

采动岩体力学——一门新的应用力学研究分支学科

Mining Strata Mechanics

钱鸣高

(中国矿业大学, 中国工程院院士 徐州 221008)

缪协兴

(中国矿业大学, 教授 徐州 221008)

一、引言

采动岩体是指随着矿体采出,受到采动应力场影响的那部分岩体(或称围岩)。采动岩体力学属矿山岩石力学的一部分,是固体力学与采矿工程相结合的一门交叉学科。如在煤矿开采中,一般情况下覆岩受采动影响后均要发生破坏,直至引起地表移动(或称地表沉陷)。因此,采动岩体往往是由破坏后的各种块状岩体所组成,它最显著的力学行为特征是破断与运动。破碎岩体的行为对采矿工程、岩体内部流体和气体运移及地面建筑和环境带来严重影响。

矿山岩石力学在基础研究方面取得的成就已大大促进了采矿工程的发展和生产技术与方法的变革。60年代初,因岩石弹塑性理论在地下采矿工程稳定性分析中的应用,人们认识到地下工程围岩既可能是一种载荷,也可能是一种能承受载荷的结构,并提出了以新奥法为代表的新的岩石支护与施工方法。新方法充分发挥了围岩的自承能力,大大降低了对人工支撑结构与支撑材料承载强度的要求,产生了巨大的经济和社会效益。70年代,岩石粘弹、粘弹塑性理论研究使岩石流变学取得了巨大的进展,为预测采矿工程中围岩的长期稳定性提供了理论基础。岩石刚性压力实验机可以测定岩石由变形至破坏的应力应变全过程,它为研究岩石破坏后的力学行为、采场矿压分析、矿柱设计、岩体失稳研究、岩爆与地震机理研究提供了实验基础。岩石多孔介质力学理论及渗流理论的研究为采油工艺、煤矿瓦斯抽放技术和地下水渗流问题奠定了基础。

但是,作为矿山岩石力学的研究重点,采动岩体力学成为一门完整独立的学科分支尚未成熟。因为作为分析采动岩体破裂—失稳—运动的固体力学基础并没有完全建立起来,它尚需在采动岩体力

学的发展中逐步形成。也就是说,随着采动岩体力学的发展,固体力学本身也会得到发展和完善。

二、岩石材料的本构理论

一般认为,岩石材料是对固体力学研究工作者最具吸引力的固体介质。岩石内部的细观结构和力学特性与时间、温度、水等影响因素的相互关系,都对固体本构理论提出了严重的挑战。

岩石是大自然的产物,是由多种矿物晶粒、孔隙和胶结物组成的混杂体。亿万年的地质演变和多种复杂的构造运动,使岩石物质结构从本质上由宏观到微观都成为极其复杂的非连续和非均质体。它具有非线性、各向异性及随时间变化的力学属性。在应用数学力学方法研究岩石力学行为时,必须考虑岩石介质本身的物质属性,因为它的变形性质和破坏性质不但和岩石的复杂结构密切相关,而且还受到温度、围压、孔隙水等环境因素的影响。

岩石材料具有多种内部缺陷,是造成岩石非弹性变形的主要原因。为描述岩石的状态,岩石损伤力学引入内变量来刻画岩石介质微观结构的裂隙变形扩展,从而得出岩石宏观破坏的力学准则。其中分形、混沌、分叉等现代数学理论的应用为描述岩石细观结构及演化过程开辟了新的有效途径。同时也为新的力学分支的建立奠定了基础。但岩石材料的本构描述,尤其是断裂以后的力学行为的特征描述还有待于新的数学、力学理论的发展。

三、采动岩体中的灰色结构

面对在地下数百米,甚至上千米的深部从事煤矿开采的问题,人们首先想到的是如何控制覆岩的活动。完全用人工的办法控制整个上覆岩层不产生活动是不可能的。只有采用推断岩体在破坏后可能形成的结构模式和形态,并加以验证,而后掌握它

的活动规律,才能达到安全生产的目的。采场上覆岩层结构为非人工结构,并且只能局部观测到其形态特征,所以称之为灰色结构。这种结构将随地质条件、采场布置、支护方式等发生变化。

从19世纪末,人们就对采场覆岩中的这种灰色结构提出了种种推测,形成了岩体结构假说。例如,自然平衡拱假说、假塑性梁假说、砌体梁结构假说等。能否准确地推断采场上覆岩层灰色结构的模式,将对一系列采矿工程问题产生重大影响,例如,采场工作面顶板来压与支架受力、上覆岩体中裂隙分布与地面瓦斯抽放、上覆岩体的断裂失稳与地表沉陷、煤岩分离控制与放顶煤回收率的提高等。值得一书的是,由我国学者建立的砌体梁结构理论正在逐步完善,应用范围也在不断扩大。如,由砌体梁全结构力学解的求得,得到了砌体梁稳定的S-R条件以及砌体梁关键块体运动与支架受力的定量关系;由砌体梁全结构的形态推导出了地表沉陷曲线及岩层内部离层情况;将砌体梁稳定理论应用到底板结构中,得到了底板结构运动与突水的关系等等。

