

温度作用下岩石力学行为的研究进展

李树荣, 徐小丽, 沈晓明, 高峰

(中国矿业大学, 江苏徐州, 221008)

摘要: 本文简述了国内外学者在温度作用下岩石力学行为研究方面取得的主要进展。在此领域的进展主要体现在温度作用下岩石的物理特性、力学特性、热破裂特征及热损伤理论等方面。这些研究成果为核废料的存储、煤与油页岩的现场气化、深部资源开采、地热资源开发、煤层瓦斯的安全抽放和综合利用等工程提供了有价值的参考资料。

关键词: 岩石; 温度; 力学行为; 热破裂; 损伤本构

1. 引言

随着核电在世界许多国家能源消耗结构中所占的比例越来越大, 核电站在运行过程中产生的大量放射性核废料的安全处置问题也受到了人们的重视。目前, 各国多采用深层地质处置, 但核废料在处置过程中发生衰变而放出热量, 导致储存库围岩温度升高, 须对温度作用下岩石的物理力学性质进行研究, 以预测储存库的长期稳定性和安全性。此外, 在煤与油页岩的现场气化、深部资源开采、地热资源开发、煤层瓦斯的安全抽放和综合利用等工程中, 也需要考虑此类岩石力学问题。因此研究温度作用下的岩石力学性能具有巨大的工程意义, 处理高温环境下的岩石工程问题就成了岩石力学的又一新的研究方向。本文简述了国内外学者在温度作用下岩石力学行为研究方面取得的一些进展, 主要从温度作用下岩石物理特性、岩石力学特性、岩石热破裂特征、热损伤本构理论等方面进行简述。

2. 温度作用下岩石物理力学性质的研究进展

2.1 温度作用下岩石物理特性的研究进展

研究岩石的热物理特性, 在地球科学、地热开发、采矿、地震研究等多方面有广泛的应用。如地热开发中进行数值模拟时所需的岩石密度、热导率等参数; 大地电磁测深中需要通过岩石的弹性波速来推断岩性; 深部采矿中热害治理同样需要岩石的热学参数等。早在 1964 年, Lebedev 和 Khitaror 就对温度作用下花岗岩的热物理特性进行了研究。R. S. C. WAI^[1] (1982) 得出在加热和冷却过程中石灰岩热膨胀系数、导热系数数据, 它们分别是:

$$\text{热膨胀系数: 石灰岩: } \alpha_T = \left(4 + \frac{T}{60}\right) \times 10^{-6}, \quad 0 \leq T \leq 180 \quad (1)$$

$$\text{片麻岩状的花岗岩: } \alpha_T = \left(6 + \frac{T}{20}\right) \times 10^{-6}, \quad 0 \leq T \leq 180 \quad (2)$$

$$\text{导热系数: 石灰岩: } \kappa_T = 1.2 \left(1 - \frac{T}{360}\right) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \quad 0 \leq T \leq 180 \quad (3)$$

$$\text{片麻岩状的花岗岩: } \kappa_T = 1.6 \times \left(1 - \frac{T}{360}\right) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \quad 0 \leq T \leq 180 \quad (4)$$

母润昌等^[2] (1995) 对华北地区韧性剪切带几种代表上、中、下地壳深度的糜棱岩及其围岩在高温高压条件下进行纵波速度测定及各向异性研究, 对实验样品的纵波速度测定得到沿糜棱岩面理方向的纵波速度大于与面理垂直方向的纵波速度, 如图 1 所示。另外赵志丹、高山、郑海飞等^[3-6]

(1996) 对秦岭和华北地区地壳低速层岩石高温高压波速进行了实验, 高温高压下地幔岩石物理性质及其流体影响的实验研究, 对大别山超高压榴辉岩高温高压地震波速和密度的初步研究。杨树锋等^[7] (1997) 在高温高压下应用全波震相分析方法对华南不同成因类型的花岗岩 (I 型和 S 型两类花岗岩类) 进行了弹性波波速的测量, 发现两类花岗岩的波速值随所加的温度和压力有各自的变化规律。S 型花岗岩的波速随温度和压力的变化比 I 型花岗岩波速变化大, 如图 2 所示。席道瑛等^[8]

