



# 综采工作面复杂条件下 人与环境关系及安全性研究

景国勋 周 霏 段振伟 等 著



科学出版社

# 综采工作面复杂条件下 人与环境关系及安全性研究

景国勋 周 霏 段振伟 等 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书针对综采工作面复杂条件下人与环境关系及安全性进行了详细研究。分析了综采工作面复杂条件下人与环境关系及安全性研究的背景,总结了国内外矿井作业环境对作业人员心理、生理指标影响的研究现状,阐述了综采工作面复杂环境条件下人与环境关系及安全性研究对煤矿安全生产的重要意义。对综采工作面环境对人体的影响进行了理论研究,包括综采工作面主要环境因素对人体的生理影响和心理影响。通过数值模拟和试验研究了综采工作面温度、湿度、噪声、照度等因素对作业人员影响的规律,以及作业时间对人员影响的规律。建立了综采工作面作业人员可靠度模型;基于生理指标的安全劳动时间计算模型,构建了煤矿作业人员生理指标安全预警系统,为减少人因失误、提高作业人员可靠度和煤矿安全管理水平提供理论基础和科学依据。

本书可供煤矿企业管理人员及职工阅读参考,也可作为安全工程、采矿工程专业的研究生和本科生及安全管理人员、生产技术和研究人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

综采工作面复杂条件下人与环境关系及安全性研究 / 景国勋等著. — 北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060060-8

I. ①综… II. ①景… III. ①综采工作面-人-机系统-安全评价-研究 IV. ①TD802

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 285829 号

责任编辑: 刘 冉 宁 倩 / 责任校对: 杜子昂  
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 北京图阅盛世

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年3月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 21 3/4

字数: 440 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 本书编写人员

景国勋 周 霏 段振伟

李 辉 高志扬 程 磊

贾智伟

## 作者简介



**景国勋** 1963年生，教授，博士生导师，国务院政府特殊津贴专家，国家安全生产专家，国家煤炭行业“653工程”安全管理首席专家。曾任河南理工大副校长、中原经济区煤层气（页岩气）河南省协同创新中心主任，现任安阳工学院院长。《国际职业安全与人机工程杂志》（*JOSE*）编委，《安全与环境学报》编委，《安全与环境工程》编委，《科技导报》编委。

主持国家自然科学基金、省（部）级及企业委托课题40余项，出版著作、教材等10余部，发表论文170余篇。曾获“中国煤炭工业十大科技成果奖”1项，中国煤炭工业企业现代化管理部级优秀成果奖一等奖1项，河南省科技进步奖二等奖2项、三等奖4项，煤炭部科技进步三等奖1项；获河南省高等教育教学成果奖特等奖1项、一等奖1项。荣获中国青年科技创新优秀奖，中国科学技术发展基金会孙越崎科技教育基金“优秀青年科技奖”，河南省优秀中青年骨干教师，河南省跨世纪学术及技术带头人，河南省创新人才，河南省杰出青年科学基金，河南青年科技创新奖杰出奖，河南省高等学校教学名师奖，中国煤炭工业技术创新优秀人才，河南省优秀专家，河南省优秀共产党员，河南省高等学校优秀党员，河南省高等教育十大突出贡献人物，改革开放40周年影响河南十大教育人物等荣誉。

# 前 言

由于综采工作面环境复杂，对井下作业人员生理、心理产生较大的影响，进而导致人因失误，诱发事故，所以煤矿安全工作十分注重综采工作面人与环境关系研究。虽然人们已经意识到综采工作面人与环境关系对安全生产的重要性，并开展了相关的研究，但是偏重于对综采工作面环境的研究，对于人与环境耦合关系的研究较少，人因失误导致的事故还时常发生。

我国煤炭资源总量 5.97 万亿吨，其中 1000 m 以下占 53%，深部开采条件下的高温、高湿、高压、高瓦斯等日趋严重，深部开采环境条件日益恶劣。目前，大多数作业人员的失误是由综采工作面温度高、湿度大、噪声大、照明不佳、作业空间狭窄等造成的，而煤矿事故中 80% 左右是由人的因素造成的。虽然煤矿综采工作面环境已经有较大的改善，但是人因失误导致的事故仍有发生，说明还有许多本质的东西未被认识，对综采工作面人与环境关系的研究还存在许多问题亟待解决。

