

固体力学研究的趋向和良机 (III)

——美国机械工程师协会应用力学分会
固体力学研究方向委员会的报告

2. 地质材料力学

首席作者 M. M. Carroll

(加利福尼亚大学 (Berkeley) 机械工程系)

与 J. F. Schatz 及 F. J. Fischer 合写初稿. 由 B. M. Butcher, N. G. W. Cook, W. F. J. Deeg, W. Herrmann, W. Goldsmith, R. E. Goodman, K. S. Hasen, L. D. Hockanson, G. L. Mcwrey, S. Nemat-Nasser 和 J. R. Rice 提供审阅意见.

提要 能源回收, 地下构筑物, 减轻地震灾害, 以及常规防护和核防护等各个领域所必需的进展, 其关键都取决于地质材料力学和热学行为的改进理论的发展. 这些领域包括石油和天然气 (包括近海和极地的开采), 采矿和就地回收, 地热开发, 核废物隔离, 海底隧道, 地下仓库, 核试验防护外壳, 地面爆炸效应. 必需的发展包括 (其中的一些已在早些时候美国科学院的报告中详述) 非弹性变形、破坏和破坏后行为的本构理论, 细观结构和宏观结构的影响, 岩石的断裂 (直接断裂、水力压裂和爆炸炸裂), 摩擦滑动, 土的液化, 冰的力学, 现场条件的确定, 渗流, 热效应等, 地质材料力学的进展需要某些已建立的流变学、金属塑性、复合材料、混合物等等理论的配合, 还需要发展某些全新的思想和方法. 岩石和土的复杂性, 应力、温度、应变率等的宽广范围, 岩土工程过程中遇到的相互作用, 以及所涉及的极其不同的尺寸和时间尺度, 都引出固体力学中一大批有发展前景的挑战性问题.

2.1 引言

固体力学是岩土工程学当前研究的一个重要部分. 实际上, 在能源回收和开发 (石油和天然气, 包括近海和极地的开采, 采矿和就地回收, 地热开发), 地下构筑物 (包括核废物的隔离, 地下仓库, 海底隧道和勘探), 以及减轻地震灾害等各种岩土工程过程的提出、设计和控制, 都受到当前地质材料力学知识水平的限制. (最经常处理的地质材料是各种类型的岩石和土, 但是冰和雪目前也受到相当大的注意, 混凝土也是作为地质材料处理的.) 这些限制已经被美国全国岩石力学委员会的一系列研究考查过, 并且已经在美国科学院 (岩石力学部, 1978, 1981) 发表的报告中介绍过. 尽管在这期间有一些鼓舞人心的进展, 但是仍

• 238 •

有大量令人激动的挑战性问题尚待解决。防护的需要,尤其是关于核试验的防护外壳以及预计常规爆炸和核爆炸的影响,也需要更好地了解地质材料中应力波的传播和动态断裂。

几乎所有的情形中,为了克服技术上的限制,必须通过物理学家、力学家、工程师、地质学家和地球物理学家在各学科之间的共同努力,来取得所需要的重大进展。许多问题都具有很强的固体力学成分,它们包括如下的一个方面或几个方面:

1. 发现合适的系统和初始边值问题来模拟各种过程。

2. 发展合适的本构方程(细观力学的,唯象的,统计的)来描述材料的行为。这可能包括非弹性变形、断裂、破坏后响应、流体固体相互作用、热效应、有限应变、高应变率或长期蠕变,等等。

3. 发展与材料模型相结合的计算格式,来求解有关的初始边值问题。

4. 设计合适的试验和发展测量方法,以便将理论计算跟实验室测量及现场测量相比较。

岩土工程过程的复杂性,材料的复杂性质,应力、温度、应变率等的宽广范围,上述这些过程中遇到的相互作用,以及所涉及的极其不同的尺寸和时间尺度,都引出一大批令人激动的挑战性力学问题。

地质材料包括从颗粒状的砂、砾石和雪,到冰、土、盐、页岩、煤、透赤砂岩、凝灰岩、珊瑚等,还有花岗岩和大理石等,它们都呈现出宽广和多变的材料响应范围。这种响应在相当程度上受细观结构组构(fabric)(晶粒,孔隙,微裂纹,胶结,流体含量,等等)的影响,也受中尺度结构和宏观结构的影响。固体力学在下列这些方面已经作出了许多贡献:(a)根据地质材料的力学响应对地质材料进行分类;(b)用公式表达各类材料变形和破坏的适当的本构理论;(c)鉴别能够描述组构的(可测量的)细观结构参数;(d)通过分析基本的细观力学过程更好地了解组构的影响。

