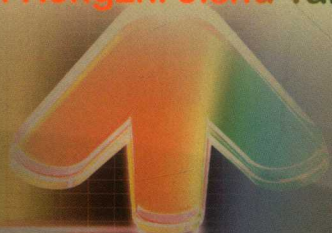


国家科技支撑计划项目 (2007BAK29B02) 资助
山西省自然科学基金项目 (2006011047) 资助
山西省科技攻关项目 (200631118-02) 资助
太原市科技项目大学生创新创业专项 (09122036) 资助

采空区顶板垮落空气冲击灾害的 理论及控制技术研究

邢平伟 / 著

Caikongqu Dingban Kualuo Kongqi Chongji Zaihai De
Lilun Ji Kongzhi Jishu Yanjiu



中国矿业大学出版社

国家科技支撑计划项目(2007BAK29B02)资助

山西省自然科学基金项目(2006011047)资助

山西省科技攻关项目(200631118-02)资助

太原市科技项目大学生创新创业专项(09122036)资助

采空区顶板垮落空气冲击灾害的 理论及控制技术研究

邢平伟 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以煤矿采空区顶板大面积垮落引起的空气冲击灾害为研究对象,采用数学物理模型、实验室模拟和现场实践研究的方法,对采空区顶板垮落空气冲击灾害理论及控制技术进行研究。构建了采空区顶板力学模型;研究了顶板垮落过程中采空区、巷道风速和风压的发生机理及演变规律;进行了实验室模拟,验证了顶板垮落-空气耦合冲击规律的一致性;建立了不同顶板垮落形式下空气冲击灾害对巷道人员及设备的损伤和损坏模型,给出了巷道内人员损伤及设备损坏的判则;依据具体的现场工程背景,提出了采空区顶板大面积垮落所导致的空气冲击灾害的防灾工程设计方法与减灾控制措施,通过现场控制实践,验证了实际的防灾减灾效果。

本书可供从事煤矿安全生产及管理工作的企业安全生产管理部门、工程技术人员、科研人员以及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

采空区顶板垮落空气冲击灾害的理论及控制技术研究/
邢平伟著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2966 - 3

I. ①采… II. ①邢… III. ①采空区—顶板事故—空气—灾害—研究 IV. ①TD327.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298625 号

书 名 采空区顶板垮落空气冲击灾害的理论及控制技术研究

著 者 邢平伟

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 9 字数 154 千字

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

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

我国煤炭储量丰富,在常规化石能源中,煤炭资源占 90% 以上,储采比远高于石油和天然气。目前已标明的煤炭保有储量超过 1 万亿 t,可采储量在 1 100 亿 t 以上。以煤炭为主的资源禀赋及其经济性,决定了煤炭在我国的能源构成中长期占有主导地位。预计到 2020 年,煤在一次能源中的占比仍高达 60%,到 2050 年,煤炭所占比例不会低于 50%。可以预见,在今后相当长的时间内,煤为基础仍是我国能源供给的基本格局。煤炭工业在国民经济中的基础地位,将是长期的和稳固的,具有不可替代性。煤炭资源的安全高效开发对我国国民经济的快速、平稳和可持续发展具有十分重要的战略意义。

顶板事故是煤矿的五大主要灾害之一,而煤矿采空区顶板大面积垮落又是顶板事故中最危险的一种表现形式。采空区顶板在短时间内大面积垮落,不仅因自身重力产生严重的冲击破坏,而且更加严重的是把已采空间的空气在瞬间高速压出,形成空气冲击灾害,造成严重的人员伤害和设备损坏等后果。纵观我国煤矿历次顶板大面积垮落引起的空气冲击灾害事故,其致灾的根本原因都是因为对煤矿顶板大面积垮落引起的动力冲击现象研究不够,对其灾害发生的机理和规律没有形成系统的科学预测理论和判据,难以提出实用有效的预警措施和防灾工程设计依据,以便在实践中科学地指导煤矿采空区顶板大面积垮落引起的空气冲击灾害的防治工作。因此,非常有必要对采空区顶板大面积垮落引起的空气冲击灾害进行更加深入的理论基础与现场防治实践研究,以实现我国煤炭工业的健康安全发展。