为了有效地改变目前的这种状况，必须应用现代科学理论和新技术以及多学科交叉，发展和完善已有的理论和技术，以求综采工作面人与环境关系及安全性研究取得新的突破。

综采工作面环境所包含的温度、湿度、噪声、照度等因素极大地影响作业人员的生理和心理，进而降低作业人员可靠度，导致事故的发生。因此，只有发现和掌握综采工作面各环境因素对作业人员影响的规律，才能准确地判定人因失误的原因，科学地预防人因失误。由此看来，针对综采工作面环境因素影响作业人员生理和心理指标的机理、不同因素（温度、湿度、噪声、照度）对作业人员的影响规律及作业人员的可靠度模型的研究具有十分重要的理论价值和实际指导意义，可以有效提高作业人员可靠度，减少人因失误，预防煤矿生产事故的发生。

本书系统研究了综采工作面环境温度、湿度、噪声、照度等主要因素对作业人员的影响，在此基础上基于安全预警理论建立了煤矿作业人员生理指标预警系统。书中主要采用理论分析、数值模拟和试验研究的方法，得出关于综采工作面人与环境关系及安全性的结果。首先，对综采工作面不同因素对作业人员生理、心理指标影响进行理论分析；其次，进一步进行数值模拟和试验研究，通过对综采工作面温度、湿度、噪声和照度进行模拟，得出各环境因素呈现的规律；再次，搭建试验平台，通过试验研究各单因素对作业人员生理指标的影响，进而分别对

单因素和多因素对作业人员生理指标的影响进行数值模拟，得到作业人员生理指标与安全劳动时间的关系，建立基于功能函数的人的可靠度模型；最后，在理论研究和数值模拟以及试验研究的基础上，基于大数据思想，构建煤矿作业人员生理指标安全预警系统。

本书由河南理工大学景国勋教授、周霏博士、段振伟博士主笔，李辉副教授、高志扬博士、程磊副教授、贾智伟副教授参加相关章节的撰写，全书最后由景国勋教授统稿。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目“综采工作面复杂环境下人-环关系与安全性研究”（项目编号：51474098）的资助，在此表示感谢！另外，本书的出版得到了科学出版社的大力支持和帮助，在此表示由衷的感谢！本书引用了大量参考文献，对所有参考文献的作者表示真诚的感谢！

在课题研究过程中，王远声博士和雒赵飞、张峰、赵攀飞、吕鹏飞等硕士参与了有关工作，在此一并表示感谢！

由于著者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正！

著 者

2018年10月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 温度场、湿度场、噪声场数值模拟	3
1.2.2 矿井作业环境对作业人员生理、心理指标的影响	4
1.2.3 作业人员的可靠性分析	8
1.2.4 安全预警研究	10
1.3 本书的主要内容	13
第 2 章 综采工作面环境对人体影响基本理论	16
2.1 综采工作面主要环境因素	16
2.1.1 温度	17
2.1.2 湿度	17
2.1.3 噪声	17
2.1.4 照度	18
2.2 综采工作面环境对人体生理影响综述分析	19
2.2.1 安全生理学概述	19
2.2.2 综采工作面作业人员个性特征	20
2.2.3 综采工作面作业人员生理特征	22
2.2.4 综采工作面环境对作业人员生理的影响	23
2.3 综采工作面环境对人体心理影响综述分析	26
2.3.1 安全心理学概述	26
2.3.2 综采工作面环境对作业人员心理的影响	27
2.4 小结	29
第 3 章 综采工作面环境场数值模拟	30
3.1 综采工作面温度环境数值模拟	30
3.1.1 高温矿井综采工作面热环境分析	30

