

陈卫昌, 王思敬, 傅焕然. 2018. 岩石内应力的基本特征及研究进展[J]. 工程地质学报, 26(1): 62-72. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.007
Chen Weichang, Wang Sijing, Fu Huanran. 2018. Study advance on basic characteristics and formation causes of rock inner stress [J]. Journal of Engineering Geology, 26(1): 62-72. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.007

岩石内应力的基本特征及研究进展*

陈卫昌^{①②} 王思敬^{①③} 傅焕然^{①②}

(^①中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

(^②中国科学院大学 北京 100049)

(^③清华大学, 土木水利学院 北京 100062)

摘要 关于岩石内应力在文献上已有较多的论述和讨论,多数专家均承认岩石中存在内应力,但是由于岩石内应力是在岩石自身建造及改造过程中形成的,岩石内应力的复杂性导致了其研究均停留在概念、假说或测量结果的讨论层面,岩石内应力的储存过程以及释放特性等许多问题尚未得到深入和完善的解答。本文通过总结已有的研究成果,分析了岩石内应力的储存过程及释放特性,并提出了岩石内应力问题的进一步研究目标和方向。通过讨论认为,岩石内应力的储存与岩石的物质结构状态密切相关,岩石的弹塑性特点是岩石内应力储存的必要条件,塑性变形是引起岩石内应力释放的一种可能的途径。进一步的研究方向应集中于岩石内应力的形成机理、释放特征及其在岩石工程中的应用上。

关键词 岩石内应力; 形成机理; 释放特征

中图分类号:P584 文献标识码:A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018.01.007

STUDY ADVANCE ON BASIC CHARACTERISTICS AND FORMATION CAUSES OF ROCK INNER STRESS

CHEN Weichang^{①②} WANG Sijing^{①③} FU Huanran^{①②}

(^①Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029)

(^②University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(^③School of Civil and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100062)

Abstract The history and current research status of the internal stress in the residual stress of rock are reviewed and important meanings of research on the internal stress are pointed out in this paper. The basic characteristics of internal stress in rock are analyzed and the formation cause and mechanism are concluded and discussed. Based on analysis, we conclude that the elastic and plastic characteristics and inhomogeneous plastic deformation are necessary condition for locking internal stress of rock, and external loads. Physical and chemical effects and thermodynamic functions are the direct power to store internal stresses. Determining principle and measurement techniques of internal stress in rock are analyzed and summarized respectively. We believe that the plastic deformation is the fundamental cause for releasing of internal stress. Besides, internal stress in rock may affect mechanical behavior, to which attention should be pay.

Key words Rock inner stress; Formation mechanism; Release characteristics

* 收稿日期: 2016-11-11; 收到修改稿日期: 2017-08-17.

基金项目: 科技支撑计划课题(2014BAK16B02), 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLG2016K001)资助.

第一作者简介: 陈卫昌(1989-), 男, 博士生, 研究方向为工程地质力学. Email: chenweichang1989@163.com

0 引言

对于岩石内应力的研究已有较多的论述(王思敬, 1984, 2009; 钱七虎等, 2004, 2013; 钱七虎, 2011)和假说(陈宗基, 1982; 陈宗基等, 1991)可以参考, 研究学者普遍认为岩石内应力是真实存在的, 并提出了一些概念, 如“冻结应力”、“封闭应力”、“自平衡封闭应力”、“岩石的记忆功能”等, 但是多数研究和讨论均停留在概念层面上, 或者仅限于测量结果(Handin, 1967, 1970; Friedman, 1970, 1976; Friedman et al., 1972)上。对岩石内应力的研究已有较多工作, 但是, 严格来讲, 岩石是非连续介质、非相容性的力学介质, 不同类型岩石的成岩过程也存在本质的差异, 以及经历多次地质构造和长期地质外营力的作用, 岩石内应力的形成过程显得更为复杂。因此, 对岩石内应力的形成过程、释放特征的研究仍不够清晰, 目前在岩石工程中尚未引起足够的重视。因此, 本文对岩石内应力存在的本质问题进行了梳理和分析, 提出岩石内应力进一步的研究方向和研究目标, 希望引起关注及重视。

对岩石内应力定义, 已经有了较多的论述。王思敬(1984)在《地下工程岩体稳定分析》中给出了岩石内应力的定义: 岩体在形成过程中经受着建造阶段和构造变形阶段形成它的原生应力状态, 但经过地表次生变化阶段, 由于风化、卸荷而部分释放, 但是仍有一部分保留在岩体中, 称为残余应力。同样重要地, 我们将残余应力分为 2 类: 一种是因为边界未完全解除而保存的应力, 另一种是岩石内部约束造成的内应力, 即岩石的非封闭应力和封闭应力(钱七虎等, 2013)。我们将第二种应力称其为岩石内应力。分析上述定义可以发现, 岩石内应力的定义要素有两个, 一是岩石不受任何外部荷载作用, 二是岩石内应力满足自平衡状态。目前, 岩石力学仅对边界未完全解除的残余应力研究较多, 而对岩石内部约束造成的内应力重视不够。

在金属材料 and 玻璃制造研究范畴, 由于温度场的不均匀作用或者冲压成型过程中会产生不均匀塑性变形, 造成应力储存在玻璃内部(米谷茂, 1983)。类似地, 具有复杂应力历史的岩石, 在其成岩过程、后期构造变形运动等地球内外动力作用下也会产生赋存于岩石内部而尚未释放的应力。作者在学习过程中认识到, 岩石在形成过程中, 不均匀冷却作用、高温高压变质作用及沉积成岩作用会使岩石在矿物

组成和结构构造上产生各向异性, 在内外地质动力的作用下, 岩石中产生的不均匀塑性变形, 与弹性变形不能协调同步, 因此, 极有可能在岩石内部会产生不能释放的弹性应变。岩石形成后在漫长的后期改造过程中及人类的工程活动会产生岩石扰动, 也可能产生不能释放的弹性应变。究其根本原因, 一方面, 岩石类材料是一种非均匀介质, 组成岩石的微观颗粒在力学性质及热传导性能方面都存在有差异, 在压力和温度变化的作用下, 会产生局部的塑性变形(韩贝传, 1998); 另一方面, 岩石是一个复杂的力学体系, 由于岩石组成成分、结构及其赋存的地质环境不同, 其应力传递和力学作用差异很大(孙广仲等, 2011)。由于塑性变形导致弹性应变不能完全释放, 造成部分应力被封闭其中, 称为“封闭应力”, 是残余应力的一种(陈宗基, 1982)。