本书以煤矿采空区顶板大面积垮落引起的空气冲击灾害为研究对象,采用数学物理模型、实验室模拟和现场实践研究的方法,对采空区顶板垮落空气冲击灾害理论及控制技术进行研究。构建了采空区

顶板整体切落力学模型、O-X形断裂垮落力学模型以及房柱式开采顶板整体切落力学模型;研究了顶板垮落过程中采空区、巷道风速和风压的发生机理及演变规律;进行了实验室模拟,验证了顶板垮落-空气耦合冲击规律的一致性;建立了不同顶板垮落形式下空气冲击灾害对巷道人员及设备的损伤和损坏模型,给出了巷道内人员损伤及设备损坏的判则;依据具体的现场工程背景,提出了采空区顶板大面积垮落所导致的空气冲击灾害的防灾工程设计方法与减灾控制技术措施,通过现场控制实践,验证了实际的防灾减灾效果。

本项目得到了国家科技支撑计划项目(2007BAK29B02)、山西省自然科学基金项目(2006011047)、山西省科技攻关项目(200631118-02)、太原市科技项目大学生创新创业专项(09122036)等资助。

本项目从研究思路的形成到研究方法和技术路线的确定,从理论建模、实验台设计研制到实验方案的制订和现场测试,以及本书的撰写全程,均承蒙太原理工大学采矿工艺研究所宋选民教授及时的启发、悉心的指导和无私的帮助。在此,谨以此书向宋选民教授表达最崇高的敬意和诚挚的感谢。同时,对长期关心和支持本项目研究的各位专家、学者和工程技术人员表示由衷的感谢,对为本书出版工作给予支持和帮助的单位和个人表示感谢。本书参考和引用了许多学者的观点和研究成果,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏和不足,敬请同行专家和学者批评指正。

作 者

2015年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究的目的地意义	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 顶板断裂垮落机理的研究现状	3
1.2.2 顶板大面积垮落引起空气冲击灾害的研究现状	5
1.3 研究内容与研究方法	10
1.3.1 主要研究内容	10
1.3.2 研究方法	11
1.4 研究思路与技术路线	11
2 采空区顶板垮落-空气耦合冲击的理论研究	14
2.1 引言	14
2.2 采空区顶板垮落-空气耦合冲击的力学模型	15
2.2.1 全部切落-整体运动型顶板垮落空气冲击的理论模型	15
2.2.2 O-X形顶板垮落空气冲击的理论模型	22
2.2.3 房采采空区顶板垮落空气冲击的理论模型	29
2.3 采空区顶板垮落空气冲击灾害的理论预测	34
2.3.1 活鸡兔井 1-2 煤层顶板整体切落的空气冲击预测	34
2.3.2 活鸡兔井 1-2 ^上 煤层与霍洛湾矿 2 [#] 煤层采空区 顶板垮落的空气冲击预测	40
2.4 本章小结	52
3 采空区顶板垮落空气冲击的实验研究	54
3.1 实验装置与监测设备	54
3.1.1 相似比的确定	54
3.1.2 实验装置设计	55
3.2 顶板垮落空气冲击的实验方案与实验测试过程	57

