

Gaowen Gaoya Tiaojianxia Chongji-Qiexiao

Zuankong Poyan Shiyan Yanjiu

中国矿业大学图书馆藏书



C01710385

高压条件下 冲击一切削 钻孔破岩实验研究

赵金昌 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

TD231
Z-414

高温高压条件下冲击一切削 钻孔破岩实验研究

赵金昌 著



中国矿业大学图书馆藏书



C01710385

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书通过对高温高压条件下大尺寸花岗岩试件的破碎规律进行实验研究和理论分析得出三种破岩方式的破岩效果随温度变化的趋势,总结出高温下钻进速度、破岩能耗与钻进参数的关系,给出了不同温度下的最佳破岩方式。对高温岩石钻进中的井壁稳定机理进行分析,得出钻进中井壁失稳的条件。对高温钻井液的特性及配制也做了初步研究。

本书可作为采矿工程、地下工程等相关专业本科生、研究生的参考书,也可供现场相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温高压条件下冲击一切削钻孔破岩实验研究/赵金昌著. —徐州:中国矿业大学出版社,2012.3
ISBN 978 - 7 - 5646 - 1419 - 5

I. ①高… II. ①赵… III. ①破碎岩体—实验—研究
IV. ①TD231-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 043808 号

书 名 高温高压条件下冲击一切削钻孔破岩实验研究

著 者 赵金昌

责任编辑 王美柱

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 850×1168 1/32 印张 5 字数 130 千字

版次印次 2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

地热开发被越来越多的国家关注并采取实质性的开发行动。中国有极丰富的高温岩体地热资源,它的开发利用对改善我国能源结构,保证我国能源安全具有重大战略意义。高温岩体地热主要蕴藏在花岗岩体中,从其中提取地热能,需要在花岗岩中施工钻孔,进行以水压致裂技术为主的人工储留层建造。钻孔施工的机械方式主要有三种:冲击破岩、切削破岩、冲击—切削复合破岩。在常温下,冲击破岩一般用于钻进坚硬岩石;切削破岩一般用于钻进较软的岩层。

对钻井工程而言,提高破岩效率的实质是提高机械钻速,而影响机械钻速的首要因素是地层岩石性质。地热钻井中随着钻井深度的增加,岩石温度逐渐升高,岩石内部发生热破裂,导致岩石的性质发生变化——强度降低、塑性增强等。研究高温高压条件下以上几种破岩方式的破岩效率随着温度升高如何变化及在不同的温度下哪种破岩方式能取得更佳效果具有重要的工程意义。

在高温岩体地热开发钻井施工中,钻孔围岩的稳定性受到温度应力、钻井液特性和原岩应力等多种因素的影响。钻井围岩在温度场、渗流场、应力场的多场耦合作用下,在钻井施工中会发生缩颈、变形失稳、井壁坍塌等事故,致使钻井费用及井壁维护费用大幅度增加,工程计划难以实现。

本书通过对高温高压条件下(4 000 m埋深、500℃以内)大尺寸($\phi 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$)花岗岩试件的破碎规律进行实验研究和理论分析得出三种破岩方式的破岩效果随温度变化的趋势,总结出高温下钻进速度、破岩能耗与钻进参数的关系,给出了不同温度

下的最佳破岩方式。对高温岩石钻进中的井壁稳定机理进行分析,得出钻进中井壁失稳的条件。钻井液的密度和滤失性对井壁稳定具有重要影响。本书对高温钻井液的特性及配制也做了初步研究。

本书不仅反映了作者在高温高压岩石性质方面的研究成果,同时也揭示了高温岩石的破碎规律。全书在注重内容和结构体系的同时,还意在探讨高温高压条件下钻井的最佳方法与途径。

