

国家重点基础研究发展计划(973)项目 (2013CB3227900)资助
国家自然科学基金项目 (51074166)资助
国家自然科学基金项目 (51104128)资助
高等学校博士点专项科研基金项目 (20120095110013) 资助
江苏省青蓝工程项目资助
江苏省“333”工程项目资助
徐州工程学院学术著作出版基金资助

高温作用下泥岩的损伤演化及 破裂机理研究

张连英 郭晓倩 李 明 茅献彪◎著

Gaowen Zuoyongxia Niyang De Sunshang Yanhua Ji Polie Jili Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB3227900)资助

国家自然科学基金项目(51074166)资助

国家自然科学基金项目(51104128)资助

高等学校博士点专项科研基金项目(20120095110013)资助

江苏省青蓝工程项目资助

江苏省“333”工程项目资助

徐州工程学院学术著作出版基金资助

高温作用下泥岩的损伤演化及 破裂机理研究

张连英 郭晓倩 李 明 茅献彪 著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书共分7章,主要讲述了泥岩随温度升高和加载速率增加的力学性能变化规律;给出了高温作用下泥岩试样的组分与物相变化,揭示了高温作用下泥岩宏观破裂特征的微观机制;针对所测泥岩岩样的力学特性,给出了相应的损伤本构模型。全书结构紧凑,内容合理。本书可供矿山生产、设计、科研单位的有关技术人员和相关院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高温作用下泥岩的损伤演化及破裂机理研究 / 张连英等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2974 - 8

I. ①高… II. ①张… III. ①煤系—泥岩—研究
IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 301584 号

书 名 高温作用下泥岩的损伤演化及破裂机理研究
著 者 张连英 郭晓倩 李 明 茅献彪
责任编辑 章 毅 夏 然
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 9.75 字数 252 千字
版次印次 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着社会与经济发展对能源需求的不断加大,与温度有关的岩土工程问题越来越受到广泛关注,如:地热资源开发、核废料处置及煤炭地下气化等工程。温度与地应力耦合作用下岩石力学性能的研究是解决温度有关的岩土工程问题的基础。本书以煤系岩层中泥岩为研究对象,借助于 MTS810 电液伺服材料试验系统及配套的高温环境炉、扫描电镜、X 射线衍射分析仪等试验手段,应用损伤断裂理论、黏弹塑性理论等,从宏观和细观不同尺度上,对高温作用下泥岩的损伤演化与破裂机理进行了系统的研究。主要工作和研究成果如下:

(1) 系统测定了常温至 800 °C 高温条件下泥岩试样的全应力—应变曲线,分析得到了泥岩的弹性模量、峰值强度、峰值应变、软化模量等随温度的变化规律,并给出了加载速率对泥岩力学性能的影响,揭示了泥岩随温度升高和加载速率增加的脆延转化特性。

(2) 基于泥岩试样断口的电镜扫描和 X 射线衍射分析试验,给出了高温作用下泥岩试样组分结构的变化特征、影响泥岩力学性能的组分因素、试样断口处裂纹的形态及发育变化特征。结果表明,高温作用下泥岩试样的组分与物相变化是导致岩样断口处裂隙的扩展、闭合、晶界破裂形式差异的重要原因,从而呈现了不同温度段泥岩宏观力学性能的变化特征。有效地揭示了高温作用下泥岩宏观破裂特征的微观机制。

(3) 依据岩石损伤力学与统计强度理论,结合高温作用下泥岩的力学性能,构建了考虑温度及应变率效应的泥岩损伤演化方程和本构模型,并针对所测泥岩岩样的力学特性,给出了相应的损伤本构方程具体参数,本构模型与试验结果具有很好的印证性。

(4) 通过对常温及高温(700 °C)作用下泥岩的分级加载蠕变试验,得到了相应的蠕变曲线,给出了泥岩的蠕变经验方程,并初步建立了考虑温度效应的泥岩蠕变本构模型,包括:泥岩的蠕变方程、卸载方程和松弛方程。

本书的研究成果在一定程度上丰富了岩石力学的基本理论,也为高温与地应力耦合作用下岩土工程问题的研究提供重要依据。

著 者

2015 年 6 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容与方法	13
2 高温作用下泥岩力学特性的实验研究	17
2.1 实验条件及方法	17
2.2 高温作用下泥岩的变形特征	23
2.3 高温作用下泥岩的强度特性	28
2.4 高温作用下泥岩的热膨胀效应	34
2.5 高温作用下泥岩的脆延转化	37
2.6 本章小结	39
3 加载速率对高温作用下泥岩力学性能的影响	41
3.1 试验方法与方案	41
3.2 不同加载速率下泥岩的变形特征	42
3.3 不同加载速率下泥岩的强度特性	51
3.4 不同加载速率下泥岩的脆延转化特性	63
3.5 本章小结	69
4 高温作用下泥岩的微观损伤机制分析	71
4.1 温度作用下泥岩的组分结构变化特征	71
4.2 温度作用下泥岩试样断口形貌的微观特征分析	78
4.3 加载速率对泥岩断口形貌微观特征的影响	86
4.4 本章小结	89
5 高温作用下泥岩的损伤演化及本构方程	90
5.1 损伤力学基础	90