3.2.1	实验方案	57
3.2.2	实验测试过程	58
3.3	采空区顶板整体垮落空气冲击实验的结果分析	59
3.3.1	顶板整体垮落冲击风速测试结果及采空区速度场分析	59
3.3.2	顶板垮落空气冲击巷道风速实验数据及结果分析	65
3.4	顶板垮落空气冲击实验结果与理论预测结果的比较分析	71
3.4.1	巷道口风速比较分析	72
3.4.2	巷道内风速比较分析	72
3.5	本章小结	73
4	采空区顶板垮落空气冲击灾害的危险评价研究	75
4.1	采空区顶板垮落空气冲击灾害研究的重点	75
4.2	采空区顶板垮落空气冲击灾害的评价理论	75
4.2.1	井下人员损伤的理论分析	75
4.2.2	巷道设备损坏的理论分析	79
4.2.3	巷道密闭墙损坏的理论分析	81
4.3	采空区顶板垮落空气冲击的灾害评价算例分析	83
4.3.1	井下人员损伤的算例分析	83
4.3.2	巷道设备损坏的算例分析	92
4.3.3	巷道防灾密闭墙损坏的算例分析	94
4.4	本章小结	105
5	采空区顶板垮落空气冲击灾害的控制实践及应用	107
5.1	顶板大面积垮落空气冲击灾害的现场控制概述	107
5.2	活鸡兔井 1-2 煤层顶板垮落空气冲击灾害的现场控制实践	108
5.2.1	活鸡兔井 21303 工作面顶板强制预裂爆破方案设计	109
5.2.2	活鸡兔井 21303 工作面顶板强制爆破初次来压 灾害预防的效果分析	114
5.2.3	活鸡兔井 21303 工作面顶板强制爆破空气冲击 灾害预防的效果分析	115
5.3	霍洛湾矿房柱式开采采空区顶板垮落空气 冲击灾害的控制实践	115
5.3.1	霍洛湾矿房柱式开采采空区密闭墙的方案设计	116
5.3.2	密闭墙的受载分析	116

目 录

5.3.3 密闭墙的强度校核	117
5.3.4 霍洛湾矿房柱式采空区顶板岩层破坏状态 监测方案设计及实施	118
5.4 本章小结	120
6 研究结论与展望	122
6.1 主要结论	122
6.2 不足与展望	123
参考文献.....	124

1 绪 论

1.1 研究的目 的及意义

我国是世界上煤炭储量最为丰富的国家之一,开采和利用煤炭的历史悠久,为世界上其他国家所不及。长期以来,煤炭在我国的能源构成当中占有十分重要的比例。《中国可持续能源发展战略》研究报告指出,到 2010 年煤炭在一次性能源生产和消费中将占 60%左右,到 2050 年煤炭所占比例仍不会低于 50%。因此可以预见,煤炭工业在我国国民经济中的基础地位,将是长期的和稳固的,具有不可替代性。煤炭工业的安全高效开采对我国国民经济的稳定快速发展具有十分重要的意义。

顶板大面积来压造成的冲击灾害在世界范围的各类矿山多有发生,是矿山生产中不容忽视的灾害之一。如前苏联库茨涅克、顿巴斯矿区以及印度的浅埋煤层矿区,我国的大同、神东和北京等矿区,以及多座金属、石膏矿山,均有顶板大面积冒落动力现象发生,形成采场和巷道内的空气冲击(飓风)灾害。对煤矿而言,顶板大面积来压作为一种重要的矿压现象,又是煤矿的主要灾害之一。据相关文献统计,仅近 30 年来,大同煤矿区发生的顶板大面积来压事故就有 27 次之多^[1-5]。

更值得注意的是 21 世纪以来,随着国家经济的加速发展,对能源的需求大幅度增加,特别是 2003 年至今,全国范围内出现大面积的煤荒和电荒,一定程度上要求能源的龙头——煤炭企业实现超常规的跨越式发展。在这种形式下,