对其他材料如金属、聚合物、复合材料、混合物等发展出来的并予以应用的许多技术,已经应用于地质材料。不过这些应用并不总是成功的,并且在实际上,过分应用标准技术,乃是地质材料力学发展状况相当差的一个原因。尽管唯象理论已经获得某些成功,并且无疑将继续获得成功,但是,大家越来越认识到,需要更好地了解引起主要的细观力学效应和中尺度力学效应的基本过程。

固体力学界正在对这些挑战作出反应,并且已经出色地作出了一些重要的进展。这些进展包括,在了解细观结构组构的影响、摩擦滑动、整体运动、孔隙崩塌、细观起裂、破坏局部化、软化和破坏后响应等方面的总的改进,以及对下述几类工作的一些特殊的改进:采用形状脉冲或时控爆炸来加强爆炸炸裂;采用小型及微型水力压裂来就地测定应力;通过采用声发射(微地震活动性)预报岩石突然崩碎和顶板崩塌来提高采矿安全性等。

2.2 非弹性变形本构理论

对于许多岩石,尤其是软的或高度渗水的砂岩、凝灰岩、珊瑚、页岩、白垩、盐等,它们在相当狭窄的应力范围内发生的是弹性的行为,而在岩土工程过程中却往往超过这一狭窄的应力范围。土也呈现出非弹性响应性质,包括剪切压实、液化及其他破坏机理。这就需要发展非弹性变形本构理论,包括破坏和破坏后响应。例如,地面或地下爆炸的研究,可能涉及从近场的碎成大大小小的岩石块,到中场的没有宏观破坏的非弹性变形,到远场的暂态弹性响应这一整个范围。油藏开采中非弹性变形的例子包括地面不稳定性(地面沉降),压力敏

感性以及钻孔不稳定性。加利福尼亚的油田、新西兰的地热田、加拿大的沥青沙滩等处已经证明发生了地面沉降,这种沉降可以对地面设备和附近的井筒造成严重的损害。开采后与时间相关的沉降也可能造成问题。地面沉降也往往由地下生产岩层的非弹性变形所引起。涉及温度及有效应力变化的强化回采过程,也可能导致岩层渗透率严重降低到不可能得到恢复,这使过程受到了限制。井筒不稳定性可能导致严重的钻孔故障损失、很差的粘结工作、不精确的测井数据、流沙控制问题和穿孔问题。这可能是跟有效应力变化有关的非弹性破坏效应,或者是更复杂的化学-流体-非弹性效应。对这方面情况的更好的了解,将有助于在需要采取预防措施时明确问题并进行预测。

岩石和土的非弹性响应十分复杂,它表现出金属、合金和聚合物所未遇到过的某些不寻常的特点。这主要是由于空洞、裂纹、晶粒、胶结、分层等等细观结构对材料响应的显著影响所引起,也由于流体压力对材料响应的影响所引起。这也导致大家都知道的尺寸效应,从而较大尺度试样的行为是受导致不同响应性质的较大尺度结构所影响的。

在更重要的和新奇的变形中,地质材料的特性为:①非弹性体积变化,剪切增强压实,扩容,以及由于裂纹和空洞的存在所引起的依赖于压力的屈服;②由于内摩擦引起的流动中可能的非正交性;③脆性应变软化。裂纹和空洞也可能引起弹性非线性,而卸载行为通常是非弹性的。超弹性行为的传统理论不能直接应用于岩石,需要在经验方面和细观力学方面继续发展新的本构理论,来描述非弹性变形和破坏,以及变形与流体流动之间的相互作用。

目前正在发展和应用的细观力学本构理论包括:①颗粒材料的理论,着重组构的影响,压力敏感屈服条件和破坏条件,以及壅性流动的非正交性;②多孔材料的理论,不仅应用于岩石,而且应用于粉末冶金等其他领域;③含微裂纹材料的理论。许多应用是有关静态问题的。然而,这些理论也应用于研究应变率效应,包括如动态微裂纹扩展和空洞成核及扩展或崩坍等效应,以及长期和短期蠕变效应。另一使人感兴趣的细观力学方法,是采用接触处具有适当相互作用的包含成百上千晶粒的计算机模型,来模拟颗粒材料的行为。一个有关的重要课题是发展一些相当简单的例行程序,来测量实验室试样的或者现场的重要的细观结构参数如孔隙率、晶粒粒度和裂纹密度等。只要更好地了解了非均质介质中的波传播效应,特别着重超声弥散、衰减和散射,上述这些都是可以达到的。