5.2	岩石的损伤力学模型	93
5.3	岩石破坏的统计强度理论	97
5.4	泥岩的损伤演化方程	99
5.5	泥岩的损伤本构方程	103
5.6	泥岩损伤本构方程参数的确定	105
5.7	损伤本构方程验证	109
5.8	本章小结	113
6	高温作用下泥岩的蠕变特性	115
6.1	岩石的流变特性	115
6.2	高温作用下泥岩蠕变特性的试验测定	117
6.3	高温作用下泥岩蠕变方程	124
6.4	本章小结	132
7	结论与展望	134
7.1	结论	134
7.2	展望	136
	参考文献	137

CHAPTER

1

绪 论

1.1 研究目的及意义

岩石是自然界的产物,它是在各种不同随机因素作用下经历了漫长而又复杂的地质构造运动后形成的地球介质,是组成地壳和地幔的主要物质。多数岩石是由一种或几种造岩矿物按一定的方式组合而成的天然聚集体,具有一定的结构、化学成分和矿物成分,是人类赖以生存和发展的立足之地。随着工业文明的进一步发展,人们对岩石的认识和利用在不断地深入和发展,虽成果丰富,但也代价沉重,如近年来煤矿事故频繁发生,多数是由于瓦斯、水等引起岩石的失稳破坏,给国家和人民的生命财产造成了无法估量的损失。这些灾害的发生表明,人们对岩石力学行为的认识和把握还远未达到令人满意的程度,现有岩石力学的分析方法及其可靠性还远不能满足岩石工程设计需要,很多工程实践的岩石力学问题亟待解决。对这些工程的设计和施工都要求系统地研究岩石的变形状态、破坏机制以及建立力学模型,以便为工程设计中预测岩石工程的可靠性和稳定性提供依据,并使工程具有尽可能的经济性。而这些工程建设问题不断给岩石力学的研究者提出了新的挑战,也大大促进了岩石力学的发展。

岩石力学是研究岩石与岩体力学性能的理论 and 应用的科学,是探讨岩石和岩体对其周围物理环境的力场的反应的力学分支。从力学的角度看,就是要解决岩石的变形、强度和破坏的力学性质和力学效应问题,因此岩石力学的发展同弹塑性力学、断裂力学、损伤力学、流变学、结构力学、地质学、地球物理学、固体物理学、矿物学和水化学等学科是分不开的。岩石是一种既复杂又特殊的材料,是由多种矿物颗粒、孔隙和胶结物组成的混合物,经过亿万年的地质演变和多期复杂的构造运动,又使其内部形成大量随机分布的微裂隙、微孔洞、节理、夹层和断层等。因此,岩石既不是一种理想的连续介质(存在宏观、细观、微观的不连续性),又不是严格意义上的离散介质(结晶材料)。这种似连续又

非完全连续、似破断又非完全破断的特征使岩石的力学性质异常复杂,对岩石强度的研究明显不同于对金属材料、高分子材料强度的研究,也不同于对陶瓷、混凝土等这类与岩石有相似力学行为的材料的强度研究。近年来,随着断裂损伤力学、分形、分岔、混沌、耗散结构、突变理论、协同论等学科分支和研究方法相继渗入,岩石力学的非线性研究方面取得了很大的进展。尽管如此,迄今为止还没有一种普适的岩体物性关系,每种岩石物性关系只是在一定范围和一定条件下适应。这是因为岩石的变形和破坏性质不仅与其自身微结构密切相关,还受到温度、载荷、围压、孔隙水、化学等环境因素的影响。因此现阶段研究各种条件下岩石的变形破坏特性和本构关系都具有重大的理论和工程实践意义。

