

国家自然科学基金项目 (51504183) 资助

陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2015JQ5132) 资助

陕西省教育厅科研计划项目 (15JK1454) 资助

构建本质安全型煤矿理论与实践

The Theory and Practice of the Construction of
Intrinsic Safe in Coal Mine

高晓旭 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51504183)资助
陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JQ5132)资助
陕西省教育厅科研计划项目(15JK1454)资助

构建本质安全型煤矿 理论与实践

高晓旭 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

全书共分为 10 章,第 1 章主要阐述了煤矿本质安全目前研究背景及意义;第 2 章主要探讨了本质安全相关理论;第 3 章探讨了人本质安全;第 4 章探讨了设备本质安全;第 5 章主要分析环境本质安全;第 6 章依据煤矿危险源辨识相关理论,应用系统工程理论分析煤矿危险源所具有的多层递阶逻辑结构特征,建立了煤矿危险源多层递阶模型;第 7 章根据职业健康安全管理原理,结合职业健康安全管理体系的 17 个要素,建立了煤矿本质安全管理体系;第 8 章根据人一机—环境—管理四个子要素建立了煤矿本质安全评价指标体系,并利用 BP 和小波神经网络评价模型展开分析研究;第 9 章以陕西黄陵一号煤矿为实例研究对象,促进了企业安全的持续改进;第 10 章以危险源信息数字化平台为研究对象,并结合陕西南梁矿业有限公司实际生产情况进行了系统说明。

图书在版编目(CIP)数据

构建本质安全型煤矿理论与实践/高晓旭著. —徐
州:中国矿业大学出版社,2016.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3390 - 5

I. ①构… II. ①高… III. ①煤矿—矿山安全—研究

IV. ①TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 313510 号

书 名 构建本质安全型煤矿理论与实践

著 者 高晓旭

责任编辑 黄本斌

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 12 字数 242 千字

版次印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

安全生产与国家财产、员工生命安全和健康以及整个社会的和谐、稳定、发展息息相关。近年来我国煤矿安全生产工作总体上向好的方向发展,但煤矿安全生产仍存在着许多薄弱环节和深层次问题,形势依然十分严峻。创建本质安全型矿井符合科学发展观理念,也是煤矿发展的必由之路。煤矿井下是一个复杂多变的人—机—环境—管理系统。本书运用“4M”(人—机—环境—管理)系统理论,以煤矿人、机、环境、管理四个单要素和系统整体为研究对象,对煤矿本质安全进行系统分析和研究。

全书分为10章。第1章主要阐述了煤矿本质安全目前研究背景及意义;第2章主要探讨了本质安全相关理论;第3章探讨了人员本质安全;第4章探讨了设备本质安全;第5章主要分析环境本质安全;第6章依据煤矿危险源辨识相关理论,应用系统工程理论分析煤矿危险源所具有的多层递阶逻辑结构特征,建立了煤矿危险源多层递阶模型;第7章根据职业健康安全管理原理,结合职业健康安全管理体的17个要素,建立了煤矿本质安全管理体系;第8章根据人—机—环境—管理四个子要素建立了煤矿本质安全评价指标体系,并利用BP和小波神经网络评价模型展开分析研究;第9章以陕西黄陵一号煤矿为实例研究对象,促进了企业安全的持续改进;第10章主要以危险源辨识为理论基础,隐患管理信息系统为研究对象,并以陕西南梁矿业有限公司为例进行了系统说明。

创建本质安全煤矿是对现有安全管理模式和煤矿安全质量标准化工作的发展和升华。本书研究将煤矿本质安全这一安全管理的新理念系统化,应用于煤矿现场,以期煤矿企业的安全管理提供理论依据及技术支持,为有效提高煤矿安全生产水平做全方位的努力,最终实现煤矿的本质安全目标。

在编写本书的过程中,得到了西安科技大学能源学院的大力支持,同时得到了陕西黄陵矿业集团、陕西南梁矿业公司、榆林杨伙盘煤矿等单位的大力支持,得到了西安科技大学常心坦教授、伍永平教授的支持和帮助,陕西黄陵矿业集团董事长范京道,陕西南梁矿业公司董事长张光耀、总经理付二军,榆林杨伙盘煤矿董事长王飞、总工程师张利军等也给予了热情的帮助和密切配合,研究生张旭、聂尧、李鑫