采动岩体内结构模型的建立,是十分复杂的研究工作,这种灰色结构不像传统固体力学中的人工搭接结构那样,可以准确地描述其形态特征及测定构件的受力状态。灰色结构模型的建立需要更丰富的经验、突出的想象力及正确的推断力。

四、岩体变形—破裂—结构—运动全过程描述

受采动应力场影响,采动岩体将发生变形,直至破裂。破裂后的块状围岩体将形成堆砌结构,堆砌结构的失稳即造成岩体运动,直至再形成稳定的块状堆砌结构。在采矿工程中,围岩的破坏是不可避免的。特别对于煤矿采动覆岩来说,大部分情况下,覆岩的及时垮落是必须的,否则将对工作面的安全造成严重威胁。但是,对于煤矿工程来说,覆岩的垮落将对采场形成来压;岩层内部造成裂隙和离层,引起气体和水体的运移;地表沉陷造成地面建筑、道路、水体以及环境的严重破坏。因此,必须对岩层活动加以人为控制,研究岩层控制技术。

在岩层控制方面,经几十年的研究,已逐步形成了独立的学科分支。对层状矿体开采来说,岩层控制主要包括三个方面:采场覆岩活动规律及其对支架与围岩的影响;开采引起岩体内的裂隙和离层变化及其对地下水与瓦斯流动的影响;地表沉陷对建筑物、水体及环境的影响。由于这三方面研究目标不同,长时期来,在研究手段和方法等方面也存在着差异。如采场矿山压力大部分是从力学机理上进行研究,而岩层移动大多偏重于用数学统计方法

对地表沉陷曲线进行描述。但事实上这三方面都是采场上覆岩层活动的结果,因而必然能采用同一的力学原理对上述开采所引起的岩体—破裂—结构—运动及其形态全过程进行描述。

事实上,在煤系岩层中,由于成岩时间和矿物成份等不同,各层厚度和力学特性等方面总存在着不同程度的差别。一些较为坚硬的厚岩层在采动覆岩的变形和破坏中起着主要的控制作用,它们以某种力学结构形式支承上部岩体的压力,而它们的破断和失稳又直接影响着采场矿压显现和地表沉陷。在实践中发现,由于各坚硬岩层的特征不一,因而并不是每一层都对覆岩的运动起决定作用的,有时仅仅为一层或几层。因此,我国学者把这种岩层活动中起主要控制作用的坚硬岩层称为关键层。关键层的变形—破裂—结构—运动将在采场覆岩中引起大范围的岩层活动,这种活动下可影响至采场和支架,上可影响到地表,因此关键层结构模型可作为地表沉陷和采场矿压研究统一的基础。

在采场覆岩中存在多层坚硬岩层时,可以作如下定义,即对岩体活动全部或局部起决定作用的岩层称为关键层。关键层判别的主要依据为其变形和破断特征。即在关键层破断时,其上覆全部岩层或局部岩层的下沉变形是相互协调的,前者称为岩层运动中的主关键层,后者称为亚关键层。一般来说,关键层即为主承载层,在破坏前以板(或简化为梁)结构的形式承受上覆岩层的部分重量,断裂后则可形成砌体梁式结构,其结构形态即是岩层移动的形态,而各亚关键层之间移动的不协调即形成岩体内部的离层,块体间的不平整铰接即形成裂隙。

采动覆岩中的关键层就是控制破裂岩体活动的主要因素或主要结构,也是描述和反映覆岩活动的结构力学模型。与一般结构所不同的是,它是一种自然结构,并且随采场推进而不断运动。关键层的确定,即是对采动覆岩的变形—破裂—结构—运动全过程的描述勾画出了主要轮廓。

五、采动应力场

采动应力场是指围岩内由于矿体被采出而引起的重新分布的应力场。采动应力是岩体变形—破裂—运动之源。但由于原岩应力状态及开采后应力场的难以测定,因此,它像采动岩体中的灰色结构一样,其有关的理论描述和现场测定均不成熟。

随着矿体的采出,在采场两侧和前后方围岩内均要形成采动应力集中,特别是垂直方向上的支承压力集中,峰值可达 $3\sim 5\gamma H$ (其中 γ 为岩体的容重, H 为采深),甚至还要高。在深部开采时,如采场两侧巷道围岩受支承压力峰值影响,必将给巷道围岩稳定性控制造成严重困难。现场资料表明,有些巷

