高温矿井作业人员热应激预测评价

吴建松　付　明　著

煤炭工业出版社

·北　京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 提 要

本书全面阐述了高温矿井作业人员热应激预测评价研究的最新进展，系统、详细地论述了稳态、瞬态矿井热环境下作业人员热生理反应计算方法、模型及热应激评价指标。本书共分6章，主要内容包括矿井热环境与人体热交换、矿井工作服热阻和湿阻实验测量分析、稳态矿井热环境作业人员热应激预测评价、瞬态矿井热环境（变温采煤工作面）作业人员热生理反应预测分析及高温矿井作业人员热应激计算预测软件。

本书可作为高等学校的研究生教材，也可供该领域的科技工作者参考使用。

前 言

近年来，随着矿井开采深度的增加，我国矿井热灾害问题愈发突出。高温高湿工作环境不仅显著降低工作效率，而且严重影响井下工作人员的身体健康。在不断发展各种降温技术手段、改善高温矿井作业环境的同时，研究高温矿井作业人员热应激反应规律及预测评价方法，建立有效的个体防护措施及制定合理的高温矿井工作组织策略，逐渐受到业界学者和工程技术人员的重视。由于我国在此方面的研究起步较晚，相关的研究成果及著作不多，因此笔者及团队在多年研究成果和积累的基础上撰写了此书。

本书在理论分析与实验测量矿井工作服热阻和湿阻数据的基础上，建立了适用于高温矿井热环境的作业人员热反应计算预测模型，对不同环境因素和人因参数条件下作业人员热应激预测评价进行了深入研究，并将最新研究成果和研究进展进行了系统总结，重点论述了稳态、瞬态矿井热环境作业人员热生理反应计算方法、模型及热应激评价指标，增加了高温矿井作业人员热应激计算预测软件开发等内容。在撰写过程中本书突出了“基础性、实用性”的原则，希望能够进一步丰富和完善高温矿井作业人员热反应规律研究理论体系及应用技术。

全书共有6章。第1章简要阐述了我国高温矿井热害概况和国内外高温环境热安全及热应激评价研究现状。第2章介绍了矿井热环境及人体热交换相关基础理论，概括总结了国内外常用的高温环境热应力评价指标。第3章对暖体假人实验平台做了讲解，测量分析了我国当前矿井工作服套装热阻和湿阻。第4章具体阐

述了适用于稳态高温矿井热环境作业人员热生理反应计算预测模型及井下作业人员热应激评价指标。第5章是对瞬态矿井热环境下作业人员热反应计算模型的介绍和变温采煤工作面热环境下作业人员热生理反应的分析。第6章简要介绍了开发的高温矿井作业人员热应激计算预测软件。本书可作为高等院校相关专业研究生教材，以及相关学科科研人员的参考用书。

本书在国家重点研发计划（2016YFC0802801）、国家自然科学基金（51076073，51574249）、中央高校基本科研业务费（2014QZ04）等项目资助下完成，在此深表感谢！本书在完成过程中，研究生郭伟旗、童兴、方伟鹏、马晋钰等提供了部分素材和诸多帮助，对他们的辛勤劳动，在此表示衷心的感谢！

由于高温矿井热环境与人体热生理反应的复杂性，并涉及多个学科交叉，加之时间及作者的水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者对本书及我们的工作予以批评指正。

作　者

于中国矿业大学（北京）

2017年1月

目 次

1 绪论 …… 1

1.1 我国高温矿井热害概况 …… 1
1.2 高温环境热安全评价研究概况 …… 4
1.3 高温矿井热环境评价及作业人员热应激研究概况 …… 10
1.4 本书主要内容 …… 14

2 矿井热环境与人体热交换 …… 17

2.1 矿井热环境 …… 17
2.2 人体热交换与热生理反应 …… 24
2.3 高温环境热应力对人体生理系统的作用机理 …… 34
2.4 高温环境热应力评价指标 …… 36
2.5 本章小结 …… 53