杰、陈锦瑞、邵广桐做了大量基础工作，西安科技大学董丁稳博士在软件开发过程中做了大量工作，在此一并深表谢忱。

笔者从事煤炭教学和科研工作十余年，本书结合自己科研项目倾心所著，由于知识水平所限，书中谬误之处难免，所提观点有待进一步探讨，恳请同行和有关专家批评指正，本人将不胜感激。

作者

2016年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外发展趋势及其研究现状	4
1.3 本章小结	11
2 煤矿本质安全综合评价理论与方法	12
2.1 综合评价理论和方法	12
2.2 评价指标选取方法	15
2.3 指标隶属函数的建立	22
2.4 本章小结	26
3 人员本质安全	27
3.1 煤矿人员素质现状	27
3.2 人的不安全行为分析	28
3.3 人失误的原因分析	29
3.4 人的可靠性分析	31
3.5 人可靠度计算	33
3.6 人安全性系统模糊状态分析	34
3.7 人本质安全评价指标体系	38
3.8 实例分析	41
3.9 本章小结	42
4 设备本质安全	44
4.1 设备故障及影响因素	44
4.2 设备系统可靠性数据	46
4.3 设备系统本质安全性分析	47

4.4	设备维修性的提高	53
4.5	煤矿机器设备的本质安全	55
4.6	设备本质安全评价指标体系	63
4.7	实例分析	64
4.8	本章小结	65
5	环境本质安全	66
5.1	作业环境	66
5.2	地质环境	70
5.3	本质安全环境评价指标体系	74
5.4	职业安全	77
5.5	实例分析	78
5.6	本章小结	80
6	煤矿危险源辨识及相关理论探讨	81
6.1	危险源理论	81
6.2	煤矿危险源辨识	82
6.3	多层递阶特征分析	89
6.4	基于因素空间理论的煤矿危险源信息表述	91
6.5	煤矿危险源三维多粒度结构模型	92
6.6	煤矿危险源因素空间	94
7	本质安全管理体系的建立	100
7.1	本质安全管理体系的主要内容	100
7.2	本质安全文化	107
7.3	基于层次分析法的煤矿本质安全管理评价	110
7.4	实例分析	114
7.5	本章小结	116
8	煤矿本质安全评价指标与模型	117
8.1	基于 BP 神经网络模糊评价模型	117
8.2	基于小波神经网络的煤矿本质安全评级模型	124
8.3	MATLAB 神经网络工具箱简介	127

8.4	煤矿本质安全综合评价模型	128
8.5	本章小结	129
9	实例应用分析研究	131
9.1	煤矿概况	131
9.2	煤矿本质安全建设状况	134
9.3	本质安全评价	135
9.4	本章小结	145
10	南梁煤矿危险源信息管理系统	147
10.1	系统功能分析	147
10.2	系统设计与工作流程	148
10.3	系统开发相关技术	159
10.4	软件功能及操作	165
10.5	研究效果分析	171
10.6	工作展望	173
	参考文献	174

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

安全生产与国家财产、员工生命安全和健康以及整个社会的和谐、稳定、发展息息相关。随着我国经济进入“新常态”,能源结构全面进入深化改革阶段,“以人为本,安全发展”的理念更是对煤炭工业安全生产工作提出了明确的指示和更高的要求。同时,人民生活水平的不断提高和新《中华人民共和国安全生产法》的实施(2014年12月1日起实施),使得社会各界人士对煤炭安全生产的关注也上升到前所未有的高度。因此,进一步提高安全生产监督检查意识和煤炭安全生产管理水平意义重大。

当前,我国经济的快速增长,对煤炭工业发展提出了更高的要求。为此,必须加强安全生产,确保煤炭工业持续、稳定、健康发展。但煤炭行业是高危行业,高瓦斯和瓦斯突出煤矿占全部煤矿一半左右,煤矿安全是整个工业安全生产工作的重中之重。安全是煤矿生产永恒的主题。煤矿企业具有人员多、作业分散、设备设施多、分布面广、自然条件恶劣、不安全因素多、作业环境复杂、管理困难等特点,工作场所处于不断的变化之中,自然灾害和生产事故的危险因素始终影响和制约着煤矿的安全生产。我国长期坚持贯彻“安全第一,预防为主,综合治理”的指导方针,煤矿事故的频繁发生给国家和人民带来了巨大的经济损失和人员伤亡,争取煤矿安全生产形势的根本好转是全社会、特别是全行业的当务之急。