3.1.2	综采工作面热源与对流换热系数的确定	33
3.1.3	综采工作面热环境数值模拟	36
3.1.4	模拟结果及分析	41
3.1.5	试验验证	47
3.2	综采工作面湿度环境数值模拟	48
3.2.1	综采工作面湿度环境分析	48
3.2.2	综采工作面湿度模拟结果及分析	49
3.3	综采工作面噪声环境数值模拟	52
3.3.1	综采工作面噪声概况及声源介绍	52
3.3.2	综采工作面噪声场模拟	54
3.3.3	模拟结果及分析	57
3.3.4	试验验证	61
3.4	综采工作面照明环境数值模拟	62
3.4.1	DIALux 适用性分析	62
3.4.2	煤矿巷道照明模拟	64
3.4.3	模拟结果分析	67
3.5	小结	70
<b>第 4 章</b>	<b>温度对人影响的试验研究</b>	<b>72</b>
4.1	试验设计	72
4.1.1	选择温度为单一变量	72
4.1.2	温度范围和试验时间的确定	72
4.1.3	受试者选择	72
4.1.4	试验平台搭建	73
4.1.5	试验仪器选择	73
4.2	试验过程	74
4.3	数据分析	75
4.3.1	试验数据整理预处理	75
4.3.2	单因素方差分析	75
4.3.3	不同温度条件下的曲线拟合	78
4.4	讨论	82
4.5	小结	83
<b>第 5 章</b>	<b>噪声对人视觉认知影响的试验研究</b>	<b>84</b>
5.1	视觉认知随噪声暴露时间变化的试验设计	84
5.1.1	受试者	84
5.1.2	试验材料	84

5.1.3 试验仪器 .....	85
5.1.4 试验设计与程序 .....	88
5.1.5 视觉认知评价指标的选择 .....	89
5.2 视觉认知随噪声暴露时间变化的数理分析 .....	90
5.2.1 数据分析方法 .....	90
5.2.2 试验数据处理 .....	93
5.2.3 结果与分析 .....	94
5.2.4 讨论 .....	104
5.3 视觉认知随噪声暴露时间变化的规律分析 .....	104
5.3.1 试验数据处理 .....	104
5.3.2 结果与分析 .....	105
5.3.3 结果讨论与噪声防护对策 .....	111
5.4 小结 .....	112
<b>第 6 章 噪声对人注意力影响的试验研究</b> .....	<b>114</b>
6.1 试验方法 .....	114
6.1.1 受试者 .....	114
6.1.2 试验装置 .....	114
6.1.3 试验材料 .....	114
6.1.4 试验步骤 .....	115
6.1.5 试验数据处理 .....	115
6.2 试验结果及分析 .....	116
6.2.1 描述性统计 .....	116
6.2.2 方差分析 .....	116
6.2.3 Tukey HSD 多重比较 .....	117
6.2.4 均值分析 .....	118
6.2.5 出错次数与超时次数分析 .....	118
6.3 讨论 .....	119
6.4 小结 .....	119
<b>第 7 章 噪声对人行行为影响的试验研究</b> .....	<b>120</b>
7.1 试验方法 .....	120
7.1.1 受试者 .....	120
7.1.2 试验装置 .....	120
7.1.3 试验材料 .....	121
7.1.4 试验步骤 .....	122
7.1.5 试验数据处理 .....	123

7.2	试验结果及分析	124
7.2.1	描述性统计	124
7.2.2	相关性分析	124
7.2.3	线性回归分析	125
7.2.4	平均反应时与出错次数统计分析	126
7.2.5	可靠度分析	126
7.3	讨论与结论	127
7.3.1	讨论	127
7.3.2	结论	128
7.4	小结	128
<b>第8章</b>	<b>照度对人影响的试验研究</b>	<b>129</b>
8.1	照度对人视觉识别性的影响	129
8.1.1	试验设计	129
8.1.2	试验过程	131
8.1.3	试验数据分析	131
8.1.4	讨论	136
8.1.5	结论	136
8.2	照度对人反应时间及操作可靠度的影响	137
8.2.1	试验设计	137
8.2.2	试验过程	138
8.2.3	试验数据分析	138
8.2.4	讨论	142
8.2.5	结论	143
8.3	小结	143
<b>第9章</b>	<b>作业时间对人影响的试验研究</b>	<b>145</b>
9.1	试验设计	145
9.1.1	所选综采工作面概况	145
9.1.2	现场实测	146
9.1.3	受试者选择	147
9.1.4	试验仪器选择	148
9.1.5	试验流程	148
9.2	血压随工作时间的变化规律研究	148
9.2.1	试验过程	148
9.2.2	数据分析	148
9.2.3	讨论	160