岩石的流变性是指岩石在外界载荷、温度等条件下呈现出与时间有关的变形、流动和破坏等性质,主要表现在弹性后效、蠕变、松弛、应变率效应、时效强度和流变损伤断裂等方面。岩石流变是岩土工程围岩变形失稳的重要原因之一,比如地下工程在竣工数十年后仍可能出现蠕变变形和支护结构开裂现象,尤其是在软岩中成洞的地下工程,由于围岩显著的流变性给结构设计、施工工艺带来了一系列特殊问题。最适合储存核废料的盐岩和花岗岩,在载荷、高温、核辐射等条件下同样会产生流变,从而影响储藏洞室的稳定性。此外,煤与油页岩的地下气化、地热资源开发、煤层瓦斯的安全抽放和综合利用等工程所涉及的岩土工程问题往往与温度、载荷、应力波等有关。理论和试验证明,岩石在承受不同加载速率作用时,其本构关系和力学特性有很大差异,在常温和高温状态下岩石的力学性能也具有很大差异。而这正是研究岩体爆破机理、破坏判据以及岩体工程参数优化与长期稳定性等的理论基础。因此开展岩石不同温度和应变率下岩石力学性质演化研究,深入了解岩石高温蠕变变形及其破坏规律,对于岩石工程建设具有十分重大的现实意义和经济价值。岩体的破坏,通常是由于内部的微裂隙和微孔洞起裂、发展并最终相互贯通形成宏观裂纹引起的。因此,研究岩体中的微裂隙和微孔洞的扩展、演化规律,弄清岩体破坏失稳的机理,无疑是能否正确评价岩体稳定性的关键。目前在岩石力学研究领域中,对岩石在常温静载作用下破坏的研究较多,但由于研究条件(设备)的限制,有关高温环境不同应变率下岩石破坏机制的研究较少。在不同温度与应变率作用下,岩石的力学性能与破坏特性将表现如何?这也是近年来随着深部开采的出现面临的新的问题,这方面国外刚刚起步,并将成果初步应用于连续采矿机破岩方面,国内这方面则仍是空白。因此,进行煤系岩石不同温度与应变率下力学性质演化与高温蠕变特征的相关研究对解决岩石工程中的一系列问题有着重要的指导意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 温度对岩石物理性质的影响

岩石的物理性质主要表现为岩石的导电性、弹性波速、热导率、热交换率、线膨胀系

数、比热容、热扩散率、孔隙度、渗透率等。研究这些岩石物理性质随温度的变化规律,在地球物理学、能源、地热开发、灾害预测等研究有着广泛的应用。

1.2.1.1 高温作用下岩石导电性

高温高压下电性测量技术是人们获得地球内部物质组分、物质运动变化状态以及地球物理测量的重要手段^[1]。从 20 世纪四五十年代起,国内外学者对高温高压下岩石的导电性做了大量的研究,已经有了长足的发展。

1989 年勒热夫斯基等指出,岩石电导率与温度的倒数呈负线性关系。即,温度越高,岩石的电导率越大。柳江琳等^[2,3]通过在高温(563~1 173 K)、高压(1.0~2.5 GPa)条件下,对花岗岩、玄武岩与橄榄岩三种岩石电导率的实验测试,得到了相类似的结论,在温度 563~1 173 K 的变化范围内,电导率发生了 3~5 个量级的变化,且在某些部位存在着电导率的突然变化,白武明等^[4]进一步研究表明,当温度升高到岩石内部出现部分熔融时,电导率有几个量级的增大,对于辉橄岩 11% 的熔融可使电导率增大两个数量级。

图 1-1 所示为玄武岩电导率—温度关系曲线。

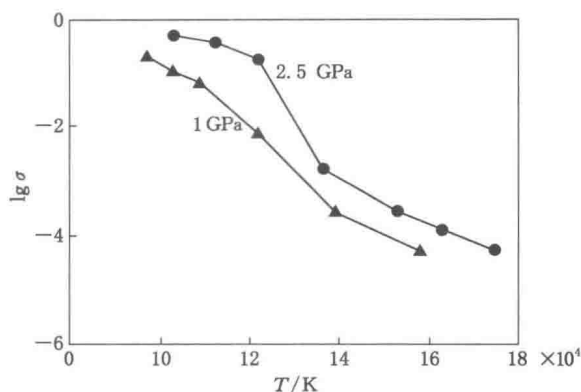


图 1-1 玄武岩电导率—温度关系曲线

1.2.1.2 弹性波速

研究资料表明:温度对岩石弹性波速的影响显著,随着温度的升高,岩石纵波波速 v_p 不断降低,且各种岩石都存在一个波速急剧下降的临界温度^[5-9]。

刘巍^[10]利用超声波脉冲投射法、透射—反射联用法与频谱振幅比法研究了斜长角闪岩、橄榄岩及辉石岩等弹性波速和首达波的振幅、总能量、频谱等随压力及温度的变化特征。研究显示:橄榄岩和辉石岩的纵波速度在室温至 1 240 ℃ 左右区间,随温度升高呈直线下降趋势;斜长角闪岩和闪长岩在室温至 600 ℃ 或 800 ℃ 呈线性下降,当温度继续升高,波速迅速下降;蛇纹石化辉岩在室温至 500 ℃ 呈线性降低,当温度更高时,波速迅速下降。