在我国能源消耗中,煤炭的需求比例最高,它是我国的基础性能源,2014年我国煤炭产量达36亿吨,相比2013年(37亿吨左右)下降2.5%,是十年来第一次下降,估计未来几年内煤炭的能源需求比例会有所降低。但是,煤炭仍将占我国一次能源需求量的64%左右,短期内煤炭的能源主体地位将不会改变。因此,作为我国目前占据能源比例较大的煤炭生产行业其安全生产备受注目。又由于我国煤炭绝大部分属于井工开采,受到人员专业素质、大型技术装备、复杂生产环境、不同管理水平等因素的制约,容易发生煤矿事故,因此,持续改进并努力做好煤炭安全生产管理工作意义重大。据表1-1的数据,2005~2014年煤炭产量总计约304亿吨,

年均约 30.4 亿吨,平均百万吨死亡率 1.06。结合图 1-1 的走势可以看出,2005~2013 年期间随着煤炭产量的逐年攀升,事故死亡率持续下降,2014 年降到最低 0.257,说明近十年我国煤炭安全生产状况持续好转。^[1]据表 1-2 可知,2005 年煤矿百万吨死亡率,中国是美国、印度的 133 倍、11 倍,随后这种差距逐年缩小,特别是 2013 年我国煤矿百万吨死亡率首次低于 0.3,但仍是美国的 10 倍左右,形势不容乐观。

表 1-1 煤炭产量、百万吨死亡率、事故数、死亡人数统计表(2005~2014)

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
年产量/亿吨	21.9	23.25	25.36	26.2	30.5	32	35.2	36.5	37	36
百万吨死亡率	2.811	2.041	1.485	1.182	0.892	0.798	0.564	0.374	0.293	0.257
事故数/起	3 341	2 945	2 421	1 901	1 616	1 403	1 201	779	604	506
死亡人数/人	5 986	4 746	3 786	3 215	2 631	2 433	1 973	1 384	1 067	914

数据来源:国家统计局、国家安全生产监督管理总局发布的有关数据整理。

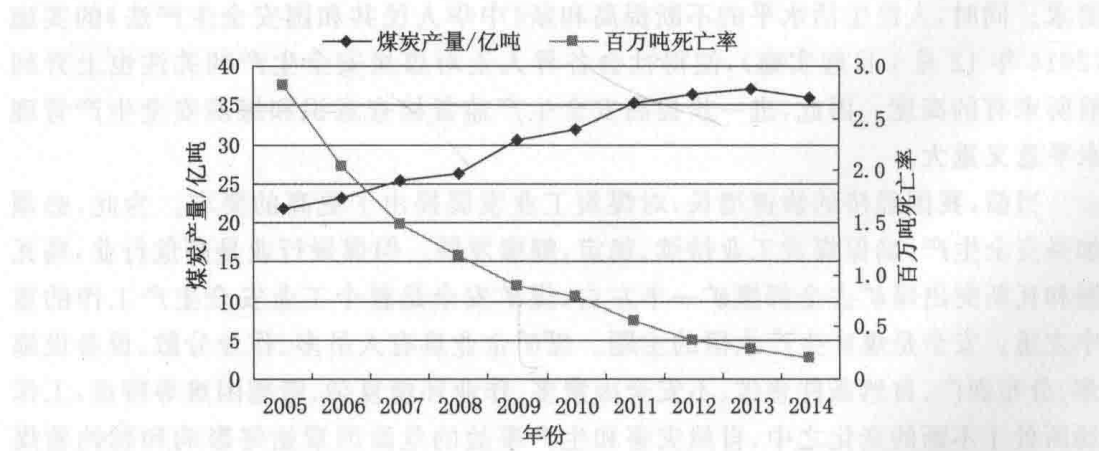


图 1-1 煤炭产量和百万吨死亡率走势图

表 1-2 中国、美国、印度煤矿百万吨死亡率对比统计表(2005~2014)