3 基于暖体假人的矿井工作服热阻和湿阻测量分析 …… 54

3.1 暖体假人实验平台 …… 54
3.2 人工环境舱 …… 63
3.3 矿井工作服静态热阻和湿阻测量分析 …… 66
3.4 矿井工作服动态热阻和湿阻计算修正 …… 76
3.5 本章小结 …… 79

4 稳态矿井热环境作业人员热应激预测评价 …… 81

4.1 预测热应激模型 …… 81
4.2 基于矿服热阻湿阻测量数据的改进 PHS 模型 …… 88

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.3 稳态矿井热环境作业人员热应激计算预测与评价 …… 89
4.4 不同工作着装对井下作业人员热应激的影响 …… 95
4.5 本章小结 …… 100

5 瞬态矿井热环境作业人员热生理反应预测分析 …… 102

5.1 基于瞬态 PHS 模型的井下作业人员热反应预测分析 …… 102
5.2 基于瞬态人体热反应模型的井下作业人员热反应预测分析 …… 111
5.3 本章小结 …… 134

6 高温矿井作业人员热应激计算预测软件 …… 135

6.1 软件开发环境 …… 135
6.2 软件功能及界面设计 …… 136
6.3 软件运行实例 …… 140
6.4 本章小结 …… 144

参考文献 …… 145

1 绪 论

1.1 我国高温矿井热害概况

能源是关系到国计民生的重要问题，在我国的经济社会发展过程中占有举足轻重的位置。目前我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，煤炭在一次能源的生产、消费中占到了60%以上。经过长期的开采，我国煤炭浅部资源已经日见枯竭，逐渐进入深部开采阶段。据第3次全国煤炭资源预测结果，全国埋深2000 m以内的煤炭资源总量为5.57万亿吨，其中埋深超过1000 m的煤炭资源量约为2.86万亿吨，占总量的51.34%。随着开采深度的日益增大，深部矿井的数量势必不断增多。目前国内许多大型矿区的开采或开拓延伸的深度目前均已超过800 m，江苏、山东、河南、河北、黑龙江等省份已有47个大型煤矿的采深已经超过1000 m（蓝航等，2016）。据研究，目前我国煤矿矿井正以8~12 m/a的平均速度向深部延伸，中东部地区的延伸速度达到了10~25 m/a。据此推测，到2020年，国有重点煤矿的平均采深将达到1200 m，也就是说未来10年之内，全国大多数煤矿将全面进入深部开采阶段。

随着开采深度的不断增加，原岩温度不断升高，煤矿的高温热害将成为制约煤矿生产的重要因素之一。矿井热害是指井下空气的温度、相对湿度、风速和环境温度（指向人体辐射放热的高温岩边和物体等）达到一定状态后，致使人体散热困难，作业人员感到闷热，劳动生产率下降，进而出现大汗不止、体温升高、头昏、虚脱、呕吐等中暑症状，甚至有死亡的危险。20世纪50~60年代，国内外一些深部矿井已显现出较严重的热害问题；至20世纪70年代，矿井热害更加突出，有从局部现象发展成普遍现象的趋势。据初步统计，在国外，南非西部矿井在深度3300 m处气温达到50 ℃；日本丰羽铅锌矿由于受热水影响，在深度500 m处气温高达80 ℃；德国鲁尔区

Heim 矿最大采深达 1480 m，温度高达 68 ~ 70 ℃。在国内，这一情况更为严重，中国煤矿在采深至 650 m 时，生产水平的平均原始岩温为 35.9 ~ 36.8 ℃；超过 1000 m 的矿井，其原岩温度高达 40 ~ 45 ℃，工作面温度达 34 ~ 36 ℃。近年来的统计资料表明，我国已有 140 余对矿井出现了不同程度的高温问题，其中采掘工作面风温超过 30 ℃的矿井已达 60 余对（谢和平等，2012）。在 2012 年对全国 62 个高温矿井的调查表明，在这些矿井 857 个采掘工作面中，高温采掘工作面达到了 333 个，占采掘工作面总数的 38.9%，温度超过 30 ℃的矿井有 38 个，占全部高温矿井总数的 61.3%（刘卫东等，2012）。我国中东部地区矿井热害更为严重。根据调查，山东省共有 13 个矿井的工作面温度超过 26 ℃，其中工作面温度在 26 ~ 30 ℃之间的有 6 个矿井，超过 30 ℃的矿井有 7 个；江苏省共有 5 个矿井的工作面温度超过 26 ℃，其中工作面温度在 26 ~ 30 ℃之间的有 3 个矿井，超过 30 ℃的矿井有 2 个；安徽省共有 10 个矿井的工作面温度超过 26 ℃，其中工作面温度在26 ~ 30 ℃之间的有 7 个矿井，超过 30 ℃的矿井有 3 个；河南省共有 12 个矿井的工作面温度超过 26 ℃，其中工作面温度在 26 ~ 30 ℃之间的有 2 个矿井，超过 30 ℃的矿井有 10 个。

