文章编号：1673-3363-(2016)01-0019-08

深部巷道围岩协同锚固机理

龙景奎

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，力学与建筑工程学院，江苏 徐州 221116)

摘要 针对深部巷道围岩控制过程中遇到的难题，以协同论为理论基础和方法指导，在前期研究和工程实践的基础上，提出深部巷道围岩协同锚固机理。通过分析巷道围岩控制系统的组成因素，介绍协同论对围岩锚固的描述方法，提出结构协同、强度协同、刚度协同、锚固时机协同、预紧力协同、变形协同等协同作用机制，以此初步建立协同锚固机理的研究框架。研究表明，协同锚固系统在宏观整体功能大于各子系统之简单总和，即产生“1+1>2”的协同增强效应，这对于深部巷道围岩稳定性控制来说是最为根本和至关重要的，也更加符合煤矿安全生产的本质要求。

关键词 深部巷道；协同锚固；作用机理；协同效应

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.004

The mechanism of synergetic anchorage in deep roadway surrounding rock

LONG Jingkui

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering，School of Mechanics and Civil Engineering，China University of Mining & Technology，Xuzhou，Jiangsu 221116，China)

Abstract In response to the difficulties during the surrounding rock control in deep roadway, based on previous research and engineering practices, the mechanism of synergetic anchorage in deep roadway surrounding rock has been put forward, taking synergetics as its theoretical basis and guideline. Through analyzing the components of the controlling system of the roadway surrounding rock, and introducing the way how synergetics direct the anchorage of surrounding rocks, a research framework has been built to propose the synergetic mechanisms concerning structure, intensity, rigidity, anchorage timing, preload, and deformation. The study shows that the synergetic anchorage system achieves the effect of 1+1>2, as its macroscale function outweighs the sum of its total subsystems. This is of fundamental and vital importance to the stability control of the deep roadway surrounding rock, and meets the essential needs of safety production of coal.

Key words deep roadway；synergetic anchorage；mechanism of function；synergetic effect

随着对煤炭需求量的增加和开采强度的加大，国内外矿山都相继从浅部进入深部资源开采。我国已探明的煤炭储量中，约53%的矿山埋深超过1 000 m。深部巷道围岩所处的复杂地质力学环境，使得巷道围岩稳定性控制成为影响深部资源安全开采的突出问题之一[1-2]。深部巷道开挖后通常需要采取一定的方式进行控制，通过调整系统中所有或部分子系统的参数来调整系统的状态和稳定性；否则，

收稿日期：2014-04-17 **责任编辑**：王江涛
基金项目：国家自然科学基金项目(51374199)
作者简介：龙景奎(1970—)，男，贵州省锦屏县人，博士，研究员，从事岩石力学与地下工程方面的研究。
E-mail：jklong@cumt.edu.cn **Tel**：13912005678

就会带来冒顶、片帮、整体垮塌或前掘后修等后果，甚至引发更大的工程灾害和和严重事故。

受深部岩体复杂环境的影响，巷道开挖和控制经历了一系列复杂的演化过程，涉及多尺度、多层次子系统之间的相互竞争、合作与协调，表现出从微观到宏观各种尺度的演化规律，从而决定了深部巷道围岩控制系统是一个高度非线性的开放系统，靠单纯的细观理论和只涉及宏观描述的唯象理论并不能充分反映变形破坏的本质机理[3-4]。因为这些过程无论被认识与否，由竞争、协同所带来的系统演化规律和协同效应都是客观存在的，并符合协同论所揭示的系统非平衡相变的演化规律。这种认识已经得到科学的验证，探求非线性关系是岩石力学研究中的一个基本任务[5-7]。因此，必须借助非线性科学理论和方法，从新的视角研究深部岩体系统，才能有效地解决深部岩体工程相关问题。协同理论是普适性最强的横断科学之一，是研究和解决深部岩体工程的科学理论与有力工具[8-9]。

1 深部巷道围岩锚固系统

1.1 深部巷道围岩控制系统的构成要素

如图 1 所示，深部巷道围岩控制系统根据其构成要素，可划分为锚固系统、围岩系统和环境系统 3 个子系统。

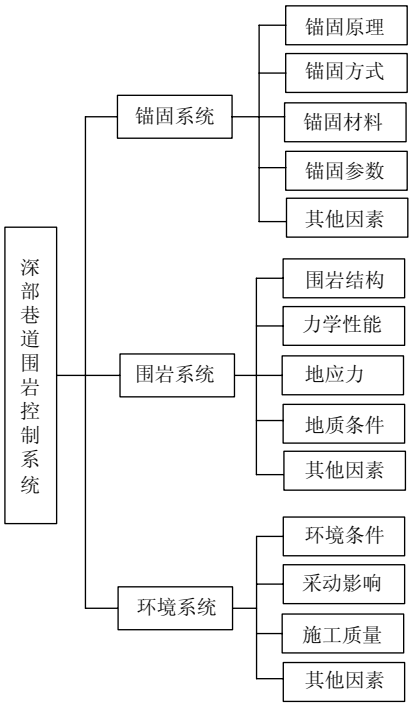


图 1 深部巷道围岩控制系统的构成

Fig.1 The components of the controlling system of the deep roadway surrounding rock

