

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(矿业与安全工程) ·

煤田火区热能开发与生态利用研究进展

周福宝^{1*} 邓进昌¹ 史波波¹ 齐海宁¹ 苏贺涛² 葛绍坤¹

1. 中国矿业大学 安全工程学院,徐州 221116

2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院,北京 100083

[摘要] 地下煤火造成的地质灾害资源经济和生态环境问题突出,同时又蕴藏着丰富的废热资源,开展热能回收利用研究和工程应用,对于加快煤火治理、节能减排意义重大。本文重点围绕煤矿火灾共性基础科学问题和煤火热能转化清洁利用技术,分析了煤火热能资源开发利用领域中煤火热资源评估、煤火地热提取系统和方法、热能转化与利用等重点方向的关键基础理论和核心技术,阐述了煤火热能提取综合利用系统与工程的最新研究进展,最后提出了煤火防治与利用领域在基础理论、技术攻关和装备研制等方向上的关键问题和研究趋势。

[关键词] 地下煤火;热能回收;热能利用;重力热管;温差发电

1 煤火热能资源化的战略意义

地下煤火是煤层由于人为或自燃因素形成的煤田火和矿井火的统称。和一般的固体火灾不同,地下煤火是指煤层以自燃倾向性为诱因,在适宜的环境下与氧气接触,发生一系列的物理化学作用(氧化、放热、升温、自燃)直至剧烈燃烧,然后持续形成一定的时间和空间规模,并对周围环境产生影响的综合性灾害(图 1)。煤火是无地理边界的全球性灾难,在中国、美国、澳大利亚、俄罗斯、印度、波兰、南非等地均存在不同程度的煤火灾害^[1]。煤炭是我国的主体能源,但中国却是世界上受地下煤火灾害威胁最严重的国家,大约有 56% 的煤层具有自然发火倾向,集中分布在新疆、内蒙古、宁夏、陕西、山西、甘肃、青海等 7 省(自治区)^[1-3]。

煤火对煤炭资源、生态环境、人类健康和安全生产构成了巨大威胁^[2-5]。全球每年因煤火烧损的煤炭资源约高达 10 亿吨^[4]。烧损大量煤炭资源的同时,还影响煤矿安全生产和经济效益。煤火燃烧过程中释放出大量的温室气体,每年产生的 CO₂ 约占世界化石燃料碳排放的 2%^[5],加剧全球气候变暖效应。此外煤火向空气释放大量有毒有害烟气(CO、



周福宝 中国矿业大学教授、矿山安全专家,长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、国家重点研发计划项目首席科学家,国务院学科评议组安全学科联合召集人,“煤矿瓦斯与煤自燃防治”教育部创新团队带头人,长期致力于瓦斯与煤火(自燃)复合灾害防治工作,在瓦斯与煤火耦合致灾理论、协同防治技术等方面开展了原创性研究,研究成果在我国安徽、山西、河南和贵州等省区的 130 余座矿山直接转化与应用,推动了煤炭安全生产形势的持续向好。获国家科技成果二等奖 3 项(第一、二、四),第一完成人授权发明专利 58 件、美国和欧盟等国际专利 9 件,以第一/通讯作者发表论文 108 篇,获工程院光华工程青年奖、腾讯科学探索奖(能源环保)、国家有突出贡献的中青年专家等。

SO_x、H₂S、NO_x等)和颗粒物引发当地雾霾、酸雨和排放污染超标一系列问题。排放的有害化学物质如汞、砷、硒、铅和氟等长期聚集,严重污染火区周围的大气、土地和地下水^[2]。高温地表灼毁植被,破坏土壤原有物理结构和性质。析出的硫酸盐、硫磺和重金属导致土壤酸碱失衡。燃烧形成的烧空区坍塌导致地表出现燃烧裂隙、塌陷坑与裂缝,为煤层燃烧提供了氧气通道,促进火灾的复燃和蔓延,严重威胁煤矿开采和土地资源安全^[4]。