9.2.4 结论	161
9.3 心率随工作时间的变化规律研究	161
9.3.1 试验过程	161
9.3.2 数据分析	162
9.3.3 讨论	168
9.3.4 结论	169
9.4 体温随工作时间的变化规律研究	169
9.4.1 试验过程	169
9.4.2 数据分析	169
9.4.3 讨论	173
9.4.4 结论	174
9.5 小结	174
第 10 章 综采工作面环境对人的综合影响研究	176
10.1 试验准备	176
10.1.1 试验平台	176
10.1.2 受试者	177
10.1.3 测量工具介绍	177
10.1.4 调查问卷	179
10.2 试验方案与试验过程	179
10.2.1 试验方案	179
10.2.2 预处理	180
10.2.3 试验过程	181
10.2.4 多因素环境试验设计	184
10.3 单因素环境影响分析	186
10.3.1 数据的处理与分析	186
10.3.2 温度与各生理心理指标的回归模型	187
10.3.3 湿度与各生理心理指标的回归模型	193
10.3.4 噪声与各生理心理指标的回归模型	199
10.3.5 照度与各生理心理指标的回归模型	205
10.4 多因素环境影响分析	211
10.4.1 数据的处理与分析	211
10.4.2 多元线性回归	212
10.4.3 收缩压与多环境因素的回归模型	213
10.4.4 舒张压与多环境因素的回归模型	215
10.4.5 心率与多环境因素的回归模型	216

10.4.6	呼吸率与多环境因素的回归模型	218
10.4.7	体温与多环境因素的回归模型	220
10.4.8	率压积与多环境因素的回归模型	221
10.4.9	疲劳度与多环境因素的回归模型	223
10.4.10	试验结果分析	225
10.5	多因素模型验证	226
10.6	小结	228
<b>第 11 章</b>	<b>综采工作面不同环境条件下作业人员可靠度模型研究</b>	<b>229</b>
11.1	传统人的可靠度模型	229
11.1.1	人子系统的可靠度计算模型	230
11.1.2	量化作业工人作业环境的安全区域、潜在危险区域、危险区域	231
11.2	基于功能函数的作业人员作业可靠度模型	234
11.2.1	功能函数与极限状态方程	234
11.2.2	人的可靠度	235
11.2.3	基于蒙特卡罗模拟法的可靠度计算	236
11.3	人的可靠度求解中的蒙特卡罗法	239
11.3.1	模型分析	239
11.3.2	模型建立	240
11.3.3	建模结果与分析	242
11.4	小结	244
<b>第 12 章</b>	<b>综采工作面作业人员生理指标实测与安全劳动时间</b>	<b>245</b>
12.1	矿井基本情况	245
12.1.1	井田位置与范围	245
12.1.2	矿井开采与开拓	246
12.1.3	主采煤层	246
12.2	生理敏感指标分析	246
12.2.1	敏感指标分析原理介绍	246
12.2.2	综采工作面作业人员生理指标的测定	249
12.2.3	井下作业人员生理指标显著性分析	250
12.2.4	生理指标敏感性分析	251
12.3	井下作业人员安全劳动时间	253
12.3.1	GM (1,1) 预测模型	253
12.3.2	生理指标随工作时间变化模拟分析	255
12.3.3	井下作业人员安全劳动时间确定	265
12.4	小结	266

---

第 13 章 煤矿作业人员生理指标安全预警系统 .....	267
13.1 矿井安全预警系统综述 .....	267
13.1.1 矿井预警系统概述 .....	267
13.1.2 安全预警的主要功能 .....	269
13.1.3 考虑矿井环境特殊性的预警模型 .....	271
13.2 Hadoop 数据自动收集与存储架构 .....	272
13.3 作业人员生理指标预警系统 .....	274
13.3.1 预警系统简介 .....	274
13.3.2 预警系统设计 .....	274
13.4 可靠度预警系统在煤矿中的应用 .....	285
13.4.1 井下作业人员信息收集与录入 .....	285
13.4.2 可靠度预警系统应用 .....	287
13.5 系统优化功能介绍 .....	290
13.5.1 预警模型优化 .....	290
13.5.2 数据预处理 .....	291
13.6 小结 .....	293
参考文献 .....	294
附录 A POMS (心境状态量表) .....	316
附录 B 作业人员可靠度计算代码 .....	318
附录 C MATLAB 程序代码 .....	321
附录 D 作业人员作业环境预警系统建设方案 .....	327

