

国家自然科学基金项目 (51704281)

江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD2014)

高温及冲击载荷作用下 煤系砂岩损伤破裂机理研究

Research on Rupture Mechanisms of Coal Measures Sandstone
under High Temperature and Impact Load

李 明 张连英 卢爱红 张 雷 茅献彪 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



国家自然科学基金项目(51704281)

江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD2014)

高温及冲击载荷作用下煤系砂岩 损伤破裂机理研究

李 明 张连英 卢爱红 著
张 雷 茅献彪

中国矿业大学出版社

内 容 摘 要

本书共分7章,主要讲述了高应变率下岩石动态力学特性的测试方法,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统对常温及热处理后煤层顶板砂岩的动力学特性进行了测试;分析了热处理温度及加温速率对砂岩动态力学特性的影响,并给出了砂岩破坏特征及破坏过程中的能量耗散规律;利用X射线衍射与扫描电镜(SEM)试验系统,探讨了热处理对砂岩物质组分及动态细观断裂特征的影响;利用断裂力学及岩石损伤力学理论,建立了考虑温度及应变率效应的岩石动态损伤演化本构模型。

本书可供岩石力学、岩石动力学等相关领域的高等院校师生、科研院所的科研工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高温及冲击载荷作用下煤系砂岩损伤破裂机理研究 /
李明等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2017.11
ISBN 978 - 7 - 5646 - 3774 - 3

I. ①高… II. ①李… III. ①煤系—砂岩—损伤(力学)—研究 IV. ①P618.110.2②TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 268519 号

书 名 高温及冲击载荷作用下煤系砂岩损伤破裂机理研究
著 者 李 明 张连英 卢爱红 张 雷 茅献彪
责任编辑 章 毅 张 岩
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 10.25 字数 262 千字
版次印次 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 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

近年来,随着矿山采掘向深部延伸,采矿工程面临高温和动载的双重作业环境。地热资源的开发利用、高温核废料处理、岩石地下工程灾后重建等工程也都面临相同的问题。高温及冲击载荷作用下岩石力学特性及损伤破裂机理的研究是上述工程开展的基础。本书以典型的煤层顶板砂岩为研究对象,利用GWD-02A型节能电炉、分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统、X衍射试验系统以及扫描电镜(SEM)试验系统,基于岩石损伤断裂理论,从宏观与细观两个层面系统地研究了高温高应变率耦合作用下砂岩的损伤破裂机理。主要研究成果如下:

① 对常温下砂岩进行了不同应变率单轴压缩试验,研究了高应变率下砂岩应力—应变曲线特征,得到了砂岩动态弹性模量、峰值应力、峰值应变随应变率的变化规律,明确了应变率对砂岩破坏特征与能量耗散特征的影响。

② 基于高温高应变率三种耦合作用(相同应变率不同温度、800℃不同应变率、相同应变率不同温度加载速率)下砂岩单轴压缩试验,分析了高温高应变率耦合作用对砂岩应力—应变曲线、动态弹性模量、峰值应力、峰值应变的影响,得到了砂岩破坏特征及能量耗散特征的基本变化规律。

③ 根据X衍射试验结果,明确了温度及温度加载速率对砂岩物质组分及平均晶粒尺寸的影响规律,揭示了砂岩力学特性的变化本质;基于砂岩断口扫描电镜试验,分析了砂岩断口细观形貌特征与损伤破裂模式随温度及温度加载速率的变化规律,从机理上解释了砂岩宏观破裂特征。

④ 基于岩石损伤力学理论,依据温度与冲击载荷作用下砂岩力学试验数据,以弹性模量为对象定义损伤变量,分别建立了高温下考虑应变率效应,高应变率下考虑温度效应、升温速率效应的砂岩损伤演化方程以及损伤演化本构方程。根据应力—应变曲线的连续性特征,利用曲线拟合方法确定了方程参数,

并将理论数据与试验数据进行了对比,验证了理论模型的准确性。

本书研究成果丰富了岩石动力学的基本理论,也为高温、动载复杂条件下的深部矿山工程开展提供了重要依据。

著 者

2017 年 8 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的主要研究内容与方法	15
2 冲击载荷下岩石力学特性的测试原理与方法	17
2.1 岩石动力学特性的测试技术	17
2.2 分离式霍普金森压杆试验系统	19
2.3 分离式霍普金森压杆试验系统测试原理	22
2.4 分离式霍普金森压杆试验系统测试方法与技术	25
2.5 本章小结	27
3 冲击载荷作用下煤系砂岩力学特性及破坏特征	28
3.1 试样制备与试验方案	28
3.2 煤系砂岩单轴压缩应力—应变曲线的应变率效应	31
3.3 煤系砂岩力学特性随应变率的变化规律	33
3.4 煤系砂岩能量耗散的应变率效应	36
3.5 煤系砂岩破坏特征的应变率效应	38
3.6 本章小结	42
4 高应变率下煤系砂岩力学特性及破坏规律的温度效应	44
4.1 试验设备与方法	44
4.2 高应变率下煤系砂岩力学特性的温度效应	52
4.3 高温作用下煤系砂岩力学特性的应变率效应	57
4.4 温度加载速率对煤系砂岩动力学性能的影响	62
4.5 高温与高应变率下煤系砂岩宏观破坏特征与能量耗散	67
4.6 本章小结	80
5 高温与冲击作用下煤系砂岩损伤破裂的微观机制	82
5.1 高温作用对煤系砂岩物相特征的影响	82
5.2 冲击载荷作用下煤系砂岩损伤破裂的细观特征	96
5.3 高温作用对高应变率下煤系砂岩破裂细观特征的影响	106
5.4 加温速率对高应变率下煤系砂岩断裂细观特征的影响	115