(1998) 研究了温度对花岗岩、大理岩的模量和波速的影响。

V. M. Shmonov et al.^[9] (2000) 用在不同的载荷和高温作用下的三种岩石 (辉长岩、玄武岩和石灰岩) 模拟

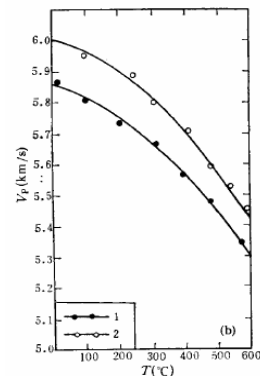


图 1 500MPa 固定围压下纵波速度与温度关系

1. 与面理垂直的方向; 2. 沿面理方向

典型地震震动(改变频率和震幅)对岩石渗透率的影响进行了研究, 结果发现: 地震震动影响岩石的渗透性, 可以导致其渗透性的增加和减小, 影响因素有: 振动振幅、振动频率、有效应力和温度等, 且三种岩石的渗透性增大的程度和变化趋势是不一样。朱茂旭等^[10-13] (2001) 分别在高温高压下对花岗岩条纹长石的电导率变化、用电导率—温度曲线方法进行蛇纹石脱水温度测量和在 10GPa 和 20GPa、400⁰C—860⁰C 条件下测定了滑石的电导率。柳江琳, 朱茂旭等^[14] (2001) 研究了高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征实验, 讨论了这几种岩石电导率随温度的变化趋势, 如图 3 所示, 结果表明: 电导率随温度的升高而显著变化增大, 这种变化可能同岩石的部分熔融过程有关。

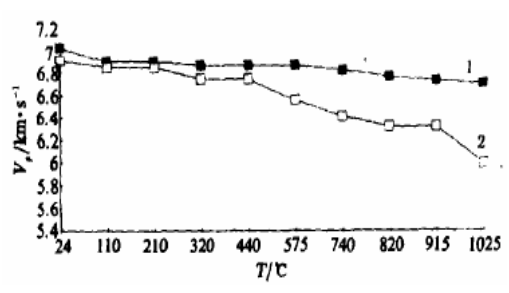


图 2 花岗岩的温度 25~1025℃和 500 MPa 压力下 V_p 的变化曲线图
1. I 型花岗岩; 2. S 型花岗岩

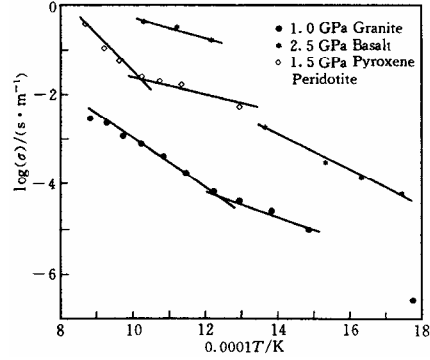


图 3 花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率--温度关系曲线

白利平等^[15] (2002) 在 1~2GPa, 室温到 1100⁰C 条件下测量了辉长岩的纵波速度和电导率, 分析了影响辉长岩纵波速度的因素及其微观导电机理。Heuze 等^[16-21] 总结了国外学者的研究成果, 得到许多实验结论: 岩石热导率基本上随温度的升高而下降, 有的呈直线下降, 如硅岩、白云石灰岩、普通角闪石闪长岩; 有的下降到一定值后有所增大, 如霞石闪长岩、斑岩和斜长石, 透明黑曜岩和页岩的热导率则随温度增大而增大, 岩石比热随温度升高而增加, 岩石的热应变随温度的升高而增加。

总之, 中外的研究者在温度作用下的岩石物理特性研究方面作出了许多有益的工作, 但岩石的热膨胀系数、导热率等热物理性能随温度变化的不确定性, 到目前尚未弄清, 有待于从内部机制来加以研究。

2.2 温度作用下岩石力学性质的研究进展

20 世纪 70 年代以来, 国内外学者从各个不同角度和层次, 从理论上和实验上, 研究温度对材料力学性质的影响, 取得了丰硕成果。Alm 0 等^[22] (1985) 考察了花岗岩受到不同温度热处理后的某些力学性质, 在温度作用下并对花岗岩微破裂过程进行了讨论。张静华、王靖涛等^[23-24] (1987) 对花岗岩弹性模量的温度效应和临界应力强度因子 K_{IC} 随温度的变化进行了研究, 在花岗岩断裂韧度随温度升高的变化过程中, 存在一门槛温度 200⁰C。这意味着, 在 200⁰C 上下, 花岗岩的断裂韧度发生了根本性变化。寇绍全等^[25] (1987) 系统地研究了经过热处理 Stripa 花岗岩的力学特性, 得到了工程中需要的最基本的力学参数, 研究表明: 颗粒胶接处开裂是热处理时裂纹的主要生成机制, 生成的裂纹具有与晶体颗粒大小相当的尺度, 温度高于 300⁰C 时, 裂纹数量随温度升高增加很快, 温

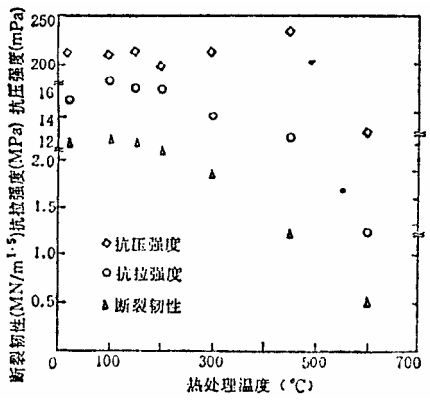


图 4 经过热处理的 Stripa 花岗岩的断裂韧性、抗拉强度和抗压强度

度小于 300⁰C 的热处理对 Stripa 花岗岩抗拉强度的影响不大, 见图 4。Brede 和 Haasen^[26] (1989) 认为温度对材料力学行为的影响主要体现在裂尖位错形核、发射和裂纹断裂的过程中。林睦曾等^[27] (1991) 研究了岩石的杨氏模量随温度升高而变化的情况, 结果表明, 安山岩、花岗岩、石英粗面岩等的杨氏模量 E