全国大规模地改扩建和新建大型现代化矿井,采用引进和国产的先进技术装备,大规模地开展高产高效的煤炭资源开采工作,以满足国民经济发展的需要。为了实现高产高效,新建和改扩建的大型现代化矿井多采用超长工作面(220~300 m)和超长推进长度(1 500~3 500 m)的高新技术支持的现代综合机械化装备进行工作面开采,并且推进度非常快,可以达到 20~35 m/d。由于采用超长工作面和超大推进长度的布置参数,使用高产快速推进技术,从而使工作面的顶板垮落形式表现出与以往截然不同的性质。以往属于缓慢释放、频繁多次垮落的顶板,在采空区面积达到几万甚至几十万平方米情况下趋向转化为急速地、超范围的大面积垮落来压的动力冲击现象,因此可能给煤矿井下人员及设备和设施造成极大的冲击灾害威胁。倘若是坚硬难冒顶板,这种情况就更为突出^[6-10]。此外,短壁工作面的连续开采技术,在开采完成后由于工艺要求必须留设少量煤柱的隔离采空区或支撑顶板,也将会形成大面积的采空区,采空区顶板不能实现缓慢有序的垮落,而形成安全威胁,当采空区超过面积极限时,顶板大面积来压垮落造成非常大的冲击载荷和超乎寻常的空气冲击波载荷,给工作面、采(盘)区巷道乃至整个矿井的人员、设备设施造成伤害及损坏。实践中一般采用各种仪器进行观测和预报,以及用“堵”和“泄”的方法来预防顶板大面积垮落造成的空气冲击危害^[11-17],这是矿山防治顶板空气冲击灾害的重要措施,但这种办法相对比较被动,并且效果不是很好。

这些生产实践中出现的新问题,都严重地影响煤矿的安全生产,给国家造成经济损失。究其根本原因,均因为对煤矿顶板大面积垮落引起的动力冲击现象研究的深度不够,对顶板大面积垮落-空气耦合冲击灾害发生的机理和规律没有形成系统的科学认识,难以提出实用有效的预警预测理论和进行防灾工程设计方法及科学依据,以在实践中科学地指导矿井的顶板大面积垮落空气冲击灾害工作。因此非常有必要对顶板大面积垮落引起的空气冲击灾害进行更加深入的理论与实践研究,以实现我国煤炭工业的健康顺利发展。

1.2 研究现状

采场顶板动力冲击控制方面的研究,一直是国内外采矿学科的难题。国内

外的许多专家、学者在此方面进行了大量的理论研究,对其引起的灾害预警与防治也进行了一些有益的初步探索与实践。

1.2.1 顶板断裂垮落机理的研究现状

国内外很多专家和学者对顶板大面积来压的相关研究主要侧重于顶板断裂和垮落机理,以及顶板失稳的监测与预警方面。如:

靳钟铭教授等^[18-20]针对顶板大面积来压机理进行了研究,认为顶板发生大面积来压的原因主要是支撑顶板的煤柱被损坏,而发生大面积来压的范围主要取决于顶板的厚度或刚度、分组厚度以及岩体强度,并给出了预测顶板大面积来压的计算公式,利用实例进行了检验,理论与实践具有较好的吻合度。

窦林名等^[21-26]针对顶板大面积来压灾害进行了研究,认为顶板大面积来压是由坚硬岩层大面积冒落而形成的。这些岩层一般为厚层的整体结构,岩体中层理、结构和裂隙均不发育。这些坚硬岩层有的直接覆于煤层上方,有的在煤层之间夹有一薄层强度较小的岩层,由于直接覆于煤层上方顶板的岩层坚硬,在工作面初采时,工作面顶板初次破断步距可以达到 50~70 m,甚至 100 m。为避免初次来压危害,常采用房柱式或刀柱式进行回采,但随着采空区面积的增加,支撑煤柱会由于风化作用及长期受载而发生蠕变,丧失支撑能力,导致顶板大面积垮落;并从实践角度给出了煤柱支撑面积与采空区面积之比低于 30% 时,易发生顶板大面积来压的结论。

钱鸣高等^[27-32]对基本顶岩层断裂形式进行了研究,认为工作面上方的基本顶如同支承在煤柱上的“板”一样,而“板”的断裂对工作面中部及上、下部的顶板压力影响是不一样的,并且研究了各种不同支承条件下基本顶岩层的初次破断形式。根据模型试验及实测资料研究了基本顶的断裂过程、条件以及断裂的形式。认为基本顶断裂的形式可以分为横 X 形、X 形及竖 X 形破坏,只有基本顶呈横 X 形破坏时,工作面中部才可以采用“砌体梁”的理论进行矿山压力研究,而对于其他情况则必须用“板”的破坏理论进行矿山压力研究。