为应对地下煤火问题,近十几年许多研究者进

收稿日期:2021-06-02;修回日期:2021-12-15

* 通信作者,Email:f.zhou@cumt.edu.cn

本文受到高等学校学科创新引智计划(111 计划)(B17041)、国家自然科学基金项目(51325403,52074277)、江苏省自然科学基金项目(BK20211585)的资助。

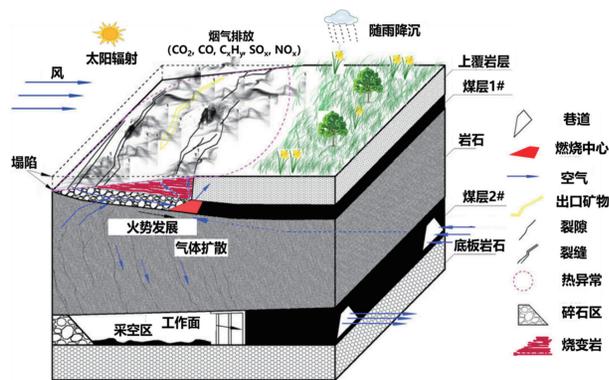


图1 地下煤火燃烧与发展规律^[2]

行了大量的相关研究工作,主要集中在地下煤火形成机理、探测技术、防治技术、环境污染等方面^[1-4]。灭火工程耗费巨大,甚至超过煤炭资源本身的价值,一些地区只能任其燃烧或者采取简单降温、覆盖手段控制煤火面积。国内主要采用剥离平整—打钻—注水注浆—覆盖—生态修复等传统煤田火治理工艺^[2]。火区热源点多、面广、隐蔽性强,地面工程无法保证彻底治理,在一定条件下存在复燃、燃烧加速、甚至形成新生火区的风险。在倡导着力提升生态环境治理能力,推动绿色发展的新时期,迫切需要走“生态灭火,绿色用火”道路,推进绿色用能和生态工程建设^[5]。

另一方面,火区深部岩石和地层蕴藏着大量热能,这和浅层地热能储层状态类似,煤田火灾产生的废热资源在一定程度上可以作为低—中品级地热资源开发利用^[4]。据统计,全世界每年地下煤火燃烧约产生1000 GW的能量,相当于全球500个核电总容量的2.5倍,超过全球水力发电所产能量总和^[5]。然而,此前传统的灭火工序均是将火区的热能作为一种灾害源,治理时仅考虑如何移除火区热能而并未考虑热量的资源化利用,造成了巨大的能源损失^[5-8]。

相对于煤火治理,国内外针对煤田火区热能提取和转换技术和理论研究处于探索阶段。为此,本文重点介绍和分析煤田火区热能开发与生态利用研

究进展和实践工作,对该领域的研究现状、前沿技术、核心问题以及工程应用开展分析和论述。

2 煤火热能资源开发利用研究现状

2.1 煤火热资源评估

科学合理的热资源评估勘探和评价分级方法是保证热资源高效开发的基本前提。煤火废热资源评估是综合分析地热资源勘查成果,运用合理方法对地热资源储量、可开采量及热品质进行的计算与评价。前人在干热岩、油田和常规地热利用领域提出了多种地热资源评价方法,目前应用最多主要包括地表流量法、体积法、蒙特卡罗方法、数值法等^[9,10]。地热资源评价方法较多,各种方法的适宜性和应用条件存在差别,因此需要比较不同热评价方法的优缺点,详见表1。基于现有热评估方法,提出适用于煤火阴燃或燃烧的热能开发与热潜力评估模型。

