

黄浪, 吴超. 安全物质学的方法论研究[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 11–16. [HUANG Lang and WU Chao. Study on Methodology of Safety Materials Science [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 11–16. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.002.]

# 安全物质学的方法论研究<sup>\*</sup>

黄浪, 吴超

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 为完善安全物质学的理论体系, 指导并促进安全物质学研究与应用地开展, 提出安全物质学方法论定义, 论述其学科基础和理论基础。提出安全物质学研究三阶段: 物质安全现象—物质安全规律—物质安全科学, 并阐述其一般研究方法。归纳安全物质学方法论特征, 建立安全物质学方法论六维结构体系, 分别解析各维度内涵。基于此, 以“事前—事中—事后”为主线厘清安全物质学研究的实践程序, 并提炼具体实践方法。研究结果系统化了安全物质学研究的层次思路, 可为安全物质学的研究和应用提供理论指导。

**关键词:** 安全科学; 安全物质学; 物质学; 方法论

**中图分类号:** X91   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2016)04-0011-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.002

安全物质学作为国标《学科分类与代码》中“安全科学技术”一级学科中的二级学科<sup>[1]</sup>, 虽然人们在物质安全性能、安全防护等方面的相关研究已经很多<sup>[2-4]</sup>, 但是从安全学科建设层面出发的研究还很少, 其理论体系长期处于空白状态, 吴超等在文献[5]首次提出安全物质学定义, 分析其内涵, 并构建包括安全物质原理学、物质致灾学、物质功能安全学、人物环交互安全系统学4个学科分支的安全物质学学科框架。

从科学方法论可知, 任何学科理论的研究都离不开对其方法论的研究, 学科理论变革首先依赖于对其研究方法论的变革<sup>[6-8]</sup>。因此, 研究与探讨安全物质学(学科代码62023)<sup>[5]</sup>方法论对该学科的存在与发展显得至关重要。基于此, 本文结合安全科学、安全物质学和方法学, 通过梳理、归纳和总结现有物质安全相关研究方法、步骤、原理, 从方法论的视角出发, 对安全物质学方法论进行系统性的探索, 挖掘并建立安全物质学研究的方法论体系, 并论述其一般实践步骤和具体方法, 以期完善安全物质学理论体系, 促进安全物质学研究与发展。

需指出的是, 本文所研究的“物质”范围是自

然科学视阈下的, 人类生产和生活中接触的物质。

## 1 安全物质学方法论理论基础

安全物质学方法论是关于安全物质学一般研究方法的理论、指导思想和基本原则。内涵如下: ①其专属研究领域是如何选取合适的方法探讨普遍存在于可导致损害物质(致灾物)、可遭受损害物质(承灾物)、可避免或减少损害物质(避灾物)及上述3种物质与人、环境间的能量和信息的交互作用、安全现象及其本质规律; ②安全物质学方法论是为了解决安全物质学理论研究与实践问题而提供的一套关于选择具体方法和程序的思想、原则和步骤的知识体系; ③在进行安全物质学的研究时不能把其研究方法论等同于研究方法, 而应该用完备的安全物质学方法论体系去指导和探讨安全物质学的具体研究方法。

### 1.1 学科基础

安全物质学是以保障人类的身心安全健康为着眼点, 研究物质安全与危险的运动规律, 融贯安全科学与物质学所形成的综合交叉学科, 因此

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-04-21    修回日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51534008); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2016zzts099; 2016zzts458)  
第一作者简介: 黄浪(1990-), 男, 四川泸州人, 博士研究生, 主要从事安全物质学、安全理论模型基础理论研究。

E-mail: 18971185983@189.cn

通信作者: 吴超(1957-), 男, 广东揭阳人, 工学博士, 博士生导师, 主要从事安全科学与工程学科的教学和科研工作。

E-mail: wuchao@mail.csu.edu.cn

具有多层次、综合交叉的学科基础。

(1)安全物质学需要以唯物辩证的观点、实践的观点和发展的观点去认识物质现象、总结物质运动规律,才能确保研究结果的科学性和有效性,才能指导和促进安全物质学的研究与实践活动,因此唯物辩证论是安全物质学的哲学层思想基础。