对于某一具体深部岩体工程，巷道位置一旦选定，就意味着围岩系统、环境系统是客观存在的，即其所处的环境和条件是相对“固定”的，只能在确定巷道位置时尽量避开最大水平应力、断层构造等不利因素的直接影响。因此，由锚杆、锚索、组合构件等锚固构件与围岩组成的锚固系统是重点研究的对象，可通过调整锚固系统中所有或部分子系统的控制变量来调整巷道围岩控制系统的状态参量和稳定性。为了简化对巷道围岩控制系统的研究内容，同时抓住锚固系统的“可控性”这一根本特征，只对深部巷道围岩锚固系统的协同作用机理进行研究和探讨。

1.2 深部巷道围岩锚固系统的组成因素

深部巷道围岩锚固系统主要包括锚杆子系统、锚索子系统和它们所作用的锚固岩体系统。其中，锚杆(索)子系统包含有锚杆(索)长度、钻装角度、间排距、预紧力、锚固力、布置方式等控制变量，锚固岩体系统包括应力分布、位移、强度、刚度等状态参量，可将这些变量或参量再划分为次一级、次次级甚至更细的子系统。从系统论角度，可将深部巷道围岩锚固系统与子系统及控制变量的关系表述如下：

$$S=(P,R_{jk}) \tag{1}$$

$$P=\{P_i \mid i\in I\} \tag{2}$$

$$R_{jk}=\{r_{jk} \mid j\in J,k\in K\text{且}J+K=I\} \tag{3}$$

式中：S 为深部巷道围岩锚固系统；P 为深部巷道围岩锚固系统中的子系统，如锚杆子系统、锚索子系统等；R_{jk} 为各子系统之间的关系矩阵，即非线性协同作用。

2 协同论对巷道围岩锚固的描述方法

一般来说，系统可从微观、中观和宏观的不同层次进行描述，这需要根据研究对象和目标具体确定。协同学研究的对象介于微观和宏观之间。通过对系统中协同机制的形成与演化的研究，把微观组分和宏观特征联系起来，是协同学卓有成效的工作。将协同理论应用于岩体工程中，目的是研究岩体从开挖到锚固过程中各个子系统之间的协同作用和系统的协同效应是怎样产生的。

对于深部巷道围岩协同系统，其微观层面主要揭示构成锚固岩体的分子、原子是如何作用和运动的，即对其内部组成分子的位置、应力和速度的描述；中观层面主要描述由细微结构组成的子系统是

通过怎样的合作来形成时间、空间或时空的有序结构；而宏观层面则是对锚固岩体整体结构、功能作用及变形破坏的直接描绘。进行巷道围岩协同锚固的研究，是为了形成具有一定功能的控制结构，以达到围岩稳定的目的，若从微观层面去做深入研究，具体到内部分子原子的构成、运用和作用，显然没有必要；但若只从宏观层面做泛泛的探讨，比如采用类比法、经验计算法等研究和分析巷道围岩控制的作用和功能，则不可能实现功能最优化、效能最大化的目的。而协同学从中观角度对复杂系统所进行的研究和描述，则为巷道围岩控制研究提供了最佳的方法和途径，即围岩控制系统中采取合作行动以产生宏观结构的子系统并非微观意义上的原子、分子，而是由大量原子、分子组成的锚固岩体微单元通过协同作用来实现局部功能(子系统功能)的最优化和系统整体功能的最大化，从而产生整体功能大于局部功能之和的增强效应，而并非锚固构件在力学性能上的线性叠加或联合，这也正是巷道围岩稳定性控制的关键所在。

3　深部巷道围岩协同锚固机理

深部巷道岩体开挖后，在综合应力的作用下，打破了岩体原有的自然平衡状态，特别是围岩综合应力高于围岩强度时，围岩将产生复杂的非线性变形直至破坏。如果不采取有效的锚固方式，巷道就会因顶板冒落、片帮或断面缩小而不能满足使用要求，因而需进行必要的人工控制。从目前我国煤矿巷道控制广泛应用的联合支护、复合支护、组合支护和耦合支护等理论及技术来看，虽然它们的作用机制各有不同，但结果都是形成具有一定承载能力的有自组织特征的有序结构，实际上“协同作用”已不同程度地体现在这些控制系统中。只是由于对协同作用的认识不充分，往往会带来 2 种不利的结果：1) 子系统内部因素之间的协同作用不足，导致子系统功能得不到强化；2) 子系统之间的协同作用不足，从而影响甚至削弱系统的整体功能。而协同锚固机理能够有效地解决这些问题，使深部巷道围岩稳定性控制更加趋于科学、合理而适用。