本书可作为普通高等院校地热研究方向的教学用书,也可作为相关工程技术人员的技术参考书。

笔者对提供帮助和书中引用材料所涉及的个人和组织表示感谢。

限于水平和经验,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

2011 年 11 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 高温下岩石的热物理和力学特性研究综述	4
第三节 钻井围岩系统稳定性研究现状	22
第二章 高温高压下花岗岩冲击破碎实验研究	29
第一节 引言	29
第二节 冲击凿岩波动理论基础	32
第三节 压头侵入规律和凿岩速度的影响因素	39
第四节 高温高压下冲击一切削钻孔破岩实验系统	42
第五节 高温高压下冲击破岩实验方法	50
第六节 高温高压下冲击凿岩规律	56
第七节 本章小结	69
第三章 高温高压下花岗岩切削破碎实验研究	70
第一节 引言	70
第二节 切削理论和切削参数分析	72
第三节 三轴应力下不同温度时的切削破岩实验	75
第四节 切削速度随温度、钻压、转速的变化关系	79
第五节 单位破岩能耗与温度、钻压、转速的关系	88
第六节 切削扭矩分析及不同温度切削效率比较	90
第七节 本章小结	93

第四章 高温高压下冲击一切削复合破岩实验研究	95
第一节 引言	95
第二节 冲击一切削复合破岩理论及钻进参数的影响	97
第三节 高温高压下冲击一切削复合破岩实验	100
第四节 钻进速度与温度和冲击一切削参数的关系	103
第五节 不同温度下三种破岩方式比较	111
第六节 本章小结	118
第五章 钻进中钻孔围岩稳定性研究	119
第一节 引言	119
第二节 钻孔围岩变形破坏机理研究	121
第三节 高温钻井液初步研究	135
第四节 本章小结	148
参考文献	149

第一章 绪 论

第一节 引 言

随着全球进入绿色经济时代,可持续发展成了世界人民的共同追求,低碳经济也成为热门话题。在这种国际大环境下,地热能受到全世界的广泛关注。很多发达国家推出了“绿色新政”,积极发展绿色经济,走低碳道路,来应对全球变暖和克服金融危机。以变革为口号的美国现任总统奥巴马推出了自己的“能源新政”。美国众议院通过了《清洁能源安全法案》,法案要求到2020年美国电力生产中至少12%为太阳能、风能、地热等清洁能源。最近,日本政府发布了发展可再生能源的新目标,同时出台了新的补贴措施。新目标规定,到2020年日本全国发电能力要提高一倍。增加的发电量中,大部分来自生物质发电、小水电和地热发电。到2030年,日本全国发电能力将提高至少3倍,而地热发电量届时要增加3倍。另外,新政策还提出加大推广家庭太阳能发电和地热发电计划,提高对这两项计划的财政补贴。

地热开发被越来越多的国家关注并采取实质性的行动。该行动会给我们生存的这个世界带来益处也是不争的事实。中国最近公布的数字就是一个有力的证明:2008年地热资源利用使全国减排二氧化碳2500万t。地热是生产热、电能的重要可再生能源,是目前位列水力、生物质能之后的世界第三大可再生能源。

中国有极丰富的高温岩体地热资源。根据板块构造理论,中

国西南部受印度洋板块的挤压作用,东南部受菲律宾板块的挤压作用,东部受太平洋板块的挤压作用,地质活动强烈。这些地区有很高的地热梯度,典型代表如西藏羊八井地区、云南腾冲地区、海南琼北地区、台湾及东南沿海地区、长白山天池等地有极丰富的高温岩体地热资源,具有很优越的地热开发条件。

高温岩体地热(hot dry rock, HDR)是指温度在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的岩体中蕴藏的地热能资源,可以经过人工开采从岩体中直接提取出过热水蒸气而直接用于发电和热水利用,是可再生的“绿色能源”。我国有丰富的高温岩体地热资源,预计仅云南腾冲和西藏羊八井两地可开发的资源量就超过 $1.56 \times 10^{11} \text{ kW} \cdot \text{a}$, 它的开发利用对改善我国能源结构、保证我国能源安全具有重大战略意义。高温岩体地热资源开发的设想,最早由美国人 Morton Smith 领导的洛斯阿拉莫斯国家实验室的科学家小组于 1970 年提出,基本思路为:将一个钻孔钻入高温岩体,然后形成裂缝,再将第二个钻孔钻入裂缝,进而从一孔注水,经过裂隙加热,从另一个钻孔排出,用于发电或热水利用。1973 年以美国为主进行开发研究,投资 1 500 万美元,在美国 Fenton Hill 地区建立了一座装机容量 10 MW 的高温岩体地热电站;1986 年日本在肘折地区建设高温岩体地热开发井,到 1996 年已在多处建成高温岩体地热发电站,装机容量 50 万 kW;现英国和德国准备钻 12 000 m 深的钻井,进行高温岩体地热开发试验。与此同时,许多国家围绕着高温岩体地热开发的工业试验进行了大量而广泛的相关科学研究。