浦海等^[33]针对采场顶板 X-O 形断裂形态进行力学分析,认为采场顶板的

破断形态与采场来压、瓦斯抽放、地下水运移、地表沉陷等均有密切关系。并建立了四边固支顶板的弹性薄板力学模型,利用里茨法理论分析顶板断裂形态的产生机理,得出了顶板发生破坏以及破坏延伸、转移的规律。利用 ANSYS 软件对顶板的空断形态进行三维数值模拟,得到顶板的空断 X-O 形断形态。

朱德仁等^[34-36]针对顶板来压及其控制进行研究,将长壁工作面上覆基本顶视为位于 Winkler 弹性基础上的 Kirchhoff 板。通过对主结构块的受力、活动与平衡的分析,指出在坚硬顶板条件下,工作面矿山压力显现的主要特征是来压时具有较强烈的冲击载荷,造成直接顶大面积垮落和支架的严重损坏。而且,冲击载荷的强烈程度与基本顶断裂线至工作面煤壁的相对距离有关,断裂线愈向煤壁内深入,冲击载荷愈缓和,基本顶稳定性愈高。

宋选民等^[37-39]针对神东煤炭公司大柳塔煤矿活鸡兔井 21303 综采工作面上层采空区顶板突然大规模垮落对下层顶板及支架的突然冲击问题,采用动量定理、动量矩定理、达朗伯原理推出了顶板垮落瞬间的运动量及顶板切顶垮落所需要的剪力值计算公式,并采用 ANSYS LS DYNA 程序对顶板垮落过程进行了数值计算,得到了最大冲击力。在大柳塔煤矿活鸡兔井 21303 综采工作面顶板垮落特征进行了实际观测和理论成果验证,理论分析、数值计算及工程实测结果相辅相成。研究不但解决了大柳塔煤矿活鸡兔井 21303 综采工作面上层顶板突然大规模垮落对下层顶板及支架的突然冲击问题,而且也对矿山开采过程中类似的问题提供了理论指导。

熊仁钦^[40-41]提出主动防治顶板大面积垮落的基本原理是减小悬顶面积和能量聚集。具体手段:一是通过高压注水改变顶板岩层的物理力学性质,降低岩体的力学强度;二是通过强制放顶等手段来改变顶板的力学条件,减小工作面顶板初次来压和周期来压步距。

连清旺^[42]基于矿压控制理论,分析了采场顶板和巷道围岩的矿压显现影响因素的数量变化特征以及与各种状态的关系,采用模糊数学理论构建了采场顶板和巷道围岩的多因素灾害综合预警模型,研制出矿井顶板状态的智能监测及预警软件,并应用于 KJ232 矿井顶板状态与灾害预警系统,实现矿井采场顶板与巷道围岩监测系统的智能预警功能。系统增加了顶板岩层结构、采场风流压

强和巷道围岩破裂的声发射监测,并与平巷监测融为一体,综合判断工作面周围顶板围岩总体所处的安全和灾害状态。现场应用证明,该系统监测预警反应迅速,可敏锐地捕捉到顶板灾害的临界预兆信息,灾变预警趋势符合顶板断裂运动的来压显现和巷道围岩失稳破坏实际。

1.2.2 顶板大面积垮落引起空气冲击灾害的研究现状

关于顶板大面积垮落引起空气冲击灾害的系统性研究文献并不多见,相关研究主要集中于金属、石膏矿,仅有少量文献针对煤矿矿山顶板进行了研究。文献主要研究顶板垮落引起的空气冲击灾害的发生机理,少数研究涉及冲击空气在采场与巷道的传播规律以及对巷道设备的损坏和人员的伤害,提出了预警与防灾减灾措施。关于冲击气体冲击流动的规律研究主要集中于煤矿瓦斯爆炸、金属矿山以及军工炸药爆炸文献^[43]。如:

熊仁钦^[40-41]针对大面积冒顶产生的暴风破坏机理进行研究,把采空区简化成一个很大的扁平容器,工作面两端的平巷简化成容器底部两个小孔,利用理想气体的伯努利方程导出了工作面平巷的暴风流速计算理论公式,并得出平巷风速随顶板厚度的增大而增大的变化关系,利用牛顿平板阻力公式求出了平巷暴风对巷道设备的冲击力。

宋选民等^[44-46]依据神东煤炭公司活井 21[±]303 旺采工作面的布置与开采情况,参照 1-2[±]煤层的顶板赋存结构条件,建立了旺采采空区飓风冲击灾害的理论预测模型及其灾害程度的预测评价模型,分析预测了 1-2[±]煤层顶板在采空区整体切落时现有采空区飓风灾害的程度,并从利用抗弯、抗剪及抗挤压三个方面对现场实施的防灾工程的安全程度进行了校核。

顾铁凤和宋选民^[47-48]针对矿山开采过程中采空区突然性的、大规模的、顶板垮落所引起的飓风对煤壁、巷道及采场工作人员的冲击灾害问题,采用理论分析及工程实践方法,用能量守恒观点和气体动力学理论,推出了飓风冲击周围煤壁及巷道时的冲击载荷及总压力,建立了飓风对煤壁及巷道的冲击破坏的评价体系,为预防矿山顶板大规模垮落所引起的飓风冲击灾害及采场工作人员抗灾能力的提高提供了理论依据。工程实践证明,在防灾工程设计中将顶板大规模垮落及伴随的飓风冲击作为关联的灾害系统分析,防灾效果更好。并基于

牛顿第二定律和空气动力学原理,分析了矿山开采中突发性的顶板垮落所伴随的飓风冲击灾害,建立了封闭采空区条件下顶板垮落-空气冲击的耦合模型,讨论了差分数值解法。借助数值解研究了封闭采空区条件下顶板块体运动速度的变化规律、冲击过程的作用时间,以及采空区和工作面两端巷道内压缩空气风流的速度变化规律。

邢平伟等^[49-52]以神华集团神东矿区的开采地质条件为工程背景,分析了大采高超长工作面顶板垮落所伴随的飓风灾害,建立了顶板整体切落-空气冲击灾害耦合模型,并讨论了差分数值解法。借助数值解分析了飓风发生过程中采场顶板高度及采空区面积对飓风速度的影响变化规律。得出采场顶板飓风灾害理论预测公式以及采场顶板高度和采空区面积越大,飓风风速越大,冲击破坏性越严重的结论。

息金波^[53]在深入研究采场顶板动力冲击机理的基础上,利用流体力学理论和能量理论,建立了反映顶板大面积垮落时的动力冲击和采场压缩空气冲击气浪灾害并存的数学物理模型,给出了运输平巷与回风平巷中形成的飓风流速的理论计算公式,以及处于暴风中的物体所受的作用力的理论计算公式;对柱式体系采煤法中留设煤柱的受力情况进行了分析,给出了煤柱合理尺寸的计算公式,并特别说明顶板大面积垮落引起飓风灾害的计算公式在壁式体系采煤法中同样适用;在进行了大量理论分析的基础上,运用数值模拟软件——ANSYS 中的流体动力学模块 FLOTRAN 提供的流体分析功能对采空区顶板垮落引起的飓风灾害进行了数值模拟,建立了采空区顶板块体垮落的三维模型。