巷道围岩因为锚固方式、锚固作用及锚固参数等方面的不同，所产生的锚固结构各不相同，而不同的锚固结构会产生不同的性质和功能。因此，锚固结构是系统产生功能的基础，当巷道围岩锚固系统满足某一具体结构时，系统就会产生某种具体的功能。同时，功能对结构也起到一定的反作用，其使用和发挥是以结构消耗为代价的，比如锚固构件损耗、围岩变形破坏等。表明人们可根据不同巷道的功能使用需要，来选择不同的锚固结构组成。需明确的是，对于某一具体巷道来说，采用相同的锚固构件进行锚固时，因锚固作用方式、锚固参数的不同会产生不同的结构和功能，但肯定有一种锚固结构是最优的，其整体性能是最合理的和最佳的，这时所对应的锚固方式，就是巷道围岩协同锚固。

3.1　巷道围岩锚固机理的一般描述

巷道开挖以后，设定使围岩向临空区运动各种力的合力为 P，则巷道围岩锚固机理的一般形式[10]可以表示为

$$P=\sum_{i=0}^{n}P_i \tag{4}$$

式中：P 为锚固岩体结构的总合力；P_i 为锚固岩体结构内部的分力。

深部巷道开挖后，P 所代表的合力很复杂，包括重力、水作用力、膨胀力、构造应力和工程偏应力等。为了简化对巷道围岩锚固机理的描述，结合现场实际情况，只考虑以变形形式转化的工程力、围岩自撑力和工程锚固力对 P 的贡献和影响，即

$$P=P_0+P_1+P_2 \tag{5}$$

式中：P_0 为以变形的形式转化的工程力，主要是塑性能以变形的方式释放；P_1 为围岩自撑力；P_2 为工程锚固力。

式(5)中受巷道所处位置的围岩结构、围岩性能、围岩条件的客观性影响，P_0，P_1，P_2 均可调控，它们的相互关系及对巷道稳定性的影响如下：

1) 巷道开挖以后，引起围岩向临空区运动的合力 P 并不是由工程锚固力 P_2 全部承担，而是由 P_0，P_1，P_2 共同分担，主要过程为：① 以释放巷道围岩塑性能的方式释放掉一部分合力，即 P_0，也就是说 P 的一部分转化为岩体变形；② 通过岩体自身强度和承载能力来承担部分合力，即 P_1，如果 $P_1>P-P_0$，表明岩体强度很高，巷道可以自稳，如果 $P_1<P-P_0$，则需要进行采取人工控制，即施加 P_2，巷道才能够稳定，深部巷道大多如此；③ 通过人工控制提供工程锚固力 P_2。虽然 P_0，P_1 从理论上来说是可控的，但其过程比较复杂，实际上难以准确掌控；因此，为了安全起见，一般需要提供足够的工程锚固力作为保障。

2) 从理论上来说，要达到经济、高效的目标，应满足如下条件：$P_0\rightarrow\max$，$P_1\rightarrow\max$，$P_2\rightarrow\min$。即通过充分释放变形能和发挥围岩的自承能力，来

降低对 P_2 的要求，从而大大节省锚固材料和施工成本。但是，P_0 与 P_1 之间存在此消彼长的矛盾关系，不可能同时为最大，只能找到两者处于相对均衡时所对应的最佳关系，即协同关系。其关键是合理地选取变形能释放的时间和锚固作用时间，即存在作用时机上的协同关系。

3) P_2 越小，即要求提供的工程锚固力越小，锚固施工就越简单，越经济有效。但是，从人工锚固控制的目标和结果来看，却要求 P_2 要达到“最大值”，即通过有限的控制来产生最大的效应。实际上，这不是相互矛盾的，而是相互对应的。简单说，对 P_2 具有“双重”目标要求：从锚固施工的过程来看，要求 P_2 为“最小值”，即尽可能减少人工控制程度；而从锚固施工的效果要看，却要求 P_2 为“最大值”，即最大程度地发挥锚固作用效应，其目的也是减少人工控制程度，即要求用最少的材料和最简的工艺来产生最大的效能。因此，P_2 的“最小值”与“最大值”是相统一的，只是被赋予的“目标”不一样而已。

由于各组成部分的刚度不同，锚固岩体结构合力 P 只是在同一位移条件下各分力的叠加。特别是锚固岩体结构内部应力不均匀、变形不协调时，锚固岩体结构的承载能力主要依赖于某一承载构件(如锚杆)的承载能力，而其他构件只发挥了“补强”功能，即 P 等同于该承载构件最大承载力 $P_{1\max}$ 和其余构件(如锚索、锚网等)实际承载力的总和，即

$$P_{\mathrm{t}} = P_{1\max} + \sum P_j \leqslant \sum P_{i\max} \tag{6}$$

式中：$P_{1\max}$ 表示某一主承载构件(如锚杆)的最大承载力；P_j 表示其余构件的实际承载力；$P_{i\max}$ 表示系统内部各个承载构件的最大承载力。

式(6)表明，锚固系统各子系统之间的协同作用不足时，会导致系统的最终合力等于或小于各个子系统的最大分力之和，从而影响到系统的总体力学性能。特别是子系统之间协同作用严重不足时，会造成某一局部受力不均或软弱而先行破坏，最终导致锚固岩体系统整体变形破坏。

式(6)也反映出组合支护、联合支护等传统控制方式的作用机理，即子系统间的相互作用主要表现为功能的线性叠加和互补，通常表现出互补效应，这也是非协同锚固方式的主要特征。