地球的半径约为 6 371 km,地球内圈层由地壳、地幔和地核构成,其深度分别为 $0 \sim 33 \text{ km}$, $33 \sim 2\,885 \text{ km}$, $2\,885 \sim 6\,371 \text{ km}$ 。地球内部温度随深度的加大而升高,但升幅有变小的趋势。地壳表层的温度为 $0 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 距离地壳表层 1 km, 2 km, 3 km 处的温度分别为 $40 \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $65 \sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $90 \sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地壳下层的温度为 $500 \sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$; 地幔的温度为 $1\,200 \sim 3\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 地核的温度为 $3\,700 \sim 6\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

高温岩体地热主要蕴藏在花岗岩体中,从其中提取地热能,需要在花岗岩中施工钻孔,进行以水压致裂技术为主的人工储留层建造以及进行储留层的破裂监测。在岩石中施工钻孔是地热开发的重要手段,在构造地热、自然梯度增温地热等领域得到了广泛应用。目前,地热井的钻进钻头主要使用牙轮钻头,为提高机械钻速,在砂岩或者泥页岩中或使用 PDC 钻头,水射流辅助破岩也能取得提高钻速的效果。

对钻井而言,破岩效率的实质是提高机械钻速,而影响机械钻速的因素很多,主要有地层岩石性质、钻井机械参数和水力参数 3 种。普通温度和压力下的破岩理论与技术已基本成熟,但随着钻探深度的增加,地应力越来越大,岩石温度也会逐渐升高,在高温高压状态下,岩石的性质会发生很大变化,如强度降低、塑性增强等。在高温高压条件下,如何破碎岩石效率最高、钻速最快是广大学者共同关心的问题。

岩石的机械破碎方式主要有:冲击破岩、切削破岩、冲击一切削复合破岩。冲击破岩是利用钻头的冲击力来破碎岩石,凿岩机即是利用冲击破岩原理的凿岩器械。影响冲击破岩速度的因素很多,如岩石性质、钎头形状及直径、钻孔深度、冲击能、冲击频率、转钎速度、推进力、冲洗水压及水量等。从机械方面讲最主要的参数是冲击能、冲击频率、转钎速度和推进力。切削破碎岩石属于剪切破碎,PDC 切削齿靠钻压吃入地层,靠扭矩切削岩石。牙轮钻头是冲击一切削组合破岩,是冲击压碎型井下破岩工具。钻头的切削齿在钻压和扭矩的作用下轮番接触井底,产生动压力和冲击力进而破碎岩石。

井孔围岩系统在温度场—渗流场—应力场的耦合作用下稳定性变得复杂起来,既有热作用下岩体力学特性随着温度的变化,也有渗流场的影响,使得井孔围岩随着水和水蒸气的逐渐渗入产生热破裂,岩体力学性能降低,甚至井孔围岩在高温高压下

发生水化反应、水化膨胀。还有,在钻进过程中,钻井液液柱的压力代替被钻掉的岩石所提供的原始应力,井孔周围的应力重新分配,当某一方向的应力超过热一流一固耦合作用下岩石的强度极限就会引起井壁剥落或坍塌。所以,在热一力耦合作用或热一流一固多场耦合作用下,井孔围岩系统无论在钻进过程或裸井阶段,还是投入运行中都很容易造成失稳(缩颈、塌孔、卡钻等)而影响正常使用。

在地热的钻探过程中,钻井液是必不可少的,是影响钻井成败的关键因素之一。钻井液的作用主要是携带和悬浮岩屑、稳定井壁和平衡地层压力、冷却和润滑钻头及传递水动力。相对常规井而言,地热钻井对所用的钻井液要求更高,深井钻井液除要能保持井眼的稳定性和有效携带岩屑外,还必须具有良好的抗高温性能。随着钻探深度的增加,温度和压力的升高使钻井液的黏度、切力升高,触变性增强,流动性变差,滤失量增大,泥饼增厚。这时需要添加耐高温的添加剂才能有效地保持钻井液高温下的稳定性,所以高温钻井液的研制对地热井的钻探具有重要意义。