李志军^[54]针对华北地区一般情况采空区顶板大面积垮落的空气冲击灾害,建立了顶板 O-X 形垮落伴随的飓风灾害的预测理论模型,给出了大规模顶板 O-X 形垮落伴随的飓风灾害的差分解法,预测了空气飓风冲出巷道时在巷道中的瞬时速度,并考虑巷道的摩擦阻力,给出了巷道中飓风速度的理论计算公式和冲击载荷的计算公式。

马砺等^[55-60]在分析采空区气体冲击特性的基础上,建立了采空区永久密闭的力学模型,并对密闭结构进行了防灾设计。分析了密闭结构在气体冲击作用下的受力状态,并对其力学参数进行了校核。利用三维有限差分软件,对永久密闭的强度进行了验算,为采空区密闭墙的设计提供了借鉴。

郑学敏^[61]基于狮子山铜矿生产中密闭墙的架设情况,进行了大型采空区井下密闭的设计研究,分析了密闭墙的载荷作用特点,提出了密闭墙的结构要求、井下密闭墙的位置的选择原则以及密闭墙的设计与施工依据。

王来等^[62-67]针对地下通道中空气冲击波的传播规律开展研究,通过试验得到了空气冲击波在巷道直角拐弯处的传播衰减系数。同时应用流体网格法进行了数值模拟,获得了通道直角拐弯前后空气冲击波传播的波形图和流场图。得出了空气冲击波通过直角转弯后,其衰减系数在 1.2~1.3 之间的结论;通过数值计算得出了一些试验无法获取的过程性规律,如冲击波的完整传播过程;从超压流场图可以看出空气冲击波在遇到转弯前角时,首先发生绕射,遇到后壁时会发生强烈的反射,再次经过前角的时候,还会发生复杂的作用。试验和数值研究结果一致,可以为防护工程或煤矿企业设计防波、泄波设施提供更加精确的理论依据。

庞伟宾等^[68-78]建立了可以对高能炸药在坑道内爆炸空气冲击波到时进行预计的计算公式,公式中主要考虑了炸药质量、炸药和坑口的相对位置、坑道直径和冲击波在坑道内的传播距离等因素。认为:空气冲击波到时沿坑道传播是随着距离的增加而增加;炸药在坑口内爆炸时,空气冲击波的走时曲线基本上不随 R 的变化而变化,而炸药在坑口外爆炸时,空气冲击波的走时曲线会随 R 的变化而变化。公式适用于爆点在固定横截面的直通道口外、口内和口部爆炸三种情况情况。利用该公式可以研究空气冲击波在坑道中传播速度的变化规律。

李铮等^[79-84]为了研究在空气冲击波作用下人的安全距离问题,进行了梯恩梯炸药爆炸情况下动物(羊、狗、兔)受损情况的试验。根据试验求出了空气冲击波在各种爆炸条件下的传播规律。通过对炸药爆炸事故中人员伤亡情况的调查以及对动物试验数据的分析,得出了人员在空气冲击波作用下的安全距离。

季惠龙等^[85]针对某矿 31-1# 矿体采空区暴露面积大和采高较高的条件,在其下部有一定的资源需要进行回采,空区一旦冒落,将对其下部工作人员和设备造成巨大危害的情况,对采空区稳定性、冒落形式进行现场调查,并结合现场实际,建立了采空区顶板冒落危害的预测模型,并就该矿采空区顶板围岩大面

积冒落和零星冒落进行了危害性预测,在预测的基础上,提出了该矿预防顶板灾害的相应措施。

郑怀昌等^[86]基于采空区顶板冒落过程中冒落岩体与空气相互作用的能量守恒与转化原理,建立了冲击气浪风速预测模型,并设计制作了模拟实验测试装置进行实验,结果表明,随着采空区顶板下落高度的增加,冲击气浪的速度增加幅度略有减缓。因此得出结论,认为采用大断面空间小尺寸的“打气筒”模型可以更好地反映冒落过程中的气体流动过程,表征冲击起浪应该采用“打气筒”和“绕流”的复合模型。