3.2 深部巷道围岩协同锚固机理

深部巷道围岩锚固的目标主要有：① 通过研究深部巷道围岩的变形破坏规律，建立与之适应的控制机理，实现更加安全的目标；② 尽量减少人工控制的程度，实现经济的目标；③ 将人工控制的效能发挥到最大化，实现高效的目标。

3.2.1 深部协同锚固机理的定义

深部巷道围岩协同锚固机理是基于协同原理和方法，借鉴和吸收围岩锚固理论、支护理论、围岩承载结构理论等理论及技术精髓，针对深部巷道围岩控制系统中客观存在着的多尺度、多层次控制变量的竞争与合作过程，以及由这种竞争、协同带来的系统演化规律，从有效改善巷道围岩锚固结构的应力状态，减少围岩应力集中和变形，显著提高锚固岩体结构的整体承载能力、抗变形能力和稳定性出发，通过对影响巷道围岩控制系统的几何特性参数、物理特性参数、力学特性参数、结构特性参数及演化特性参数的设计和优化，在优化子系统内自身功能的基础上，使子系统之间协调合作、相互作用、互为结果，充分调动和发挥各子系统的最佳性能，从而使巷道围岩锚固系统的整体性能在宏观上大于各子系统、要素之简单总和，即产生“1+1>2”的协同效应，更好地实现安全、经济、高效的巷道围岩控制目标和要求[11]，可表示为

$$P_{\mathrm{s}} = \sum P_{i\max} + \Delta S > \sum P_{i\max} \tag{7}$$

式中：P_{s} 为协同锚固结构系统的总合力；ΔS 表示在协同作用下系统在宏观功能上产生的协同增强效应。

3.2.2 协同锚固的特性

与巷道围岩控制的其他作用方式相比较，协同锚固作用具有如下突出的特性：

1) 实现锚固结构系统中各子系统之间的协同，即各子系统都基于一个共同目标(控制围岩稳定)，在一个核心的导向下协同作用，协同行为使协同各方的作用效果产生质的飞跃。

2) 实现锚固结构系统中子系统内部的协同，每个子系统都可看作由下一级子系统构成的系统，同样需要所含次级子系统之间的协作，才能发挥子系统的最佳效能，也才能实现大系统的协同效应。而且，次级子系统可以根据需要进行更加细观的划分和研究。

3) 实现锚固结构系统在宏观整体上大于各子系统之简单总和，即产生“1+1>2”的协同效应。对于巷道围岩稳定性控制来说，需要研究和利用的就是这样的协同锚固效应，更加有利于煤矿生产安全、经济和高效的目标实现。

4) 更好地揭示系统从无序到有序的转变、进化和协调发展的一般规律。各子系统内部、子系统之间彼此协同作用这一微观机制和宏观体现，是巷道围岩锚固系统发展进化的根本原因。因此，协同锚固不是简单地看宏观“效果”，而是通过子系统之间的行为探究寻求实现“效果”的内在规律和方法。

3.3　协同锚固效应

协同效应是指在复杂性系统中，由于各构成要素之间存在着非线性的相互作用，当外界控制参量达到一定的阈值时，要素之间由相对独立、相互竞争向互相联系、相互关联演化，并由相互关联占据主导地位，表现出共同目标下的行为协调与合作，从而带来整体效应的增强，促使系统从无序状态走向有序状态，即协同导致有序。

协同效应可以用式(8)[12]来表示：

$$\begin{aligned} SE &= F(S)-\sum_{i=1}^{n}F(x_i) \\ S &= f(x_1,x_2,\cdots,x_n) \end{aligned} \tag{8}$$

式中：SE 为协同效应，与式(7)中的 ΔS 相一致；$F(x_i)$ 为要素 x_i 产生的效用；$F(S)$为系统 S 产生的效用。

对于一个复杂系统来说，产生协同效应应该至少具备 2 个基本条件：① 系统是一个大系统，由若干个子系统及要素组成，子系统又可以划分为次级、次次级等子系统；② 子系统及构成要素之间彼此依存、相互协调、相互作用，围绕既定目标发生协同行为，产生协同作用。分析深部巷道围岩锚固系统的组成要素及作用方式，显然符合复杂系统的基本条件，因此存在协同作用和协同效应。

根据协同效应的表现结果，可以分为 3 种情况：① 当 $SE>0$ 时，系统产生协同正效应；② 当 $SE<0$ 时，系统不产生协同效应或产生协同负效应；③ 当 $SE=0$ 时，系统无协同效应或效应不明显。对于深部巷道围岩控制来说，需要研究和实现的是协同正效应。