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
中国	2.811	2.041	1.485	1.182	0.892	0.798	0.564	0.374	0.293	0.257
美国	0.021	0.044	0.032	0.028	0.03	0.049	0.019	0.018	0.021	—
中美差距	133	46	46	42	29	16	29	20	14	—
印度	0.25	0.3	0.27	0.13	0.15	0.16	0.11	—	—	—
中印差距	11	6	5.5	9	5.9	4.9	5	—	—	—

备注:中美差距=中国百万吨死亡率/美国百万吨死亡率;中印差距=中国百万吨死亡率/印度百万吨死亡率;“—”:暂无数据。

经统计,2005~2014年期间,我国发生死亡的煤矿事故16 717起,死亡28 135人,伤亡事故数量总体上呈下降趋势(表1-1)。由于我国煤矿企业受自然条件、生产环境和管理因素影响较大,因此,煤矿灾害事故有其独特性质,但总体具有突发性、破坏性、继发性和援助条件受限等性质。按照事故伤亡性质以及依据煤炭职工伤亡事故统计标准的界定,我国煤矿灾害事故分为顶板事故(冒顶、片帮、冲击地压等)、瓦斯事故(瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出、瓦斯中毒窒息等)、机电事故、运输事故、爆破事故、火灾事故、水害事故和其他事故。这些灾害事故以人一机一环境一管理为载体,以煤岩、瓦斯、煤尘、机械设备、水、火等实体为传播介质,以人员伤亡或财产损失为结果,共同组成煤矿的灾害系统。它与煤炭生产整个过程的时间变化和空间分布紧密联系,是一个危险源普遍存在且具有较强模糊性和随机性的复杂巨系统。

对于煤炭生产行业而言,煤尘等引起的尘肺病危害相当严重,主要特点是慢性致病,相比重大灾害而言,不具有突发性,但是缓慢积累一旦患病,死亡率较高,对工人家庭造成不可估量的损失,因此应受到高度重视。据国家卫生和计划生育委员会官方网站统计数据,2005年我国尘肺病新增4 477病例,来自煤炭行业的比例为48.8%;2010年我国尘肺病新增23 812病例,来自煤炭行业的比例为57.75%。从2015年2月7日《人民日报》获悉:全国尘肺病报告人数已超过72万人,来自煤炭行业的比例为62%。这一数据充分体现了尘肺病在煤炭行业的巨大危害,因此,从根源上预防尘肺病发生十分迫切。

煤矿事故不仅夺走了无数矿工的生命,使遇难家庭、煤矿企业和社会担负沉重的经济压力,甚至已经上升为社会问题、政治问题,后果严重,影响深远。

如何有效遏制重大矿难的发生,是我国煤矿生产当前需要解决的头等问题,本质安全理论就是在这种大环境下提出的,煤矿本质安全是煤矿安全管理的新理念。从20世纪80年代起,我国煤炭行业开展煤矿质量标准化工作,逐步形成了一套比较成熟的安全质量标准化管理办法,煤矿企业在建设本质安全方面也进行了积极的探索和实践,创建煤矿本质安全是对现有安全管理模式和煤矿安全质量标准化工作的发展和升华。

1.1.2 研究目的

煤矿井下是一个复杂多变的人一机一环境系统,“4M”定义由美国航空与宇航局(NASA)制定,“4M”指人(man)、设备(machine)、环境(environment)、管理(management)。本书将运用“4M”系统理论,以煤矿人一机一环境一管理系统为研究对象,通过对人一机一环境一管理各个因素具体深入分析,建立煤矿本质安全评价体系以及评价模型,全面构建煤矿本质型安全系统,为煤矿的安全生产和管理提供依据,全面提高煤矿行业安全生产水平。研究成果对煤矿企业消除事故隐患,预防和控制事故发生,规范和完善各项安全管理制度,改善煤矿的安全生产状况具

有重要的理论价值和实际意义。

1.1.3 研究意义

随着全球经济一体化和国民经济的快速发展,人们对安全的要求不断提高,传统的安全管理模式和方法越来越不适应当前的煤矿安全管理,开展本质安全管理体的研究,建设煤矿本质安全,是加强安全管理,与国际先进管理体系接轨,提高企业竞争力的有效途径,其重要意义主要有:

(1) 开展本质安全研究,是贯彻落实科学发展观和安全发展指导原则,构建社会主义和谐社会的重大举措。建立煤矿本质安全管理体系,是建立在对煤炭工业现状和发展趋势进行深入分析、科学判断的基础上的,既是科学发展观在安全生产工作、煤矿安全领域的具体运用,也是煤炭工业发展的必然选择;既是积极的也是切实可行的。坚持安全发展,就是要把煤矿企业的改革发展建立在安全状况不断改善、劳动者生命安全和健康得到切实保障的基础上,实现人与自然的和谐相处。

(2) 建立煤矿本质安全管理体系是把握工业化进程中安全生产的规律,推动安全生产“五要素”落实到位的重要步骤。本质安全管理的内容是人员本质安全、设备本质安全、环境本质安全和配套的保障措施。这正是安全生产“五要素”落实到位的体现。推广本质安全管理体系就是推动安全生产“五要素”落实到位的具体实施。

(3) 建立煤矿本质安全管理体系是保证煤炭企业具有持续、有力竞争力的必然措施。煤炭企业必须实现本质安全,才能在激烈的市场竞争中立于不败之地。在经济上,安全状况直接决定着煤矿企业的生死存亡,煤矿企业不论其经营规模大小,经济效益好坏,都经不起事故的折磨,只有减少甚至杜绝各种事故,才能创造宽松的安全环境,更好地保证企业健康稳定的发展。

(4) 开展煤矿本质安全研究,是实现煤矿安全生产状况稳定好转的重要手段和途径。我国煤矿事故多发的主要原因是煤矿安全基础脆弱、安全保障水平低、整体防灾抗灾能力差。以人一机一环境一管理系统协调为着眼点,从人员本质安全、设备本质安全、环境本质安全、管理本质安全四个方面消除影响煤矿安全生产的各种因素,可以从根本上减少事故的发生,实现企业的安全生产。

1.2 国内外发展趋势及其研究现状

1.2.1 事故理论研究

20 世纪初期,国内外研究学者提出了多种事故致因理论,如 1916 年由吉布森(Gibson)提出的“能量异常转移”论,1919 年由格林伍德(Greenwood)和伍兹(Woods)提出的“事故倾向性格”论,1936 年由海因里希(H. W. Heinrich)提出的事故因果连锁理论^{[2][3]}。

20 世纪中后期,人们结合系统论、信息论和控制论的观点、方法提出了一些有代表性的事故模型和理论。1969 年瑟利(Surry)提出的瑟利模型,是以人对信息的过程为基础描述事故发生因果关系的一种事故模型;与此类似的理论还有 1972 年威格里沃思(Wigglesworth)的“人失误的一般模型”、1974 年劳伦斯(Lawrence)的“金矿山人失误模型”、1978 年安德森(Anderson)等人对瑟利模型的修正等等。上述理论把人—机—环境作为一个整体(系统)看待,也有人将它们称为系统理论。

动态和变化的观点是近代事故致因理论的又一基础。1972 年本尼尔(Benner)提出了在处于动态平衡的生产系统中,由于“扰动”(perturbation)导致事故的 P 理论;约翰逊(Johnson)于 1975 年发表了“变化—失误”模型;1980 年塔兰茨(W. E. Talance)介绍了“变化论”模型;1981 年佐藤吉信提出了“作用—变化与作用连锁”模型。综合论的事故模型是目前世界上最为流行并被广泛接受的事故理论,我国以及美国、日本等都主张按这种模式分析和处理事故。多年来,许多学者较一致地认为,事故的直接原因不外乎人的不安全行为(或失误)和物的不安全状态(或故障)两大因素作用的结果,即人与物两系列运动轨迹的交叉点就是发生事故的“时空”,“轨迹交叉论”应运而生。我国的安全专家在事故致因理论上的研究方兴未艾,认为事故是多种因素综合造成的,是社会因素、管理因素和生产中危险因素被偶然事件触发而形成的伤亡和损失的不幸事件。事故致因的本质是基础原因。综合论是在我国较为受重视的事故致因理论。事故管理模式以事故理论为基础,它随着人们认识的提高、社会的发展、科技的进步和安全理论的完善不断更新,在实际应用中如杜邦公司以事故为“零”目标的管理模式、马鞍山钢铁公司的“三不伤害”(不伤害自己,不伤害他人,不被他人伤害)管理模式、鞍钢“0123”管理模式、中国石油的“2110”安全管理模式等。