白武明等^[4]利用超声波脉冲测量弹性波速的方法研究了花岗岩、辉长岩、辉橄岩、花岗闪长岩及玄武岩弹性波速随温度变化的特征。实验结果表明:在给定压力条件下,升

温至岩石内部出现部分熔融时,弹性波速大幅度下降。

张友南等^[11]在高压 700~800 MPa、高温 800~1 100 °C 下对镁铁质、超镁铁质岩石波速进行实验测量,得到:在 700 °C 以内,波速随温度的降低幅度不大,当超过这个温度限时,大多岩石开始脱水出溶,相组合发生变化,波速大幅度降低,这一转折的机制是岩石中液相的产生(图 1-2)。岩石组分结构的各向异性决定着岩石弹性波速的各向异性,高温作用下岩石的结构特性发生改变势必对岩石弹性波速的各向异性产生影响。1975 年 Kern 对不同温度下蛇纹岩、角闪岩、橄榄岩及大理岩的弹性波速各向异性进行研究,得到:蛇纹岩波速的各向异性最大,受温度的影响最显著,600 °C 后波速的各向异性明显增大,角闪岩与橄榄岩受温度影响较小,600 °C 后波速的各向异性略有增加,而大理岩波速的各向异性随温度的升高而降低。

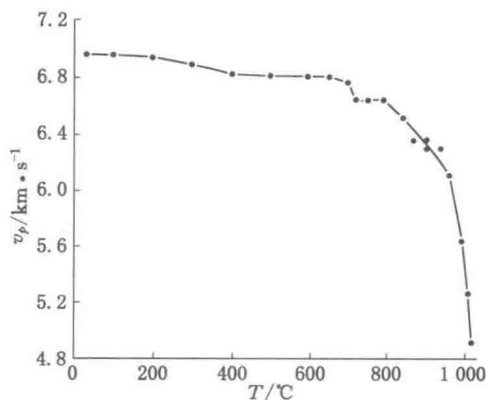


图 1-2 角闪岩波速随温度的变化曲线(压力 700 MPa)

1.2.1.3 热物理性质

研究岩石的热物理特性,在地球科学、地热开发、采矿、地震研究等方面有着广泛的应用。尤其在地热资源开发的应用中,岩石的导热系数、比热容、热容量、导温系数、线膨胀系数及热交换等参数是岩体工程中温度场的形成、温度场的分布特征、热应力场及热破坏特征的计算与模拟的基本岩体参数。

早在 1940 年, Birch 和 Clark 发现在温度 0~600 °C 之间岩石的热导率[单位:W/(m·K)]与温度有以下关系:

$$K_T = 0.418 \left(\frac{600}{300 + T} + 4 \right) \quad (1-1)$$

苏联库塔斯和戈尔迪恩斯研究认为:砂岩、石灰岩、黏土岩等沉积岩热导率有如下经验公式:

$$K_T = K_0 - (K_0 - 1.38) \left[\exp \left(0.725 \frac{T - 193.15}{T + 403.15} \right) - 1 \right] \quad 20 \text{ °C} \leq T \leq 300 \text{ °C} \quad (1-2)$$

式中, K_0 为 20 °C 对应的热导率。

花岗岩、玄武岩、闪长岩等火成岩热导率有如下经验公式:

$$K_T = K_0 - (K_0 - 12.01) \left[\exp\left(\frac{T - 293.15}{T + 403.15}\right) - 1 \right] \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \quad (1-3)$$

对于大多数岩石而言,随着温度的升高,岩石的热导率呈降低趋势。R. S. C. Wai (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:

石灰岩热膨胀系数:

$$\alpha_T = \left(4 + \frac{T}{60}\right) \times 10^{-6} \quad 0^\circ\text{C} \leq T \leq 180^\circ\text{C} \quad (1-4)$$

式中, α_T 为热膨胀系数。

片麻岩状的花岗岩热膨胀系数:

$$\alpha_T = \left(6 + \frac{T}{20}\right) \times 10^{-6} \quad 0^\circ\text{C} \leq T \leq 180^\circ\text{C} \quad (1-5)$$

石灰岩导热系数(单位: m^2/s):

$$\kappa_T = 1.2 \left(1 - \frac{T}{360}\right) \times 10^{-6} \quad 0^\circ\text{C} \leq T \leq 180^\circ\text{C} \quad (1-6)$$

式中, κ_T 为导热系数。

片麻岩状的花岗岩导热系数:

$$\kappa_T = 1.6 \left(1 - \frac{T}{360}\right) \times 10^{-6} \quad 0^\circ\text{C} \leq T \leq 180^\circ\text{C} \quad (1-7)$$