(2)根据安全物质学学科性质、学科框架、学科分支及研究内容,安全物质学所涉及的基础学科包括安全系统学、安全人机学、安全原理、安全管理学、安全经济学、安全法学、安全心理学、物理学、化学、热学、生物学、环境科学等。上述众多较为成熟的学科为安全物质学的研究提供了坚实的基本原理和知识体系,为安全物质学的工程实践提供了丰富的应用背景和经验借鉴。

## 1.2 方法论理论基础

安全物质学的研究与实践活动本身就是一项复杂的系统工程,其学科主旨是应用系统思想、系统工程的原理和方法,辨识、分析、评价、控制和消除系统中的物质危险有害因素,从而保障系统安全。因此,安全系统思想是安全物质学的核心思想,系统工程方法论是安全物质学研究的方法论基础。

系统工程方法论典型代表是国外学者 Hall<sup>[9-10]</sup>提出的系统工程方法论三维(时间维、专业维、逻辑维)结构体系,其特点是强调明确目标,认为对任何现实问题都必须而且可能弄清其需求,其核心内容是最优化;Chekland<sup>[11-12]</sup>等提出的软系统方法论提供一套系统方法,使得在系统内的成员间开展自由、开放的辩论,从而使各种世界观得到表现,并在此基础上达成对系统进行改进的方案,其核心是比较或学习,即从模型和现状的比较中来改善现状;Hill 和 Warfield<sup>[13]</sup>提出的统一规划方法论,其目的在于实现对大型复杂系统的全面规划。国内学者钱学森<sup>[14]</sup>等人提出关于复杂开放巨系统的定性定量相结合的综合集成方法论;张文泉<sup>[15]</sup>等研究了硬、软系统方法论兼容,自然科学和人文社会科学胶合的广义系统方法论;雷战波<sup>[16]</sup>等对 Hall 方法论进行了改进,提出以环境维为第四维的系统工程方法论结构体系;顾基发<sup>[17]</sup>等提出的“物理-事理-人理”系统方法论是把物理、事理和人理三者巧妙配置,实现系统科学的总体分析、总体规划、总体设计和总体协调,有效利用以解决管理问题的新型系统方法论。此外,吴超在文献[18]中系统地提出和论述了安全科学方法学,为安全科学研究奠定了方法论理论基础。上述系统工程方法论及安全科学方法学为安全物质学方法论研究与构建提供了充分的借鉴和参考。

## 2 安全物质学研究阶段及方法

### 2.1 研究三阶段

按照安全科学、安全科学原理研究范式<sup>[19-20]</sup>,安全物质学的研究可以分为三个阶段(如图1所示),即物质安全现象-物质安全规律-物质安全科学:①物质安全现象是可观测的物质安全或危险状态表象,对应的一些具体方法有观察、实验分析、识别、收集、整理、描述等;②物质安全规律是隐藏在物质安全现象背后的可重复联系,对应的一些具体方法有解释、抽象、归纳、概括等;③物质安全科学是关于物质安全现象与物质安全规律的知识体系,对应的具体方法有比较、公理化、预见预测等。安全物质学研究可以由物质安全现象到物质安全规律,再到物质安全科学,同时所形成的物质安全科学要经得起实践检验,并指导认识物质安全现象。

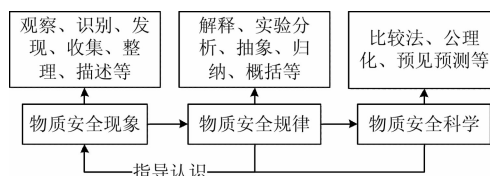


图1 安全物质学研究三阶段

### 2.2 一般研究方法

为了科学地开展安全物质学研究与实践,将安全物质学方法论融入和贯彻到具体的研究与应用工作中。根据科学方法学相关研究与实践<sup>[21-26]</sup>,归纳4条安全物质学的一般研究方法(表1所示),这些研究方法同时也是指导性原则,因为原则不能停留在完全抽象的层次上,而应体现在安全物质学的具体研究与实践活动之中。