工人在高温高湿条件下会产生一系列生理功能的改变，这些变化在一定程度内是属于适应性反应，但是如果长期超过限度，则会产生不良影响，甚至发生高温热害。这些危害通常分为生理危害、心理危害和行为危害三个方面。其中生理危害主要有：

（1）体温调节发生障碍。主要表现为体温和皮肤温度升高，长期在矿井高湿下作业，会影响人的正常生理功能，使人的机体不能有效地散发热量，出现高温晕倒诱发事故，中暑休克，严重的会导致死亡。

（2）水盐代谢出现紊乱。使机体功能受到影响，循环系统、消化系统、泌尿系统、神经系统等均会因高温高湿下的机体大量失水，改变正常的功能，甚至致病。

（3）人的中枢神经系统容易失调。从而感到精神恍惚、疲劳、周身无力、萎靡不振，这种精神状态成为诱发事故的原因之一。

生理功能改变会使人出现热疲劳、中暑、热衰竭、热虚脱、热痉挛、热疹，甚至死亡。徐州夹河煤矿 7446 工作面温度高达 34 ~ 36 ℃，相对湿度高

达100%，2006年因高温热害现场晕倒172人次，死亡2人。

高温高湿环境对心理方面的影响较为复杂。在高温环境下工作，人很容易产生枯燥、乏味以及沉闷感，而且随着热环境条件的不断恶化，甚至出现易怒、脾气暴躁等心理问题。

在行为影响方面，高温的工作环境会引起工作效率下降，出错率增加，增加劳动操作事故发生的概率，造成不必要的劳动损失。湖南省湘潭某煤矿经过长期调查统计，得出了在高温矿井中温度与工伤频次的关系，见表1-1。数据表明，随着工作温度的上升，工伤频次明显增加。

表1-1 工作面温度与工伤频次的关系

工作面温度/℃	29	30	31	32
工伤频次（次/千人）	155	231	320	486

在对作业人员的健康构成危害的同时，高温情况下工作人员的劳动效率也会出现明显降低。根据苏联的实验结果，当工作环境温度超过26 ℃后，气温每增加1 ℃，人体的工作效率降低6% ~8%。国内研究人员通过实验测定发现在工作环境温度超过30 ℃后，每增加1 ℃，人的工作效率大幅降低，在工作环境温度超过35 ℃时，人的工作效率只有正常情况下的20%（图1-1）。南非金矿也对矿井热害进行了多年的调查统计，当矿内作业地