自陈宗基(1982)提出岩石“封闭应力”的概念后, 韩贝传(1998)对岩石残余应力的形成机理和确定方法做了初步探讨, 钱七虎等(2004, 2013)和王思敬(2009)分别对岩石内应力作了肯定性的讨论和描述。值得注意的是, 徐嘉谟等(2006)通过光弹性材料模拟了成岩地质体的初始应变能, 储存初始应变能的光弹材料, 在卸荷作用下伴随着内应力的释放产生回弹现象。这为测定岩石的成岩压力提供了可能(徐嘉谟等, 1998)。总结发现, 尽管对岩石内应力的研究是重要的, 也是具有重要的工程意义的, 但是目前关于岩石内应力的系统的研究工作, 尤其是量化的研究还尚未发现。直到最近, 在研究岩体非协调变形时, 钱七虎等(2013)重申了岩石自平衡应力的重要性, 并认为岩石内的自平衡应力是非协调变形引起的。在此基础上, 岳中琦(2014)提出了岩石内的流体包裹体是内应力和内应变能的具体存在和作用方式, 并给出了流体包裹体的计算公式和算例, 这对岩石内应力的量化研究是极大的推进。

在以往的地应力测试中, 都没有考虑岩石内应力的影响, 这很可能是地应力测定结果可靠性较差的原因(吕爱钟等, 2004); 在力学特性上, 内应力的存在往往导致岩石在循环加卸载过程中的负变形效应(刘雄, 1994); 在岩石力学与工程、采矿工程及开挖工程等过程中, 也常发现例如岩爆应变能释放(何满潮, 2011; 钱七虎, 2011)、软岩巷道应力松弛产生变形(方祖烈等, 1982)、基坑开挖底部的反常隆升(刘国斌等, 1996)以及滑坡蠕变期间的岩块松动等现象, 这些未能充分解释的现象可能都与岩

石内部应力的积累与释放有关。在承压板试验中,加载板在载荷增大的过程中向上运动的现象就是一个熟知的例子;开挖底部的反常隆升,其量值远大于重力影响的预计值,也是一个例子;岩石边坡在长期蠕变期间的岩块松动也是由岩石内应力的重新分布或部分释放造成的(陈宗基, 1982)。除此之外,陈宗基等(1991)进行花岗岩的一次加载与卸载循环,其蠕变和恢复曲线是正常的,但在第二次加载之后,材料就变得“不愿”变形,且卸载后的应变的恢复为负值;Price(1964)对Walsop泥质灰岩进行单轴加载试验后,发现样品的长度超过了原来的尺寸,并认为这是内应力的作用。同时,由于岩石内力的形成过程是具有复杂应力历史的,所以岩石内应力的存在对于鉴定岩石构造轨迹、分析地震活动(安欧等, 1991; 张欣等, 2017)、设计岩体工程是有重要意义和影响的。因此,岩石内力的产生和释放规律的研究需要得到足够的重视。

1 岩石内应力的基本特征

岩石内应力是存在于岩石内部并保持自平衡的一种机械应力,当外部作用打破这种自平衡状态时,岩石的力学行为会发生变化。岩石内应力在无边界荷载时存在于岩石内部的应力系统,在体内自平衡,是封闭应力系统。其中,由于岩石内部因素变化产生的内生应力系统为内应力系统,如玄武岩的冷却应力、岩石失水的干缩应力;而由于外部应力在岩石体内残留下来的为残余应力系统,如光弹性模型的冻结应力。这两种应力均满足两个条件:(1)岩石是无边界约束的;(2)应力在岩石内部保持自平衡状态。目前,主要的内应力测试手段为X射线衍射法。X射线衍射法测定应力的理论依据是布拉格定律,具体来讲,认为由应力状态引起的晶格应变和按弹性理论求出的宏观应变是一致的,而晶格应变可通过布拉格方程由X射线衍射技术测出,因此可以从测得的晶格应变来推算内应力,相关测试原理见后文。

1.1 可测量性

通过X射线衍射技术的方法,研究人员对砂岩、石英岩和花岗岩进行了内应力测试,测试结果(表1)。岩石试件中的应力值多大于同一测点用钻孔法测得的现今应力值,且应力值在地表均有垂直分量(安欧, 2000),而现今应力在地表的垂直分量

应近于零,这说明了在岩石中测到的机械应力是岩石本身赋存的应力,而不可能是现今应力的残余部分。表1的数据也表明,岩石内力广泛存在于沉积岩、岩浆岩和变质岩中,且最大主应力的量级在10 MPa左右,其中,石英岩和花岗岩中测定的内应力大多高于砂岩和石灰岩的应力,这说明,在不考虑构造运动对岩石内应力的扰动作用时,岩浆岩中储存的岩石内应力高于沉积岩和变质岩储存的内应力,且岩浆岩中的内应力更稳定,不易被扰动。另外,表1的测量数据表明,第3主应力多为负值(拉应力),而第1主应力一般都是正值(压应力),这可能与岩石成岩过程中受到较大上覆荷载有关。

1.2 与岩石物质结构状态的关系

岩石内应力最重要的基本特征是它与岩石的物质结构状态有关。组成地壳的岩体在成岩过程中和长期构造变形中,受多次的、长期的复杂地质构造应力作用,尚处于弹性变形阶段的高弹性矿物被周围塑性基质固结,构成了自平衡的应力系统。试验表明,岩石中的内应力不但岩石尚未脱离母体时存在,即使脱离了母体而成为孤立岩石也有部分应力残存于岩石中(陈宗基, 1982)。因而,岩石内应力是地质历史上才能形成的一种特殊表现。因此,表现内应力的行为需要具备特殊条件,即岩石的物质结构状态发生变化。徐嘉谟等(2006)采用光弹材料明胶固化模拟了成岩地质体的初始应变能状态,试验结果表明,液相转变为固相过程中,材料储存了部分应变能,固化后,材料体自身具有力学性能反映。当固相明胶从中间截断后,明胶柱体发生了明显的回弹现象(韩贝传等, 1991),即应力释放现象。这里的截断可以理解为试样的上覆荷载解除,固相明胶的整体密度发生了变化,即物质结构状态发生了变化。