4　深部巷道围岩协同锚固作用机制

为实现巷道围岩锚固系统的协同作用及锚固效应，需要研究和建立子系统之间及子系统内部的协同锚固作用机制，并应用于工程实践和技术推广。根据深部巷道围岩锚固的实际情况，其作用机制主要包括锚杆锚固作用机制、锚索锚固作用机制和锚杆–锚索协同锚固作用机制。其中，锚杆(索)锚固作用机制主要指锚杆(索)预紧力、间排距、长度、钻装角度等控制变量单一变化或组合变化对系统稳定性的作用机制；锚杆–锚索锚固作用机制则以锚杆、锚索 2 个子系统之间控制变量的单一变化或组合变化为对象，着重研究锚杆–锚索预紧力协同、结构协同、变形协同、锚固时机协同、强度与刚度协同等与系统稳定性的相互关系及对其所产生的作用和影响，以进一步研究和揭示深部巷道围岩协同锚固机理。在此，只是提出这些协同方式的基本内涵，并以预紧力协同、变形协同为例，对其协同锚固机制进行简要分析。

4.1　结构协同

深部巷道锚固系统整体功能的实现效果，很大程度上取决于锚杆(索)采取什么样的布置方式、形成什么样的锚固结构。根据深部巷道锚固结构的划分和相互作用关系，可知锚杆-锚索在长度、间排距、角度等布置方式存在差异时，会产生不同的内、外锚固结构。其中必有一种结构所产生的锚固系统功能是最优的，所对应的锚固参数是最合理的，即为结构协同。进行锚杆–锚索结构布置时，主要考虑锚杆(索)长度、锚杆(索)间排距和锚杆(索)群锚作用等对锚固系统所产生的不同影响。

为了实现锚杆-锚索结构协同，必须满足：① 巷道内外锚固结构的协同，即锚杆主要作用于内锚固结构，同时对外锚固结构起到一定的支撑作用，锚索则将内外锚固结构锚固为一个整体，且在内外锚固结构离层时起到一定的限制作用；② 锚杆与锚索在物理力学性能方面要协调，如锚杆长度要满足巷道围岩松动圈大小的要求，对应地锚索长度要满足于将内外结构锚固成一个整体；③ 锚杆与锚索在安装位置、间排距、钻装角度等方面协调配合；④ 锚杆-锚索能够形成纵横交错的网状承载结构，充分发挥群锚作用。

4.2　强度协同

受深部巷道高应力和复杂条件的影响，巷道围岩本身具有“潜在”的巨大变形能，即便采取高强度材料进行加强锚固，仍不可能完全阻止围岩变形。而且，围岩自身具有一定的强度和承载能力，在不完全破坏围岩自身承载强度的基础上，充分释放其内部变形能，是有效释放高应力的重要举措。因此，需要考虑锚杆-锚索-围岩在强度上的协调配合。强度协同由锚杆-锚索-围岩之间的合理变形空间来确定。预留变形空间的原则是保证充分释放高应力强膨胀变形能的同时，又尽量保留岩体的自承能力。即在巷道开挖初期只安装锚杆，允许围岩发

生适量变形，以此释放围岩变形能；随着围岩变形增大，锚固岩体的承载能力和自稳性降低，当其自稳性达到极限之前、且围岩剩余变形小于锚索工程延伸量时开始安装锚索，一方面可减少围岩变形对锚索延伸量的要求，另一方面可通过锚索与锚杆的协同变形来提高和保持锚固岩体稳定性。

4.3 刚度协同

由于巷道围岩的破坏主要是变形不协调而引起的，因此要实现锚杆(索)及其组合构件的刚度与锚固岩体刚度协调匹配。一方面锚固构件要有一定的柔度，对围岩进行锚固后，仍然允许巷道围岩具有足够的变形空间，避免“过早”阻止巷道围岩变形而引起能量集聚；另一方面，锚固岩体又要具有足够的刚度，将巷道围岩变形控制在其允许的范围之内，避免因过度变形而破坏围岩自身强度，降低其承载能力。这样才能在锚固构件与围岩共同作用过程中，实现锚固一体化、荷载均匀化。锚固岩体刚度主要通过锚杆(索)的群锚作用来实现，即利用连接构件将锚杆、锚索进行有效连锁，以充分发挥锚杆(索)的群锚作用，有效提高锚固岩体刚度。

4.4 锚固时机协同

研究表明，巷道开挖以后不能实现立即锚固，会带来巷道的变形[13]。因此需要及时利用锚杆的柔性控制作用，对巷道围岩进行及时锚固。而锚索延伸率小，巷道一开挖就采用锚索锚固往往会因锚索延伸量超过极限而破断。因此，选择合理的锚固时机进行锚杆、锚索的分次安装和使用亦十分重要。根据现场经验，在围岩表面与锚杆锚固段之间岩层急剧变形期内，锚索不宜锚固安装；围岩表面与锚杆锚固段之间岩层变形由急剧向缓慢变形转化时是锚索安设的最佳时期。