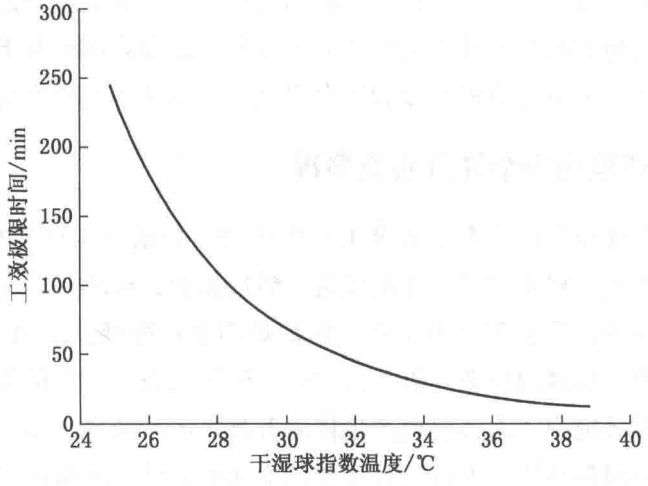


图1-1 工作环境温度与工作效率关系曲线

点的空气湿球温度达到28.9 ℃时，开始出现热晕中暑死亡事故。同时南非金矿也统计分析了井下温度与事故率关系，如图1-2所示。

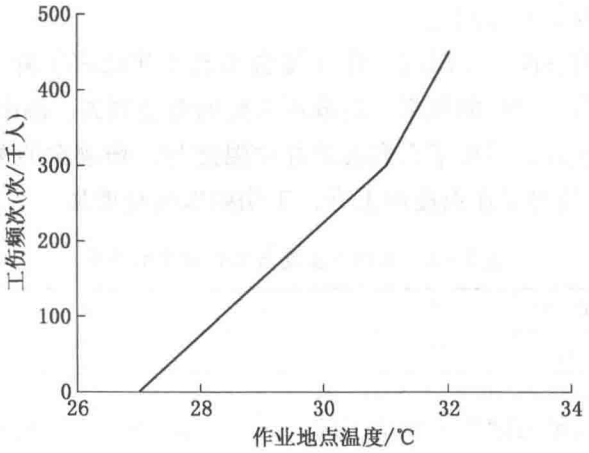


图1-2 南非金矿井下温度与事故率关系曲线

矿井热害问题产生的根本原因是深部矿井所处的复杂地质环境。针对矿井热害的防治，一方面是采用工程技术手段，降低矿井工作环境温度，但现在大多数降温手段仍处于研究阶段，降温效果有限，且成本高、投资大。另一方面是通过研究高温矿井中人体热应激反应，加强高温矿井下人体热防护措施，保障作业人员的身体健康和生命安全，这也是本书研究的主要内容。

1.2 高温环境热安全评价研究概况

高温工作环境广泛分布于各种工业生产中，如冶金工业的炼铁、炼焦、轧钢、炼钢作业，机械制造工业的锻造、铸造作业，玻璃、砖瓦、搪瓷、陶瓷等的炉窑作业，轮船和火力发电厂的锅炉作业；造纸、纺织工业的缫丝、造纸、印染等高温高湿作业，以及采矿业、建筑、农业、搬运等的露天高温作业。在高温环境中，人体可能产生体温升高、出汗脱水、心率加快等生理变化。依据高温热环境下人体生理参数的变化和人体生理指标安全阈值，可对高温热环境中人体安全状态进行评价。目前常用的高温环境热安全评价方

法有热应力指标、真人实验手段、暖体假人实验手段、人体热生理模型计算方法，其研究进展综述如下。

1.2.1 基于热应力指标的高温环境热安全评价

应用环境的热应力指标评价人体安全状态，主要是依据测得的热应力指标直接评价或间接评价人体可能的热危害。近年来，国际上发展出许多评价热应力或人体热耐受能力的指标，主要有：

（1）直接指标：干球温度、湿球温度、湿球黑球温度（Wet - Bulb Globe Temperature，WBGT）、黑球温度所对应湿球温度（Wet Globe Temperature，WGT）。

（2）经验指标：有效温度（Effective Temperature，ET）、环境应力指标（Environmental Stress Index，ESI）等。

（3）理论指标：操作温度、热应力指标（Heat Stress Index，HSI）、皮肤湿润度（Skin Wettedness，SWA）、必须出汗率（Required Sweating Rate，Swreq）、预测热应激（Predicted Heat Strain，PHS）等。

此外，也有一些学者提出根据人体生理参数变化来评估热应力等级，这些生理参数指标主要包括：体温、出汗量、皮肤温度、血液水分含量、工作及恢复期心率等。除了这些指标之外，国际上还在此基础上制定出了相关标准，如基于 WBGT 的 ISO 7243、基于生理学指标的 ISO 9886 和基于必须出汗率 Sreq 的 ISO 7933。同时还有一些相关的标准，如热环境仪器及检测方法标准 ISO 7726、评价新陈代谢产热的热环境工效学 ISO 8996、衡量衣服热阻的 ISO 9920、人体暴露于极端热和冷环境的医疗监控 ISO 12894、热环境工效学原理和相关国际标准应用的 ISO 11399 等。