Gallagher(1971)采用烯丙基二甘醇碳酸酯(CR-39)模拟砂岩颗粒,用CIBA环氧树脂模拟胶结材料,模拟了砂岩的固化过程。试验前先对颗粒进行施加压力,然后灌注环氧树脂进行胶结,待环氧树脂完全固化后,撤去外力。外力移除后,试样整体有部分回弹,但颗粒中未释放的应力与胶结作用,形成一个新的平衡体系(图1)。

20世纪70年代,以残余应力为基础建立的封闭应力壳理论(乔登江等, 2002),尝试解释了应力封闭现象,并为同行所接受。王海兵等(2013)模拟了在地下爆炸时,岩石中形成稳定应力封闭壳的动

表 1 岩石内应力测试结果(受拉为正,受压为负)

Table 1 Inner stress determined by X ray diffraction

岩性	试样位置	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	测试方法	参考出处
砂岩	宾夕法尼亚田斯利	11.0	-5.0	-14.0	X 射线衍射法	Friedman, 1976
	宾夕法尼亚田斯利	12.0	2.0	-12.0	X 射线衍射法	Friedman, 1976
	宾夕法尼亚田斯利	14.0	-6.0	-27.0	X 射线衍射法	Friedman, 1976
	宾夕法尼亚田斯利	13.0	-7.0	-17.0	X 射线衍射法	Friedman, 1972
	宾夕法尼亚田斯利	8.0	-1.0	-4.0	X 射线衍射法	Friedman, 1972
	宾夕法尼亚田斯利	11.0	-2.0	-9.0	X 射线衍射法	Friedman, 1972
	田纳西	0.0	-4.0	-8.0	X 射线衍射法	Friedman et al., 1970
	宾夕法尼亚韦伯	7.0	2.0	-6.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	宾夕法尼亚韦伯	6.0	-7.0	-10.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	宾夕法尼亚韦伯	11.0	-2.0	-7.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	宾夕法尼亚韦伯	10.5	-2.0	-10.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	宾夕法尼亚韦伯	6.0	-7.0	-6.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	宾夕法尼亚韦伯	7.0	2.0	10.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
石英岩	科可尼诺	11.0	-1.0	-12.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	方山	20.0	-3.0	-15.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	方山	20.0	3.0	-15.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	伊力特湖	11.0	0.0	-23.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	伊力特湖	10.0	-0.1	-23.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
花岗岩	奇路豪厄	20.0	15.0	3.0	X 射线衍射法	Handin, 1970
	尤尼塔山	22.0	3.0	-9.0	X 射线衍射法	Friedman et al., 1970
	迁西荆子峪	11.4	3.7	—	X 射线衍射法	安欧, 2011
	切姆斯佛	24.0	-1.0	-14.0	X 射线衍射法	Handin, 1967
石灰岩	切姆斯佛	24.0	-1.5	-13.0	X 射线衍射法	Handin, 1967
	巴雷	19.0	-1.0	-6.0	X 射线衍射法	Handin, 1967
	巴雷	22.0	6.0	-12.0	X 射线衍射法	Bur et al., 1969
	巴雷	4.0	-4.0	-20.0	X 射线衍射法	Nichols, 1975
片麻岩	大井川	-10.0	12.3	0.0	X 射线衍射法	星野一男等, 1978
	丹沢山区	-22.0	-1.2	-20.0	X 射线衍射法	星野一男等, 1978
	迁西荆子峪	11.6	3.9	—	X 射线衍射法	安欧, 2011
泥岩	迁西荆子峪	11.8	4.0	—	X 射线衍射法	安欧, 2011
泥岩	新墨西哥伯尼塔断裂	12.0	-4.0	-22.0	X 射线衍射法	Handin, 1970

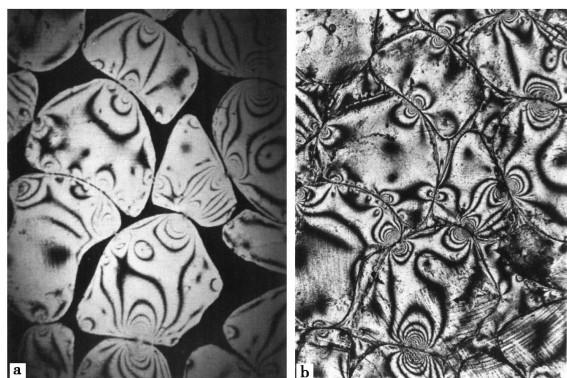


图 1 未固结的 CR-39 颗粒在垂直压力下的图像(a)环氧树脂固结后,撤去外部荷载后模型内的应力(b)

Fig. 1 CR-39 grains under vertical stress(a) Stress fringe of locked-in stress when unloading after epoxy consolidation(b)

力学过程。爆炸时,高温蒸汽的压力可达 100 GPa,这些巨大能量会使岩石熔化甚至汽化,空腔膨胀至最大值后开始冷却,冷却过程中,残余应力封闭了围岩裂缝,导致部分弹性应力不能完全恢复,最终形成稳定的呈压缩应力状态的球状区域。

近年来,岳中琦(2014, 2015)提出了流体包裹体是岩石封闭应力的具体存在和作用形式,并认为岩石建造过程中形成的流体包裹体赋存的封闭应力值与深部地应力相当。这也证明了岩石内应力是与岩石的物质结构组成或状态是相关的。Roedder(2002)认为,在矿物结晶时,矿物能够圈闭和捕获在结晶过程中出现的微小液泡和气泡,每个液泡或气泡就是一个流体包裹体,加热或冷却矿物,可得到

矿物形成温度和压强。岩石中的流体包裹体总体积和质量很小,但是其膨胀能力是巨大的(Yue, 2012, 2013; 岳中琦, 2015)。

H bock 在研究玄武岩柱状节理块体时发现,取出岩块后再进行应力解除试验仍能发现岩块中存在拉张应力(图 2),这极有可能是玄武岩在由流体冷却至弹塑性体的过程中,由于不协调的变形而储存了拉应力,当改变岩石的自由面时,岩石内应力得以重新调整。安欧(2011)对中国西南部岩石中的石英晶粒和方解石晶粒进行退火处理,发现晶粒间距随着退火温度的升高而升高,并随着退火温度的改变而趋向于一定值(图 3),而不含内应力的石英和方解石在 0~600 °C 范围内,其线热膨胀系数为一定值(量级约为 $10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$),因此其晶面间距与温度变化应呈线性关系。分析原因认为,随着温度的升高,组成岩石的矿物颗粒发生了结构状态的变化,强塑性变形矿物固结的结构或基质在高温中软化,矿物颗粒由弹塑性状态向塑性体甚至流体转化,内应力借助于热能的帮助而释放。