由于缺少统一规范的煤火地热资源评价手段和有效的数据资料管理,煤田火区存在基本参数不全、热储资源分布不清、开发潜力不明等问题,严重制约了煤火热资源的高效开发和规模化利用。为加强煤火热能利用中热储和开发潜力的前期评估研究。课题组 Deng 等首次对新疆三道坝火区进行了煤田热能废热回收,利用与评价的综合性研究^[8]。对火区钻孔采用了稳态测温法,判定该区域废弃地热资源属性为复合型对流—传导地热资源。之后对整个实验热异常区覆盖网格测点,进行了长期的地表热通量动态监测。结果表明火区废热回收区域地表热流水平异常突出,适合大规模热资源提取利用。最后进行了废热资源热储评价与估算。依据火区详查资料构建传热模型计算等效热阻网络,综合了地表热流法,热储体积法和数值计算的优势,定量分析了传热过程中热阻、温降、余热资源量、可回收量和提热率等关键参数,得到了三道坝煤田火区废热资源量和能用开发上进行了整体效益概算,详见表2。

表1 地热资源评估方法优劣势对比^[9,10]

评价方法	原理	关键指标	优势	局限性	适用
体积法	将赋存和运移的地热流体作为整体,计算整个热储体积所蕴含的全部热能	采收率	应用最早 最广泛	默认定值计算,忽略内部热能补充	所有地热田
蒙特卡罗法	以体积法为基础,根据概率模型进行统计实验评估热储参数	概率分布	评估精度 较高	热储参数不确定	勘查程度较高地区
数值法	建立地热系统流动与热量运移的数学耦合模型,模拟计算和评价地热储量。	非线性偏微分方程的数值解	地热精准 预测管理	热储参数测定要求 最高	勘查程度最高,信息 最全地区
地表热流量法	测量地表各种形式的天然放热量总和,对比叠加以估计热资源开发产热量。	大地热流	简单易行 成本低	半定量评估	勘查程度低、地表热 量较高区域

表 2 新疆三道坝火区废热资源量和能用效益评估^[8]

资源量评估	全资源量(MW)	平均提热率(%)	热损(%)	热提取量(MW)
	240.6	57.85	24.41	105.2
能源转化	单孔提热(kW)	年提热量(kJ)	汽化潜热(kJ/kg)	节水量(t)
	42.5	1.53×10¹¹	336.19	4.55×10⁵
区域供暖	单孔发电(kW)	年发电量(kWh)	电费(元/kWh)	省电费用(万元)
	1	10⁶	0.5	50
区域供暖	单孔供暖(kW)	全区供暖(kW)	热负荷(W/m ²)	可供暖面积(m ²)
	16	7985.4	60	1.3×10⁵

通过对火区全域废热资源,节能增益和供暖效果的定量评估发现,该地煤田火区废热资源储量丰厚,地热资源开发利用条件优越。开展煤火废热资源的规模化回收利用攻关研究,经济效益显著,具有广阔的利用前景。

2.2 煤火热能提取技术

为捕获、富集地下热能并将其转化为可利用的能源形式,国内外研究提出了一系列热提取技术和系统,比如热管技术,有机朗肯循环系统,增强型地热系统,埋管换热器和地源热泵系统等^[11, 12]。但针对煤田火区特殊地质条件和热储存情况,目前主要采用热媒热置换和热管技术两种提热方法。

2.2.1 热媒热置换提热法

仲晓星等提出一种采用气态热媒多孔压入式方向性的热量提取方法,在换热区施工若干压入和抽出钻孔,通过气体增压泵将热媒工质(热媒)直注到高温换热区,热媒完成热交换后从抽出孔抽取,提取的热能由有机朗肯循环系统发电^[6]。但由于煤田火区地表孔隙与裂隙发育,气态热媒易贯通泄漏,热交换效率低。同时钻孔负压易造成地表漏风供氧而加剧煤体燃烧,发展和蔓延。因此还需在对火区地表漏风通道进行材料填充和全覆盖封堵,以控制热媒的泄漏和外界空气的进入。Kürten 等对德国西部 Ruhr 地区废弃矿堆中的燃烧煤体,采用埋管换热器技术进行了地热提取和利用研究^[13]。该项目量化评价了废弃矿堆阴燃的地热潜力,论证了煤火地热利用的可行性和经济性。但是研究没有跟踪评估长期热提取性能,无法判断温度下降是因为热提取还是燃烧转移引起。地层温度恢复短期内无法实现,可能会导致附近建筑热供应稳定性不佳。Chiasson 等介绍了美国怀俄明州北部煤矿矸石废物堆自燃火区中提取热能和发电的案例,模拟了垂直钻孔套管热媒换热器热交换过程,进行了系统灵敏度和成本寿命分析以评估地下煤火提热发电的经济性和可行性^[14]。此研究缺少热储分布的前期评价,可能会导致模型计算的热能提取量和实际供热存在极大偏