在 300°C 以下随温度升高而急剧减小, 但超过 300°C 后, 杨氏模量几乎保持一定值, 而凝灰岩和陶石等岩石随温度的升高, 弹性模量变化不大。Brede^[28] (1993) 研究了温度对材料韧脆转变的影响, 发现韧脆转变温度随着加载率升高而升高。Oda M 等^[29] (1993) 研究了在温度的作用下岩石的基本力学性质 (包括杨氏模量、泊松比、单轴抗压强度、单轴抗拉强度和断裂韧性等等)、岩石的微破裂过程, 得到了岩石的基本力学特性随温度的变化规律和岩石的破坏机理。Lau^[30] (1995) 研究了较低围压下花岗岩的弹性模量、泊松比、抗压强度随温度的变化规律以及破坏准则。刘泉声、许锡昌等^{[31][32]} (1998) 研究了温度作用下三峡花岗岩力学性质及损伤特性。许锡昌等^[33] (2000) 研究了高温下花岗岩基本力学性质初步研究, 通过试验, 初步研究了花岗岩在单轴压缩 ($20\sim 600^{\circ}\text{C}$) 状态下主要力学参数随温度的变化规律, 指出了 75°C 、 200°C 分别是花岗岩弹性模量和单轴抗压强度的门槛温度, 见图 5, 图 6, 泊松比受温度的影响规律, 至今也未有定性结论, 但该文发现泊松比大致随温度升高而增加。

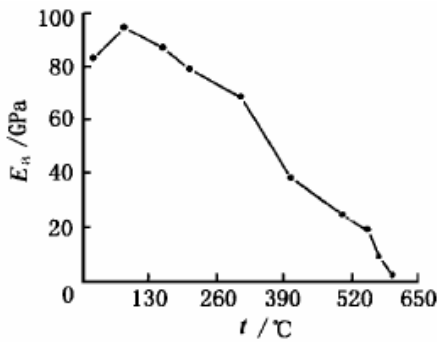


图 5 花岗岩弹性模量随温度的变化

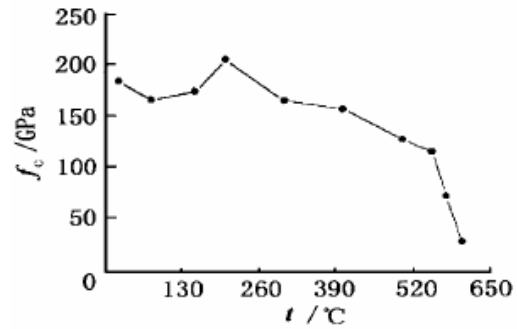


图 6 花岗岩单轴抗压强度随温度的变化

N.A. Al-Shayea^[34] (2000) 利用声发射来考察加热时岩石的损伤过程, 测量了 Westerly 花岗岩在 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 时的断裂韧性 K_{IC} :

$$K_{IC} = \frac{p\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_1, \quad K_{IIC} = \frac{p\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_2 \quad (5)$$

K_I 和 K_{II} 分别为 I 型和 II 型应力强度因子, N_1 和 N_2 是只与 a/R 和开槽方向与加载方向间的角度 β 有关, R 为 Brazilian 圆盘的半径, B 是圆盘的厚度, p 为破坏时的压缩载荷, a 为裂纹半长。桑祖南^[35] (2001) 等研究了辉长岩脆—塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究, 辉长岩在 600°C 时以脆性破裂为主, $700^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$ 时为半脆性变形, 含微破裂, 900°C 以上表现为塑性变形阶段。在实验温度压力范围内, 辉长岩的强度主要取决于温度和应变速率, 同时受围压影响, 辉长岩的成分、结构对岩石的力学性质和变形机制有显著影响。王颖轶^[36] (2002) 采用液压伺服刚性岩石力学试验系统, 研究了大理岩在常温至 800°C 高温作用下的应力—应变全过程特性, 比较系统地分析了高温作用对大理岩的刚度、峰值强度、峰后特性及残余强度等的影响, 试验结果表明: 随着温度升高, 岩石总体刚度、单轴强度降低表现出明显的软化特性, 峰后特性及残余强度宏观上表现出由脆性向塑性的渐次演化。黄炳香^[37] (2003) 选择甘肃北山花岗岩为研究对象, 利用改进的三点弯曲试验对花岗岩在温度影响下的蠕变断裂特性进行了初步的试验研究, 并分析了应力—应变曲线的变化特点, 得到了 200°C 下北山花岗岩蠕变全过程曲线, 研究了北山花岗岩断裂韧度随温度的变化规律, 75°C 时断裂韧度出现极值, 在 200°C 以后呈下降趋势。