道受一次采动影响即可全部毁坏,有时则使巷道围岩的变形呈流变状态,并且在一般的支护条件下难以克服。因此,在巷道围岩稳定性控制方面,有两种截然不同的方法。一是控制围岩的整体完整性,例如,采用全封闭支架、围岩注浆、锚杆支护等,尽量提高围岩的整体强度来承受采动应力的作用,达到控制巷道围岩稳定性的目的。另一种与之相反的方法是人工破坏围岩的完整性,降低围岩的整体强度,使之不能在巷道周边形成采动应力峰值,让应力峰值向远处转移,而达到控制巷道围岩稳定性的目的。这方面实际使用的方法有,巷道底板切缝和巷道围岩内放松动炮等。针对采动应力场的影响,如何把握控制巷道围岩的“刚”或“柔”,是采动岩体力学的中心任务之一。

采动应力的集中是造成冲击矿压和煤与瓦斯突出灾害的主要原因之一。随着采深的增加,煤矿冲击矿压事故越来越严重。专家们曾预言,煤矿冲击矿压是20世纪矿山压力研究的焦点之一。采动应力与开采设计及开采方式有关,因而在深入研究冲击矿压发生机理的同时,采动岩体结构运动与采动应力场变化的关系研究是防治冲击矿压技术发展的关键。

采动应力场研究也是带动采矿新方法和新工艺发展的重要基础。例如,当前在全国重点研究和推广的放顶煤开采方法的技术关键就是要提高顶煤的回收率。顶煤的回收率高低主要受其破碎块度大小的影响。顶煤块度大,不易冒落;顶煤块度小,易引起冒顶事故。因此,有效地利用支承压力的作用来控制顶煤破碎的块度,是提高顶煤回收率的重要途径之一。

在煤矿生产过程中,对采动应力场的正确描述常常是预测矿山压力显现的基础。

六、结 语

在以往的采动覆岩活动规律研究中,只是利用

一些传统的力学理论和成果,并没有把其归结为一门有特色的力学分支。事实上,采场覆岩的变形—破裂—运动,完全是一种独具特色的力学现象。在采矿工程中,覆岩的损伤、断裂和失稳往往是不可避免的,不像机械和建筑等工程结构那样,一定要防止这类现象的发生。目前的固体力学还只能对较为理想的弹性、塑性和损伤体进行可靠的变形与受力分析,而在采场覆岩的变形、运动与受力分析中,更多的是要面临材料或结构破坏后的力学行为,以及结构破坏和失稳的全过程。采矿工程师们更加关心的问题恰恰就是岩体结构是如何破断的,破断后的岩块是否趋于稳定状态,以及结构失稳后的形态变化。例如,采场坚硬老顶随着工作面推进,不断地由连续体破断成块体,块体重新排列后的自然结构再受覆岩和自重的作用,不断变化、运动和失稳,直到引起地表沉降。

要推动材料和结构破坏后的力学行为的研究,还涉及到思想观念的转变。传统的观念认为,材料和结构的破坏意味着废弃,因而无任何研究价值。可以肯定,要解决采矿工程中的流变、损伤、断裂和失稳问题,首先要发展现有的流变理论、损伤理论、断裂理论和失稳理论。采动岩体是一种连续与非连续相耦合的复杂介质,要形成新的力学分支,必须深入研究其岩体内的多种耦合作用关系。例如,坚硬岩层与软弱岩层、坚硬岩层与坚硬岩层、坚硬岩层与软弱岩层、块状体与连续体、块状体与松散体等之间的相互作用关系。只有对岩体内部各种作用关系有了透彻的了解后,才能建立起较为完整的力学模型,给出系统运动的控制方程。

现代计算机技术及相应数值计算理论和方法的高速发展,为从理性上建立采动覆岩活动规律理论提供了前提。这门新的岩石力学分支的发展必将促使相应计算机软件的开发,因而也将促进采动岩体力学研究的进一步深入。(责任编辑 肖庆山)

科技动态

用核废料制造处理 有毒的有机废物的催化剂

据英国《新科学家》周刊1996年11月30日报道,英国普雷斯顿核燃料研究实验室的伊恩·赫德林和利物浦大学新式催化剂研究中心的格雷厄姆·哈钦斯及斯图尔特·泰勒用核废料制造的催化剂可以处理有毒的有机废物。这种新式催化剂以氧化铀为基础,它和传统

的以贵金属为基础的催化剂不同,价格要便宜得多。贵金属为基础的催化剂不仅非常昂贵,而且很快就会被氯化物等化合物沾污。

他们发现,氧化铀在300~400℃之间可以破坏苯、甲苯、氯苯和氯丁烷等有机化合物,在催化过程中只产生水、氧化碳和氯化氢等副产物。

美国印第安纳州珀杜大学的催化剂专家托姆斯·贝恩认为,这种对有机废物有稳定的催化作用而且既便宜效率又极高的催化剂有极大的经济价值,在催化技术上是一大进步。(刘先曙编译)