5.5 本章小结 122

6 温度及高应变率下煤系砂岩的损伤演化及本构方程 124

6.1 材料破坏的损伤力学研究方法 124

6.2 温度及高应变率下煤系砂岩的损伤演化方程 130

6.3 温度及高应变率下煤系砂岩的损伤本构方程 135

6.4 砂岩损伤演化本构方程的验证 139

6.5 本章小结 142

7 结论与展望 144

7.1 主要结论 144

7.2 研究展望 145

参考文献..... 147

1 绪论

1.1 研究背景及意义

岩石材料是自然界中普遍存在的地质脆性材料,其组成成分复杂,内部包含大量的缺陷,例如节理、裂隙等。这些固有特点使得岩石的力学特性会随着外界载荷及环境因素的影响而发生变化。岩石工程是国民经济建设的基本工程之一,是社会进步的重要支撑,例如在煤炭开采、水利水电、道路桥梁以及各种工民建等工程规划建设过程中都涉及对岩石力学特征等基本问题的研究^[1-4]。随着岩石类工程的增加,人们对于岩石的认识和利用也在逐步深入,但是大量事故,例如煤矿事故、山体滑坡、桥梁坍塌等表明,人们对于岩石力学行为的认识还远远不能满足当前工程实际的需要^[5-32]。因此,必须根据实际的岩石工程问题,针对岩石破裂机理及破坏特征建立有效的力学模型,为实际工程问题提供理论支持和技术参考。

从 19 世纪开始,人们采用多种试验手段对岩石力学基本问题展开了广泛的研究,并且逐渐明确了岩石在外载作用下的力学特征。近年来,矿山采掘、隧道开挖及各种土建爆破工程等大量增加,这些实际工程的开展广泛涉及动载下岩石变形及破坏特征。20 世纪 40 年代末,分离式霍普金森压杆(SHPB)系统的引入,推动了岩石动态力学特征研究领域的发展。随着研究的深入,学者们发现单一动态外载作用下岩石力学特征问题的研究并不能完全符合实际爆破工程中岩石力学及破坏特征,例如,深部矿山采掘中,爆破手段对于岩体的作用并不仅仅局限于单一的动载荷作用,还包含高温作用。

温度是影响岩石力学特性的重要因素之一,大量的试验研究发现,高温作用下岩石基本力学特性、破坏特征与常温下有显著的区别。近年来,由于浅部煤炭资源的枯竭,矿山采掘开始逐步向深部延伸,国内外千米以上开采深度的煤矿超过百座,南非甚至出现深度在 5 000 m 以上的金矿^[33-35]。深部矿井岩层温度会达到几十摄氏度甚至上百摄氏度,在如此高的温度下进行矿产采掘,需要面临温度和动载的双重条件。除了深井矿山采掘工程之外,地热资源的开发利用、高温核废料处理、岩石地下工程灾后重建等工程都会涉及温度和冲击等荷载作用。

当前,岩石类材料的动态力学特性的研究主要集中在常温条件下,高温下(后)岩石动态力学特性研究成果较少,因此无法为上述一系列实际工程问题提供有效的参考。常温下,岩石基本力学特性参数、动态破坏程度、破坏方式等对于应变率具有较强的敏感性,在高温下,这种应变率的依赖性是否仍然与常温下相同?高温下岩石动态宏观破坏特征与高温下准静态岩石破坏有何区别?这一系列问题都是当前深部矿山采掘、岩石地下工程灾后重建等工程所亟待解决的问题。另外,由于岩石内部存在大量的原始裂纹,外界载荷条件下,原始裂纹起裂、成核、贯穿而最终导致岩石宏观破坏^[36],因此,高温下(后)岩石动态破坏过程微观裂纹的扩展方式等内容也是研究岩石宏观破坏重要基础,对于优化岩石工程施工工艺等具有重要的价值。

长期以来,国内外学者对于岩石动态力学特性进行了一系列的研究,在岩石力学特性应变率效应等方面积累了大量的研究成果^[37-39],另外,在高温下及高温后岩石准静态力学特性研究方面也出现了一些研究成果。但是,高温与高应变率共同作用下的岩石力学特性研究,特别是在高温高应变率下煤系岩石力学特性等方面的研究较少。针对当前实际工程需求的迫切性,本书将对煤系岩石高温后高应变率下岩石力学特性进行深入研究,从宏观和微观两个层面解释岩石破坏机理及其损伤演化特征。研究成果对于解决当前深部矿山采掘、地下工程灾后重建及地热开发等工程实际问题具有重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 冲击载荷作用下岩石基本力学特性研究