2.3 温度作用下岩石热破裂特征的研究进展

岩石热开裂的研究, 国内外仍处在初步阶段, 目前以模拟各种温度条件下花岗岩、碳酸岩、砂岩等不同岩性热开裂状态的实验研究为主, 大部分认识是在实验研究的基础上获得的, 理论研究开展得还很少。Simmons (1976) 等^[38-41] 研究了加热速率对火成岩热开裂的影响, 结果表明: 加热速率对火成岩的热开裂的影响是大的, 由温度梯度和加热速率所产生的微裂纹和仅由高温所产生的不同, 加热速率超过每分钟几度, 微裂纹可在较低温度下产生, 加热速率更低时, 花岗岩在 300°C 以下都无明显的微裂纹生成。Johnson

等^[42] (1978), F. HOMAND-ETIENNE and R. HOUPERT^[43] (1989) 对 Senones 和 Remirement 两种不同粒度花岗岩在 20℃—600℃ 范围内热处理过试件, 扫描(SEM)微观分析裂纹长度、宽度、形状、密度、种类(晶间、穿晶、晶内裂纹)等变化特性, 定性定量研究该岩石微观结构损伤对其力学性能的影响。图 7 和图 8 为花岗岩晶间、晶内裂纹长度随温度变化关系曲线。

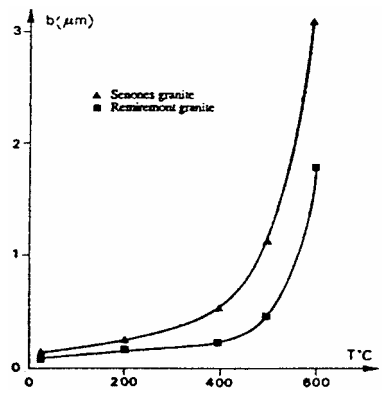
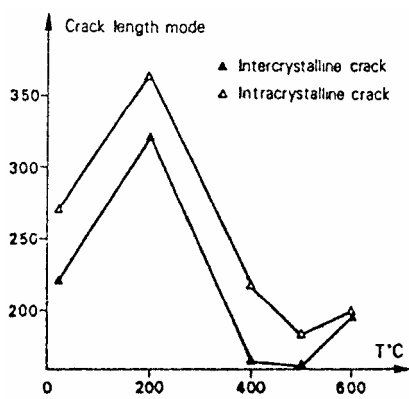
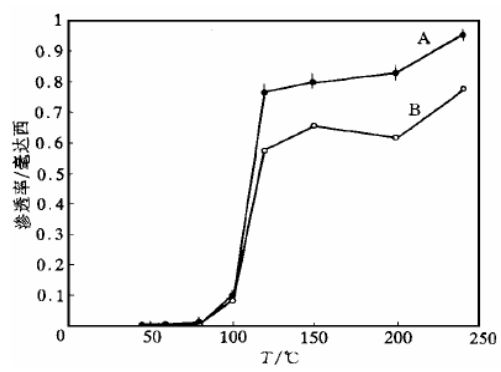


图 7 Senones 花岗岩晶间、晶内裂纹长度与温度关系曲线 图 8 Remirement 花岗岩晶间、晶内裂纹长度与温度关系曲线
H. F. Wang 等^[44] (1989) 对美国 Westerly 花岗岩进行了热开裂现象的研究, 同时系统地考察了声发射 (AE)

现象, 研究表明: 美国 Westerly 花岗岩在加热到约 75⁰C (Chen 等认为是 60—70⁰C) 时产生热破裂, 并伴随有声发射现象, 且加热速率越大, 声发射计数率越高, 加热速率对声发射的阈值温度没有明显的影响。寇绍全^[45] (1987) 对 Stripa 花岗岩变形和破坏特性进行了热开裂损伤的实验, 实验结果表明: 经过中等温度 (100⁰C 左右) 热处理后, Stripa 花岗岩的多数力学特性都出现极大值, 这与裂纹密度及声速比在温度下取极小值对应, 抗压强度随热处理温度的变化规律与抗拉强度和断裂韧性不同, Stripa 花岗岩的断裂韧性随拉伸强度的减少而减少; 热处理温度低于 200⁰C 时, 花岗岩中包含的裂纹较少, 主要在颗粒边界上, 随热处理温度升高, 颗粒边界更明显, 温度越高, 穿晶裂纹越普遍, 经过 450⁰C 和 600⁰C 处

理的样品的颗粒边界常发现裂纹包围的碎片。陈颢等^[46] (1999) 用山东东营碳酸盐岩样品进行实验, 实验结果表明:

岩石存在着 110~120⁰C 的温度阈值, 一旦达到或超过这个温度阈值, 岩样的渗透率会有 8~10 倍的增长, 超过阈值温度后进一步加热, 岩石的渗透率只是缓慢的增加, 如图 9 所示。周克群等^[47] (2000) 将砂岩、碳酸岩盐和花岗岩等岩石从 30⁰C 加热到 120⁰C 以后再降温, 对各温度点测量纵波速度, 实验完成后利用核磁共振技术研究其孔隙度和渗透率。



实验表明: 某岩石加热再降温后, 纵波速度不能恢复且出现较大下降, 核磁共振实验表明孔隙度和渗透率增加, 并研究热开裂对储集岩石的物性影响, 系统地考察了声学检测、磁共振技术等方法在检测岩石热开裂中的效果。该文并总结了岩石热开裂的一些主要实验结果, 见表 1。吴晓东等^[48] (2003) 通过室内大量岩心的实验, 结果表明: 岩心经过高温热处理后, 其渗透率、孔隙度等参数会发生较大的变化且此变化存在一定的温度界限, 不同类型的岩心具有不同的温度界限。韩学辉, 楚泽涵等^[49] (2005) 在回顾岩石热开裂研究进展的基础上着重讨论了其在石油开采、核废料存储等工程应用方面的意义。

图 9 碳酸盐岩加热至 110~120℃时, 热开裂形成的裂纹连通, 导致岩石渗透率有近 10 倍的增加

表 1 一些实验结果与结论

作者	样品	条件	阈值温度	简要结论
Todd et al (1973)	Westerly 花岗岩	1 大气压, 2℃--8℃/min	约 75℃, AE 法	加速率越大, 声发射计数率越高
Johnson(1978)	Westerly 花岗岩	1 大气压, ≤2℃/min	75℃, AE 法	
Chen,Wang(1980)	Westerly 花岗岩	1 大气压, 0.4~12.5℃/min; ≤120℃	60~70℃; AE 法	加热速率对声发射的阈值温度没有明显的影响
BaucerJ,HandinJ(1983)	安山岩玄武岩	有效压力 <100Mpa, <800℃		对于各向异性的多晶体矿物加热到 100℃, 在埋深大于 10km 的压力下会产生热裂缝
Atkinson et al(1984)	Westerly 花岗岩	1 大气压, 2.5℃/min	75℃, AE 法	
H.F.Wang et al(1989)	Westerly 花岗岩	7, 28, 55MPa, ≤300℃		随温度升高, 纵波速度明显下降, 从室温加热到 300℃, 7MP 降了 22%, 28Mpa 下降了 15%, 55Mpa 下降了 10%。
吴晓东等(1997)	碳酸盐岩; 凝灰岩; 花岗岩; 砂岩	1 大气压, 常温	常压下, 碳酸盐岩在 70℃左右渗透率开始变化	碳酸盐岩渗透率随温度升高明显增加, 凝灰岩、花岗片麻岩、砂岩的渗透率随温度升高变化不明显。

3. 岩石热损伤理论和本构方程的研究现状

由于岩石是含有微裂隙、微孔洞等初始缺陷的天然材料, 因此利用损伤理论来研究岩石等含有初始缺陷的材料已被认为是最有效的研究方法, 而损伤理论也已渗透到岩石工程的各个方面, 如: 高温、蠕变、冲击等工程中, 而且其研究方法都是建立在连续介质力学和热力学的框架之内。

国内, 李长春等^[50] (1991) 在内时理论的基础上建立了考虑温度效应的岩石损伤本构方程, 导出了增量型岩石材料损伤本构关系式:

$$de_{ij} = \frac{1}{2\mu(1-D_0)} dS_{ij} + \frac{b}{\mu} S_{ij} dz_d + \frac{S_{ij}}{2\mu(1-D_0)^2} dD_1 \quad (6)$$

$$d\epsilon_k = \frac{1}{3k(1-D_0)} d\sigma_k + \frac{a}{k} \sigma_k dz_k + \frac{\sigma_k}{3k(1-D_1)^2} dD_1 + aT(1-D_1) dz_k \quad (7)$$

方程式右边第一项是受损伤材料外载荷增量导致的应变增量的增加; 第二项是内时标度增量(实质上是累积塑性变形历史)对应变分量的贡献; 第三项是累积损伤增量的影响, 体积变形中具有温度 T 的一项则可解释为材料在主应变方向受到的热膨胀伸长。SHUKE MIAO and MING L. WANG^[51] (1997) 通过实验在热力学框架内将弹塑性理论和连续损伤力学结合起来预测半脆性材料的力学性能, 方程 (8) 表示在热力学框架内弹塑性损伤过程, P_{total} 表总的耗散率,

$$P_{total} \equiv \frac{1}{\rho} s : \dot{e}_p - b_D \dot{D} - \hat{b}_E :: \dot{\epsilon} - \frac{1}{\rho T} \bar{q} \cdot \nabla T \geq 0 \quad (8)$$