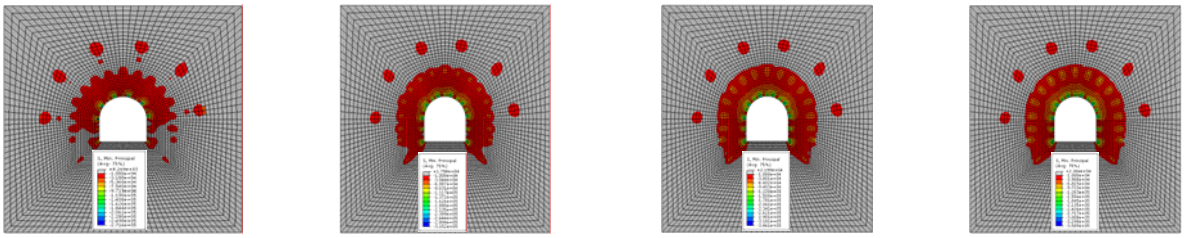
由式(5)可知，巷道在加速变形阶段使 $P_0\rightarrow\max$，但 P_1 却随着变形增大而明显降低。而工程锚固力 P_2 要满足“最小值”，就需要 P_0，P_1 同时达到最大值。显然，P_0，P_1 不可能同时实现最大值。要解决这个问题，就要确定好锚杆(索)最佳锚固时间或最佳锚固时段，即找到 P_0，P_1 同时趋于“最大”时所对应的时空关系，就能实现锚固时机协同[14]。

4.5 预紧力协同

根据锚杆-锚索的作用机理分析，锚杆预紧力主要对巷道周边的浅部岩体起到加固作用，形成内锚固结构；锚索则作用于深部岩体，形成外锚固结构，并将内外结构加固为一个整体。锚杆-锚索预紧力协同，是以锚杆预紧力对浅部围岩的及时锚固为基础，通过加固浅部破裂岩体来提高围岩的承载能力和自稳性。然后，通过锚索预紧力的二次作用，一方面在锚杆锚固的基础上进一步提高锚固岩体强度，控制围岩变形破坏，并将浅部破裂岩体与深部较稳定岩体锚固为一个整体；另一方面，当巷道围岩松动圈较大，造成锚杆所作用的浅部锚固岩体与深部稳定岩体发生离层时，锚索对锚杆锚固岩体起到一定的限制作用，防止顶板冒落。

锚索与锚杆在预紧力上存在如下关系：1) 锚杆预紧力较大而锚索预紧力不足时，锚杆是加固主体，锚索没有起到应有的加固作用，会导致内锚固结构与外锚固结构离层；2) 锚索预紧力较大而锚杆预紧力不足时，锚索是加固主体，而锚杆没有发挥应有的锚固作用，即对内外锚固结构的变形未能形成有效的支撑作用，可能导致锚索先被拉断而造成整体破坏；3) 当锚杆与锚索预紧力协调匹配时，一方面通过锚杆预紧力将内锚固结构加固成良好的组合梁(拱)，另一方面通过锚索预紧力将内-外锚固结构锚固成一个整体，在内-外锚固结构岩体内都形成有效的压应力区，从而改善锚固岩体的应力状态，有效提高巷道锚固岩体的强度和刚度。

图 2 为锚索长度 6.0 m、间距 1.2 m，锚杆长度 2.5 m、间距 0.6 m，锚索预应力 F 为 140 kN，锚杆预应力 f 分别为 20，60，100，120 kN 组合下锚固岩体最小主应力分布云图。



(a) 锚索预紧力 140 kN 锚杆预紧力 20 kN　（b）锚索预紧力 140 kN 锚杆预紧力 60 kN　（c）锚索预紧力 140 kN 锚杆预紧力 100 kN　（d）锚索预紧力 140 kN 锚杆预紧力 120 kN

图 2 锚杆-锚索不同预紧力组合时最小主应力分布云图 (Pa)

Fig.2 The cloud diagram of minimum principal stress distribution under various combinations of bolt-cable preload

由图 2 可看出：在锚索-锚杆不同预紧力组合作用下，锚固岩体中最小主应力挤压带厚度和应力值是不同的，当两者预应力均较小时，受到锚索预应力影响，在巷道周边虽能形成一定连续区域的挤压带，但其厚度较小。在锚索预应力不变时，随着锚杆预应力增加，岩体中最小主应力挤压带区域逐渐扩大，但锚杆预应力过大时在岩体中亦会出现应力叠加区域过耦合现象。如锚索预应力 F=140 kN、锚杆预应力 f=60 kN，岩体中最小主应力叠加区域较为均匀，且形成的加固区域能够满足巷道围岩稳定性的基本要求，此后再增大锚杆预应力意义不大，甚至会起到负面影响。因此，锚杆-锚索共同锚固时，其预紧力组合存在一个协同关系范围，满足时则会产生最优的锚固效果。

4.6　变形协同

现阶段矿用锚杆延伸率一般超过 15%，多数为 16%~18%，表现出变形让压的“柔性锚固”特性，适合于深部高应力巷道围岩稳定性控制。因为锚杆延伸率高，不仅具有适应围岩大变形的特点，而且还具备加固围岩、减小围岩位移的作用。虽然锚索延伸率较低，相当于“刚性锚固”，但若实现它与锚杆在变形和锚固作用上的“刚柔并济”，则能够更好地实现对巷道围岩的主动锚固。因此，锚杆(索)锚固已成为煤矿巷道围岩控制的主要方式。然而，在一些深部巷道或高应力破碎巷道中，锚杆(索)拉断、拉脱及外露现象时有发生，主要是由于锚杆(索)变形与围岩变形不协调造成的。因此，需要重视和解决锚杆(索)与围岩的变形协调问题。