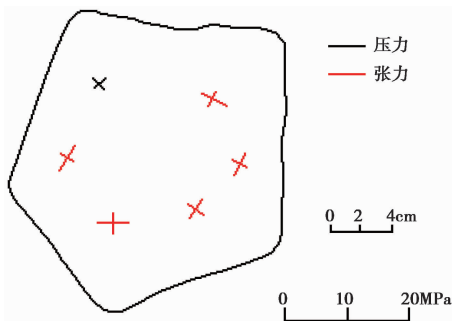


图 2 玄武岩冷凝后内应力分布(据王思敬, 1984)

Fig. 2 Distribution of locked-in stress after condensation in basalt(After Wang, 1984)

因此,在理论上,岩石内应力是稳定的应力,不因边界荷载和时间变化而变化,只要不改变岩石的结构状态,内应力的状态应保持长期稳定不变。由此,本文认为,改变岩石的结构状态,使其从弹塑性状态向塑性和流体状态转换,破坏岩石内应力的自平衡体系,则岩石内应力可在此过程中促使内应力释放或部分释放。

2 岩石内应力的产生机理和原因

2.1 岩石内应力的产生机理

关于岩石内应力的形成原因已有较多的论述可以参考,表 2 是对岩石内应力的形成原因的几种解

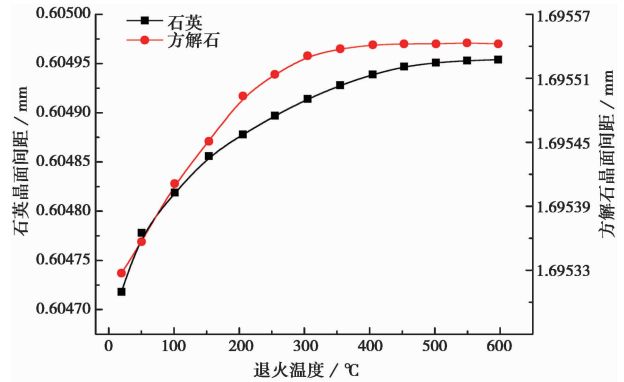


图 3 岩石中石英和方解石晶粒从岩石中取出在表面自由状态下退火后的晶面间距随退火温度的变化曲线

Fig. 3 Crystal plane spacing and annealing temperature relationship of quartz and calcite

释和讨论。专家学者们通过弹塑性理论、摩擦力、胶结力、非协调变形理论、微观位错和螺错以及流体包裹体等理论从微观和宏观方面尝试解释了岩石内应力的构成形式,并在形成机理上进行了描述。总结这些理论可以发现,储存内应力的必要条件是岩石具备弹塑性特征,即在宏观上是岩石的塑性框架限制了弹性变形,从理论上可以证明,理想弹性或理想塑性的介质是不可能储存内应力的。而在微观上,岩石内应力的形成被归因于岩石内部矿物晶体的缺陷,即弹性缺陷理论,这与非协调变形理论是共通的。在金属制造和玻璃制造行业已对内应力的研究有了较为完善的理论,表 3(Lin et al., 1995)给出了

表 2 关于岩石内应力的形成原因的解釋

Table 2 Explain or presumptions on the cause of inner stress

理论基础	内应力的形成过程	参考文献
弹塑性理论	塑性介质限制住了弹性应变的自由恢复,塑性屈服强度较低时,内应力缓慢释放;塑性强度较高时,内应力稳定储存	王思敬(1984)
摩擦力	卸荷后,摩擦力将阻止系统的恢复,结果内应力下降至一个最小值但不为零	陈宗基等(1991)
胶结力、结合力	滑移面两侧经受相对滑动后被内部原子之间的结合力或者外来的胶结物焊接住	陈宗基等(1991)
非协调变形理论	位错、向错和螺错等岩石内部缺陷引起了岩石变形的非协调性,导致内应力储存在岩石内部	钱七虎等(2013)
弹性缺陷理论	组成岩石的晶体或颗粒存在缺陷,在外力作用下,这些缺陷造成弹性变形不连续,部分弹性应变不能完全释放,导致内应力储存	Voight(1966, 1967)
晶格畸变	应变导致应力场畸变并积累应变能	刘雄(1994)
气体包裹体理论	岩石中微小、密封、压紧的流体包裹体是封闭应力和内应变能的具体存在和作用形式	岳中琦(2014)

关于内应力在不同研究尺度上的分类。从不同的尺寸分析内应力的形成原因,可以发现内应力与外部作用力(应力历史)、材料结构、晶体缺陷甚至分子位错等因素相关,究其根本,是材料的弹塑性特点决定的。外部应力作用超过材料的屈服极限后,宏观上,材料会产生塑性变形,晶粒间产生滑移和转动,微观上,晶粒内部和晶粒间的变形与晶粒微观结构和晶粒的缺陷有关。当外力移除后,弹性变形趋于恢复,而塑性变形会限制其恢复,于是内应力得以储存。

表 3 残余应力的分类(Lin et al.,1995)

Table 3 Classification of residual stress

内应力	研究的尺寸范围/mm							
	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
第 I 类	不均匀的外部荷载引起的应力							
第 II 类	结构引起的应力							
第 III 类	晶体内的不均匀引起的应力							
	位错引起的应力							

因此,可以总结的是,岩石内应力的形成与岩石的弹塑性变形、微观上的缺陷造成的不连续弹性变形等因素有关,而这些变化的外界条件必然与岩石在成岩过程中的物质结构形态变化有关,例如岩浆岩由流体到固体的冷凝,沉积岩的固结以及变质作用等,这些过程均对岩石的物质结构形态产生了影响,为内应力的形成和储存创造了必要条件。因此可以推论,岩石内应力产生、储存及释放是伴随着岩石结构形态变化的。

2.2 岩石内应力的产生原因

2.2.1 不均匀塑性变形产生的岩石内应力

一个地区在地质历史上可能经过多次地壳运动,岩石在此过程中伴随着非协调变形。例如,金川矿区围岩中松弛区和严密区具有交替出现的现象(方祖烈等,1982),说明岩石中产生了不均匀的塑性变形,这些非协调的变形是岩石产生“自平衡封闭应力”的重要原因(钱七虎等,2013)。