郑志辉等^[87-88]针对地下空间顶部塌落产生高压气浪的问题进行了理论分析,提出了利用一维 Lagrange 黏性差分格式的方法,建立了一个有效的计算高压气浪的模型,并利用模型对空腔的底部压力和风速变化规律进行了计算和分析,得出了矿顶冒落在腔底形成的压缩波为高压气浪,腔底压缩波的最大压力随着空隙率的增大按二次抛物线规律减小,腔底的最大风速可以近似按自由落体规律计算的结论。

宋选民等基于近年来采场顶板大面积垮落所形成的空气冲击灾害的频发性与严重性情况,在总结以往研究结果的基础上,用矿压理论与流体力学理论的分析方法,论证了长壁采场空气冲击灾害发生的客观条件、灾害模式、研究的重点内容、解决问题的途径以及最新研究进展等问题。得出的主要结论有:采场空气冲击灾害的发生条件与灾害模式存在差异;顶板垮落的空气冲击灾害过程存在着共性,过程中需要考察冲击时间、灾害程度以及防治与防灾工程设计等问题;应当运用非稳态可压缩流体的理论来研究这些问题。

(1) 研究的最新进展

① 文献基于采空区顶板整体垮落的空气冲击飓风灾变数学物理模型及理论研究,给出了采空区顶板整体垮落过程结束时刻采场及工作面平巷空气冲击飓风速度的计算公式,其中采场风速计算公式即

$$v_1 = \sqrt{2gM - \frac{2(V_0 + ML_1L_2)p_1 \ln(1 + ML_1L_2/V_0)}{\rho_d L_1 L_2 h_1}} \quad (1-1)$$

式中 ρ_d ——顶板岩层的密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$;

L_1, L_2, h_1 ——顶板块体的长、宽和厚度, m;

M ——采高(顶板最大跨落高度), m;

V_0 ——空气冲击灾害结束时采空区与巷道体积, m^3 ;

p_1 ——灾变初始采空区静压强, MPa。

② 研究认为采空区顶板垮落引起的空气冲击(飓风)速度服从非线性的变化规律,存在着临界时间拐点,即采空区空气冲击飓风因顶板与压缩空气耦合作用,空气冲击速度并不是一直遵循线性正比增加规律(灾害越来越严重),而是在临界时间点后逐渐减弱。

③ 研究得出了顶板飓风灾害的历程比按照自由落体下落时间长的结论。说明采空区空气与顶板的耦合作用延长了顶板空气冲击飓风灾害的时间,使后期灾害威胁变小。

④ 研究依据采空区顶板块体-气体耦合冲击数力模型,应用差分数值解法求出了空气冲击飓风灾害在特定采空区条件下,随垮落顶板的长度、厚度和宽度以及下落高度等参数变化与巷道内飓风速度的内在变化关系规律。

⑤ 研究中应用数值模拟的方法,给出了特定条件下采空区飓风冲击灾害的发生和发展规律,给出了采空区和工作面平巷内的压强、风速分布状况。

(2) 研究中存在的主要问题

顶板大面积垮落引起空气冲击飓风灾害的研究虽然开展多年,但仍主要局限于采空区顶板断裂和垮落机理方面,探讨顶板自身重力原因对采场支架支撑能力的影响规律,而对因采空区顶板大面积垮落引起的空气冲击飓风灾害威胁的研究并不是很多见,仅有少数文献涉及,而且没有系统的研究成果,尤其极少提及空气冲击防灾工程设计的相关内容。

具体如下:

① 研究主要针对采空区顶板整体垮落形式下的空气冲击灾害进行,对因为具体的赋存条件以及不同的开采方法表现出不同的垮落形式下采空区顶板空气冲击灾害理论与控制实践研究不足。

② 大量文献只孤立地分析采空区顶板垮落冲击的计算和采空区空气的压力变化,而未将顶板与受压空气作为一个关联的灾害系统,建立不同垮落形式下的物理力学模型,并分析空气冲击灾害的过程变化规律,获得采空区顶板动