## 3 安全物质学方法论体系

### 3.1 安全物质学方法论特征

#### (1)研究方法的多样性与多元化

物质多样性是自然界复杂性的具体体现,是人-物-环系统多样性的基本特征,是安全系统的基本属性之一<sup>[27]</sup>。这些多样性既有物质系统本身具有的多样性,如物质种类多样性、物质结构多样性、物质状态多样性、物质性质多样性、物质运动过程多样性、物质所处时空环境多样性、物质危害多样性、物因事故类型多样性等;又包括人类活动所创造的多样性,如人造物质多样性、人类需求与创造多样性、人类生产过程多样性、生产环境多样性等。上述物质多样性决定了安全物质学研究方法的多样性和多元化。

表 1 安全物质学的一般研究方法

方法	方法解释
相似 - 比较法	通过比较与相似相结合, 如质的比较(反映物质本质属性的某些特征的比较)与量的比较(物质某些数量特征的比较)、静态比较(物质或其属性处于相对静止、相对稳定状态中的比较)与动态比较(物质在时间流中的运动过程中的先后状态、属性的变化)、现象比较(物质的非本质属性的比较)与本质比较(物质稳固的反映内部联系、本质属性的比较)等, 找出不同物质的物理性质、化学性质、存在状态、时空特性、结构特性、功能特性等之间的相似性和相斥性, 得出比较和相似结论, 为物质危害性辨识、分析、评估、控制与管理等提供理论依据。
微观 - 宏观法	微观分析以物质为研究对象, 研究物质的基本属性、安全特性、安全机理、安全能量、致灾机理、救援机理等; 宏观综合以物质所处人 - 物 - 环系统为研究对象, 研究人、物、环交互关系。微观分析与宏观综合相结合是指在人 - 物 - 环系统的整体观对照下建立对物质的微观分析, 综合所有物质微观分析结果建立关于系统整体的描述, 由微观、局部物质的认识获得人 - 物 - 环系统整体的认识, 以达到对人 - 物 - 环系统涌现性的充分认识。
静态 - 动态法	静态分析不考虑物质的原有状态和发展趋势, 只考虑物质在特定时空范围内的现实状况, 完全抽离时间因素, 不关注物质安全或危险状态的具体变化过程; 动态考察将物质放进时间流中, 对致灾、避灾、承灾的实际过程进行分析, 包括所有物质参数、环境参数等在一定时间过程中的变化规律及相互影响规律和彼此制约关系。安全物质学的核心是考察物质安全状态和危险状态的动态转换规律和本质, 涉及时间因素, 这决定安全物质学研究时应将静态分析与动态分析相结合。
定性 - 定量法	定性分析与定量描述相结合就是由安全物质学理论、经验知识等形成和提出定性分析结果(如溶解性、防腐性、导电性、导热性、挥发性、沸点等, 以及可燃性、毒性、腐蚀性、放射性、稳定性、氧化性、还原性、助燃性、热不稳定性、酸碱性、络合性等), 然后采用严密的逻辑推理和精确的物理学方法、化学方法、生物学方法等得出物质的安全阈值(如溶解度、燃点、爆炸极限等)。

### (2) 方法论的指导性与实践性

安全物质学方法论是从个别物质研究方法和研究实验中概括出的共同性思想方法、原则和规律, 在具体实践时不是用“一般”去代替“个别”, 而是为安全物质学研究提供一般性的指导, 使研究者在进行安全物质学研究或实践时更好地发挥主观能动性, 比较自觉地去创造或选择良好的甚至是巧妙的方法。

### (3) 方法论体系的系统性与整体性

安全物质学方法论体系本身就是一个系统, 其对安全物质学研究方法、手段、途径的正确选择与指导就是其系统涌现性的表现。每个维度都具有不同的功能和内涵, 但它们之间不是孤立存在的, 而是环环相扣的, 脱离任何一个维度都将失去对安全物质学的具体研究方法的正确指导。因此, 安全物质学研究方法和方法论体系具有系统性与整体性特征。