以三点弯曲试验为例(米谷茂,1983),当外力超过材料的屈服强度时,两侧均会产生塑性变形。现仅研究梁上侧的情况,设从中性轴到 $+x$ 部分为弹性变形区, $+x$ 以外部分为塑性变形区。

外力移除后,从中性轴到 $+x$ 部分弹性恢复(oa),而变形量达到b点的塑性部分将沿着与oa平行的bcd进行弹性恢复。沿着oa变形的部分,在其

应变恢复为零时,应力也降至零,而沿着bc变形的部分,应力恢复至零时仍有残余应变oc,若使应变恢复至零,则需要应力沿cd继续下降至应力为负的一侧(图4)。如此就产生了如图5所示的内应力分布。

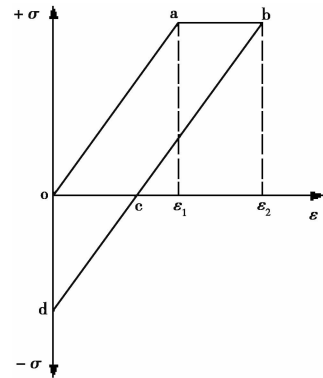


图 4 外力移除后材料的应力-应变变化

Fig. 4 Stress variation after unloading inside of material

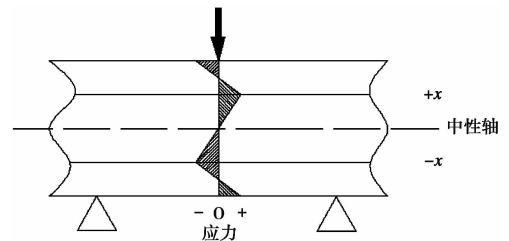


图 5 三点弯曲试验示意图

Fig. 5 Three point bending test diagram

2.2.2 热影响产生的岩石内应力

岩石类材料是一种非均匀介质,组成岩石的微观颗粒在力学性质及热传导性能方面都存在有差异,在压力和温度变化的作用下,会产生局部的塑性变形,造成部分应力被储存其中。例如,在火成岩生成阶段,火成岩在喷出时,由于内部冷却速度和边缘冷却速度差异较大,由此产生的温度应力场造成岩石的不均匀塑性变形。在火成岩相变点以下,初期岩石表面已冷却而内部未受影响,此时表面趋于收缩而岩石内部保持原态,牵制表面收缩,此时岩石状态表现为表面受拉,内部受压;待到冷却后期,表面已经完全冷却,而内部温度开始下降,此时岩石内部趋于收缩,而岩石表面欲趋于原态,对岩石内部的收缩起限制作用,使内部受拉而表面受压,同时,由于冷却初期已产生一定量的塑性变形,所以应力反向后,表面的拉应力不能与冷却初期的拉应力抵消,最终形成表面受压,内部受拉的内应力分布(图6)。Handin(1967,1972)在研究岩石裂隙时,对加拿大

Chelmsford 的 Barre 花岗岩进行了内应力测量, Bur et al. (1969) 在研究声发射时对花岗岩的内应力进行了测量, Nichols (1975) 也对 Barre 花岗岩的内应力进行了钻孔应力解除测量, 发现岩石内应力总是表现为内部受拉、外部受压的状态。

类似地, 沉积成岩作用、变质作用过程中由于高温高压等作用, 也会使岩石在形成过程中产生不均匀的塑性变形, 其结果主要体现为, 除大区的古构造残余应力场之外, 还有局部地区的热变质残余应力场和冷凝岩残余应力场 (安欧, 2000)。矿物的结晶和重结晶的温度和压力不同, 后结晶的晶体构架刚度较高, 在外力作用下, 高刚度的晶体构架会限制先结晶的晶体构架 (或较软矿物) 的应力释放, 因此, 在变质岩中往往也保存很高的内应力 (王思敬, 1984)。这些岩石形成后在漫长的后期改造过程 (如构造变形、卸荷作用、风化作用、地下水作用等) 中, 由于对岩石内部已经保持平衡的内应力进行了扰动, 造成储存在岩石内部的弹性应变不同程度地增大或释放。

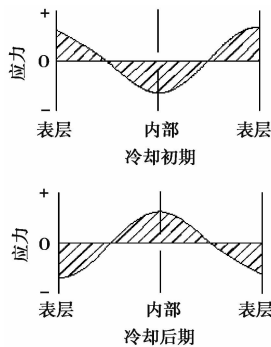


图 6 火成岩冷却时的应力变化

Fig. 6 Stress variation during condensation process in magmatic rock

2.2.3 物理化学作用产生的岩石内应力

岩石由表面到内部传递的化学或物理作用会产生作用力。含水率不均匀的岩石在失水干缩过程中产生拉应力, 风干到一定程度后就会产生拉裂纹 (吕爱钟等, 2004)。龙游石窟在抽水后, 砂岩质石窟壁上就出现了明显的拉裂纹, 这很有可能是岩石内应力造成的。

3 岩石内应力的测定方法

3.1 X 射线应力测定法

X 射线法, 其原理严格、技术精确, 是目前研究

最为广泛和深入的岩石内应力测定方法 (Friedman, 1972; 安欧, 2000, 2011)。X 射线衍射法测定应力的理论依据是布拉格定律, 并认为由应力状态引起的晶格应变和按弹性理论求出的宏观应变是一致的, 利用 X 射线测试岩石矿物晶面间距的变化, 因此可以从测得的晶格应变来推算内应力, 测量原理示意图 (图 7), 用固定波长 λ 的单色 X 射线入射到测点岩石后, 其衍射线给出掠射角 θ , 根据布拉格定律:

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (1)$$

求出选测矿物选测晶面系的晶面间距 d , 晶面间距的改变反映了岩石造岩矿物晶粒的弹性应变, 由于晶面法向弹性应变是以选测矿物经高温退火后弹性变形为零的状态作为起算点, 所以测得的弹性应变是绝对弹性应变, 因而可以通过弹性理论方程求得绝对弹性应力。同时, 这种变形机制不同于晶面滑移、破碎、转动等塑性变形机制, 因而不受塑性变形的影响。