唯象理论包括各种修改的经典塑性理论或粘塑性理论(包括屈服条件下的压力相关性,非伴生流动,断裂面,等等)。能够推导出土的 Cam-Clay 模型的临界状态法导致发展了与广泛使用的 CAP 模型非常相似的多孔岩石的理论。复合材料理论和混合物理论已被修改后应用于地质材料,充满着流体的多孔材料的 Biot 理论已经得到进一步的发展。

2.3 岩石断裂力学

自然界岩石裂纹的尺寸范围,是从亚微米尺度的晶粒内裂纹,直至几百公里尺度的大地构造板块之间的边界。许多能源回采方法或者是采用机械刻压机直接破碎岩石,或者是采用爆炸产生应力波法,或冲击产生应力波法,或水力压裂法间接破碎岩石。水力压裂可能涉及单个断裂传播几千英尺以上。机械破碎尺寸的范围则从采煤工作上的几英尺直至钻孔处的几分之一英寸。爆炸应力波则可能产生几十英尺以上的裂纹图案,或者把岩石粉碎成石碴或粉末。时间变化率则是从准静态直至大于 $10^4/s$ 的应变率。

在工程断裂力学中,最感兴趣的是主要在拉应力下使裂纹变成不稳定的那些条件。在地

壳岩石中，由于重力无处不在的作用，则是压应力占优势。不过，还是形成了多种多样的裂纹或断裂形式。不仅这些裂纹的起裂条件服从工程断裂力学中使用的同样的理论分析，而且可以将工程断裂力学中的概念和理论基础加以推广，来分析和了解裂纹如何扩展到形成节理和断裂。成核以及断裂扩展的研究，需要了解实践上很重要的基本地质现象。节理形成节理组，而这些节理组的取向和持续时间，节理之间的间距以及节理的尺寸，都可以借助于岩石的强度、应力的地质状态和孔隙压力等因素来了解。某些断层面之间的运动，或断层面各部分间的运动，有时是以稳定的无地震方式发生的，其他时间则变得不稳定和发生地震。这种行为的不完全的定性解释是有意义的，但现在有理由认为，利用类似于断裂力学中的那些适当的理论，可以定量地计算上述这些差异。

各种破坏机理包括延性剪切流动，局部化和破断，脆性开裂，裂纹或空洞成核、扩展和合并引起的崩落，以及粉碎。这方面已导致另外一些研究，如①扩容和加工软化的力学及其对不稳定性和断裂的影响；②损伤开始和扩展的测定和理论的公式化表达；③温度、孔隙流体类型、孔隙压力和侧限应力对损伤机理的影响；④各向异性和非均匀性对裂纹缓慢扩展和迅速扩展的影响。

2.3.1 钻孔和切割 需要对开凿工具和钻孔工具破碎岩石的方式有一更好的了解。机械刻压机和岩石之间的界面附近发生的过程不是简单的过程，并且也未很好地了解。需要改进现有的技术并发展一些新的技术。开凿工具的损坏是一个重要的问题。机械刻压机工作能量的主要部分（约为90%）转换成热，这一能量的大部分用于加热工具。采用把高压水射流置于切削钻头前面的方式可提高效率和减少损坏。切割尺度从小于1mm（金刚石的切割）到大于1m（煤的切割）的方法，以及效率（对于给定的能量用断裂的体积表示）依赖于碎片尺寸的方式，都需要作进一步的研究。这是一个有发展前景的挑战性应用力学问题，它对于提高开凿工具和钻孔工具的性能有巨大的潜力。

2.3.2 水力压裂 预计、影响和监控油藏开采中水力压裂的问题，是涉及断裂力学、流体固体相互作用和波传播的一个吸引人的问题。固体力学家在这方面已经作出了显著的贡献。一般的问题可能包括当地应力（以及当地应力场的变化）对主断裂的起裂和扩展的影响，岩层界面处断裂的行为或它与已有天然断层的相互作用，含支撑剂流体与岩层的相互作用，等等。水力压裂是一个有可能通过固体力学的研究得到很大改进的领域。