矿山采掘、岩体爆破等工程中岩石(体)都会受到动载荷的作用来看,从力学角度来看,类似问题都可转化为高应变率下岩石力学特性等基本问题进行分析。试验手段是研究岩石动态力学特性最有效的方法,自1968年Kumar^[40]利用SHPB试验系统首次进行岩石动态强度测试之后,大量的岩石动态力学研究成果被提出,直到今天,该技术仍然是岩石动态力学特性研究的主要试验方式。当前高应变率下岩石力学特征的研究方向主要包括以下三个方面。

(1) 冲击载荷作用下岩石的压缩特性

早在20世纪中期,国外很多科学家就开始从岩石动态压缩特性入手研究岩石动力学问题。1970年,Friedman et al.^[41]利用液压伺服机及SHPB装置对花岗岩及石灰岩进行了动态力学性能测试,结果表明,随着应变率的增加,两种岩石的基本力学性能参数,如弹性模量、抗压强度等都随之增加;1976年,Janach^[42]通过试验证明了高应变率下花岗岩和石灰岩的抗压强度要远大于静载作用下抗压强度,并且破碎程度随应变率增加而提高。

除了单轴压缩外,三轴压缩试验也在同期开展。Brace et al.^[43]对花岗岩、白云岩等六种岩石在应变率为 $10^{-8} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内进行了三轴压缩试验,证明了岩石破坏程度随着应变率的增加而增加;Donath et al.^[44]对大理石、石灰岩、砂岩以及盐岩四类岩石进行了 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的动态试验,定量地证明了随应变率的增加,岩石抗压强度逐渐增加;Sangha et al.^[45]对砂岩进行了围压为17.2 MPa、37.2 MPa、68.9 MPa、103.4 MPa,应变率为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $2.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的力学试验,同样证明了岩石抗压强度随应变率的增加而提高。总体而言,在20世纪80年代前,岩石单轴动态压缩试验已经向高应变率方向发展,而三轴试验则主要以低应变率为主。与国外相比,这一时期国内岩石高应变率下试验基本处于空白阶段。

20世纪80年代之后,岩石动态压缩力学特性的试验研究快速发展,大量的试验研究成果陆续出现。1980年前后,Ghong et al.^[46-48]为解决油页岩矿开采过程中岩矿爆破实际问题,对不同含油量的油页岩进行了动态力学性能测试,证明了随应变率的增加,油页岩的抗压强度逐渐增大,并且动态破坏方式会出现劈裂、剪切以及两种方式的混合破坏;Lanldrord et al.^[49-50]分别证明了不同类岩石材料抗压强度随应变率增加而增加;Blanton et al.^[4,51]则对不同岩石进行了三轴动态试验测定,分别解释了随应变率增加,岩石三轴动态抗压强度、弹性模量以及破坏程度等有不同程度的增加。在同一时期,国内学者开展了大量岩石材料

动态压缩性能试验研究。1980 年,吴绵拔 等^[52]在中应变率条件下对花岗岩和煌斑岩力学特性进行了试验研究,证明了岩石抗压强度随应变率的增加而逐渐增加,但是泊松比与应变率变化无关;吴绵拔^[53]利用气—液式压缩联动系统的快速加载机,在 $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内对两种花岗岩进行了动态力学特性试验,试验结果表明,当应变率从 10^{-5} s^{-1} 增加到 10^{-1} s^{-1} ,花岗岩抗压强度提高 120%,弹性模量从 38 GPa 增加到 51 GPa。

1992 年,于亚伦^[10]利用 SHPB 试验系统对各种金属矿石进行了动态力学试验,试验结果表明,高应变率下岩石抗压强度要远大于静态下岩石抗压强度,并且,岩石破碎吸收能随应变率的增加而逐渐升高。随后,大量学者采用 SHPB 装置对不同岩石进行了高应变率岩石力学性能的研究,并定量地分析了随应变率增加,岩石基本力学参数及能量耗散对应变率的依赖性,为岩石动态力学特性的研究提供了大量的科学依据^[15,21,30,54-61]。翟越^[62]在前人试验结论的基础上对岩石类材料动态力学特性进行了总结,如表 1-1 所示。