1983年 Heuze 总结前人在岩石比热容与温度间关系的研究成果时指出:岩石的比热容随着温度的升高而增大。

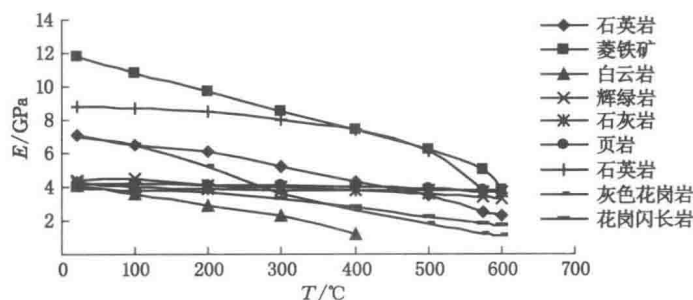
总之,中外的研究者在温度作用下的岩石物理特性研究方面作出了许多有益的工作,但岩石的热膨胀系数、导热率等热物理性能随温度变化的不确定性,到目前尚未弄清,有待于从内部机制来加以研究。

1.2.2 温度对岩石力学性质的影响

与常温下岩石相比,温度的升高,使得岩石内部结构将发生物理或化学性质的改变,同时也将对岩石的力学性能产生影响。在许多工程领域,如地热资源的开发利用、高放射性核废料地下贮存及石油开采等,人们需要了解岩石在温度作用下力学性质的变化规律。20世纪70年代以来,国内外学者从各个不同角度和层次,对岩石在温度作用下的基本力学性质(包括弹性模量、抗压强度、泊松比、断裂韧性等)进行研究,得到了岩石的力学特性随温度的变化规律及岩石的破坏机理^[13-36]。

弹性模量的变化对计算岩石热应力及变形特征等具有重要作用。徐小荷等在温度20~600℃区间分别对石英岩、菱铁矿、白云岩、辉绿岩、石灰岩、页岩、石英岩、灰色花岗岩及花岗闪长岩测试了不同温度下岩石的弹性模量的变化。得出:几种岩石的弹性模量随温度的升高逐渐减小,但减小规律各不相同(图1-3)。

Alm^[38]考察了花岗岩受到不同温度热处理后的力学性质,并对花岗岩温度作用下微


 图 1-3 $E-T$ 关系曲线

破裂过程进行了讨论。张静华、王靖涛等^[39-40]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。N. A. Al-Shayea^[41]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 20~50 °C 时的断裂韧性:

$$K_{IC} = \frac{p\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}RB}N_1, K_{IIc} = \frac{p\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}RB}N_2 \quad (1-8)$$

K_{IC} 和 K_{IIc} 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。寇绍全等^[42]系统地研究了经过热处理的 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。Brede^[43]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速率升高而升高。Brede 和 Haasen^[44]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。Oda 等^[45]研究了岩石在温度作用下的基本力学性质、岩石的微破裂过程,得到了岩石的力学特性随温度的变化规律和岩石的破坏机理。桑祖南^[46]等进行了辉长岩脆—塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究,指出辉长岩在 600 °C 时以脆性破裂为主,700~850 °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。许锡昌、刘泉声^[47-48]通过试验,初步研究了花岗岩在 20~600 °C 高温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,如图 1-4、图 1-5 所示,泊松比受温度的影响规律至今也未有定性结论,但指出泊松比大致随温度升高而略有增加。

杜守继^[49]等对经历不同高温后花岗岩的力学性能进行了试验研究,分析了花岗岩应力—应变曲线、峰值应力、峰值应变、弹性模量和泊松比等的变化情况。王颖轶和夏小和等^[50,51]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、峰值应力、峰后特性及残余强度等的影响。朱合华等^[52]通过单轴压缩试验,对不同高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学性质进行了研究,分析比较 3 种岩石峰值应力、峰值

