹，或者是设计不当造成的应力集中在低温下导致脆断。

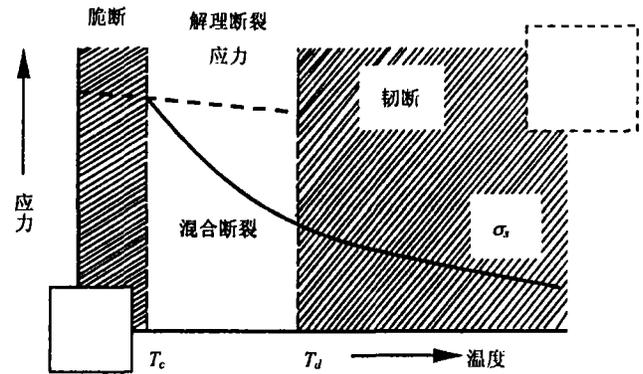


图 1 温度对钢的断裂特性的影响

钢材在低温下韧-脆断裂转变过程可用解理断裂应力^[2]的概念来说明。解理断裂是一种由正应力拉开的穿晶分离，这种分离是沿一定的结晶平面而发生的，从图 1 中可以看出，拉伸条件下材料的屈服极限 σ_s 随温度的下降而升高，但材料的解理断裂应力的变化很小，两根曲线相交于温度 T_c 。当温度较低 ($T < T_c$) 时，应力先达到断裂强度，材料便发生解理断裂，这时几乎没有宏观塑性变形；当温度较高 ($T > T_c$) 时，应力先达到屈服应力 σ_s 曲线，材料先产生一定量的塑性变形后才发生解理断裂；当 $T > T_d$ 时，完全是以韧窝机制所控制的韧性断裂。在 T_c 和 T_d 之间的温度范围内，材料表现为混合断裂。注意，解理断裂与脆性断裂的含义并不相同，前者是指断裂机理，后者是指断口的宏观形态。脆断断口在宏观上表现为断口平齐，断面往往与正应力垂直。断口呈颗粒状，有时呈人字纹。人字纹断口常在强度较低的低碳结构钢中出现，其人字纹的尖端指向断裂源。

低温对材料热物理性质的影响主要是材料的比热容、热膨胀率和热导率的变化。一般来说，材料的比热容、热膨胀率等随着温度的下降而减小。但热导率则不然，有的材料随温度的降低而增大；有的材料却随温度的降低而减小。通常，低温时有较高热导率的材料，随着温度升高，热导率降低。而低热导率的材料正相反。

在室温附近，大多数固体物质的比热容是几乎与温度无关的常数，但当温度很低时，实验数据支持德拜定律，即物质的比热容与温度的 3 次方成正比：

$$C_V = \beta T^3$$

式中 C_V 为定容比热容， β 为与德拜温度有关的常数。对于无机非金属材料，德拜温度在 600 到 1000°C 的范围内。

所有物质的热传导，都是由物质内部微粒相互碰撞传递能量的结果。金属的热传导主要是通过电子的相互作用和碰撞来实现的。在无机介电体中，热传导是通过晶格振动而实现的。介电物质的热传导可看成是声子（非谐波晶格振动波）相互作用和碰撞的结果。热导率 k 以电子碰撞为最大，声子次之，分子或原子碰撞（气体或液体的导热机理）最小。金属晶体的热导率最大，随着温度的降低，热导率有所增加，并在低温下可出现一个峰值。非金属固体的热导率与金属相比，其 k 值至少相差一个数量级，热导率的温度关系曲线比较平坦（随温度的降低而减小）。液体和气体的热导率与非金属固体分别相差 1 和 2 个数量级。同一种物质的热导率，一般来说，固态大于液态，液态大于气态。各种物质的热导率都是由专门的实验测定的^[3]。由实验结果可知，在摄氏零下 100 度到 0°C 的温度范围内，多数材料的 k 值都可用线性近似关系，即

$$k = k_0(1+bt)$$

来确定, 式中 k_0 为 0°C 的热导率, t 为温度, b 为常数。有些材料的 $b > 0$, 另一些材料的 $b < 0$ 。

在温度发生变化时, 当物体的膨胀和收缩受到限制 (或材料不均匀、有较大的温度梯度), 物体中就会产生热应力。如果产生的应力超过某一极限值, 那么将引起材料屈服或破坏。在均质的弹性材料中, 热应力有一定的大小, 并与弹性模量、热膨胀系数和温度差有关。例如两端固定的弹性杆件, 当温度变化为 T 时, 其热应力大小为