表 1-1 岩石类材料动态力学特性实验结果总结

研究者	岩石类型	实验类型	实验结果	共同规律
Friedman (1970)	花岗岩、石灰岩	$10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩	弹性模量增加,剪胀起始应力为破坏强度的 30%~70%	岩石动态抗压强度远大于较静态作用岩石抗压强度,并且随着应变率的增加抗压强度及破坏程度增强。对于部分岩石而言,弹性模量会随着应变率的增加而增加,但是有些岩石弹性模量随应变率增加变化并不明显。另外,泊松比随应变率的增加变化并不明显
Janach (1976)	花岗岩、石灰岩	单轴压缩	抗压强度比静载作用下增大,破碎程度随应变率升高而增加	
Grady (1980)	油页岩	$10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩	随应变率增加,抗压强度逐渐增大,动态破坏方式会出现劈裂、剪切以及两种方式的混合破坏	
吴绵拔 (1981)	花岗岩、煌斑岩	$10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	抗压强度随应变率的增加而逐渐增加,但是泊松比与应变率变化无关	
Blanton (1981)	闪绿岩、砂岩、 石灰岩	$10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 三轴压缩	抗压强度、弹性模量以及破坏程度随应变率的增加而增加	
Olsson (1991)	凝灰岩	$10^{-6} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩	抗压强度随应变率的增加而增加	
于亚伦 (1992)	石英铁矿石、 混合花岗岩等	$3 \times 10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩	岩石动态破坏强度远高于静载作用下破坏强度,并且岩石破碎吸收能随应变率的增加而逐渐增加	
杨春和 (1994)	泥岩、大理岩	$10^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩	应变率为 10 s^{-1} 时,泥岩的抗压强度比静态强度增加 70%;应变率为 10^3 s^{-1} 时,大理岩的抗压强度比静态强度增加 60%	
Zhao J (1999)	花岗岩	$10^{-5} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩	抗压强度随应变率增加而显著提高,弹性模量与泊松比随应变率增加变化较小	
李海波 (2001)	花岗岩	$10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩,三轴压缩	两种实验条件下,岩石抗压强度随应变率增加而显著提高,弹性模量与泊松比随应变率增加变化较小	
翟越 (2007)	花岗岩、混凝土	$10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩	抗压强度、破碎程度、能量耗散能力随应变率增加而增加	

(2) 冲击载荷作用下岩石的抗拉性能

冲击载荷下岩石抗拉性能研究也是岩石动力学研究的重要内容。早在 20 世纪 60 年代,Price et al.^[63]通过对圆孔石灰岩和辉绿岩进行圆盘劈裂拉伸试验,证明了两种岩石动态抗拉强度较静态作用下岩石抗拉强度有显著的增加,并随着应变率的增加而提高。1996 年,吴绵拔等^[64]对石灰岩进行了动态劈裂拉伸试验,定量地分析了随着应变率增加岩石拉伸强度增加量,这也是国内学者较早开展的岩石动态拉伸测试。

随着 SHPB 系统的应用,巴西圆盘劈裂已经成为当前测试常用的试验方法。李伟等^[65-66]利用直径为 100 mm 的 SHPB 系统以不同速度径向冲击平台巴西圆盘试样,测试了大理岩在高应变率加载下的动态拉伸强度,分析了试样的应变率、破坏时间、破坏模式以及破坏过程中的载荷—应变关系。宋小林等^[67]对不同尺寸的大理岩巴西圆盘和带平台的巴西圆盘进行宽应变率范围的动态劈裂试验,研究不同类型的试样在不同应变率下的破坏应变,讨论试样尺寸、弹速、应变率对破坏应变的影响,试验结果表明:低应变率下,大理岩的动态破坏应变随着应变率的提高而显著增大,而带平台的试样的增加幅度更大,且数据的分散性也较小;当应变率较大时,应变率对破坏应变的影响较小,应变增幅较小,各类试样数据的分散程度都有所降低。

当前,断裂特性是岩石动态拉伸力学特性研究的重点。Dai et al.^[68-69]利用 SHPB 装置,采用圆盘中央带人字形凹槽的岩石试样(CCNBD)进行试验,得到了动载荷作用下起裂韧度、断裂能、裂纹扩展韧度和裂纹扩展速度等岩石的断裂参数,提出裂纹扩展分为稳定和不稳定两类,并给出了加载速率与起裂韧性、加载率、裂纹扩展韧性的定性关系,研究表明:当加载速率在 30 GPa/s 至 70 GPa/s 范围内变化时,断裂参数都呈线性增加,并且不稳定裂纹扩展速度总是大于稳定裂纹扩展速度,前者是后者的 2~3 倍。陈荣等^[70]对带预制裂纹的 Stanstead 花岗岩圆盘三点弯试样进行了动态断裂性能测试,结果表明,该种花岗岩的传播速度和起裂速度都与加载速率有关,并近似呈直线形式变化。

(3) 冲击载荷作用下岩石的损伤演化与本构模型

在岩石动力学领域,损伤演化规律及本构模型一直是研究的重点。1974 年,日本学者木下重教提出了过应力模型,第一次将应变率影响引入岩石动态损伤模型中,并且通过实验证明了模型的理论应用价值^[71]。20 世纪 80 年代,这一模型被我国学者于亚伦等进行了丰富和发展,形成了较为成熟的宾厄模型(图 1-1),在很长一段时间内被用来描述高应变率下岩石动态损伤本构关系。

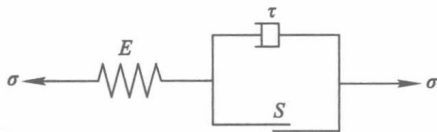


图 1-1 岩石损伤的宾厄模型

该模型的本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{E} \dot{\sigma} + \frac{1}{\tau} \left(\frac{\sigma - S}{S} \right)^m \tag{1-1}$$