M. H. H. Hettema et al.^[52] (1999) 做了粘土岩在压实过程中高温下的三轴实验, 用扫描电镜观察分析图像, 建立了粘土岩在压实过程中以微结构参数变化相关的微力学模型。该模型假设为单粒度颗粒, 在压实过程

中颗粒变化，颗粒的压痕变化，则粘土岩压实本构关系为：

$$\varepsilon_v = 1 - \sqrt{m_0/m} \cdot \left[1 - 3 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] + \sqrt{m_0/m} \cdot \left[\left(\frac{d}{D} \right)^6 \right] \quad (9)$$

$$N = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \sigma_{eff}}{m \cdot (1 - \phi) \cdot \left[1 + 30.75 \cdot (K_{eff})^{\frac{3}{2}} \cdot (1 - \nu)^2 / E \cdot \sqrt{\sigma_{eff}} \right]} \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}_v = f(\varepsilon_v, m, \phi) \cdot e^{-\left(\frac{E_a}{RT} \right)} \cdot \sigma_{eff}^n \quad (11)$$

ε_v 为粘土岩的体积应变， d 是两颗粒间接触直径， D 为颗粒的直径， m_0 颗粒开始分配数目， m 分配数目，

N 为颗粒间平均接触力， σ_{eff} 为有效应力， ϕ 为孔隙率， E_a 和 n 为蠕变过程参数， T 为温度，并将实验

室结果运用到现场中去，研究发现：该本构模型可以用来数字模拟流量和地下岩石孔洞气化的力学性能。

Wenbo Luo et al.^[53] (2000) 在实验研究温度变化对有缺陷体受外载和温度变化问题时，利用了 Allen^[54] 研究非弹性固体的热-力耦合方程，导出各向异性非弹性体热耦合方程和熵方程：

$$(\kappa_{ij} T_{,j})_{,j} = \rho c_v T - \rho r + D_{ijkl} \beta_{kl} T (\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^l) - \eta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^l \quad (12)$$

$$\rho T (s - s_0) = T D_{ijkl} \beta_{kl} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^l) + \rho c_v \theta \quad (13)$$

c_v 是恒定体积的特定热， $\eta \leq 1$ 是非弹性变形正标量函数， s 、 s_0 分别代表开始和温度 T 时的比熵。

刘泉声等^[55] (2001) 通过高温下的单轴抗压和三轴抗压蠕变试验来研究三峡花岗岩的某些力学性质受温度和时间共同作用时的变化规律，模型的本构关系如下式：

$$\frac{\eta_v}{E_v} \dot{\sigma} + \sigma = \frac{E_e + E_v}{E_v} \eta_v \dot{\varepsilon} + E_e \varepsilon_v - E_e \alpha_e \Theta - \frac{E_e \alpha_e + E_v \alpha_v}{E_v} \eta_v \dot{\Theta} \quad (14)$$

Θ 为相对于参考温度 θ_g 的绝对温度 θ 的变化量，即 $\Theta = \theta - \theta_g$ 。

徐燕萍等^[56] (2001) 分析研究了岩石在高温作用下的热弹塑性力学特性，研究了岩石的加、卸载过程，根据损伤力学的基本理论，推导了温度作用下的岩石热弹塑性力学特性本构方程。在推导过程中，假设宏观的损伤变形和塑性变形是同时出现的，由于岩石的损伤演化规律和塑性应变的演化规律不完全独立，所以本构方程中只需引入塑性变形的屈服准则。在加载过程中，岩石材料出现塑性变形时，应变率可以分解

为三个部分： $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^d + \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p$ ，其中： $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ 为弹性应变率， $\dot{\varepsilon}_{ij}^d$ 是损伤应变率， $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ 是塑性应变率。许锡

昌^[57] (2003) 以弹性模量为研究对象，提出了热损伤的概念，参照 Lemaitre 损伤模型，给出了一维 TM 耦合弹脆性热损伤本构方程的一般表达式：

$$\sigma = E_0 [1 - D(T)] \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} \right)^n \right] \varepsilon \quad (15)$$

并且定性地讨论了荷载和温度影响下损伤面的演化规律。

4. 小结

由于温度作用下岩石力学行为的研究尚处于发展阶段，无论从试验研究还是理论研究来说，所做的工作还很全面。由于当今世界范围内岩石工程的迫切需要，以下若干方面的研究将十分迫切和必要：

(1) 在高放核废料地下贮存、地热资源的开发利用及深部采矿等工程领域，人们需要了解岩石的力学行为受温度和时间共同作用下的变化规律，尤其需要了解在长时高温作用下岩石力学行为的变化规律。这