1995 年陈宝智教授在对系统安全理论进行系统研究的基础上,提出了事故致因的两类危险源理论。该理论认为,一起伤亡事故的发生往往是两类危险源共同作用的结果。第一类危险源是伤亡事故发生的能量主体,是第二类危险源出现的前提,并决定事故后果的严重程度;第二类危险源是第一类危险源造成事故的必要条件,决定事故发生的可能性。两类危险源相互关联、相互依存。2001 年西安科技大学田水承教授提出组织失误是第三类危险源,认定第三类危险源是事故发生的根本原因^[4]。

1995 钱新明博士、陈宝智教授提出事故致因的突变模型^[5],以及何学秋教授提出安全科学的“流变~突变”(R~M)理论^[6,7],建立了该理论的物理、数学模型,并对模型的安全意义进行了详细的分析。这两种模型采用系统科学的最新方法研究事故理论,对事故致因进行了深度的剖析和描述。

上述各事故模型大多为逻辑模型,虽然是事故防范工作的理论基础,但无法对事故风险的辨识和控制提供具体的指导,突变模型和流变~突变模型可以对事故

做深入的剖析,是最有发展潜力的事故理论模型,但它们在预防事故的实际应用方面尚需做进一步的研究。

事故的分析理论对于研究事故规律,认识事故的本质,从而对指导预防事故有重要的意义,在长期的事故预防与保障人类安全生产和生活过程中发挥了重要的作用,是人类的安全活动实践的重要理论依据。但是,仅停留在事故分析的研究上,一方面由于现代化工业固有的安全性在不断提高,事故频率逐步降低,建立在统计学上的事故理论随着样本的局限使理论本身的发展受到限制,同时由于现代工业对系统安全性要求不断提高,直接从事事故本身出发的研究思路和对策,其理论效果和管理功能不能满足新的要求。事故是系统运动的一种状态,原因和事故之间的因果关系是系统运动规律决定的一种内在关系,要完整认识系统发生的规律,应该运用系统论,研究系统发生事故的运动的特征^[8]。

1.2.2 安全评价理论研究

风险是一个难以准确把握的概念,国内外关于风险概念的含义众说纷纭,在国外,主要有两大观点^[9,10]:其一是主观风险论,认为风险就是损失的不确定性;其二是客观风险论,认为风险是客观存在的事物,可以用客观尺度加以衡量。

无论是主观风险论,还是客观风险论,二者的共同之处都承认风险是与损失相联系的概念,而都不把积极结果如盈利视为风险。国内学者通常把风险和危险视为同一概念,但在英美著作中,二者区别是非常明显的,risk译为风险,danger译为危险,风险与危险二者间在内涵上存在着差异。危险只是意味着一种现存或潜在的不希望的事件状态,危险发生时会导致不幸事故。而风险用于描述未来不确定的随机事件,不仅意味着可能的不希望的事件状态的存在,更意味着不希望事件转化为事故的渠道和可能性。因此,有时虽然有危险存在,但并不一定会冒此风险。刘茂山认为风险必须具备客观性、社会性、客观不确定性和可经营性四种特性,他认为风险定义为:所谓风险,指生产环境和生产工艺过程中存在着的一种不确定性,其发生可能导致损失,包括人员伤亡、财产损失、环境危害或其组合。

风险、事故和损失是既密切联系,又互有区别的三个内涵不同的概念。风险是发生事故的潜在条件,是发生事故的可能性;事故则是风险发生的可能性变成了现实,是风险由潜在状态变为发生状态的结果;损失是事故造成的后果,有后果必有损失,只是存在损失大小或程度的不同。

20世纪60年代以前,我国风险分析主要限于对自然灾害机理及预测研究,重点调查分析灾害形成条件与活动过程;70年代以后,随着自然灾害破坏损失的急剧增加,促使人们把减灾工作提高到前所未有的高度。我国不少专家对自然灾害风险评估理论和方法进行了日益深入的探讨和总结。高庆华于1991年提出了建立自然灾害评估系统的总体设想^[12],黄崇福于1991年提出了自然灾害风险评价的模型体系^[13]。