应用热应力指标评价人体安全状态在数据获取与使用方面都比较简单，但由于其依据环境热物理参量直接或间接评价环境的热应力，进而对人体安全进行评价，而不是根据人体的热生理指标进行评价，所以准确性有限。

1.2.2 基于真人实验的高温环境热安全评价

通过将真人置于模拟高温环境的实验舱内进行实验，依据实验过程中的人体生理指标的变化直接评价人体安全状态，是早期进行热环境中人体安全状态的重要研究方向。

国外，关于基于真人实验的热安全评价研究工作起步较早。Sprague

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（1970）、Wyon（1973）、Nevins（1975）、Rohles（1980）等对环境温度周期性变化时人体的热反应进行了研究，发现可接受温度的峰值幅度随着波动频率的增加而减少，该峰值幅度在稳态时达到最大值。Berglund（1978）、Rohles（1985）、Ohno（1987）等对环境温度渐变时人体的热反应进行了研究，结果表明环境温度每小时不大于0.5 ℃缓慢变化对可接受热应力的范围没有影响。Sawka（1985）等研究了环境温度49 ℃、相对湿度20%条件下热应力和失水率对人体的影响，研究将失水率划分为4个等级：0、3%、5%和7%，失水率越高，人体在热环境中的暴露时间越短，核心温度和心率也越高。Nag（1997）等在模拟环境舱中测试人体的热耐力，试验得到人体可接受的热接触极限时间：核心温度到达38～38.2 ℃时，容忍80～85 min，39 ℃时为40～45 min。Brake（2002）通过实验，研究了男性样本在77种不同工况条件下的热应力变化，并测量了样本的各项生理参数，介绍了热工作极限（TWL）这样一种新的评价指标，来判定人体的耐热极限。Carter（2005）等证实了在热应力运动过后人体的脱水与心率之间的关系及相互影响。

在国内，周青（2004）等研究高温高湿环境下运动对人体相关生理指标的影响情况，发现新老战士由于在此环境下生活时间长短不同，因而出现的耐受和适应情况不同。孙丽婧（2005）对高温高湿环境中工作个体的耐热反应、生理指标及其他环境指标进行了测量及分析，得出不同空气温度、湿度条件下人体耐热极限的各种生理指标值。刘晓林（2007）测量了高温高湿低氧环境下劳动人员的口腔温度、心率、收缩压和舒张压4个生理因素，研究实验中不同生理因素的变化及相应的人体忍耐极限。涂岱昕（2008）参照《高温作业分级》标准，在4个不同的热辐射强度下对人体耐受力实验研究，得出不同劳动强度条件下受试样本在热接触过程中各项生理指标的变化趋势，得到在人体达到热忍耐极限时各项生理指标的阈值，分析了各项环境热参数对人体耐受力的影响程度。李国建（2008）通过大规模样本试验研究，对高温高湿低氧环境下人体耐受能力及其评价方法进行探索性研究，建立起人体耐热极限时长与WBGT值、氧气体积分数和不同劳动强度之间的数学模型，用来预测人体在高温高湿低氧接触条件下的热耐受极限时间。刘佳（2011）研究了相对湿度为90%不同温度下的口腔温度、皮

肤温度、鼻腔温度、心率、能量代谢率、血氧饱和度、皮肤电导率等生理参数的变化，以及达到忍耐极限的阈值。

通过真人实验研究热环境下的人体安全，虽然能得到热环境下人体生理指标的真实结果，但也有较大的局限性。由于人体个体生理差异客观存在，要得到统计学意义上的较准确的生理指标值，就需要较大的样本量，同时为保证实验个体的安全，实验舱所设置的热物理参数不能过高或过低，人体在舱内的时间也不能过长。以上这些原因使得真人实验的人力、物力、资金投入变得巨大，限制了真人实验方法的发展。