就需要研究岩石在长时间高温作用下的力学响应, 考虑岩石的热粘弹塑性损伤。

(2) 定义合适的热损伤变量, 建立合理的本构模型。

(3) 岩石的热—液—力相互耦合的弹塑性问题。

(4) 运用新的数理理论和试验技术, 在更深的层次上探索岩石热损伤、热变形的微观物理机制, 并寻求这些微观热效应对岩石宏观力学性能的影响。

参考文献

- [1] R. S. C. WAI, K.Y. LO, R. K. ROWE. Thermal Stress Analysis in Rocks with Nonlinear Properties. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1982, 19(5): 211-220.
- [2] 母润昌, 高平, 刘若新等, 华北地区韧性剪切带几种岩石的波速各向异性高温高压实验研究[J], *地球物理学报*, 1995, 38 (2): 213~219
- [3] 赵志丹, 高山, 骆庭川等, 秦岭和华北地区地壳低速层的成因探讨—岩石高温高压波速实验证据[J], *地球物理学报*, 1996, 39 (5): 637~652
- [4] 郑海飞、谢鸿森、徐有杰等, 高温高压下含水矿物对岩石熔点影响的实验研究[J], *地质学报*, 1996, 69 (4): 326~336
- [5] 杜乐天, 地幔流体与软流层(体)地球化学[M], 北京: 地质出版社, 1996: 341~356
- [6] 高山, 金振民, Kcrn H 等, 大别山超高压榴辉岩高温高压地震波速和密度的初步研究—对造山带地壳深部组成和莫霍性质的启示[J], *科学通报*, 1997, 42 (8): 862~864
- [7] 杨树锋, 陈汉林, 姜继双等, 高温高压下华南 I 和 S 型花岗岩的波速特征及其地质意义[J], *中国科学 (D 辑)*, 1997, 27 (1): 33~38
- [8] 席道瑛等, 温度对岩石模量和波速的影响[J], *岩石力学与工程学报*, 1998, 11 (17 增): 802~807
- [9] V. M. Shmonov, V. M. Vitovtova, A. V. Zharikov. Experimental Study of Seismic Oscillation Effect on Rock Permeability under High Temperature and Pressure. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 2000(36): 405-412.
- [10] 黄晓葛, 白武明, 胡健民, 斜长角闪岩弹性和流变性质的高温高压实验研究[J], *中国科学 (D 辑)*, 2003, 33 (1)
- [11] 顾藏娟, 郭才华, 高温高压下花岗岩条纹长石和电导率变化, *地球物理学进展*[J], 1993, 8 (4): 239~243
- [12] 宋茂双, 谢鸿森, 郑海尾, 高温高压下电导率—温度曲线方法进行蛇纹石脱水温度测量及其意义[J], *矿物学报*, 1996, 16 (2): 178~183
- [13] 朱茂旭, 谢鸿森, 郭捷许等, 高温高压下滑石的电导率实验研究[J], *地球物理学报*, 2001, 44 (3): 429~435
- [14] 柳江琳, 白武明, 孔祥儒, 朱茂旭, 高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征[J], *地球物理学报*, 2001, 44(4): 528~533
- [15] 白利平, 杜建国, 刘巍等, 高温高压下辉长岩纵波速度和电导率实验研究[J], *中国科学 (D 辑)*, 2002, 32 (11): 959~968
- [16] Caldwell J A. The theoretical determination of the permeability tensor for jointed rock[C]. In: *Proc. Symp. On percolation through Fissured Rock. T1 (C). Int. Soc. Rock Mech. and Int. Assoc. Eng. Geol.*, Stuttgart. 1972. 1-6.
- [17] Simmons G and Richter D. *Physics and Chemisting of Rock*. Strers R G J Wiley. 1976: 105-137.
- [18] Hasan, S. E., *Thermo physical Properties of Rock*, 19th U. S. Symp. on Rock Mech, 1978, 210-213.
- [19] Hodgkinson D P, et al. Initial assessment of the thermal stresses around a radioactive waste depository in hard rock [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 1980, 7: 541-552.
- [20] Long T C S, Remer J S, Wilson C R and With wespoon P A. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18 (3): 645-658.
- [21] Heuze, F. E. High-temperpture Mechanical, Physical and Thermal Properties of Granitic Rocks, A Review, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 1983, 20 (1): 3-10.
- [22] Alm O, et al. The influence of micro crack densi 七 y on the elastic and fracture mechanical properties of stropa granite [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1985, 40: 61-179.