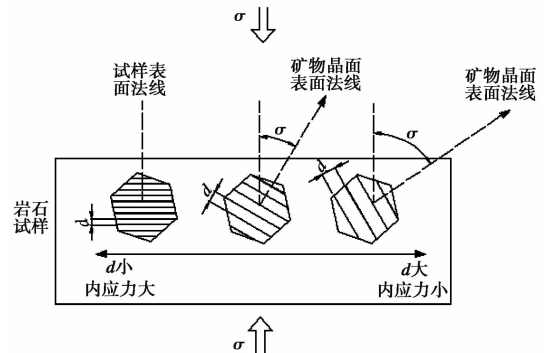


图 7 粒晶间距反映的内应力场

Fig. 7 The relationship between crystal plane spacing and locked-in stress

X 射线入射岩石内部后, 一部分从浅层晶粒的晶面系反射, 而其余的透射线继续射入岩石内部, 继续反射, 直至射线能量消耗完毕, 因此, X 射线法不仅限于测量表层应力, 而且可以测量试样内部相当深度的应力。

3.2 超声波法

超声波法检测内应力的基本原理在于, 岩石材料在应力的作用下是具有声弹性的, 简单地说, 就是有应力的条件下, 由于应力的方向和大小的不同, 会使在岩石中的超声波传播速度发生变化, 即应力的存在引起了岩石材料的各向异性。目前, 金属晶体

的声弹理论已广泛应用在金属材料的应力和塑性应变比的测定中(Hirao et al., 2003)。在岩石力学领域,实验研究也发现岩石的初始应力同样可以引起横波的分裂,并且在相同压力条件下弹性波波速的改变相对金属晶体大得多(Nur et al., 1969)。金属晶体的声弹理论也被应用到岩石的残余应力检测中,结果表明金属晶体的声弹理论可以有效解释岩石的实验结果(Huang et al., 2002)。但是,岩石本身是一种非均质材料,超声波测试结果受岩石的矿物组成和结构构造的干扰大;除此之外,由于超声波的声波较长,声速较低,由于应力引起声速的变化微小,这给精确测量带来了困难。

3.3 本文提出的新方法

应用于内应力检测的方法还有纳米压痕法、磁测法、扫面电子声显微镜法、中子衍射法等等,但是这些方法均属于间接性检测方法。目前,直接测试岩石内应力的报道和研究较少,但应该予以关注。Engelder et al. (1984) 和 Swolfs (1974) 分别采用应变解除法对阿帕拉阡高原的石灰岩和犹他西南地区的花岗岩试样进行了岩石内应力的测量,发现岩石内应力的最大主应力均超过 10 MPa。

岩石通常由多种结晶矿物组成,其粒径往往与选择的岩石试件尺寸处于同一数量级或低一数量级,所以岩石力学行为的尺寸效应明显。因此,通过改变岩石的尺寸来改变岩石的结构状态,使内应力释放或部分释放,利用电阻应变计等方法测量释放的应变,并根据弹性理论即可推算出内应力,是一种可行的测试方法。本文基于对岩石内应力形成过程、储存条件以及 X 射线测试结果的分析,认为岩石内应力的量级属于目前应变测量精度可以分辨的范围。因此,成功应用于金属内应力和玻璃内应力检测的应变解除法也可以应用于岩石的内应力检测和测量。

岩石内应力的产生过程可由图 8 说明。从没有任何外力作用的岩石 A 中取出正方形 B 块体,对取出的 B 块体进行作用使之形状和体积发生变化,成为 C 形状。可以想象,若使块体 C 重新放入岩石 A 中,则需要重新对 C 施加外力使之变为 D 块体的形状和体积,若将施加的这个外力释放,则重新放入岩石 A 中的 D 块体和 D 块体周边要调整变形,从而在该区域产生内应力场,这就是岩石内应力的状态。相反地,如果岩石内部储存内应力,那么从岩石内部取出块体时,测定取出块体的变形就可以推算出岩

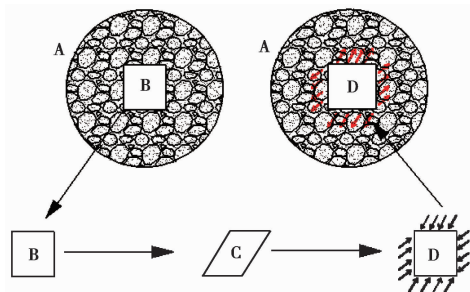


图 8 岩石内应力的产生过程示意图

Fig. 8 Production process of locked-in stress

石内应力。

根据上述原理,可以通过弹性力学理论对岩石内应力进行求解。将岩石划分为若干小块体来考虑,在外力的作用下,这些小块体将产生塑性变形,把这些永久的塑性变形在空间坐标系中分解为正应变和切应变 $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz})$,若这些小块体的应变相互协调,当重新组合时就不会产生内应力。但当应变不协调时,重新组合的小块体就会互相作用,小块体之间便会产生应力。作用在小块体表面的正应力 σ_x, σ_y 和 σ_z 及剪应力 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ 使塑性变形消除,则根据应力-应变关系,作用在小块体表面的外力与塑性应变存在如下关系:

$$\sigma = -(\lambda \varepsilon + 2G\varepsilon) \quad (2)$$

$$\tau = -G\gamma \quad (3)$$

式中, $\lambda = \nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$; E 为岩石弹性模量; ν 为泊松比; G 为岩石剪切模量。

岩石是由这些小块体组成的,通过上式可求出小块体体积力和表面力,当重新组合这些小块体时,作用在小块体上的外力满足应力平衡方程和边界条件:

$$X = -\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) \quad (4)$$

$$Y = -\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}\right) \quad (5)$$

$$Z = -\left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}\right) \quad (6)$$

$$\bar{X} = -(\sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n) \quad (7)$$

$$\bar{Y} = -(\sigma_y m + \tau_{xy} l + \tau_{yz} n) \quad (8)$$

$$\bar{Z} = -(\sigma_z n + \tau_{xz} l + \tau_{yz} m) \quad (9)$$

式中, l, m, n 分别为垂直于试样表面的方向余弦。

外力使块体的塑性变形消除,各小块体之间变形协调。若外力去除,则会产生内应力,内应力的大小与外力相等,方向相反。若考虑热应力造成的岩

石内应力场,则塑性应变为:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha T \quad (10)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (11)$$

其中, α 为岩石的线膨胀系数; T 为温度。

岩石内应力的形成过程为岩石内应力的直接测量提供了思路。岩石内应力必须满足无体力的平衡方程和零反力边界条件,实质上是反映了岩石在外部作用力去除后,内部残留的应力状态。