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景和意义

### 1.1.1 研究背景

煤炭作为我国主要能源之一，在国民经济中占有非常重要的地位。相对于石油和天然气，煤炭在储量和生产成本等方面都占有很大的优势。通过国家统计局的统计数据分析发现<sup>[1-4]</sup>，一次电力及其他清洁能源的比重虽然有所升高，但受国情的影响，远远不能满足国民需求。在我国一次能源结构中，煤炭能源消耗所占的比例仍有 60%以上，仍占据最重要地位，并且在相当长的一段时间内，我国仍将保持以煤炭为主的能源结构不会改变<sup>[5-11]</sup>。2007~2016 年我国一次能源消费结构比例如图 1-1 所示。

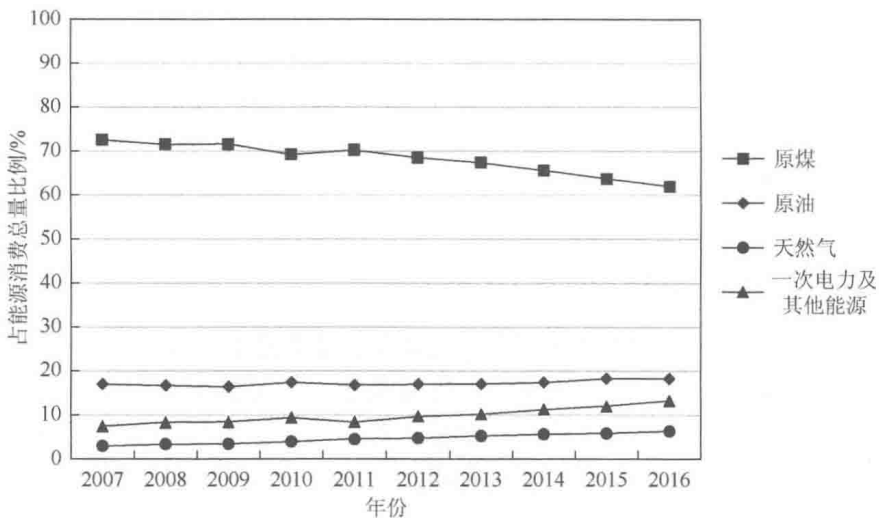


图 1-1 2007~2016 年我国一次能源消费结构比例

进入 21 世纪以来，我国的经济建设取得了飞速的发展，井下作业人员的煤矿安全生产意识在逐步增强。但随着开采强度的不断增加，地质条件越发复杂，煤矿的作业环境也更加恶劣。此外，由于工作时间长、劳动强度大，且作业场所存在粉尘、噪声、湿度等其他有害因素，对作业人员的身体健康造成了极大危害，

为煤炭企业的安全生产带来严峻挑战。2007~2016年煤矿事故死亡人数及百万吨死亡率如图 1-2 所示。从图中可以看出,近十年来百万吨死亡率和煤矿事故死亡人数呈下降趋势,安全形势逐年好转。据调查,2016年我国煤矿的百万吨死亡率为 0.156%,而世界其他主要产煤国家,如美国煤矿的百万吨死亡率保持在 0.02% 左右,澳大利亚煤矿的百万吨死亡率低于 0.02%,甚至多年未出现人员伤亡事故。其他发展中国家,如南非煤矿百万吨死亡率也多年处于 0.1 以下。印度的伤亡事故也得到了有效的控制,近些年来,百万吨死亡率也保持在 0.2% 以下。由此可见,虽然我国煤矿安全生产水平有所提高,但与世界其他主要产煤国家相比还存在很大差距,安全形势依然不容乐观<sup>[12-19]</sup>。