$$\sigma = -\alpha ET$$

式中 α 为热膨胀系数, E 为弹性模量。又例如周边固支的矩形薄板在承受变温 T 时, 其热应力大小为

$$\sigma = -\alpha ET / (1 - \mu)$$

这里 μ 为泊松比。

材料抵抗温度变化的能力称为热稳定性。脆弹性体的热稳定性是与热应力最紧密相关的。一种脆性材料突然遭受温度变化时是否破裂, 取决于其是否能承受出现的应力。影响材料热稳定性的因素有弹性模量 E 、热膨胀系数 α 、热导率 k 、热容 c 、密度 ρ_0 和抗拉强度 σ_f 等。材料的热稳定性系数 R 可用下式计算^[4]

$$R = \sigma_f (k/c\rho_0)^{1/2} / (\alpha E)$$

从这里我们看到, 材料的热稳定性与其强度的 1 次方、热导率的 1/2 次方成正比, 与膨胀系数、弹性模量的 1 次方、热容和密度的 1/2 次方成反比。因此, 热导率越小, 材料的热稳定性越差。从强度-应力理论观点来看, 材料的破坏与否, 与材料的热应力强度有很大关系, 然而材料的热稳定性受到应力的分布、产生的速率和持续的时间, 材料的特性 (例如机械性能、材料均匀性) 以及原有的裂纹、裂隙和缺陷等的影响。温度变化的结果是, 可能在结构中产生热应力, 同时材料参数作为温度的函数随温度而变化, 即非线性热传导效应也在一定程度上影响材料的热稳定性。

一般来说, 脆性材料的热稳定性比较差。它们的热冲击损坏有两种类型: 一种是材料发生瞬时断裂, 抵抗这类破坏的性能称为抗热冲击断裂性; 另一种是在热冲击循环作用下, 材料表面开裂、剥落, 并不断发展, 最终碎裂或变质。抵抗这类破坏的性能称为抗热冲击损伤性^[5]。地质体的热冲击损坏兼有热冲击断裂和热冲击损伤两种表现形式, 在岩体的物理风化过程中, 以受热冲击损伤为主。常温下表现为脆性材料的完整岩石, 在遭受急剧变温时, 也可发生热冲击断裂。

3 边坡冻融破坏机制研究

在工程实际问题中, 结构所受到的外载往往在一定的范围内重复变化, 将这种载荷称为变值载荷。由于载荷的全部或部分发生周期性的变化, 结构的变形特性与载荷单调缓慢增加时的情况不同, 最终的破坏型式也不一样。在变值载荷作用下, 结构失效时的载荷值与比例加载时的极限载荷并不完全相同, 一般情况下小于极限载荷。温度的周期性变化作为一种特殊的变值载荷, 对结构或地质体会产生类似的作用效应。

由于寒区恶劣的气候条件, 产生了特殊的寒区环境效应。在高寒、干旱气候区, 主要表现为空气湿度低, 昼夜温差大, 环境温度在 0°C 上下反复波动。由温度和湿度变化引起的冰冻和结晶性侵蚀、低温融化以及热应力将对寒区人工边坡和自然边坡的稳定性以及生态环境产生特殊的影响。

地表岩石按其成因可分为火成岩、沉积岩。火成岩是由地壳深部产生的熔融状态的岩浆沿压力较为薄弱的裂隙通道侵入上部的围岩甚至直接喷出地表形成的。由于岩浆在上升过程中环境温度和压力不断降低, 便不断有固体矿物结晶出来。因此, 喷出地表的熔岩中夹杂着许多早期结晶的矿物, 而熔体部分由于冷凝速度快, 一般都凝结为隐晶质和玻璃质的基质。这样, 就使火山熔岩都具有斑状结构。

沉积岩是由出露地表的各种岩石, 在内外动力地质作用下经风化剥蚀、冰川侵蚀和磨蚀、搬运、滚落、沉积和成岩等阶段, 在地表或地表下不太深的地方形成的岩石。其主要特征是呈层状产出, 普遍具有层理构造, 表观密度小, 孔隙率和吸水率大、强度较低、耐久性较差。

地表岩石以沉积岩分布最广, 在坡地及河谷地带更是如此。众所周知, 自然边坡 (岸坡) 处于持续的地质改造过程中, 有的处于相对稳定状态, 有的处于变形、失稳的活动状态。岸坡的变形、失稳, 从实质上说是在岸坡求得稳定状态的自然调整过程, 这里的作用因素有自然的和人为的两大类。

在自然因素中,导致岸坡变形、失稳的直接因素有地震、暴雨和洪水。地震诱发崩滑往往是大范围的。在长江三峡地区,可导致松散堆积层,特别是土质堆积体变形、失稳的 1 日降雨量为 100~140mm、2 日降雨量 200~245mm、3 日降雨量 300~315mm、4 日降雨量 350~360mm^[6]。大量的暴雨资料表明,起主要作用的因素是短时暴雨。洪水冲刷岸坡,导致松散堆积体的变形,暴雨可加剧坡体的变形甚至失稳。1982 年 7 月 18 日云阳鸡八子滑坡就是在这样的情况下发生的。