4 结论与展望

4.1 结论

笔者从地质角度分析了岩石内应力的形成机理和条件,通过分析和讨论,认为岩石内应力储存和释放必然伴随着岩石物质结构状态的变化,而岩石的弹塑性特征是岩石内应力稳定储存的必要条件,岩石内应力是地质历史上才能形成的特殊表现,而表现岩石内应力的行为需要特殊条件。

4.2 展望

岩石内应力的假说和论述已得到了肯定性的讨论,但对其系统完整的研究工作仍不充分,也存在诸多需要解决和完善的问题。综合过去的工作成果可见,对内应力的研究和论述都是基于固体力学理论的,认为岩石是弹性的、塑性的、弹塑性的和黏弹性的,并分别服从各自的固体力学理论。然而,岩石内应力这一特殊表现对这一基本假设提出了重要质疑,因为岩石内应力的形成是以改变岩石的物质结构状态为初始条件的,所以单一的固体力学理论不能合理地、充分地解释这一现象。

笔者通过本文对岩石内应力的研究现状进行了汇总和分析,提出了岩石内应力与岩石物质结构状态的紧密关系,对后续的研究,如岩石内应力的形成过程和形成机理的研究,岩石内应力释放条件、释放特征的研究,岩石内应力的尺寸效应及测量原理和测量方法的研发和改进等方向奠定了基础。更进一步地,我们或许可以发明、设计和制造人工的内应力材料,服务于工程建设。

致谢 本文在成文过程中得到香港大学土木工程系岳中琦教授、中国科学院地质与地球物理研究所徐嘉谟的指导与建议,在此表示感谢。

参 考 文 献

- An O, Gao B G, Li Z Y. 1991. The property and mechanism of the residual stress field in the paleo structure [C] // Institute of Crustal Stress, State Seismological Bureau. Crustal structure and crustal stress collection (5). Beijing: Seismological Press: 28-33.
- An O. 2000. Study on Constructing Residual Stresses Filed [C] // Institute of Crustal Stress, State Seismological Bureau. Crustal structure and crustal stress collection (13). Beijing: Seismological Press: 120-129.
- An O. 2001. Residual stress field of crust [M]. Beijing: Seismological Press: 25-27.
- Bur T R, Hjelmstad K E, Thill R E. 1969. An ultrasonic method for determining the attenuation symmetry of materials [M]. US Department of Interior, Bureau of Mines, 25-39.
- Engelder T, Geiser P. 1984. Residual stress in the Tully limestone Appalachian plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 89 (B11): 9323-9332.
- Fang Z L, Chen X W, Ding Y L, et al. 1982. Some understanding on the law of ground pressure activity in horizontal roadway of bad rock in Jinchuan mining area [J]. Journal of Beijing Iron and Steel College, (4): 8-15.
- Friedman M, Logan J M. 1970. The influence of residual elastic strain on the orientation of experimental fractures in three quartzes sandstones [J]. Journal of Geophysical Research, 75(2): 387-405.
- Friedman M. 1972. Residual elastic strain in rocks [J]. Tectonophysics, 15 (4): 297-330.
- Friedman M. 1976. Measurement of the state of residual elastic strain in rocks by X-ray diffractometry [J]. Noreko Reporter, 14(1): 7-9.
- Gallagher J J J. 1971. Photomechanical model studies relating to fracture and residual elastic strain in Granular aggregates [D]. Texas USA: Texas A & M University.
- Han B C, Xu J M. 1991. Probe into the memory model on "consolidated stress" of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 18(1): 112-114.
- Han B C, Zhang G D. 1998. Mechanism and determination of the residual stress in rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 17: 770-771.
- Han B C. 1998. The memory function of rock and its influence on deformation of rock mass [J]. Journal of Engineering Geology, 6 (4): 326-332.
- Handin J. 1970. Studies in rock fracture [R]. Texas: Texas A & M University College Station Center For Tectonophysics: 1-18.
- Handin J. 1967-1972. Studies in rock fracture [M]. U.S. Army Corps of Engineers Technical Reporter: 1-17.
- He M C. 2011. The mechanism of rock burst and its criterion [M] // Study on the mechanism of rock burst in the academic department of the Chinese Academy of Sciences. Beijing, China Science and Technology Press: 14-17.
- Hirao M, Ogi H. 2003. EMATs for Science and Industry-no contacting Ultrasonic Measurements [M]. Springer Science & Business Media. 3-8.