其中, E 、 S 分别为静态压缩破坏强度后的弹性模量和应力; m 、 τ 为不同岩石的固有常数, $\dot{\epsilon}$

为应变率。

20 世纪 90 年代,出现了大量的描述岩石动态损伤的本构模型,其中的研究成果直到今天还被广泛地应用。郑永来 等^[72]根据岩石变形过程中的流变及损伤特性,提出了岩石动态损伤过程中的黏弹性连续损伤本构模型,如图 1-2 所示。

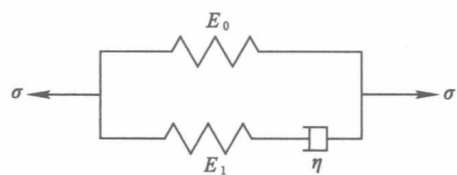


图 1-2 黏弹性连续损伤本构模型

其本构方程可以表示为:

$$\sigma = (1 - D)\sigma(t) = (1 - D) \left[E_0 \epsilon + E_1 \int_0^t \epsilon \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau \right] \quad (1-2)$$

若假定损伤 D 符合韦伯分布,式(1-2)可以写为:

$$\sigma = \left[\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m + 1 \right] \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m \right] \left[E_0 \epsilon + \dot{\epsilon} \eta \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta}} \right) \right] \quad (1-3)$$

考虑到冲击作用的瞬时特征,郑永来将该模型进行了推广,构建了广义岩石动态损伤本构模型,如图 1-3 所示。该模型强调了流体元件损伤的无效性,即损伤与流体元件无关,参数较少,容易确定,他通过花岗岩与大理岩的试验验证该模型可以有效地描述岩石的动态损伤破坏特征。

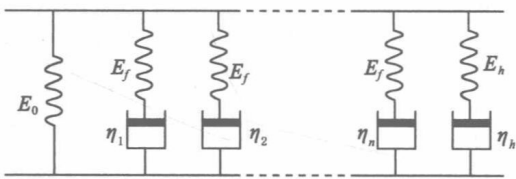


图 1-3 推广的黏弹性连续损伤本构模型

用黏性元件来描述应变率效应对于岩石动态本构模型的研究具有重要价值。单仁亮 等^[73]根据花岗岩及大理岩在高应变率下的变形及本构特征,提出了统计损伤时效模型,如图 1-4 所示,该模型假设岩石单元同时具有统计损伤特性和黏性液体特性,流体元件没有损伤特性,损伤符合韦伯分布。其本构方程为:

$$\sigma = E \epsilon \exp \left(- \frac{\epsilon^m}{\alpha} \right) + \eta \dot{\epsilon} \quad (1-4)$$

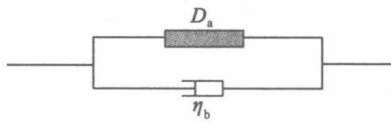


图 1-4 统计损伤时效模型

从图 1-5 所示的本构方程拟合曲线与实测曲线比较可以看出,统计损伤时效模型能够较好地描述岩石的应力—应变特征。

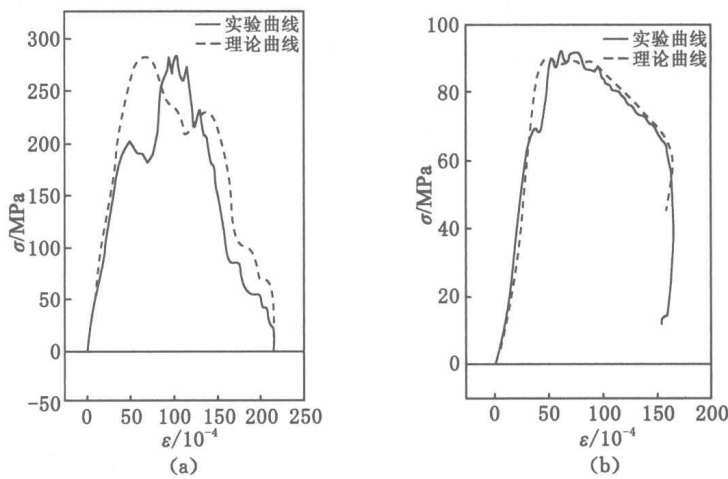


图 1-5 理论曲线与实验曲线对比
(a) 花岗岩;(b) 大理岩

尹士兵^[74]对岩石动态损伤本构模型的建立方法进行了总结,认为当前岩石动态损伤本构模型的建立主要依据以下四种方法:

① 经验和半经验法。在试验规律与理论分析的基础上,建立岩石材料动态本构关系的公式。由于岩石性质的复杂性以及动态载荷持续时间较短,实际测试的岩石动态应力—应变曲线的形态多种多样,因此,公认的经验、半经验模型较少。

② 机械模型法。单轴动应力下岩石材料的性质类似于弹性元件和黏性元件按一定规则构成的模型所具有的性质,所以可以根据这样的模型来描述受动载荷作用的岩石材料,建立岩石材料受动载荷的微分型本构方程,其系数由实验确定。有代表性的应属过应力模型。这种模型虽能反映岩石变形的应变率效应,但对强度的应变率效应无法解释,至于峰值应力后的应力—应变关系更是无法体现。