风险评价也叫安全评价或危险性评价,首先在 20 世纪 30 年代出现于保险行业,当时保险业采用安全评价的目的与生产系统的安全评价不同,但是却为后续的产业安全管理和评价工作指明了技术方向。人类自产业革命以来,在生产、生活活动中,在创造巨大财富的同时,也伴随着各种危险,特别是第二次世界大战后,工业化进程加快,工业生产系统日趋大型化和复杂化,尤其是化学工业,在生产规模和产品种类迅速发展的同时,生产过程中的火灾、爆炸、有毒有害气体泄漏和扩散等重大事故不断发生,推动了对企业、装置、设施和环境等安全评价的开展。20 世纪 60 年代进入了全面、系统地研究企业装置和设施的安全评价原理和方法的历史阶段。1964 年美国道化学公司根据化工企业使用的原料的物理、化学性质,生产中的特殊危险性,考虑具体工艺处理过程中的一般性和特殊性之间的差别以及物量等因素的影响,以火灾、爆炸指数形式评价化工生产系统的危险程度,形成了经典的道火灾爆炸指数评价方法。随着航天、航空和核工业等高技术的迅速发展,20 世纪 60 年代后期,以概率风险评价(PRA)为代表的系统安全评价技术得到了研究和开发。英国在 20 世纪 60 年代中期建立了故障数据库和可靠性服务咨询机构,对企业开展概率风险评价工作。随后又开发出一系列以概率论为理论基础的有特色的安全评价方法,最常用的有可靠性分析法(HRA)、故障分析法(FTA)、事件分析法(ETF)、危险可操作性研究(HAZOPS)、初始危险分析(PHA)、管理失效与风险分析(MORT)等^[9-14]。

随着现代科技的迅速发展,特别是数学方法和计算机科学技术的发展,以模糊数学为基础的安全评价方法得到了发展和应用,并拓展了原有的方法和应用范围,如模糊故障树分析、模糊概率法等方法及应用计算机专家系统、决策支持系统、人工神经网络技术对生产系统进行实时、动态的安全评价,使其进入了更广阔的应用领域。

1.2.3 本质安全理论研究

在本质安全概念明确提出之前,就有与此概念非常接近的概念,也就是所谓“可靠性”。可靠性工程最主要的理论基础——概率论早在 17 世纪初由伽利略、高斯等人建立起来,后来马尔科夫创立了随机概率论,这是可修复系统最重要的理论基础。可靠性工程另一门主要的理论基础——数理统计在 20 世纪 30 年代形成。

本质安全(intrinsic safety or inherent safety)概念提出距今已过半个世纪,该概念源于 20 世纪 50 年代世界宇航技术界,主要是指电气系统具备防止可能导致可燃物质燃烧所需能量释放的安全性(the safety of electrical systems in preventing energy release which might cause flammable substances to ignited)^[17-33]。

国外,本质安全理论近年在各个领域有了较大发展,1993 年美国化工安全中心(CCPS)出版了《生产安全工程设计导则》(Guidelines for Engineering Design for Process Safety),该书介绍了本质安全设计方法,强调了实现生产安全的最佳

方法是在设计初始阶段考虑安全因素。1994 年 CCPS 成立了本质安全生产分委员会,将本质安全作为重要议题进行了讨论。1996 年米歇根科技大学的 Dan Crowl 教授出版了《本质安全的化工生产:生命周期方法》(*Inherently Safer Chemical Process: A Life Cycle Approach*)。该书重点阐述了如何在整个化工生产过程的生命周期中使用本质安全设计的基本原理。

近年来,CCPS 还与美国废物减少技术中心(the Center for Waste Reduction Technologies,CWRT)共同出版了《安全健康环境应是生产设计不可缺少的组成部分》(*Making EHS an Integral Part of Process Design*),强调本质安全应与预防、绿色化学等一起综合考虑。此外,CCPS 还开展了安全与化学工程教育项目(safety and chemical engineering education,SACHE)。SACHE 项目的主要内容包括:为化工专业学生开发生产安全和本质安全方面的教材,资助本质安全研究。2001 年 10 月,美国 107 个、加拿大 10 个、其他国家 6 个研究机构或大学作为会员加入了 SACHE 项目中。

除 CCPS 外,美国化学工程师协会(American Institute of Chemical Engineers)、国家安全委员会(National Safety Council)、美国化工协会(American Chemical Society,ACS)、环境保护署(Environmental Protection Agency,EPA)等机构都积极促进本质安全理论研究和应用。