1.2.3 基于暖体假人实验的高温环境热安全评价

对于高温环境着防护服的人体热伤害研究，单纯的数学建模其准确性需要实验验证，而高温下用真人实验很难保证安全性。因此，有学者开发出了暖体假人用于这一问题的研究。暖体假人作为一种通用的仪器设备，已经广泛应用于纺织、职业健康、环境、消防、石油、交通安全、航空航天、建筑等领域。暖体假人在身体躯段的数量、尺寸、外形、控制模式、呼吸、出汗、运动等生理调节模式等方面，可根据需要进行有针对性的设计，从而对问题进行更有效的研究。暖体假人在对高温环境下人体出汗对所受热伤害的影响研究具有很好的适应性。高温下的热危害不仅由热辐射和热对流造成，而且由高温热防护服压迫皮肤的热传导造成的热伤害也是重要原因。这种紧密接触是热生理学模拟计算很难实现的，因此应用暖体假人进行人体模拟实验研究是其重要优点。

以暖体假人为主要实验工具，对人体的热反应研究、特别是高温环境下的人体热伤害研究取得了新的进展。中国人民解放军总后勤部军需装备研究所以中等热湿环境下人体实验和人体三维尺寸数据为基础，研制出了出汗假人测试系统并对服装的热湿性能进行了测试与评价。叶海等（2005）使用暖体假人评价环境的热应力，提出用暖体假人测定湿球黑球温度的方法，给出各指标的公式，将运用暖体假人所得出的指标与湿球黑球温度做了对比，其结果有一定的相似性。Camenzind（2006）建立了一种具有可接受的重复性的假人测试和气体火焰系统方法，并阐述了标准火焰实验方法的可能的改进之处。Juricic（2007）建立了通过温度估算热通量，建立皮肤仿真模型计算伤害水平的模型，并应用三层皮肤结构（表皮、真皮和皮下组织）以及

三级烧伤模型计算人体所受到的热伤害结果。Psikuta（2008）常温范围考虑人体出汗等生理调节的热舒适性假人实验与建模研究，考虑了出汗对人体热伤害的影响，但仅单段人体模型，并非全身。同时他指出，在静态、均一的表面温度的均匀发汗率下研究，相关标准也均有类似局限。Zhu（2008）考察皮肤模型和几何学对织物的热性能的影响，高热通量环境下织物材料的热传导研究，缩水降低热防护性能，并指出人衣间的空气间隙问题对服装性能的影响。Coca（2010）以暖体假人为研究工具，考察了消防员的运动行为对防护服性能的影响。Hummel（2011）以假人手臂为实验设备，研究了火焰场景下手和手臂在防护服装下的受热伤害情况。韩雪峰（2012）建立了一个基于20分区发汗暖体假人设备的多分区多层传热数值模型，通过实验等方式确定各分区的各项热物理参数，建立热平衡方程组，实现对假人在给定环境中的温度变化以及与服装相互作用的过程。

应用暖体假人进行高温环境下人体安全评价研究，实验结果的准确性往往受多种因素如燃烧器的布置方式、位置，燃烧器与假人的距离传感器类型，传感器校准及标度，假人尺寸，气体压力和空气供应，气体缓冲存储，测量时间，烧伤预测模型等影响。此外，由于技术所限，现有的暖体假人在实验过程中仅能实现设定的体温、出汗量，不具备依据环境热应力的变化对生理行为做出主动调节的自调节、自适应功能，限制了暖体假人在人体安全研究领域的应用。因此，需要将人体热生理响应建模与暖体假人模拟人体生理响应相结合，建立融合实验模拟与数值计算的热环境下人体安全评价方法，为高温环境下的人体安全防护提供方法和技术支持，为研制具有自调节、自适应能力的暖体假人建立基础。

1.2.4 基于人体热生理模型计算的热安全评价

通过热生理模型计算人体安全状态，需要综合生理学、材料学、热学等多学科知识，考虑环境与人体的相互影响。经过多年研究，学者们建立了多种模型来计算热环境下的人体热生理变化。