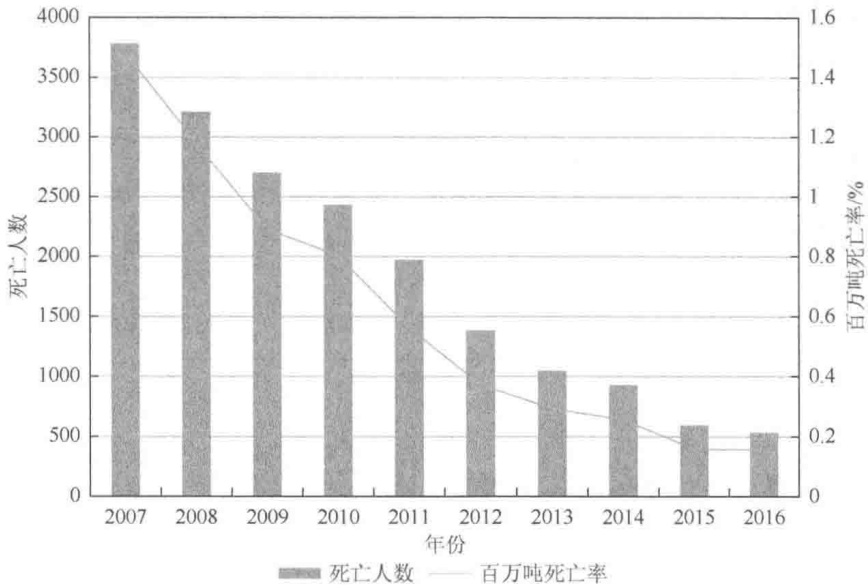


图 1-2 2007~2016 年全国煤矿事故死亡人数及百万吨死亡率

煤矿井下综采作业是煤炭开采的重要环节,也是煤矿事故多发环节。随着各种大型机械设备的投入使用,机械化程度逐渐加大,设备所引起的噪声污染也日益严重。随着开采深度的增加<sup>[20,21]</sup>,综采工作面温度受地热的影响也越发严重,且作业空间狭窄,湿度大,噪声强,照明往往不能满足安全生产的需求。作业人员在这样的条件下工作,接受和处理的信息过多,很容易疏忽大意,造成严重的后果<sup>[22-67]</sup>。此外,不舒适的环境也会使作业人员精神上产生压抑感,很容易导致厌烦情绪,不能有效接收和处理信息,进一步加大了作业的危险性<sup>[68-96]</sup>。

### 1.1.2 研究意义

综采工作面环境复杂,影响作业人员的因素众多。作业人员操作失误大部

分是由环境变化引起的。由于环境是动态变化的,作业人员在井下工作过程中会受到众多环境因素综合作用,对作业人员的生理、心理造成影响,从而降低作业人员的工作效率。因此,需要对不同环境与作业人员之间的影响关系进行研究,确定在此环境中工作时人员的可靠性,以此降低环境因素对作业人员的不利影响,从而提高作业人员的舒适度和工作效率。井下复杂的生产条件、数据采集难度大等因素导致煤炭企业在以往矿井生产系统的研究过程中,主要以设备系统为主,对作业时人与环境系统之间的关系研究相对较少,尤其对综采工作面的人与环境关系研究更少。本书通过对综采工作面人与环境关系进行研究,对综采工作面影响作业人员的主要因素进行综合模拟与分析,确定了生理指标与环境之间的关系,建立了作业人员的可靠度计算方法,构建了作业人员生理指标预警系统。

本研究对于提高煤炭企业综采工作面人因事故的预防能力,减少失误,以及对作业人员可靠性的有效管控提供理论参考,且对降低煤矿事故的发生概率有较强的理论价值和实际指导意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 温度场、湿度场、噪声场数值模拟

#### 1. 国外研究现状

早在 1740 年,法国学者就在 Belfort 地区的金属矿山进行地温观测<sup>[97]</sup>。Heise Drekopt 较深入研究了围岩温度的周期性变化规律,定义了调热圈等内容概念,这些成果形成了矿井内部热环境的最初理论<sup>[98]</sup>。

南非学者 Biccard Jappe 曾发表过以“深井风温预测”为主题的论文,提出了风温计算的基本思想,建立了风温预测计算的雏形<sup>[99]</sup>。日本学者平松良雄建立了围岩与风流的传热模型,对风流温度随时间变化的分布规律进行了分析<sup>[100]</sup>。德国学者 Nottrot 等采用数值算法描述调热圈温度场<sup>[101]</sup>。日本的内野健一运用差分法对不同巷道形状、岩性条件下围岩调热圈的温度场特征进行了研究,在考虑入口风温、水分情况下建立了风温预测公式<sup>[102]</sup>。Starfield 等建立了更为精确的不稳定换热系数计算公式<sup>[103]</sup>。Uchino 等于 1986 年提出了计算巷道风流温度与湿度的新方法,为计算复杂边界条件下的风温预测提供了新的途径<sup>[104]</sup>。

#### 2. 国内研究现状

周西华等从质量守恒、能量守恒定律出发,建立了矿井风流场模型<sup>[105, 106]</sup>。