### (4) 方法论体系的动态性与开放性

安全物质学方法论体系不是用一套固定化的模式或程序去束缚人们的研究, 而是为安全物质学研究提供思维模式和经验参考。随着科技的发展和进步, 人类在不断地设计、制造各种各样的新物质, 这些新物质的安全或危险特性是未知的, 传统的研究方法可能已经不能适应新物质危险性的辨识、分析、评价、控制和消除, 因此需要根据新物质风险性不断的完善安全物质学方法论体系, 这决定了安全物质学方法论体系的动态性和开放性。

## 3.2 安全物质学方法论六维结构体系

物质存在于一定的时空范围, 是能量和信息的载体, 能量是物质运动的动力, 信息是物质和

能量表达的状态和方式。安全物质学研究需要系统而全面的理论知识, 并按照规定的逻辑思路进行。对比方法论理论基础, 根据霍尔方法论三维结构体系, 结合安全科学方法学, 构建安全物质学方法论六维结构体系, 如图 2 所示。

(1) 时间维: 一切物质的运动都离不开时间的作用, 物质在时间维中产生、存续和消亡, 即物质的生命周期。在不同的生命周期段, 物质具有不同的物理化学性质, 具有不同的安全或危险特性。在进行安全物质学研究时, 要对物质的整个生命周期(包括物质在勘探或设计、开发、生产、加工、转换、运输、分配、储备、使用各个环节中流动的全过程)进行危险性辨识、分析、评价、控制和消除。

(2) 空间维(环境维): 物质作为安全系统的组份之一, 可以分为致灾物、承载物、避灾物, 任何物质(能量、信息)都是处于一定空间范围内的, 其空间关系主要包括物质与物质、物质与人、物质与环境之间的关系, 物质安全状态或危险状态是物质在人 - 物 - 环系统中的整体涌现性表现。此外, 物质的安全或危险状态也可能随着空间位置的改变而改变, 因此, 脱离系统孤立存在的物质失去研究意义。

(3) 能量维: 能量是描写物质安全或危险状态的物理量, 在安全物质学中占有极重要的地位。物质能量主要取决于自身的物理、化学性质, 不同种类(如势能、动能、热能、化学能、电能、辐射能、声能、生物能、光能等)的能量造成人员伤亡、设备破坏和环境破坏的机理不同, 其后果也不相同。安全物质学的一个重点是研究物质能量意外释放的触发条件、能量在环境中的传播方式