根据煤矿常用锚杆、锚索的物理力学性能，在屈服荷载作用下，某巷道使用的高强锚杆延伸率为 18%，1×7 结构锚索延伸率为 3%。选取锚杆长度 2.5 m，锚固长度 1.0 m，自由段长度 1.5 m；锚索长度 6.0 m，锚固长度 2.0 m，自由段长度 4.0 m；两者安全延伸率考虑为屈服荷载时的 80%。

1) 锚杆-锚索变形不协同

不考虑锚杆、锚索变形协同问题，即巷道开挖后同时进行安装，在围岩荷载与变形的作用下，允许锚杆、锚索变形的最大延伸量为：锚杆 $\Delta l_{\mathrm{g\,max}}$ =1.5×18%×80%=0.216 m，锚索 $\Delta l_{\mathrm{s\,max}}$ =4.0×3%×80%=0.096 m。两者相比较，锚杆“富余延伸量” $\Delta l'_{\mathrm{g\,max}}$ =0.216-0.096=0.12 m。

锚杆、锚索同时进行安装后，由于锚杆所允许的最大延伸长度比锚索长 0.12 m，在围岩高应力和变形作用下，锚索比锚杆会先屈服甚至拉断。这样的结果，一方面造成锚杆延伸率的利用明显不足，不利于围岩高应力的有效释放；另一方面造成锚杆与锚索在力学性能上的不匹配，最终影响整体控制效果。

2) 锚杆-锚索变形协同

由于锚索最大延伸量明显低于锚杆，为了促使锚杆与锚索在延伸率上协调匹配，应先安装锚杆，让其发生一定的“前期延伸量” $\Delta l''_{\mathrm{g\,max}}$，然后再安装锚索，并使锚杆“后期延伸量” $\Delta l'''_{\mathrm{g\,max}}$ 与锚索的最大延伸量相协调。由此，先计算出锚杆“后期延伸量” $\Delta l'''_{\mathrm{g\,max}}$，再确定其“前期延伸量” $\Delta l''_{\mathrm{g\,max}}$ 允许值。

① 锚杆“后期延伸量” $\Delta l'''_{\mathrm{g\,max}}$ =锚索最大延伸量 $\Delta l_{\mathrm{s\,max}}$ =0.096 m；

② 锚杆“前期延伸量” $\Delta l''_{\mathrm{g\,max}} = \Delta l_{\mathrm{g\,max}} - \Delta l_{\mathrm{s\,max}}$ = 0.216-0.096=0.12 m，即可在 0.12 m 范围之内允许锚杆发生“前期”变形让压，然后再进行锚索的二次锚固施工。

3) 锚杆-锚索-围岩变形协同

实际上，巷道承载主体是围岩自身，锚杆、锚索的主要作用是通过主动锚固来进一步提高锚固岩体的承载能力和抗变形能力。因此，要充分考虑锚杆、锚索与围岩在变形破坏方面的协同匹配。经计算，该巷道围岩处于临界破裂区时所对应的巷道周边位移 $u'_{0\mathrm{b}}$ 为 0.033 m，即锚杆、锚索、围岩同时能够满足的最大变形 $\Delta l_{\max}$ 为

$$\begin{aligned}\Delta l_{\max} &= \min\left\{u'_{0\mathrm{b}}\,,\,\Delta l''_{\mathrm{g\,max}}\,,\,\Delta l_{\mathrm{s}}\right\}\\ &= \min\left\{0.033\,,\,0.216\,,\,0.096\right\} = 0.033\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

上式表明，巷道开挖后当变形量达到 0.033 m 时，就需要即时安装锚杆，防止围岩向破裂区进一步发展。但锚杆安装后，锚杆所允许的“前期延伸量” $\Delta l''_{\mathrm{g\,max}}$ =0.12 m，即锚杆锚固岩体还有 0.12-0.033=0.087 m 的变形空间。经计算，当锚杆锚固岩体处于新的临界破裂区时所对应的巷道周边位移 $u'_{0\mathrm{bg}}$ =0.064 m，即“允许”锚杆锚固岩体再发生 0.064 m 的最大变形量，就需要即时安装锚索。因此，在锚索安装前，“允许”巷道周边位移的最大量 $\Delta l'_{\max}$ =0.033+0.064=0.097 m。由于锚索安装以后还能“允许”巷道围岩再发生相当于锚索最大延伸量(0.096 m)的变形量，即“允许”巷道围岩最终发生的总变形量 $\Delta l_{\max}$ =0.097+0.096=0.193 m，且可以同时满足锚杆、锚索最大延伸量的要求，从而实现三

者在变形上的协调，且充分发挥它们的物理力学性能，从整体上达到最佳锚固效果。

从计算结果看，虽然“允许”巷道围岩发生的总变形量超过巷道开挖后处于临界破裂区时所对应的周边位移，但由于先后有锚杆、锚索的加固作用，围岩承载能力和抗变形能力在“同步”提高，所以不会有明显的破坏影响，也基本符合深部巷道锚固围岩变形大但能控制住的实际情况。需要说明的是，以上只是从理论上进行粗略分析得出的结果，由于受到巷道断面大小、围岩破裂情况等因素的影响，与工程实践存在较大差异，须结合现场情况进行具体计算和分析。