③ 损伤模型法。损伤模型法基于连续损伤力学方法的唯象学模型,采用矢量、标量或张量的方法定义损伤变量,然后通过损伤变量建立材料的宏观本构模型。损伤模型法包括唯象学法和细观力学方法。唯象学方法建立的模型能反映全程应力—应变曲线变化特征,但岩石变形的应变率效应无法体现,此外,究竟用多少参数来描述一点的损伤状态仍然没有解决,且如何确定损伤参数的演化规律还存在很大问题。细观力学方法是利用损伤断裂力学、细观力学、分形等相关理论方法描述微裂纹的成核、扩展和汇合,并通过微裂纹的成核、扩展和汇合反映材料宏观力学性能的变化。

④ 组合模型方法。根据岩石的变形特性,将上述方法进行组合,从而达到描述岩石变形规律的目的。该方法能较真实地反映岩石的变形特性,所以应用较多。

1.2.2 温度对岩石力学特性的影响

温度是影响岩石物理力学性质的重要环境因素,也是岩土工程建设中必须考虑的环境因素,因此,明确温度作用下岩石基本的物理力学性质具有实际的意义。

(1) 温度对岩石物理性质的影响

物理性质是岩石的基本性质,也是人们进行资源开发以及地下岩层确定的基础。从 20 世纪 40 年代开始,温度作用对岩石物理性质的影响的研究就已经开展。

① 温度对岩石电阻率的影响

高温高压下电性测量技术是人们获得地球内部物质组成、物质运动变化状态以及地球物理测量的重要手段。金耀等^[75]对高温焙烧后的含水辉长岩进行了电阻率测量,给出了电阻率变化与体积应变之间的关系表达式。柳江琳等^[76-77]在高温(563~1 173 K)、高压(1.0~2.5 GPa)条件下,对花岗岩、玄武岩和橄榄岩三种岩石进行了电导率测试,研究结果表明,随着温度的升高,岩石的电导率增大,在其研究结果的基础上,白武明等^[78]通过试验验证了电导率迅速增大是由于岩石内部熔融结构造成的。

② 温度对岩石弹性波速的影响

大量研究结果^[79-83]表明:岩石纵波波速随着温度的升高不断降低。刘巍^[84]对温度作用下斜长角闪岩、橄榄岩及辉石岩的纵向波速进行了测试,结果表明:随着温度的升高,三种岩石的弹性波速逐渐降低,但三种岩石纵向波速随温度的变化规律存在差别。橄榄岩和辉石岩纵向波速随温度呈直线变化特征;斜长角闪岩和闪长岩纵向波速在 800 °C 后下降速度逐渐增大。

白武明等^[78]对岩石弹性波速随温度变化的原因进行了试验探究,通过对高温高压下花岗岩、玄武岩和橄榄岩纵向波速的测定,认为导致岩石弹性波速下降的原因是由于温度作用导致岩石内部产生了熔融结构。

除了内部结构会影响岩石的弹性波速之外,内部组分的变化是岩石弹性波速变化的重要原因。张友南等^[85]在 800~1 100 °C、700~800 MPa 条件下对角闪石进行了纵向波速测定(图 1-6),研究结果表明:由于温度的作用,岩石内部组分固液状态发生变化,随着温度的升高,水分蒸发导致岩石内部液相组分增大,从而降低了岩石弹性波速。

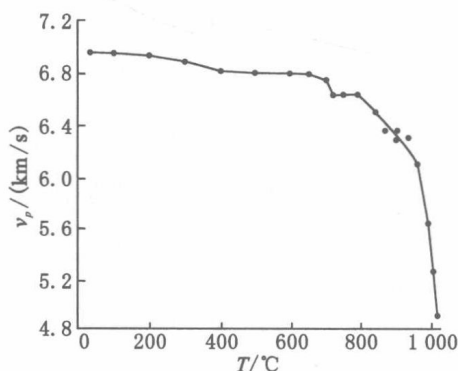


图 1-6 角闪岩波速随温度变化的曲线(压力为 700 MPa)

③ 温度对岩石热传导特性的影响

高温状态下,岩石会表现出一定的热破裂性质,而这种热破裂性质会使导热系数、比热容、导温系数等物理参数发生变化。

岩石热导率随温度的变化特征研究历史较长。早在 1940 年,Birch 与 Clark 利用试验手段分析了 0~600 °C 之间岩石热导率 K_T [单位: $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 与温度 T 之间的关系^[86],并

给出了具体的表达式：

$$K_T = 0.418 \left(\frac{600}{300 + T} + 4 \right) \quad (1-5)$$

另外，苏联科学家通过试验手段，给出了各类岩石热导率与温度的关系，并给出了具体的表达式，沉积岩类（砂岩、石灰岩、黏土岩等）为：

$$K_T = K_0 - (K_0 - 1.38) \left[\exp \left(0.725 \frac{T - 193.15}{T + 403.15} \right) - 1 \right] \quad 20 \leq T \leq 300 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-6)$$

火成岩类（花岗岩、玄武岩、闪长岩等）为：

$$K_T = K_0 - (K_0 - 12.01) \left[\exp \left(\frac{T - 293.15}{T + 403.15} \right) - 1 \right] \quad 20 \leq T \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-7)$$