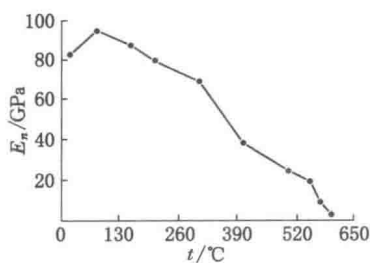


图 1-4 花岗岩弹性模量随温度的变化

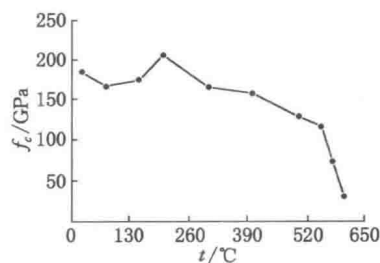


图 1-5 花岗岩单轴抗压强度随温度的变化

应变及弹性模量随温度的变化规律,并研究了峰值应力与纵波波速、峰值应变与纵波波速的关系。

吴忠等^[53]对 44 块鹤壁六矿煤层顶板砂岩试件在高温下和高温后的力学性质进行试验研究,揭示砂岩的强度和变形特征随温度的变化规律。试验结果表明:随温度升高,高温下和高温后的砂岩的弹性参数(峰值应力、弹性模量、变形模量)均逐渐降低,但总体变化趋势相似,个别试件的弹性参数在 400 °C 前高于常温状态;两者相比,高温后砂岩的峰值应力、弹性模量和变形模量有所提高,两者受温度影响均以脆性破坏为主。这为研究煤炭地下气化时热作用下燃空区的围岩稳定及应力场和位移场的变化规律提供试验依据。张连英等^[54-58]通过单轴压缩试验,对不同高温作用下大理岩、石灰岩、砂岩的力学性能进行了研究,考察了三种岩石的全应力—应变曲线,给出了其峰值应力、峰值应变、弹性模量 E 随温度的变化特征。研究结果表明:① 大理岩的峰值应力、弹性模量在常温至 400 °C 内呈现起伏变化;400 °C 后则呈平缓下降态势。② 石灰岩的峰值应力、弹性模量在常温至 200 °C 内,随温度升高呈下降趋势;在 200~600 °C 内变化不大;当 $T > 600$ °C 后,呈现出急剧下降现象。③ 砂岩在常温至 200 °C 内,峰值应力呈下降趋势,弹性模量变化不大;在 200~600 °C 内,峰值应力呈上升趋势,弹性模量变化不大;当 $T > 600$ °C 后,峰值应力、弹性模量均急剧下降。④ 对于峰值应变,石灰岩在常温至 600 °C 变化不大,当 $T > 600$ °C 后,峰值应变急剧上升;大理岩、砂岩的峰值应变在常温至 200 °C 之间随着温度升高在降低,当 $T > 200$ °C 后,峰值应变迅速增长。

目前,国内外关于高温条件下岩石断裂特征的研究工作大多集中在断裂机理与韧度测试。高温和围压条件下,岩石断裂机制可以是解理脆断和蠕变断裂,但对两种机制的发生条件及转变规律认识不清^[59-69],且停留在拉伸(I型)断裂的定性研究上,缺乏系统的理论研究。

1.2.3 高温作用下岩石的热破裂特征

岩石热开裂的研究,国内外尚处在起步阶段,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,大部分现象和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^[70-74]。

寇绍全^[75]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(100 ℃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 200 ℃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 450 ℃和 600 ℃处理的样品的颗粒边界常发现裂纹包围的碎片。Simpson 等^[76-79]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,火成岩在 300 ℃以下都无明显的微裂纹生成。

Wang 等^[80]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 75 ℃(Chen 等认为是 60~70 ℃)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。

陈颢等^[81]用山东东营碳酸盐岩样品进行实验,实验结果表明:碳酸盐岩存在着 110~120 ℃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,碳酸盐岩的渗透率只是缓慢地增加。吴晓东等^[82]通过室内大量岩芯的实验,认为岩芯经过高温热处理后,其渗透率、孔隙度等参数会发生较大的变化且这种变化存在一定的温度界限,不同类型的岩芯具有不同的温度界限。周克群等^[83]将砂岩、碳酸岩盐和花岗岩等岩石从 30 ℃加热到 120 ℃以后再降温,对各温度点测量纵波速度,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。张渊^[84]等在实验室对岩石在温度影响下的声发射现象进行了初步的研究和探讨,认为长石细砂岩在温度影响下具有明显的声发射现象,并且随着温度的变化,声发射率也随之变化,具有两个声发射峰值区。声发射的振铃累积数在 70~90 ℃发生急剧变化,表明 70~90 ℃是长石细砂岩裂纹发育的门槛值。陈剑文^[85,86]、高小平^[87,88]、梁卫国^[89,90]等就温度对盐岩的损伤、变形特征的影响做了一些探讨。邱一平和林卓英^[91]对高温作用下花岗岩的热损伤进行了试验研究和力学分析。研究表明:热开裂破坏存在一温度阈值^[91,92]。

1.2.4 岩石热损伤理论和本构方程

损伤力学(包括宏观损伤力学和细观损伤力学)研究各种载荷条件下材料和结构中各类损伤随变形而发展并最终导致破坏的过程和规律。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,20 世纪 80 年代中后期,以宏观、细观、微观相结合的现代破坏力学的研究为固体力学的发展注入了新的活力,标志着人们对结构破坏过程的认识更加深

刻。近年来,断裂力学、损伤力学和相关的细观力学一起已经成为固体力学的前沿,组成了结构破坏过程理论的主要内容^[93-109]。

国内,刘泉声等^[110]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:

$$\frac{\eta_v}{E_v} \dot{\sigma} + \sigma = \frac{E_e + E_v}{E_v} \eta_v \dot{\epsilon} + E_e \epsilon_v - E_e \alpha_e \Theta - \frac{E_e \alpha_e + E_v \alpha_v}{E_v} \eta_v \dot{\Theta} \quad (1-9)$$

式中, Θ 为相对于参考温度 θ_g 的绝对温度 θ 的变化量,即 $\Theta = \theta - \theta_g$ 。 E_e 、 E_v 为弹簧的刚度系数, α_e 、 α_v 为弹簧的热膨胀系数, η_v 为黏壶的黏度系数, σ 为总应力, ϵ_v 为应变。