从20世纪30年代到60年代，所建立的人体热调节模型并没有考虑人体自身的热调节功能，只能称之为人体温度分布模型。Mache（1947）等于1947年对人体全身热平衡模型的尝试被认为是人体热反应模型研究的开端。随后出现了具有分层的Gagge模型，其分层思路在人体热反应模型研究领域

一直沿用至今。1963 年 Crosbie 首次将人体热调节功能引入模型的研究中。Stolwijk（1971）应用负反馈的控制理论建立了 6 区段 25 单元的人体热反应模型，被认为是人体热反应模型的一次突破。随后，NASA 根据以 Stolwijk 模型为基础，建立了“41 节点”模型。Werner（1983）提出了用“数学系统分析”的方法来研究人体热调节系统。此后，人体热调节模型向着对人体内部热调节机理刻画更精细的方向发展，力求使人体热调节系统模型日益趋于完善的真实人体。如 Wissler 建立的人体热调节模型，在多区段、多层模型的基础上，进一步考虑了平行血管间换热问题。

在人体热反应模型研究方向，除传统的热反应外，将人体热系统分为被动系统和主动系统，并在热传递的基础上进一步考虑了湿传递问题。Gagge 热生理模型（1973）用来模拟人体的热生理现象，如新陈代谢、出汗、寒战等。在诸多热生理模型中，该模型的模拟效果比较好，特别是考虑出汗现象的时候，跟实际的现象很接近。Gagge 模型被提出后，不断得到改进。1986 年 Gagge 提出了目前常使用的 Gagge 2 - node 热生理模型，该模型计算简单，使用面广。Gagge 2 - node 热生理模型包括被动系统和控制系统两部分。被动系统是体内及体表与环境间的热交换模型，包括身体各部位的自由局部热损失、被动的对流换热、与周围环境的长波热辐射、光线反射、皮肤表面与非一致性服装间的水汽蒸发以及其他的热与物质交换等；主动系统指人体通过自身力求实现热平衡的行为，包括血管运动、汗腺活动、代谢产热、寒战产热等。Zeng（1998）建立 CTM 热模型研究人体的热湿传递机理。与之前将人体看成矩形、圆柱或者球体不同的是，CTM 模型将人体看成一个类似茶壶状的封闭曲面，由匀质材料构成，并将设置了不同的表面温度，考虑了湿的传递，并给出了一个传湿公式。

国内，王小玲（1994）通过将人体分为六节段两层，建立了肌体各层间和各节段内的传热数学模型。戴自祝（1997）提出了一种预测出汗率的数学模型，编制了相应的计算机程序，开发了实时的数学—物理仿真系统、人体热反应预测及评价系统，并进行了高温舱人体实验。结果表明：热辐射是造成冶金车间环境热强度过高的主要原因；高湿则是纺织企业印染车间环境热强度过高的主要原因。文学军（1998）将人、室内热环境和空调等视为一个动态热力系统，构建稳态和动态热环境，人的热感觉的模糊评价模

型。

随着计算机技术的发展，考虑因素更全面、结构更精细的模型相继建立。如 Fiala（1999）温度大范围变化环境下，完成了人体生理学建模、人体传热建模和数值编程，并考虑了运动和姿势对人体所受热伤害的影响。Malchaire（2001、2002）等基于预测人体可接受热暴露时间、平均皮肤温度等参数建立了预测热应力模型，对劳动人员在热环境中的热应力影响进行了评价。Huizenga（2001）建立了常温复杂热环境下人体生理和舒适性评价的 Berkeley 模型。该模型基于 Stolwijk 模型，在以下 7 个方面做出改进：躯段数由 6 个提高到不受限；改进了血液流动模型，包括血液与身段的热交换；对衣物节点兼顾了热容和湿容；考虑了表面与身体的热传导；改进了对流和热辐射系数；明确了热辐射计算中的角度系数；改进了热通量辐射模型。刘迎曦等（2004）以 Stolwijk 热调节模型为基础，考虑汗水积聚和热湿耦合因素，建立了人体—服装—环境系统的动态热湿传递模型，可用于人、服装、环境系统的常温下热湿传递过程的数值模拟。欧晓英（2005）等通过模糊综合评价的方法，评价了高温高湿矿井的高热害环境，并且设计出一套热环境评价软件。