热膨胀系数和热导率是岩石热物理性质表现的重要参量。早在 1982 年，R. S. C. Wai 通过对石灰岩和片麻岩状的花岗岩升温与降温过程中热膨胀系数和热导率的测定，得到了两个参数与温度的变化关系。

石灰岩的热膨胀系数：

$$\alpha_T = \left(4 + \frac{T}{60} \right) \times 10^{-6} \quad 0 \leq T \leq 180 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-8)$$

石灰岩的热导率：

$$K_T = 1.2 \left(1 - \frac{T}{360} \right) \times 10^{-6} \quad 0 \leq T \leq 180 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-9)$$

片麻岩状的花岗岩的热膨胀系数：

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

片麻岩状的花岗岩的热导率：

$$K_T = 1.6 \times \left(1 - \frac{T}{360} \right) \times 10^{-6} \quad 0 \leq T \leq 180 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-11)$$

(2) 温度对岩石力学性质的影响

研究表明，温度对岩石力学性质会产生显著的影响。与常温下相比，加热导致岩石内部组分及微观结构产生变化，在力学性质上表现为各个力学性能参数发生变化，包括弹性模量、峰值应力、泊松比等。当前，地下资源开发利用、地下空间工程建筑灾后重建以及高放射性核废料地下贮存等工程逐渐增加，明确温度对岩石力学性质的影响，能够为实际工程提供重要的指导。自 20 世纪 70 年代以来，高温下岩石力学特性的研究出现了大量的研究成果，岩石力学特性及破坏规律随温度的变化规律已基本明确^[87-110]。

徐小荷对各类岩石在 20~600 °C 温度范围内的弹性模量进行了测试，研究结果表明：随着温度的升高，岩石的弹性模量逐渐降低，但是不同岩石降低的规律不同，如图 1-7 所示。与其研究结果相似，Lau et al.^[111] 对不同温度下花岗岩基本力学参数进行了测定，明确了弹性模量、抗压强度以及泊松比等随温度的变化规律。Alm et al.^[112] 通过试验手段明确了花岗岩在不同温度作用后的力学特性，在此基础上分析了岩石微破裂随温度的变化过程。

温度对岩石断裂特性的影响是当前岩石力学研究的热点。张静华等^[113-114] 利用试验手段分析了花岗岩临界应力强度因子 K_{IC} 随温度的变化规律。Al-Shayea et al.^[115] 利用声发射技术系统地研究了 Westerly 花岗岩加热过程中的损伤特性，并且通过劈裂试验测量了 20~50 °C 的断裂韧性，其表达式为：

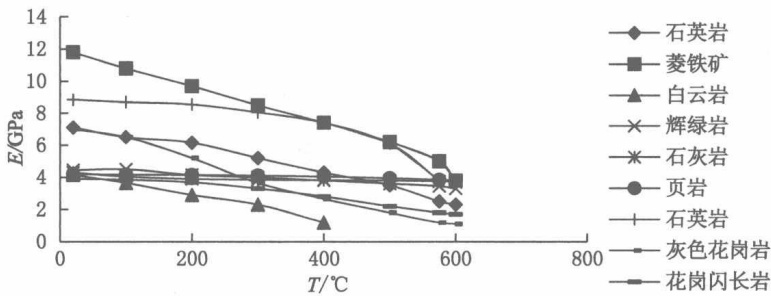


图 1-7 弹性模量 E 随温度 T 的变化曲线

$$K_{IC} = \frac{p\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}RB}N_1, K_{IIc} = \frac{p\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}RB}N_2 \quad (1-12)$$

式中, K_{IC} 、 K_{IIc} 分别表示 I 型裂纹和 II 型裂纹的应力强度因子; p 表示圆盘两端的压缩载荷; B 表示圆盘的厚度; R 表示圆盘的直径; a 为裂纹半长; N_1 、 N_2 分别表示 I 型裂纹和 II 型裂纹参数, 与圆盘的开槽方向和加载角度有关。

寇绍全等^[116]对高温后花岗岩进行加载试验, 获得了温度作用后花岗岩热破裂的基本力学特性参数。

温度作用下岩石力学特性的变化主要是由于温度对岩石内部结构产生影响所致。Brede et al.^[117-118]通过对岩石韧性随温度的转化测定, 认为高温下岩石力学特征发生变化的原因主要是由于温度导致岩石内部裂纹尖端产生了位错, 从而导致裂纹进一步发育。Oda et al.^[119]通过对温度作用下岩石力学性质的变化规律, 确定了岩石的破裂机理。桑祖南等^[120]对各个温度区间中辉长岩的脆—塑性转化规律进行分析, 研究结果表明: 600 °C 左右, 辉长岩主要以脆性破坏为主; 700~850 °C 则主要以半脆性破坏为主; 900 °C 以上, 则会产生显著的塑性变形。另外, 研究结果指出, 辉长岩的力学特性除了与温度有关之外, 还与加载速率、围压等因素有关。