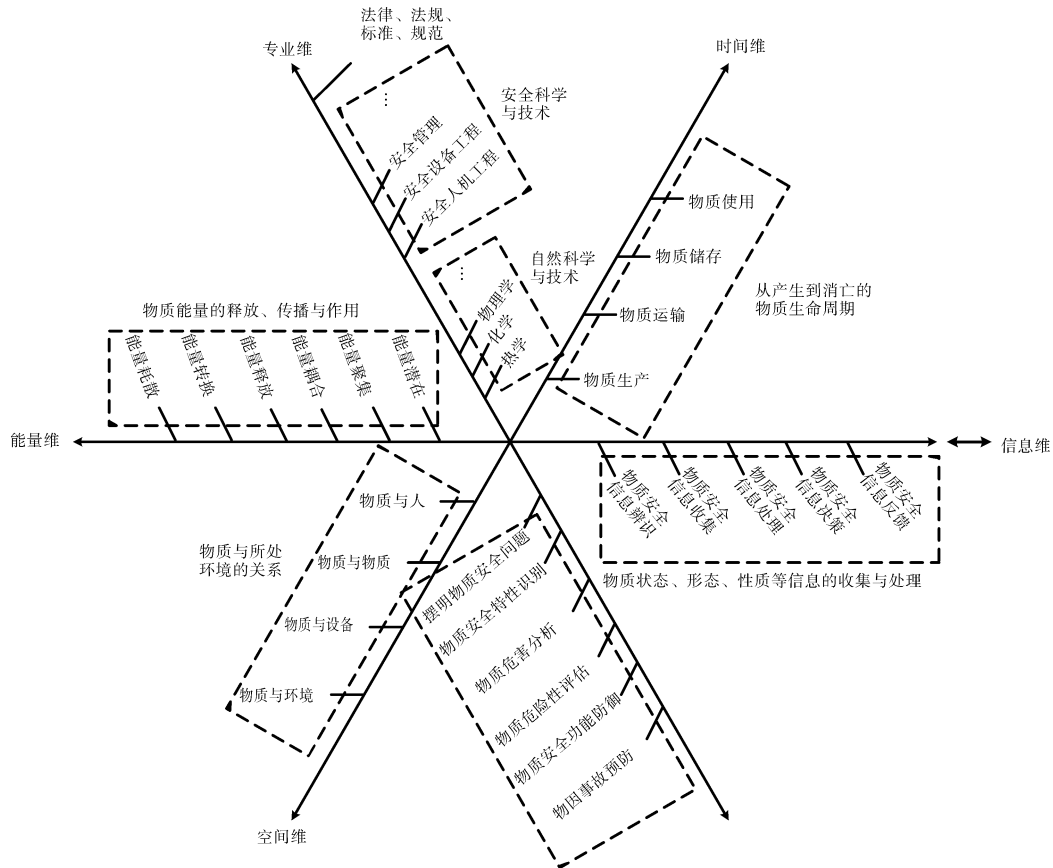


图2 安全物质学方法论结构体系

和途径、能量衰减规律、能量作用方式、能量影响范围和破坏性、能量意外释放地防控措施等。

(4)信息维：信息是自然界普遍联系、相互作用的一种表现形式<sup>[28]</sup>。在物质及能量的运动和转换过程中，会产生大量的信息，这些信息以各种形式(如温度、湿度、压力、流速、转速以及物质自身物理化学特性参数等)在系统中各元素之间、各环节之间以及各子系统之间进行传递和储存，通过对信息的感知、提取、识别、传递、储存、变换、处理和利用，可对物质和能量的安全或危险转换起到重要的标示、导向、观测、警戒和调控的作用。

(5)专业维(知识维)：专业维可理解为安全物质学的学科基础，即安全物质学研究与实践需要储备的知识基础。安全物质学的综合交叉属性，物质形态、种类、特性千变万化，以及物质系统的多样性、复杂性决定了安全物质学研究需要借鉴和利用其他相对成熟学科的基础理论、原理和研究方法。

(6)逻辑维：逻辑维是一种思维过程，既是指导安全物质学研究有序开展的逻辑思维，也是指导安全物质学相关理论应用与实践，对物因事故进行有效预防与控制以实现系统本质安全的步骤和程序。逻辑维可以分为：物质安全问题提出、目标系统选择、系统分析、系统综合、系统优化、方案决策、方案执行以及反馈调整。上述各个步