5 结 论

1) 深部巷道控制是各种不同尺度、不同类型的复杂微结构自身演化的群体效应，是系统处于远离平衡条件下多尺度、多层次控制变量的竞争与合作过程。无论采取哪一种控制方式，系统内部的协同作用、协同效应都是客观存在的。只是由于认识的角度不同，设计的思路不同，控制的方法不同，导致协同的程度不同，表现出的控制效果不同。与其他理论相比，协同论更加从本质上揭示巷道围岩控制系统的客观演化规律，从而为研究深部巷道围岩控制提供了科学的理论基础和有力的方法指导。

2) 协同锚固系统带来宏观整体功能大于各子系统之简单总和，即产生“1+1>2”的协同增强效应，因而是局部优化、整体提高的一项控制机理及技术，更符合深部巷道围岩稳定控制的本质要求。协同增强效应对于深部巷道围岩稳定性控制是最为根本和至关重要的，也是协同锚固与联合支护、复合支护、组合支护等传统控制方式的区别所在。

参考文献：

[1] 何满潮，谢和平，彭苏萍，等．深部开采岩体力学及工程灾害控制研究[J]．煤矿支护，2007(3)：1-14．
HE Manchao，XIE Heping，PENG Suping，et al．A study of deep mining rock mechanics and engineering disaster control[J]．Mine Support，2007(3)：1-14．

[2] RUSSO-BELLO F，MURPHY S K．Longwalling at great depth in a geologically disturbed environment-the way forward[J]．The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy，2000，100(2)：91-100．

[3] 钱七虎．深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]．东华理工学院学报，2004，27(1)：1-5．
QIAN Qihu．The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness[J]．Journal of East China Institute of Technology，2004，27(1)：1-5．

[4] 周宏伟，谢和平，左建平．深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]．力学进展，2005，35(1)：91-99．
ZHOU Hongwei，XIE Heping，ZUO Jianping．Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]．Advances in Mechanics，2005，35(1)：91-99．

[5] 于广明，潘永战，王国艳．岩石损伤协同特征分析[J]．山东科技大学学报(自然科学版)，2009，28(4)：5-8．
YU Guangming，PAN Yongzhan，WANG Guoyan．Analysis of the synergetic characteristics of rock damage[J]．Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)，2009，28(4)：5-8．

[6] 王来贵，刘向峰，宁民霞，等．岩石力学系统演化过程研究现状[J]．辽宁工程技术大学学报，2002，21(5)：590-594．
WANG Laigui，LIU Xiangfeng，NING Minxia，et al．The current developments of evolving process of rock mechanics system[J]．Journal of Liaoning Technical University，2002，21(5)：590-594．

[7] 许传华．岩体破坏的非线性理论研究及应用[D]．南京：河海大学，2004．

[8] 李元，刘刚，龙景奎．深部巷道预应力协同支护数值分析[J]．采矿与安全工程学报，2011，28(2)：204-208．
LI Yuan，LIU Gang，LONG Jingkui．Numerical analysis of theory of pre-stress synergetic support in deep mine roadway[J]．Journal of Mining & Safety Engineering，2011，28(2)：204-208．

[9] 刘刚，龙景奎，刘学强．巷道稳定的协同学原理及应用技术[J]．煤炭学报，2012，37(12)：1975-1980．
LIU Gang，LONG Jingkui，LIU Xueqiang，et al．Synergetic principle for roadway stability and its application technique[J]．Journal of China Coal Society，2012，37(12)：1975-1980．

[10] 蔡洪都．锚杆预应力协同支护技术研究[D]．徐州：中国矿业大学，2010．

[11] 龙景奎，蒋斌松，刘刚，等．巷道围岩协同锚固系统及其作用机理研究与应用[J]．煤炭学报，2012，37(3)：374-378．
LONG Jingkui，JIANG Binsong，LIU Gang，et al．A study of the mechanism and application of synergistic anchoring systems in roadway surrounding rocks[J]．Journal of China Coal Society，2012，37(3)：374-378．

[12] 鄢飞，董千里．物流网络的协同效应分析[J]．北京交通大学学报(社会科学版)，2009，8(1)：28-32．
YAN Fei，DONG Qianli．Analysis on synergistic effects of logistics network[J]．Journal of Beijing Jiaotong University(Social Sciences Edition)，2009，8(1)：28-32．

[13] 康红普，姜铁明，高富强．预应力锚杆支护参数的设计[J]．煤炭学报，2008，33(7)：721-726．
KANG Hongpu，JIANG Tieming，GAO Fuqiang．Design for pretensioned rock bolting parameters[J]．Journal of China Coal Society，2008，33(7)：721-726．

[14] 王进锋．高应力软岩回采巷道锚杆(索)耦合支护技术研究[D]．西安：西安科技大学，2008．