监控运行中的水力压裂的问题，也是一个很有发展前景的挑战性问题。一个可能性是，适当解释断裂阵面附近发射的声信号可能是有效的。另一个问题是分析泄漏对断裂尺寸和断裂几何形状的影响。

2.3.3 爆炸炸裂 目前正在研究利用爆炸波来增大岩层渗透率。由于最近关于利用最优形状应力脉冲来达到所希望的断裂类型和范围，成功地利用爆炸波技术的前景已经得到了改善。改进对岩石的动态破坏和破坏后行为的了解，将大大有助于这方面工作的进展。这些改进对于精确计算由于常规爆炸和核爆炸所引起的应力波传播也极重要，这种精确计算对于控制地下核试验和预计地面爆炸的影响是需要的。

2.4 未来的研究课题

固体力学已经对地质力学的许多其他研究领域作出了重大的贡献，但要取得更大的贡献，仍然极大地依赖于进一步的研究进展。

2.4.1 冰的力学 海冰的非弹性变形、蠕变和断裂的本构模型的发展,对石油工业是特别重要的。一个详细的本构模型应当充分描述三维时间相关载荷,并包括细观结构效应以及盐度、温度和冻结方法的影响。这些模型必须应用来求解与冰和结构物相互作用有关的边值问题(北极近海平台)、隆起和碎块形成的机理以及大尺度变形问题。

2.4.2 有节理的岩石 岩石行为的一个主要问题涉及宏观结构,特别是裂纹交叉的大尺度网络形成岩块的方式。了解有节理岩体的稳定性,对于许多地下构筑物(矿坑、隧道、仓库)是关系重大的,有关这方面的分析方法正在发展之中。节理上的滑动所引起的有节理岩石的变形提出了一些新的问题,例如,在一组表面上的滑动如何影响其他的表面?在水力传导率方面,在大多数岩石中,节理和断裂对液体长距离运动的影响,显然要比孔隙率的影响更为重要些。然而,许多流体流动的分析,只是研究与孔隙率有关的固有的渗透率。定量地了解水力行为以及节理和断裂的性质,对于完善地计算导致形成矿物沉积、碳氢化合物储层和地热系统的过程是必需的。

2.4.3 摩擦滑动 另一个相当重要的课题是关于界面上的分离和滑动的力学。描述这种作用的本构理论的发展,对于了解地震机理,计算细观尺度上有节理岩体的变形和稳定性,发展由于微裂纹引起的强度降低的理论,了解应力波的摩擦衰减,都是必需的。

把界面的一个面积和周围物质的一个小体积看成是一个有代表性的体积元,来研究一质点的响应性质的连续介质方法,已经证明是成功的。所导出的响应性质,把局部的法向应力及剪切应力以及孔隙压力跟界面的滑动及分离联系起来。剪切阻力随滑动的增大而减小的不稳定关系的情形,特别跟地震的模拟有关。率相关和状态相关滑动模型可预计有限循环振动和浑沌滑动振动。迫切需要的进一步工作是发展完善的三维理论和包括界面上物质如流体或断层泥粘土的影响,也包括热和化学的影响。

2.4.4 确定现场条件 确定深部应力、孔隙率和渗透率等条件是一个重要的岩土工程问题。一个方法是取岩芯和进行试样实验室试验。然而,在取岩芯过程中,岩芯损伤的程度仍然有许多未知因数。更好的模拟非弹性变形和破坏,将使我们更好地了解取岩芯操作过程,这将使我们能更可靠地解释岩芯试样的实验室试验数据。

细观结构的巨大影响和许多地质材料固有的非均质性,导致这些材料材料常数的测量值,要比其他类型材料实验室试验的情况分散得多。因此,根据实验室数据得到的现场条件的特性必定是不精确的,可以适当采用统计分析方法来补救这种缺乏精确细节的情况。

现场条件的可靠的直接测量优于取岩芯进行实验室试验。已经提出了一些方法并已取得不同程度的成功(采用小型水力压裂来测定应力是较成功的一种方法),但这方面仍然有固体力学可以提供重大突破的机会。