- Huang X, Burns D R, Toksöz M N. 2002. The effect of stresses on sound velocity in rocks: The theory of acoustoelasticity and experimental measurements[J]. Massachusetts Institute of Technology Earth Resources Laboratory, 36(3): 351-355.
- Lin Y C, Chou C P. 1995. A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 48(1-4): 693-698.
- Liu G B, Hou X Y. 1996. Analysis of residual stress in the deformation of foundation pits in soft soil[J]. Underground Engineering and Tunnels, (2): 2-7.
- Liu X. 1994. An introduction to rock rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 70-71.
- Lü A Z, Jiao C M. 2004. Discussion of two elementary problems in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(23): 4095-4098.
- Nichols Jr T C. 1975. Deformations associated with relaxation of residual stresses in a sample of Barre granite from Vermont[R]. Washington US: United States Government Printing Office.
- Nur A, Simmons G. 1969. Stress-induced velocity anisotropy in rock: An experimental study[J]. Journal of Geophysical Research, 74(27): 6667-6674.
- Price N J. 1964. A study of the time strain behavior of coal measure rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1: 272-303.
- Qian Q H, Qi C Z, Wang M Y. 2004. Rock dynamics under strong dynamic load[M] // Wang S J. China's Century Achievements in Rock Mechanics and Engineering. Nanjing: Hohai University Press: 304-323.
- Qian Q H, Zhou X P. 2013. Effects of incompatible deformation on failure mode and stress field of surrounding rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(4): 649-656.
- Qian Q H. 2011. The analysis of the mechanism of rock burst and the thinking of the decisive parameters[M] // Study on the mechanism of rock burst in the academic department of the Chinese Academy of Sciences. Beijing: China Science and Technology Press: 3-13.
- Qiao D J, Han X A, Li R S. 2002. Introduction of underground nuclear explosion phenomenon(I)[M]. Beijing: National Defence Industry Press: 1-15.
- Roedder E. 2002. Fluid inclusions, encyclopedia of physical science and technology[M]. 3rd ed. Waltham: Academic Press.
- Shigeru Y. 1983. Residual stress and its countermeasures [M]. Zhu J P, Shao H M (translate). Beijing: China Machinery Industry Press, 6-8.
- Sun G Z, S Y. 2011. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press: 49.
- Swolfs H S. 1974. Field measurement of residual strain in granitic rock mass[C] // Advances in Rock Mechanics, Proc. 3rd. Gong. ISRM II. 563-568.
- Tan Tjong Kie, Kang W F. 1991. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 10(4): 299-312.
- Tan Tjong Kie. 1982. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 1:20.
- Voigt B. 1966. On photo elastic techniques in situ stress and strain measurement, and the field geologist[J]. Journal of Geology, 75(1): 46-58.
- Voigt, B. 1967. Restspannungen im Gestein [C] // Preceeding of 1st International Congress on International Society of Rock Mechanits. Lisbon: [s.n.], 2: 45-50.
- Wang H B, Zhang J X, Tian Y, et al. 2013. Formation of stress containment cage and its relation with explosive yield for strong explosion in granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 34(9): 2727-2732.
- Wang S J. 1984. Stability analysis of rock mass in underground engineering[M]. Beijing: Science Press: 51.
- Wang S J. 2009. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(3): 433-450.
- Xu J M, Chen Y E. 1998. The possibility of determining rock-forming pressure of a sample of rock[J]. Scientia Geologica Sinica, 33: 494-501.
- Xu J M, Li X, Han B C. 2006. Original state of strain energy in a rock mass and its effect on excavation-induced displacement fields[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(12): 2467-2474.
- Yue Z Q. 2012. A possible tensile force and energy source causing rock burst, pressure bump, mine earthquake, rock split, zonal disintegration and large deformation in rock excavations at deep undergrounds with high in-situ stresses[J]. News Journal of China. Society of Rock Mechanics and Engineering, 97(1): 83-89.
- Yue Z Q. 2013. Micro-gas hypothesis for behaviors of rocks under loading [M] // Yang Q, Zhang JM, Zheng H. Constitutive Modeling of Geomaterials: Advances and New Applications. New York: Springer: 381-386.
- Yue Z Q. 2014. Gas inclusions and their expansion power as foundation of rock "locked in" stress hypothesis[J]. Journal of Engineering Geology, 22(4): 739-756.
- Yue Z Q. 2015. Expansion power of compressed micro fluid inclusion as the cause of rock burst[J]. Mechanics in Engineering, 37(3): 287-294.
- Zhang X, Wang Y S. 2017. Activities of XiaoJiang fault zone in Bihetan hydropower station reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 25(2): 531-540.
- 安欧, 高国宝, 李占元. 1991. 古构造残余应力场的性质和机制[M] // 国家地震局地壳应力研究所, 地壳构造与地壳应力文集(5). 北京: 地震出版社: 28-33.
- 安欧. 2000. 古构造残余应力场研究[M] // 国家地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地壳应力文集(13). 北京: 地震出版社: 120-129.
- 安欧. 2011. 地壳残余应力场[M]. 北京: 地震出版社: 25-27.
- 陈宗基, 康文法. 1991. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 10(4): 299-312.
- 陈宗基. 1982. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1:20.

- 方祖烈,陈新万,丁延棱,等. 1982. 对金川矿区不良岩体水平巷道地压活动规律的几点认识[J]. 北京钢铁学院学报, (4): 8-15.
- 韩贝传,徐嘉谟. 1991. 关于岩石“固结应力”记忆模型的探讨[J]. 岩石力学与工程学报,18(1): 112-114.
- 韩贝传,章根德. 1998. 岩石中残余应力的形成机理及确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,17: 770-771.
- 韩贝传. 1998. 岩石的记忆功能及对岩体变形的影响[J]. 工程地质学报,6(4): 326-332.
- 何满潮. 2011. 岩爆机理及其判别准则[M]//中国科学学会学术部. 岩爆机理探索. 北京:中国科学技术出版社: 14-17.
- 刘国彬,侯学渊. 1996. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. 地下工程与隧道, (2): 2-7.
- 刘雄. 1994. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社: 70-71.
- 吕爱钟,焦春茂. 2004. 岩石力学中两个基本问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报,23(23): 4095-4098.
- 米谷茂. 1983. 残余应力的产生和对策[M]. 朱荆璞,邵会孟译,北京:机械工业出版社: 6-8.
- 钱七虎,戚承志,王明洋. 2004. 强动载作用下的岩石动力学[M]//王思敬[J]. 中国岩石力学与工程世纪成就. 南京:河海大学出版社: 304-323.
- 钱七虎,周小平. 2013. 岩体非协调变形对围岩中的应力和破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报,32(4): 649-656.
- 钱七虎. 2011. 岩爆机理的建行分析和决定性参数的思考[M]//中国科协学会学术部. 岩爆机理探索. 北京:中国科学技术出版社: 3-13.
- 乔登江,韩学安,李如松. 2002. 地下核爆炸现象概论(上册)[M]. 北京:国防工业出版社: 1-15.
- 孙广仲,孙毅. 2011. 岩体力学原理[M]. 北京:科学出版社: 49.
- 王海兵,张建鑫,田宇,等. 2013. 花岗岩中强爆炸形成的应力封闭壳及其与爆炸当量的关系[J]. 岩土力学,34(9): 2727-2732.
- 王思敬. 1984. 地下工程岩体稳定分析[M]. 北京:科学出版社: 51.
- 王思敬. 2009. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报,28(3): 433-450.
- 星野一男,安田俊一,小出仁. 1978. 关东中部残余应力调查实例[R]. 地质调查所.
- 徐嘉谟,陈月娥. 1998. 测定一块岩石成岩压力的可能性[J]. 地质科学, 33(4): 494-501.
- 徐嘉谟,李晓,韩贝传. 2006. 成岩地质体的初始应变能状态及其对开挖引起位移场的影响[J]. 岩石力学与工程学报,25(12): 2467-2474.
- 岳中琦. 2014. 奠基岩石“封闭应力”假说的气体包裹体和膨胀能力[J]. 工程地质学报,22(4): 739-756.
- 岳中琦. 2015. 岩爆的压缩流体包裹体膨胀力源假说[J]. 力学与实践,37(3): 287-294.
- 张欣,王运生. 2017. 白鹤滩水电站库区小江断裂带活动性研究[J]. 工程地质学报,25(2): 531-540.