- [23] 张静华, 王靖涛, 赵爱国, 高温下花岗岩断裂特性的研究[J], 岩土力学, 1987, 8 (4): 11~16
- [24] 王靖涛, 赵爱国, 黄明昌, 花岗岩断裂韧度的高温效应[J], 岩土工程学报, 1989, 11 (6): 113~118
- [25] 寇绍全, O, Alm, 微裂隙和花岗岩的抗拉强度[J], 力学学报, 1987, 19 (4): 366~373
- [26] Brede M., Haasen P. The brittle-to-ductile transition in doped silicon as a model substance. *Acta Metall Mater*, 1989, 36: 2003-2018.
- [27] 林睦曾, 岩石热物理学及其工程应用[M], 重庆: 重庆大学出版社, 1991
- [28] Brede M. The brittle-to-ductile transition in Silicon. *Acta Metall Master*, 1993, 41(1): 211.
- [29] Oda M. Modern developments in rock structure characterization [J]. In *Comprehensive Rock Engineering*. 1993, 1:185-200.
- [30] Lau J. S. O., and Jackson R., The effects of temperature and water-saturational on mechanical properties of Lac du Bonnet pink granite, 8th Int.Con. On Rock Mech., Tokyo, Japan, 1995.
- [31] 许锡昌, 刘泉声, 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J], 岩土工程学报, 2000, 22 (3): 332~335
- [32] 许锡昌, 温度作用下三峡花岗岩力学性质及损伤特性初步研究, 硕士学位论文, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998
- [33] 许锡昌, 刘泉声, 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J], 岩土工程学报, 2000, 22 (3): 332~335
- [34] N.A. Al-Shayea, K.Khan, S.N. Abduljawward. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode(I-II) fracture toughness of a limestone rock. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 2000(37): 629-643.
- [35] 桑祖南, 周永胜, 何昌容, 金振民, 辉长岩脆—塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究[J], 地质力学学报, 2001, 7(2): 130~137
- [36] 王颖轶, 张宏君, 黄醒春等, 高温作用下大理岩应力—应变全过程的试验研究[J], 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (增 2): 2345~2349
- [37] 黄炳香, 邓广哲, 王广地, 温度影响下北山花岗岩蠕变断裂特性研究[J], 岩土力学, 2003
- [38] Simpson C. Deformation of granitic rocks across the brittle — ductile transition. *J. Struct Geol*, 1985, 7:503-511.
- [39] Booker J R and Savvidou C. Consolidation around a point heat source. *Int.J. Numerical Analytical Meth Geomech*. 1985,9:173-184.
- [40] E. Ayotte, B. Massicotte, J. Houde and V. Gocovski, “Modeling the thermal stresses at early ages in a concrete monolith”, *ACI Materials Journal*, 1994, 94: 577-587.
- [41] C. -X. Huang, “The three dimensional modelling of thermal cracks in concrete structure”, *Materials and Structures*, 1999, 32: 673-678.
- [42] Johnson B., Gangi A F. Handin J. Thermal cracking of rock subject to slow, uniform temperature changes. *Proc 19th US Symp. Rock Mech.*, 1978. 259-267.
- [43] F. HOMAND-ETIENNE, R. HOUPERT. Thermally Induced Microcracking in Granites: Characterization and Analysis. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 1989, 26(2): 125-134.
- [44] Wang H F, B Bonner. Thermal stress cracking in granite. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94 (B2):1745-1758.
- [45] 寇绍全, 热开裂损伤对花岗岩变形及破坏特性的影响[J], 力学学报, 1987, 19 (6): 550~556
- [46] 陈颢, 吴晓东, 张福勤, 岩石热开裂的实验研究[J], 科学通报, 1999, 4 (8) : 880~883
- [47] 周克群, 楚泽涵, 张元中等, 岩石热开裂与检测方法研究[J], 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (4): 412~416
- [48] 吴晓东, 刘均荣, 岩石热开裂影响因素分析[J], 石油钻探技术, 2003, 31 (5): 24~27
- [49] 韩学辉, 楚泽涵, 张元中, 岩石热开裂及其在工程学上的意义[J], 石油实验地质, 2005, 27 (1): 98~100
- [50] 李长春等, 考虑温度效应的岩石损伤内时本构关系[J], 岩土力学, 1991, 12 (3): 1~10
- [51] SHUKE MIAO, MING L. WANG. An Elastoplastic Damage Model for Concrete Subjected to Sustained High Temperatures. *Int. J. of Damage Mech.*, 1997,6(4): 195-214.
- [52] M. H. H. Hettema, D. V. Niepce, K. -H. A. A. Wolf. A microstructural analysis of the compaction of claystone aggregates at high temperatures. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 1999(36): 57-68.

- [53] Wenbo Luo , Tingqing Yang , Zhida Li , Longwei Yuan. Experimental studies on the temperature fluctuations in deformed thermoplastics with defects. *International Journal of Solids and Structures.*, 37(2000) 887-897.
- [54] Allen, D. H. Thermomechanical coupling in inelastic solids. *Appl. Mech. Rev.* 1991, 44(8):361-373.
- [55] 刘泉声, 许锡昌, 山口勉, 长秋雄, 三峡花岗岩与温度及时间相关的力学性质试验研究[J], *岩石力学与工程学报*, 2001, 20 (5): 715~719
- [56] 徐燕萍, 刘泉声, 许锡昌, 温度作用下的岩石热弹塑性本构方程的研究[J], *辽宁工程技术大学学报*, 2001, 20(4): 527~529
- [57] 许锡昌, 花岗岩热损伤特性研究[J], *岩土力学*, 2003, 24 (增刊): 188~191