2.4.5 渗流 Biot的理论描述了流体经过线性弹性(或粘弹性)固体中的流动。需要一些更一般的理论来描述流体经过非弹性变形岩石或经过断裂岩石或有裂隙岩石的流动。特别感兴趣的挑战性问题是研究流动的细观力学问题,以便更好地了解细观结构参数跟渗透率之间的关系。而这又将使我们更好地了解应力变化、孔隙流体压力和温度对渗透率的影响。许多过程涉及两种液体(油和水)、一种液体和一种气体(水和蒸汽)或一种液体和颗粒介质(含支撑剂压裂流体)的二相流动。这类流动的稳定性是一个重要的课题。对于某些应用,则需要研究非层流流动和非牛顿效应。

2.4.6 热效应 因为许多地质材料的等温性质并未很好地了解,所以一般的热学力学(thermomechanical)理论未得到利用是不足为奇的。因此,热效应往往不包括在岩土工程过程的分析中,尽管它们可能是十分重要的。已经有相当大量的关于各种类型岩石的变形性质和渗透率方面的热效应数据。温度对破坏的影响方面的数据则较少一些。发展材料响应的合用的热学力学理论(尤其是高温下的),是一个极重要的研究领域。

2.5 需要开展研究项目一览

地质材料力学是一个鼓舞人心的有巨大实际重要性的研究领域,目前正处于迅速发展之中。下面列举当前活跃的一些主要研究领域和较关键的进一步研究领域。

- 本构理论 根据地质材料的力学响应将地质材料分类,用公式形式表达每类地质材料的变形、破坏和破坏后响应的本构理论。

- 非弹性变形 对地质材料的非弹性变形进行细致的理论研究和实验研究,以确定象屈服面和正交性等经典概念可以适用的范围以及在什么地方需要新的方法。

- 细观结构 鉴别可测量的细观结构参数以确定地质材料的组构;组构的演化及其对变形和破坏的影响的细观力学分析;发展测量变化着的细观结构参数的实验技术。

- 断裂力学 在细观尺度上和宏观尺度上对岩石断裂的起裂、扩展、分叉、止裂和相互作用进行理论的、数值的和实验的研究;对侧限压应力、孔隙流体压力、材料非均匀性(分层)和高应变率进行研究。

- 岩石的破坏 岩石不同静态和动态破坏模式的分类;对破坏中的细观结构影响进行研究;研究钻孔和破碎时岩石与工具间的相互作用;发展可能具有交互式数值编码的实验技术,以研究涉及丧失均匀性(局部化)的破坏模式。

- 土的破坏 研究土的压实、剪切破坏和地震或爆炸引起的液化,包括组构对破坏的影响。

- 宏观结构 研究岩体中的宏观结构影响,包括断层上的摩擦滑动,有节理岩体的稳定性,与断裂和裂隙中流动有关的渗透率,运动中的断裂与先有的裂隙或分层间的相互作用;发展高效的断裂绘图技术。

- 现场状况 改进测量应力、孔隙率和渗透率的现场状况的技术,更好地了解实验室测量跟现场性质的关系。

- 冰的力学 发展描述海冰力学响应(包括蠕变变形、冲击响应和破坏)的本构理论。

- 热效应 研究影响地质材料的变形和破坏的热效应,特别是影响裂纹扩展、流体流动、相变、强度和蠕变的热效应。

- 计算机编码 能把非弹性变形、破坏和破坏后行为的各种理论纳入计算机编码或超巨型计算机编码是很重要的;应当通过跟简单的分析解以及跟实验室或现场试验的结果相比较,来检验这些编码的精确度。

2.6 参考书目

- Bazant, Z (Ed) (1985). *Mechanics of geomaterials: Soils, concrete and rocks*. Wiley, New York.
- Carroll, M M, and Sikarskie, D L (Eds) (1977). *Mechanics problems associated with the mining and processing of energy related minerals. Proceedings of an NSF workshop*, Univ of California Extension, Berkeley CA.
- Carter, N L, Friedman, M, Logan, J M, and Stearns, D W (Eds) (1981). *Mechanical behavior of crustal rocks*. Geophys Monographs Ser No 24, Geophys Union, Washington DC.
- Jenkins, J T, and Satake, M (Eds) (1983). *Mechanics of granular materials: New models and constitutive equations*. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York.
- Rock Mechanics Board (NRC) (1978). *Limitations of rock mechanics in energy-resource recovery and development*. Natl Acad Press, Washington DC.
- Rock Mechanics Board (NRC) (1981). *Rock-mechanics research requirements for resource recovery, construction, and earthquake-hazard reduction*. Natl Acad Press, Washington DC.

董务民译自: *Appl. Mech. Rev.*, 38, 10 (1985): 1256—1260.