骤的实施需要及时地反馈与整合，返回到之前的某一个阶段，重新做起，如此反复，直至实现预期的最优系统目标为止。

### 3.3 方法论的实践程序及方法

根据安全物质学方法论六维结构体系的逻辑维思路，按照事故发生发展过程，以事前—事中—事后为主线提出安全物质学方法论实践的一般步骤及具体方法如图3和表2所示。

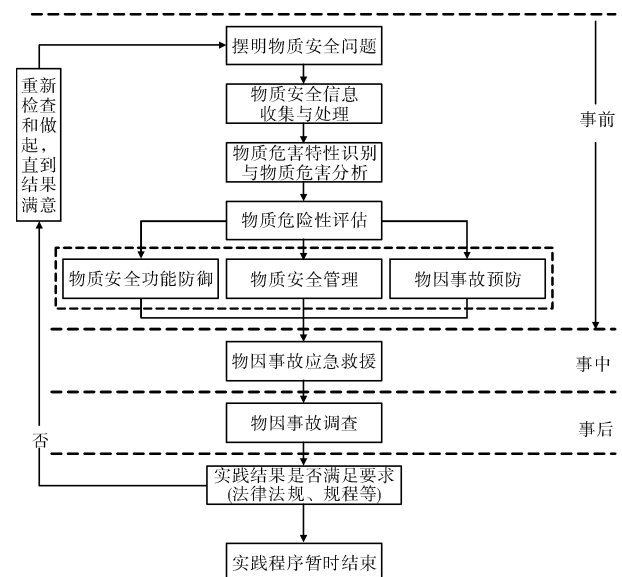


图3 安全物质学的一般研究步骤

表 2 安全物质学实践的一些具体方法

实践程序	具体方法
摆明物质安全问题	明确物质安全问题(如安全、健康、环保等)，并选定目标人-物-环系统。
物质安全信息收集与处理	包括信息的识别、收集(有观察法、实验法、事实调查法、文阅读文献法、访谈法、统计法等)、整理(对大量而琐碎的物质安全信息资料进行处理，使之条理化、系统化，主要有类比、比较、分析、综合、归纳、演绎、抽象和数学方法等)、归纳概括(对某些具有相同属性的物质抽取其共同性，找出共同特征、共同本质，从而对物质信息进行分类，以便决策)等。
物质安全特性识别、物质危害分析	可以通过各种科学与工程实验和实践，同时通过比较法、相似法、观察法、实验法、事实调查法、文文献法等方法，以及感觉、知觉和表象等对物质安全或危险特性进行感性判断和预测(对感性和直觉认识结果进行实验分析、验证)。
物质危险性评估	物质危险性评估是以物质安全特性识别、物质危害分析为前提，是物质安全管理、物质安全功能防御、物因事故预防、物因事故应急救援等的基础。包括定性评估(可采用安全检查表法、作业危险和危害分析(格雷厄姆-金尼评价法、MES 评价法、职工安全程度评价法等)、预先危害分析、故障类型和影响分析、危险性和可操作性分析等)；定量评估(道化学火灾爆炸指数评价法、蒙德火灾爆炸毒性指数评价法、危险度评价方法等)，以及暴露评估、职业病危害评价等。
物因事故预防与物质安全管理	根据物质危险性评估结果，依据物质运动客观规律，对物质理化特性动态发展的趋势或未来做出推测和判断，对物质安全或危险状态发展趋势做出预测，制定有针对性的安全管理措施，主要方法有定性预测、定量预测、技术预测、类比预测、归纳预测、演绎性预测等。
物质安全功能防御	通过缺点列举法(通过全面的列举物质危险特性和危害性、人-物-环系统的安全缺陷，为物质安全功能设计明确方向和重点)、特性列举法(通过分析和列举物质安全或危险特性，对物质或人-物-环系统进行改进，提高安全性能)、希望点列举法(分析、列举所希望达到的功能，然后围绕希望点，对物质或人-物-环系统安全功能进行改进)等。
物因事故应急救援以及事故调查	主要是依据物质危害性和危险评估结果，制定有针对性的物因事故应急救援预案、配备相关应急救援装备，加强物因事故救援保障；对人-物-环系统所涉及到的物因事故，进行有针对性的应急演练等。

4 结论

从科学方法学的视角，进行安全物质学方法论研究，研究结果清晰化和条理化了安全物质学研究的逻辑思路，有利于指导安全物质学研究与实践工作的开展。

(1)提出安全物质学方法论的定义并阐述其内涵，得出安全物质学方法论的学科基础和理论基础。

(2)划分安全物质学研究的三阶段：物质安全现象-物质安全规律-物质安全科学，并归纳和概括安全物质学研究的一般方法，即相似方法与比较方法相结合、还原方法与整体方法相结合、定性判断与定量描述相结合、微观分析与宏观综合相结合、静态分析与动态考察相结合。

(3)论述安全物质学研究方法的多样性与多元化，方法论的指导性与实践性，方法论体系的系统性与完整性、动态性与开放性；建立包括时间维、空间维、能量维、信息维、专业维和逻辑维的安全物质学方法论六维结构体系，并解析各维度内涵。

(4)以“事前-事中-事后”为主线，提出安全物质学方法论的一般实践步骤：物质安全信息收集与处理-物质安全特性识别-物质危害分析-物质危险性评估-物质安全管理-物质安全功能防御-物因事故预防-物因事故应急救援-物因事故调查，并归纳各步骤的具体方法。

参考文献：

[1] GB/T13745-2009 学科分类与代码[S]. 北京：中国质检出版社，2010.

[2] 孙金华，丁辉. 化学物质热危险性评价[M]. 北京：科学出版社，2005：1-97.