许锡昌^[112]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:

$$\sigma = E_0 [1 - D(T)] \left[1 - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_s} \right)^n \right] \epsilon \quad (1-10)$$

式中, σ 为应力, ϵ 为应变, E_0 是 20 °C 时的弹性模量, $D(T)$ 为温度 T 时的损伤, ϵ_s 、 n 为拟合值。

并且定性地讨论了载荷和温度影响下损伤面的演化规律。徐燕萍等^[113]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。

谢卫红,高峰^[114]等对高温作用下石灰岩在单向压缩和单向拉伸加载的细观结构进行了实时试验研究,探讨了岩石热损伤演化过程和热裂纹扩展、破坏特征,建立了岩石热裂纹生长的损伤模型。

Hetttema 等^[118]做了黏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,建立了黏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,则黏土岩压实本构关系为:

$$\epsilon_v = 1 - \sqrt{m_0/m} \cdot \left[1 - 3 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] + \sqrt{m_0/m} \cdot \left[\left(\frac{d}{D} \right)^6 \right] \quad (1-11)$$

$$N = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \sigma_{eff}}{m \cdot (1 - \phi) \cdot \left[1 + 30.75 \cdot (K_\beta)^{3/2} \cdot \frac{(1 - V)^2}{E \cdot \sqrt{\sigma_{eff}}} \right]} \quad (1-12)$$

$$\dot{\epsilon}_v = f(\epsilon_v, m, \phi) \cdot e^{-E_a/RT} \cdot \sigma_{eff}^n \quad (1-13)$$

式中, ϵ_v 为体应变, m_0 为初始配位数, m 为配位数, d 为两个颗粒间接触的直径, D 为颗粒的直径, N 为法向载荷, σ_{eff} 为广义 Terzaghi 有效应力, K_β 为液体的体积弹性模量, ϕ 为应力集中系数, V 为体积, E 为杨氏模量, E_a 为蠕变激活能, R 为气体常数, T 为温度, n 为蠕变定律的力功率。

1.2.5 温度作用下岩石微观断裂机理

自从 Bieniawski^[119]对岩石脆性破裂的机制做了系统的论述以后,许多岩石力学和地

球物理工作者做了大量的实验和理论工作,试图揭示这一从微观到宏观的破裂发展过程。总的趋势是,研究逐渐从宏观向微观发展。从定性描述到试图得出一些半定量结果。

Homand-etienne 和 Houpert^[121]对 Senones 和 Remirement 两种不同粒度花岗岩在 20~600 °C 范围内热处理过试件,通过扫描电镜(SEM)分析了岩样表面的裂纹长度、宽度、形状、密度、种类(晶间、穿晶、晶内裂纹)等变化特性,定量地研究了岩样的微观结构损伤对其力学性能的影响。图 1-6 和图 1-7 为花岗岩晶间、晶内裂纹长度随温度变化关系曲线。

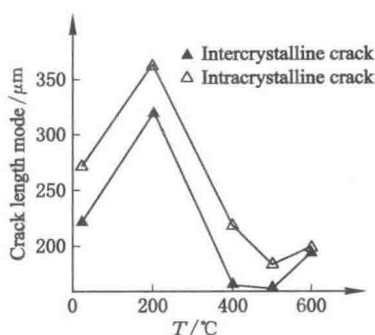


图 1-6 Senones 花岗岩晶间、晶内裂纹长度与温度关系曲线

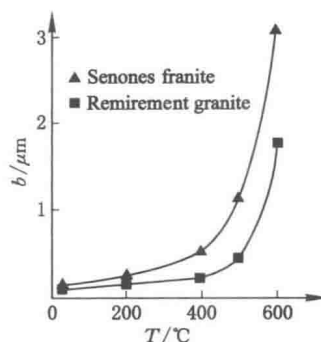


图 1-7 Remirement 花岗岩晶间、晶内裂纹长度与温度关系曲线

Hallbaucr 等^[122]将试件加载到不同的应力水平,卸载后制成薄片,在光学显微镜下进行了观察。Wu 和 Thomsen^[123]研究了 Westerly 花岗岩在单轴压缩蠕变实验中的微破裂事件累积数,并且对一些试件在临近破坏时卸载,切出薄片在光学显微镜下做了观察,结论是观察到的裂纹比记录到的事件数要少得多。有些作者还曾采用揭膜法(例如 Sangha 等^[124],Chen 等^[125])研究过受载岩石中的微破裂。