美国道化学公司(Dow chemical)、埃克森化学公司(Exxon chemical)、联合碳化物公司(Union carbide)等也积极发展本质安全的工艺、产品和评价方法。

加拿大化工学会(Canadian Society for Chemical Engineering,CSCE)、加拿大化工生产商联合会(Canadian Chemical Producers' Association,CCPA)及许多公司和组织也积极促进本质安全理论的研究、推广和应用。

欧盟为促进本质安全理论在化工工艺开发和设备设计中的应用,进一步改进化工企业在安全、健康、环境保护方面的绩效,于 1994~1997 年间组织有关研究机构和企业,开展了化工工厂本质安全设计方法研究项目(inherent safety approaches to the design of chemical process plant)。该项目主要目的是提高欧盟各成员国化工企业的本质安全、健康和环境保护绩效,通过开发一套化工生产本质安全环境保护绩效评价指标体系和化工工艺本质安全评价方法,促进本质安全方法的推广应用。

在国内,关于对本质安全的研究开展得并不晚,其前身是 20 世纪 50 年代关于电子产品的可靠性研究,但在学术上明确提出本质安全概念应是在 20 世纪 90 年代,此后关于本质安全研究如雨后春笋,有大量的学术论文发表,其中有相当篇幅是针对本质安全概念的,几乎研究本质安全的行业都有自己对本质安全含义的界定。现仅列举一些具有代表性的本质安全定义。

(1) 我国石油行业对本质安全的定义

所谓本质安全是指通过追求人、机、环境的和谐统一,实现系统无缺陷、管理无漏洞、设备无故障。实现本质安全企业,要求员工素质、劳动组织、装置设备、工艺技术、标准规范、监督管理、原材料供应等企业经营管理的各个方面和每一个环节都要为安全生产提供保障。

(2) 我国交通体系对本质安全的理论

本质安全理论认为由于受生活环境、作业环境和社会环境的影响,人的自由度增大,可靠性比机械差,因此,要实现交通安全,必须有某种即使存在人为失误的情况下也能确保人身及财产安全的机制和物质条件,使之达到“本质的安全”。

(3) 我国电力行业对本质安全的界定

本质安全可以分解为两大目标,即“零工时损失,零责任事故,零安全违章”长远目标;“人、设备、环境和谐统一”终极目标。

(4) 我国煤炭行业所说的“本质安全”

“煤矿本质安全”是电气领域“本质安全”概念在煤矿生产系统的进一步延伸,很多学者对其内涵进行了讨论。

2001年初,徐州矿务集团有限公司率先在煤炭行业提出创建煤矿本质安全的目标,总结凝练了本质安全核心理念是力求通过“人、物、系统和制度”四大要素的高度和谐统一,实现“在任何时间、任何地点不因人的不安全行为或物的不安全状态而发生事故”的目标。即人按规程操作,杜绝违章,物或设备在动态或静态状态下始终安全运行,系统实现“人机互补、人机制约”,制度不断规范,最终实现生产过程的管理零缺陷、零事故的本质安全目标。

2002年,同济大学赵朝义博士运用人的行为理论、人机工程学及可靠性理论,对煤矿人一机一环境系统的本质安全进行了系统的分析和研究^[17],提出了煤矿本质安全定义与煤矿人、机、环境本质安全措施和方法。他认为煤矿本质安全是指将本质安全的内涵加以扩大,已不是单纯指设备构造的本质安全设计,而是指在一定的技术经济条件下,煤矿具有相当的安全可靠性,具有完善的预防和保护功能,具有良好的安全文化和安全氛围,以及科学的安全管理体制,使事故、灾害降低到规定的目标或可接受的程度。

2005年,李瑞敬、王东江认为本质安全管理就是采取一定的技术、教育和行政等手段,使人自身重视安全,使机器、材料、环境等在任何非人为状况下,不会出现不安全因素,不会对人产生伤害的一种安全管理方法、手段和理念^[18]。

2007年许正权提出本质安全可划分为以下三个层次^[19]:

I型本质安全阶段,即基本安全阶段。处于该层次的本质安全主要指标是技术、设备可靠,环境安全。

II型本质安全阶段,即规范安全阶段。处于该层次的本质安全主要指标是达到行为规范、技术规范、管理规范、法律规范,更为重要的一点是人应该满足以下要