[3] 崔克清. 危险化学品安全总论[M]. 北京：化学工业出版社，2007：1-34.

[4] 胡建英，安伟，曹红斌，等. 化学物质的风险评估[M]. 北京：科学出版社，2010：1-49.

[5] 石东平，吴超. 安全物质学的学科体系与研究方法[J]. 中国安全科学学报，2015，25(7)：16-22.

[6] 孙小礼，张增一. 科学方法中的十大关系[M]. 上海：学林出版社，2004：15-21.

[7] 欧阳康. 哲学研究方法论[M]. 武汉：武汉大学出版社，1998：53-54.

[8] E B 威尔逊. 科学研究方法论[M]. 上海：上海财经大学出版

- 社, 1988: 10 – 109.
- [9] 岳志勇, 丁惠. 基于霍尔三维结构的技术创新方法培训体系研究[J]. 科学管理研究, 2013, 31(2): 20 – 24.
- [10] 赵佩华, 张卫国. 论系统工程方法(论)由“硬”变“软”的内在根由[J]. 系统科学学报, 2008, 16(3): 19 – 23.
- [11] Checkland P B. Systems thinking, systems practice[M]. Chichester: John Wiley, 1981: 35.
- [12] Checkland P B. The origins and nature of “Hard” systems thinking [J]. J Appl Syst Anal, 1978, 5(2): 99 – 110.
- [13] 阳富强, 吴超. 安全规划的方法学综述与研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 7 – 14.
- [14] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域 – 开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3 – 12.
- [15] 张文泉, 张世英. 广义系统方法探讨[J]. 决策与决策支持系统, 1994, 4(3): 51 – 60.
- [16] 雷战波, 席西民. 系统工程方法论的四维结构体系[J]. 系统工程理论方法应用, 2001, 10(2): 116 – 121.
- [17] 顾基发, 唐锡晋, 朱正祥. 物理 – 事理 – 人理系统方法论综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 17(16): 51 – 60.
- [18] 吴超. 安全科学方法学[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2011: 33 – 36.
- [19] 吴超, 杨冕. 安全科学原理及其结构体系研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(11): 1 – 8.
- [20] 贾楠, 吴超. 安全科学原理研究的方法论[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(2): 5 – 10.
- [21] 赵光武. 还原论与整体论相结合探索复杂性[J]. 北京大学学报(哲学社会科学版), 2002, 39(6): 14 – 19.
- [22] 马晓彤. 融合整体论与还原论的构想[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2006, 21(2): 125 – 128.
- [23] 黄欣荣. 复杂性科学的方法论研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [24] A Saracino, G Antonioni, G Spadoni. Quantitative assessment of occupational safety and health: Application of a general methodology to an Italian multi-utility company[J]. Safety Science, 2015, 72(2): 75 – 82.
- [25] KwanSeong Jeong, ByungSeon Choi, JeiKwon Moon. Establishment of the hazard reduction methodology to be taken into account for safety assessment during decommissioning of nuclear facilities [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 85(1): 7 – 15.
- [26] Y Nakamori, Y Sawaragi. Complex systems analysis and environmental modeling[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 122(2): 178 – 189.
- [27] 张一行, 吴超. 安全多样性原理研究及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(4): 10 – 15.
- [28] 龙妍. 基于物质流、能量流与信息流协同的大系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

## Study on Methodology of Safety Materials Science

HUANG Lang and WU Chao

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** To perfect the discipline system of safety materials science, guide and promote the research of safety materials science, the definition of methodology of safety materials science is put forward and the theoretical basis is discussed. Then, the research of safety materials science is divided into three phases, that is materials safety, phenomenon-materials safety and law-materials safety science, and its general research methods are argued. The features of methodology of safety materials science are summarized, a six-dimensional structure system of the methodology of materials safety science is founded, and the connotation of each dimension is elaborated. On this basis, the practice steps and methods of safety materials science are put forward by using “before accidents-during accidents-after accidents” as overall thinking. The results show that the hierarchical thinking of safety materials science research is systematized, and the results can provide theoretical guidance for the research and application of safety materials science.

**Key words:** safety science; safety materials science; materials science; methodology