近年来, 我国学者对温度作用下岩石力学性质的研究取得了大量的成果。许锡昌等^[121-122]对花岗岩开展了 20~600 °C 下的力学特性试验测试, 研究结果表明, 花岗岩弹性模量的门槛温度为 75 °C, 单轴抗压强度的门槛温度为 200 °C。图 1-8、图 1-9 表现了花岗岩弹性模量 E 及抗压强度 σ_c 随温度 T 的变化规律曲线。另外, 在他们的研究成果中, 对花岗岩泊松比随温度的变化曲线也进行了定性的分析, 这对岩石力学特性的温度效应研究具有重要的价值。

杜守继等^[123]对不同温度加热后花岗岩的力学特性进行了试验研究, 综合分析了花岗岩应力—应变曲线以及峰值应力、峰值应变等力学特性参数随温度的变化规律。王颖轶等^[124-125]利用液压伺服力学试验系统, 对常温到 800 °C 下大理岩的应力—应变全过程特性进行了分析, 分析了温度对大理岩力学特性的影响。朱合华等^[126]在前人研究的基础上, 对高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学性质进行了分析, 着重比较了三种岩石力学特性随温度的变化规律。

吴忠等^[127]对煤层底板砂岩进行了实时高温与高温加热后岩石力学特性的试验测定, 研究结果表明: 高温下砂岩的峰值应力、弹性模量、变形模量等力学参数随着温度的升高而

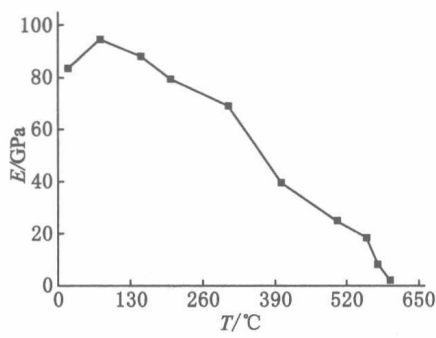


图 1-8 弹性模量随温度的变化曲线

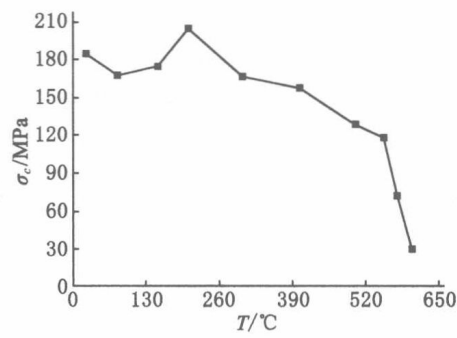


图 1-9 单轴抗压强度随温度的变化曲线

降低;高温后砂岩力学参数随温度的升高有一定的强化;两种温度条件下砂岩破坏形式都为脆性破坏。这些研究成果为当前煤炭地下气化中高温作用下燃空区的围岩应力场和位移场的变化规律提供试验依据。

张连英 等^[128-132]利用 MTS 试验系统,对高温作用下的大理岩、石灰岩、砂岩的力学特性进行了研究。通过对三种岩石的应力—应变曲线、力学特性参数的分析,得到了以下结论:① 大理岩的峰值强度、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 石灰岩的峰值强度、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;温度大于 600 °C 后,呈现出急剧下降现象。③ 砂岩在常温至 200 °C 内,峰值强度呈下降趋势,弹性模量变化不大;在 200~600 °C 内,峰值强度呈上升趋势,弹性模量变化不大;温度大于 600 °C 后,峰值强度、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,温度大于 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,温度继续升高,峰值应变迅速增长。

宏观断裂特性也是岩石力学特性的重要内容,主要集中在断裂机理和韧度测试等方面^[133-143]。研究表明,高温高压作用下,岩石断裂主要为解理脆断和蠕变断裂两类。

1.2.3 温度作用下岩石损伤及断裂机理

(1) 岩石热损伤理论

岩石内部含有丰富的微裂纹、孔隙等缺陷,在温度、载荷等外界因素的作用下,缺陷进一步发育,导致岩石力学特性方面产生变化。明确岩石微观损伤特性是研究岩石力学特性、断裂特性的基础,也是岩石损伤力学研究的主要内容。近年来,随着岩石力学工程的增多,损伤力学在实际工程研究中的作用也越来越大。在工程基础上,以宏观、细观、微观等多尺度共同构成的现代破坏力学逐渐成为固体力学的重要研究分支。进入新世纪,岩石损伤力学的研究逐渐与断裂力学、细观力学等进行结合,为揭示外界载荷作用下岩石损伤破坏特性提供了理论基础^[144-160],其中主要以岩石的热损伤为研究切入点。

刘泉声 等^[161]是国内较早研究岩石热损伤力学特性的学者,通过高温作用下三峡花岗岩单轴压缩以及三轴蠕变试验,揭示了花岗岩力学特性与温度、时间的关系,建立了损伤本构关系:

$$\frac{\eta_v \dot{\sigma}}{E_v} + \sigma = \frac{E_e + E_v}{E_v} \eta_v \dot{\epsilon} + E_e \epsilon_v - E_e \alpha_e \Theta - \frac{E_e \alpha_e + E_v \alpha_v}{E_v} \eta_v \dot{\Theta} \tag{1-13}$$