第二节 高温下岩石的热物理和力学特性研究综述

随着地球科学的发展和工程设施的深延,高温高压岩石力学已涉及越来越多的学科,并越来越受到重视。同时,处理高温高压环境下的岩石力学与工程问题也是对岩石力学新的挑战。在地热资源开发、深部采矿、煤炭地下直接液化与气化、煤层气开采、深部油气开采、高放射性核废料的深地层处置、石油及天然气的地下贮存、矿山安全、建筑安全等工程中,都需要考虑岩石在高温条件下的热物理和力学性质。

高温下岩石的力学特性主要涉及高温下岩石的变形与强度特

征及机制,如岩石在高温条件下的抗压强度、抗剪强度、抗拉强度及变形破坏形式等,力学参数如弹性模量、泊松比与温度的关系等。

高温条件岩石的热物理性质包括岩石的热膨胀系数、岩石的导热系数、岩石的比热容、岩石的热容量、岩石的热交换系数及高温岩石热破裂等。这些参数对岩体工程中温度场的形成、温度场的特征、热应力的计算以及热破坏等都是非常重要的,是高温岩体地热开发中相关数值模拟计算的基础参数,它们的准确程度直接影响数值模拟计算结果的可靠性。

一、高温下岩石的力学特性研究

20 世纪 70 年代以来,国内外学者在研究高温下岩石的力学特性实验方面取得了丰硕成果。O. Alm 等(1985)考察了花岗岩在经历不同温度热处理后的力学性质,并对花岗岩在温度作用下的微破裂过程进行了讨论;M. Oda 等(1993)研究了温度作用下岩石的基本力学性质,如弹性模量、泊松比、单轴抗压强度和断裂韧性及岩石的微破裂过程,得到了岩石的基本力学特性随温度的变化规律。国内学者朱合华、王靖涛、杜守继、许锡昌、赵阳升、万志军、邵保平等都对高温岩石或高温后岩石的力学特性做了详细的研究,发现了一些本质性的物理现象和规律,还取得了进一步研究所需的力学参数。

(1) 温度对岩石力学参数的影响

温度对岩石力学参数的影响主要表现在以下几个方面:温度对岩石弹性模量的影响;温度对泊松比的影响;温度对岩石抗压强度、抗拉强度和抗剪强度的影响等。在温度作用下,岩石的力学性质发生明显变化,如基本物理力学参数(包括变形模量、泊松比、抗拉强度、抗压强度、内聚力、内摩擦角等)。

朱合华等^[5]通过单轴压缩实验,对经历了不同高温后的熔结

凝灰岩、花岗岩和流纹状凝灰角砾岩的力学特性进行了研究,分析比较 3 种岩石的峰值应力、峰值应变和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。实验升温等级设为 20 °C、200 °C、400 °C、600 °C、800 °C 五级,升温速度为 30 °C/min。实验结果表明,高温后 3 种岩石的峰值应力、弹性模量均有不同幅度降低,且经历的温度越高,降低的幅度越大。对于峰值应变,熔结凝灰岩、花岗岩的峰值应变随温度的升高而大幅度增加,而流纹状凝灰角砾岩的峰值应变随温度升高而降低。此外,峰值应力与纵波波速、峰值应变与纵波波速依赖不同的岩石而表现出不同的规律。

杜守继等^[6]通过对 3 个孔共 25 块花岗岩试样在经历不同高温前后应用单轴压缩实验方法进行力学实验研究,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。研究表明,经历 400 °C 以内的高温后,温度对花岗岩力学性能的影响不明显,表现为花岗岩的径向应力—应变曲线变化规律基本类似,花岗岩强度和变形的变化均较小。但经历的温度超过 400 °C 后,随着受热温度升高,花岗岩力学性能迅速劣化,主要体现在花岗岩峰值应力(或强度)和弹性模量急剧降低,而峰值应变迅速增长。高温后花岗岩泊松比随经历高温的增加而呈减小趋势。