在寒区,导致坡体变形、失稳的直接因素还有冻融作用和变值温度载荷。冻融过程中岩石内部的孔隙可能增大,而微裂隙具有明显的加剧作用^[7]。水到冰的相变过程所带来的破坏主要表现为岩体空隙率的增加以及岩体完整性的逐步丧失。渗入岩石裂隙中的水在低温下冻结成冰,其体积增大 9.07%,对周围岩石产生膨胀压力。现考虑外半径为 b ,内半径为 a 的岩石球形空腔,腔内充满水,因温度下降而结冰。假设冰的瞬时弹性模量(冰只有在瞬时荷载作用下才表现出弹性)为 E_b ,泊松比为 μ_b ,岩石的弹性模量为 E_0 ,泊松比为 μ_0 ,则岩体受到的膨胀压力为

$$p = K_b \theta_b \text{ 或 } p = (\alpha^3 - 1) K_0 \theta_0, \quad K_b = E_b / (3 - 6\mu_b), \quad K_0 = E_0 / (3 - 6\mu_0), \quad \alpha = b/a$$

θ_b 、 θ_0 分别为冰和岩石的体积应变。以上压力公式在实际使用时,必须首先测出 θ_b 或 θ_0 。

另一方面,当温度回升以后,冰融化为水,渗入新形成的裂隙中,矿物经水化后体积也有所增加,对岩石产生附加机械压力。如果环境温度在 0°C 上下波动,冻结-融化反复发生,即使是坚硬的岩石,也会由于微裂隙的扩展或损伤积累最后裂为碎块。在这个过程中,岩石的孔隙率和吸湿能力、岩石内部的水分状况及其相变、水分和盐分的迁移起着重要的作用,其中水是非常活跃的因素。

季节性冻结滞水对坡体也有促滑效应^[8]。其作用机理是:冻结使斜坡体地下水富集、含水范围扩展,降低斜坡岩体强度,导致斜坡区静、动水压力增大。对坡内深度不大处有软弱夹层时,这种效应更加明显。

对于裂隙性硬粘土边坡,由于硬粘土通常属于超固结土,其应力-应变关系曲线属应变软化型曲线,如图 2 所示。这类边坡的失稳,情况比较复杂。根据已有的资料研究结果,在已发生稳定破坏的土坡内,滑动面上的剪应力分布不均匀,各点并非同时达到破坏。破坏过程是,在某些部位剪应力首先达到峰值,其它部位尚未破坏。随着应变不断加大,已破坏部位的强度不断减小,直至降低到残余强度。土坡内滑面上其它点相继发生这种情况,形成所谓渐进性的破坏现象。在整个过程中,边坡失稳破坏的时间持续很长,而滑裂面的强度降至很低。有些古滑坡体以及断层带,在其历史年代上发生过多次的滑移,经受很大的应变,土的强度下降很多,变值温度载荷和周期性冻融作用可能成为滑坡复活的直接诱因。

岩石的冻融破坏在环境温度波动于 0°C 的某一范围内最为强烈,随着整个波动范围的平均值下降,其破坏程度和速率也在下降,特别是当温度范围均低于 0°C 时,冻融过程一般不再进行。

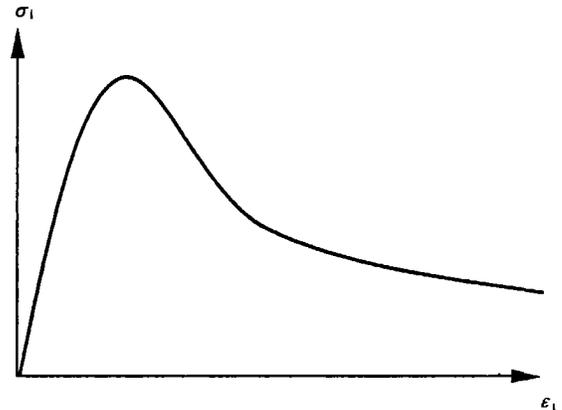


图 2 应变软化型本构关系

参考文献

- [1] 王晓春,张倬元.寒区工程与冻融力学.地学前缘,2000,第7卷(增刊):99-104.
- [2] 陈国邦.低温工程材料.杭州:浙江大学出版社,1998.
- [3] 黄方谷,韩凤华.工程热力学与传热学.北京:北京航空航天大学出版社,1993.
- [4] 王培铭.无机非金属材料学.上海:同济大学出版社,1999.
- [5] 关振铎,张中太,焦金生.屋脊材料物理性能.北京:清华大学出版社,1992.
- [6] 崔政权,李 宁.边坡工程-理论与实践最新发展.北京:中国水利水电出版社,1999.
- [7] 朱立平.寒冻条件下花岗岩小块体的风化模拟实验及其分析.冰川冻土,1997,19(4):312-320.
- [8] 吴玮江.季节性冻结滞水促滑效应-滑坡发育的一种新因素.冰川冻土,1997,19(4):359-365.