自从 Sprunt 和 Brace^[126]将扫描电镜观测技术引入岩石微破裂研究以来,已有许多这方面的成果陆续发表。Tapponnier 和 Brace^[127]研究了 Westerly 花岗岩中应力诱发的裂纹的扩展,他们的结论是很少看到与剪切有关的扩展裂纹,扩展裂纹大多数与颗粒边界有关,并与外应力方向成高角度。Menendez, David 和 Marot^[128]利用激光扫描显微镜(CSLM)对 LaPeyratte 花岗岩进行了研究,通过预先加热或者加压使样品破裂,从而研究不同的破裂机理所产生的破裂形式。Gamboa^[129]使用扫描电镜(SEM)对应力作用导致岩石破裂机理进行了研究,并对各种破裂表面进行了详细观察。Moustafa^[130]利用扫描电镜观测了浙江花岗岩在室温下由 51.6 MPa 压力产生的裂隙的发育过程。观察花岗岩的表面以研究其微裂隙和矿物的解理、晶形及破裂作用。

张宗贤等^[131]利用扫描电镜对岩石的热开裂等现象进行了分析讨论。赵永红^[132]利用扫描电镜和光学显微镜对岩石裂纹发育的实时观测,实验和现场研究结果表明岩石破

裂带具有分形几何特征。刘小明,李焯芬^[133]对拉西瓦花岗岩在各种受力情况下岩石破坏断口,进行了微观扫描电镜试验研究,分析了岩石微观破坏形貌特征和微观破坏力学机制。黄明利,唐春安,朱万成^[134]通过在扫描电镜下进行单轴加载实验,即时观察分析岩石受力过程中微裂纹的萌生、扩展和贯通破坏的全过程,得到各试样的应力—应变曲线及其所对应的微结构变化的电镜照片。孙钧,凌建明^[135]通过扫描电镜下的一系列加载试验,对三峡船闸高边坡的闪云斜长花岗岩的细观损伤特性进行了研究;在此基础上,依据脆弹性岩体的细观损伤理论,进一步分析了岩石细观时效损伤对高边坡岩体稳定性的影响。姜崇喜,尚嘉兰等^[136,137]在配置高精度单轴拉伸—压缩加载台的扫描电子显微镜(SEM)上,分别对大理岩、香港白岗岩试样在单轴压缩载荷条件下所出现的细观变形和强度特性进行实时、动态的观察与研究,阐述大理岩初始细观组构及应力水平对裂纹产生、扩展方式的影响和其细观破坏过程的力学行为与宏观力学性能的关系,并介绍了用于 SEM 下单轴压缩载荷实验的岩石试样的制备方法和实验技术。谢卫红,高峰,谢和平^[138]利用带扫描电镜的高温疲劳试验机等目前最先进的实验手段,实时观测了在温度和载荷同时作用下岩石在单向压缩和拉伸中微细观结构的变化、缺陷演化方式和变形破坏过程,对岩石在温度载荷作用下的细观结构特征和细观破坏机理进行了较为系统的实验研究。朱珍德取锦屏二级水电站引水隧洞大理岩进行高水压、高围压、低围压作用下全应力—应变过程三轴压缩对比试验,对大理岩破坏断裂断口进行微观扫描电镜试验,分析不同工况条件下大理岩断口微观形貌特征。湛伦建等^[140]采用偏光显微镜、扫描电镜及岩石力学试验系统等仪器设备研究了煤层顶板砂岩在常温到 1 200 ℃范围内的力学特性和破坏机理。左建平^[141-144]等利用岛津 SEM 高温疲劳实验系统实时在线观察,研究了不同温度作用下细观尺度砂岩的热开裂现象,温度低于 150 ℃时,砂岩几乎不发生热开裂;温度从 150 ℃升高到 300 ℃过程中出现大量的热开裂现象。张渊等^[145,146]在细观尺度下观测了不同温度条件下细砂岩的矿物组分和微结构及其发展变化,以及内部微裂纹的发生和发展,微裂纹的形成与发展与温度有关,细砂岩微裂纹的宽度、长度随温度的变化具有突变性。

林为人等^[147]通过常温及高温显微镜观察,查明了稻田花岗岩中流体包裹体的初始分布状态,并发现在高温条件下,由于流体包裹体的爆裂而导致花岗岩中微小裂纹的形成。王泽云等^[148]利用电子显微镜对岩石微结构及晶胞进行了研究。刘兴华,郑颖人^[149]用 CT 检测技术观测了砂岩的细观损伤特性,定量地分析了岩石细观损伤的分布规律:即损伤满足分形分布。葛修润等^[150]利用最新研制的与 CT 机配套的专用加载设备,进行了三轴(单轴)载荷作用下岩石材料破坏全过程的细观损伤扩展规律的实时 CT 试验。得到了在不同载荷作用下岩石材料中微孔洞被压密—微裂纹萌生—分叉—发展—断裂—破坏—卸载等各个阶段清晰的 CT 图像。对得到的 CT 数等数据进行了分析,引入了初始损伤影响因子,定义了一个基于 CT 数的新的损伤变量,得到了损伤扩展的初步规律。赵阳升等^[151]研制了 uCT225KVFCB 型高精度显微 CT 系统,采用该系统进行花岗岩在常