小岛隆等(1991)研究了热水环境下花岗岩的强度破坏,发现由于高温水的作用,岩石强度衰减十分显著,实验水温 200 °C,压力 10 MPa。

温度对不同岩石强度影响的程度和规律是不一样的。一般来说,花岗岩、石灰岩等结晶质岩石随加热温度升高其压缩强度明显下降;砂岩等非结晶岩石压缩强度随温度升高变化不大;而安山岩等岩石的强度随加热温度升高则有相当大的提高。

岩石加热后弹性模量的变化对计算岩石内部由于加热而产生

的热应力及热破坏具有重要作用。一般来说,安山岩、花岗岩、石英粗面岩等的弹性模量 E 在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下随温度升高而急剧减小,但超过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,弹性模量几乎保持一定值。而凝灰岩和陶石等岩石随温度升高,弹性模量变化不大。

化学成分相同的岩石,弹性模量受温度的影响是相近的。 SiO_2 类岩石,弹性模量随温度增加而逐渐减小,如温度由 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,弹性模量减小 $20\%\sim 30\%$;无水碳酸盐类岩石,在温度小于 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,弹性模量基本上是个常数。

由于温度在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时不容易测定泊松比,所以岩石泊松比的测定实例很少。根据对花岗岩和安山岩的测定结果,随着温度上升,花岗岩的泊松比呈大幅下降的趋势,而安山岩的似乎变化不大。

许锡昌等^[7]对花岗岩在 $20\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 单轴压缩下主要力学参数随温度的变化规律进行了研究,得出不同温度下花岗岩的泊松比,认为泊松比随温度的升高呈增大趋势。通过研究还发现 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别是花岗岩弹性模量和单轴抗压强度的门槛温度。

(2) 不同温度下岩石的应力—应变关系

高温高压条件下,岩石变形的 $\sigma-\epsilon$ 曲线形式与常温常压条件下的 $\sigma-\epsilon$ 曲线形式有明显的不同,在达到强度极限前非弹性变形增加很快,反映其抗变形能力迅速下降,达到强度极限后,曲线呈屈服流动性。

黄炳香等选择甘肃北山花岗岩为研究对象,利用改进的三点弯曲实验研究了常温、 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 应力—应变关系曲线。认为花岗岩试件在温度影响下应力—应变曲线可分为微裂缝压密闭合、线弹性变形、裂纹稳定扩展的非线性变形、裂纹非稳定扩展 4 个阶段,并由于热应力作用的影响曲线的直线段随温度升高而变短,在最后阶段出现短时间流变即发生破裂。

万志军等^[8]对煤、砂岩在三轴应力下 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的应力—应变关

系进行了研究,认为煤和砂岩达到强度极限后曲线呈屈服流动型。

(3) 高温高压下岩石的变形与破坏特征

温度升高导致岩石和流体介质活化,促使岩石变形破坏机制发生变化,使其易于塑性流动。在高温环境下,岩石变形的时间效应问题更加突出,作用时间的延长为岩石介质的活化提供了条件,促进了岩石由脆性向延性的过渡。因此,在高温环境下,岩石的力学行为会发生相应的变化,即变形的弹性—黏塑性转变,破坏的脆性—延性转变。

岩石变形基本过程和规律的研究涉及的面很广,其中与地球介质的构造变形直接有关的则主要包括四个方面,即岩石的破裂、摩擦、流变和力学失稳。它们往往相互联系、同时并存,并在不同的温度、围压和应变率等条件下表现出不同的主、次关系,导致岩石脆性—延性转变和突发失稳—渐进失稳转变等复杂多变的变形行为。脆性和延性之间存在一些过度类型——半脆性,进一步则区分为半脆性和半延性。失稳形式可以分为低压突发失稳、中压渐进失稳和高压突发失稳,随着压力的增大,岩石的失稳形式由低压突发失稳→中压渐进失稳→高压突发失稳转变。

岩石在室温条件下一般呈脆性破坏方式,随着温度和压力增大,岩石的破坏形式逐渐由脆性(破裂)、半脆性向半延性和延性(屈服、流动)转变。影响岩石的脆性—延性转变的基本因素是塑性成分或流动性的改变,其他因素如岩石的矿物成分、温度、压力、应变等也是通过改变塑性成分而起作用的。