这类方法基于对人体生理学和热物理的研究成果，进行数学建模、编程计算，得到热环境下人体生理指标的变化，对人体生理学和热物理的理论研究成果要求较高，且由于计算机能力的限制，使此类方法在一些细节问题上准确性有待提高。并且，由于是纯理论计算，对现实中容易出现的一些非理想情况，如防护服装与人体贴合度不同、人体运动造成的服装与人体之间关系的非规律性改变等，研究能力有限。

1.3 高温矿井热环境评价及作业人员热应激研究概况

影响人体热舒适平衡和热安全的因素主要可分为客观因素和与人相关的主观因素两个方面。客观因素主要包括空气温度、湿度、风速、环境热辐射温度，与人相关的主观因素包括人体新陈代谢、服装隔热透气散湿性能等。在各种不同主客观因素作用下作业人员的出现的相应的热生理反应状况是研究高温矿井作业人员热舒适平衡和热安全状况的基础。近年来国内外学者对高温矿井热环境的研究越来越重视，借助在高温环境热应力评价或在室内环

境热舒适分析评价上发展较为成熟的方法和指标体系，对多个客观环境因素和人体主观因素综合影响下高温矿井环境、避难硐室及救生舱环境的热舒适分析和热应力评价开展了大量研究工作。

国外，对高温矿井热环境评价及作业人员热生理反应研究开始较早。1740 年，法国最先开始对金属矿山的井下温度进行测量和监控。英国紧随其后，于 18 世纪末对井下作业环境气候进行观察研究，分析矿井内的热环境状态，并发现了巷道空气温度与开采深度变化规律。1915 年，巴西某金矿开始在矿井内使用空调来主动改善矿井的工作热环境。南非、波兰等国家也于 20 世纪 60 年代起对国内一些深部矿井的地温场和微气候进行了调查和测量，为井下热环境的改善积累了基本的数据资料。20 世纪 70 年代，南非煤矿安全监理及卫生部门对国内 8 个开采深度超过 600 m 矿井内从事不同工种矿工的人体生理指标做了广泛调研，包括矿工的体表温度、舌部温度、心率、出汗量及热反应等级等，并据此进行了相应安全防护设备、工作时间的改进与调整。2004 年，Donoghue 详细收集了美国矿山安全卫生管理局（MSHA）从 1983—2001 年期间报告的美国矿业的 588 例非致命性热伤害事故，详细分析了这些事故的时空分布特点，指出地下采矿业是该类事故发生的主要行业，且应该在夏季着重采取预防措施。德国 Kalkowsky 等于 2006 年针对德国煤矿矿工的热生理反应情况进行了调查研究，连续测量了 38 名矿工在高温矿井热环境下工作时的心率和直肠温度，依据该生理数据对矿井工作人员热生理反应特点作了阐释，同时得出了高温矿井热害环境下人体的平均出汗量，指出在开始工作之前可以实施“预防性饮水”可增加人体对水分的吸收，有助于减少因摄取的液体的总量损失的不平衡可能导致健康损伤情况。2010 年，波兰 Wacławik 教授基于人体热平衡方程建立一个可以模拟计算井下作业人员与环境热交换的模型，该模型以皮肤温度为人体热应激评价指标。2012 年，加拿大 Kenny 等监测和记录了在高温矿井热环境下作业人员工作期间生理参数变化情况，并测量分析了该过程中矿工的能量消耗和热生理反应。实验详细对比了不同工种不同状态（工作、休息）下新陈代谢率，指出尽管不同工种和不同状态（工作、休息）下新陈代谢率的差异很大，但平均核心温度的差异很小，变化范围为（37.20 ± 0.22）~（37.42 ± 0.18）℃。2015 年，印度 Maurya 等对地下采矿高温热环境对作业人员热反

需要全本请访问 www.ertongbook.com