王靖涛等^[9]认为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 T_c 。就湖北随县花岗岩而言,门槛温度 $T_c = 200^\circ\text{C}$ 。温度在 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内,花岗岩断裂韧度随温度升高而增大,发生平面应变温度转变;高于 200°C 后,断裂韧度迅速单调减小。在门槛温度上下,花岗岩宏观断裂韧性的质的变化表现为微观断裂形貌由主要为解理断裂向晶间断裂为主的转变和二次

裂纹的出现,但两者均属脆性断裂。热裂化是岩石宏观断裂韧度在高温下发生急剧下降的根本原因。

赵阳升等对高温下花岗岩体的变形及破坏特征进行实验研究,认为三维静水压力下,花岗岩的热变形可以分为3个阶段:常温至120℃的低温缓慢变形段,120~450℃的中高温快速变形段,450℃以上的高温平缓变形段。花岗岩体在高温下的破坏形式是典型的剪切破坏,与常温下的破坏形式一致;但在有围压条件下,花岗岩体在高温时向延性转化。

二、高温下岩石的热物理性质研究

岩石的热物理性质包括岩石的线膨胀系数、岩石的热导率、岩石的比热容、岩石的导热系数和岩石的热交换系数等。高温下岩石的热参数并不是恒定的,不仅与温度有关,而且还受岩石的结构、组成及形成过程等诸多因素的影响。

(1) 温度对岩石线膨胀系数的影响

岩石线膨胀系数,是指岩石试件温度升高1℃时在长度方向引起的应变值。由于线膨胀系数影响岩体工程的热变形和热应力,关系到岩体工程的稳定与安全,因此,必须确定岩石的线性热膨胀系数。

万志军等^[10]对高温三轴应力条件下煤、砂岩和花岗岩的热膨胀系数进行了测定。实验结果表明,煤样的热膨胀系数在温度低于150℃时随温度的升高其值为正,且小幅度增大,温度超过150℃后,线性热膨胀系数随温度升高而减小,到200℃时,变成负值,煤样发生收缩,600℃以内煤样的线性热膨胀系数随温度升高而波动;砂岩的热膨胀系数在温度低于150℃时随温度的升高而迅速减小,温度达150℃时变成负值,岩样收缩,此后随温度升高迅速增大,岩样发生膨胀,当温度超过350℃后又随温度升高而剧烈减小,400℃以后基本不变;1 000 m埋深静水压力($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 25$ MPa)下花岗

岩的热膨胀系数较自由条件下的小近 20 倍,常温至 120 °C 的低温缓慢变形阶段,热膨胀系数较小,120~450 °C 的中高温快速变形段,热膨胀系数随温度升高呈非线性增加,450 °C 以上的高温平缓变形段,热膨胀系数随温度升高迅速衰减。

不同岩石线膨胀系数随温度变化的特征是不一样的。石灰岩的线膨胀系数变化平缓,随温度变化较小。砂岩、页岩、安山岩和花岗岩的线膨胀系数变化较大,而且一般有极大值,它们的极大值与室温下的值可相差 24~120 倍。

(2) 温度对岩石热导率(导热系数)的影响

岩石传递分子热运动的性质称为岩石的热导率,用 λ 表示,其物理意义为沿热传导方向单位厚度岩石两壁温差为 1 °C (或 1 K) 时,单位时间内所流过的热量。根据傅立叶定律,计算公式为

$$\lambda = \frac{QD}{F(T_2 - T_1)t}$$

式中 λ ——岩石的热导率, W/(m · K);

Q ——热量, J;

D ——岩样的厚度, m;

T_1, T_2 ——岩样两壁的温度, K;

t ——时间, s;

F ——截面积, m²。

因此,岩石的热导率在数值上等于当温度沿单位法线长度下降 1 K (或 1 K/m) 时单位时间内传过单位面积的热量,通常把岩石热导率的倒数称为岩石的热阻率 ξ , 即 $\xi = 1/\lambda$ 。

组成岩石的颗粒形状、颗粒含量、颗粒排列,岩石的层理、片理、断层等对岩石的导热性具有很大的影响,岩石的导热性具有各向异性,还受到岩石密度和温度的影响。

岩石的热导率与温度的关系较复杂,前苏联学者 P. П. 库塔斯和 B. B. 戈尔迪恩科研究表明,沉积岩和火成岩的热导率与温度