差。此外对于永久性热提取可行性和利用周期的问题尚未给出讨论。张新浩等设计并构建了一种基于温差发电技术的煤田火区浅部钻孔内嵌式热能提取装置^[15]。该热能提取装置放入浅部钻孔进行直接热电转换,避免了先将热能提取至地表再进行热电转化所造成的热量的大幅损失,但是内部换热过程不利于外部冷源散热,导致温差不大,发电效率低。媒介运输还需要额外消耗电力,因此难适应现场钻孔热提取利用条件。

2.2.2 热管提热法

热管具有热阻小质轻,快速均温的特性,使其具有优异的单向热超导性能。两相闭式热虹吸管(重力导热管)是一种封闭的依靠工质相变传热的无芯重力辅助元件,可在很小的温度差下有效实现长距离传热^[16]。重力热管的工作原理如图 2 所示,热管包括蒸发段、绝热段和冷凝段,可自行实现工质相变循环而不需要额外的动力。通过内置热媒汽化冷凝的传热传质过程,完成低位处热量向高位持续的传递。与普通热管相比,重力热管不需要吸热芯,热管结构简单、制造方便、成本低廉、传热性能高效、工作可靠,且具有灵活多变的结构形式和型体尺寸^[11, 12]。针对煤火深部地热开发过程中地质环境

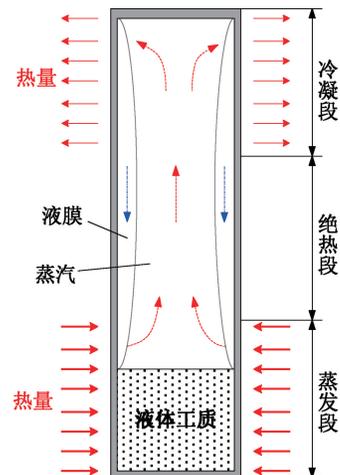


图 2 两相闭式热虹吸管工作原理

和传热效率的问题,重力热管凭借优异的传热性能和经济性,为现阶段煤火中低品位地热能高效回收提供了技术支撑。

热管换热技术已被广泛应用于工业废热,热储能,地热能,太阳能和汽车发动机等各行各业的余热回收和热能利用领域^[16]。与地下煤层氧化自燃现象相似,煤炭或矸石在运输及堆放过程中面临蓄热升温引起自燃的问题。为防止煤堆和矸石山自燃,不同学者提出采用重力热管提取和转移堆积物的非控燃烧热量,有效降低煤矸或矸石山内部的温度,阻止煤岩内部热量积聚^[17, 18]。在石油工程中,采用超长重力有效控制深部油井上下部温度场热平衡,改善了井筒温度分布剖面,还能实现油田地热能回收再利用。针对废弃煤矿的地热回收潜力大,采用热管换热器系统回收矿井水废热和地热,解决附近煤矿企业供暖,制冷和洗浴热源问题^[8]。学者将热管技术的应用于锅炉烟气余热回收中,能够明显提高锅炉的能源利用率和机组热经济性^[16]。以上成功应用案例表明,对于大范围煤火区废热的原位回收利用,重力热管技术具有较高的可行性和参考价值。

2.3 热电转化与利用

火区地下深度大于 50 m 煤岩体的温度基本保持在 300~400 °C,按照温度划分煤火热能属于中低品位地热能。地热能的利用可以分为两大类:一是直接利用,二是间接利用实现热电转化^[19]。目前主流的地热发电技术有三种:干蒸汽发电循环、闪蒸蒸汽发电循环和双工质循环发电^[20]。热源温度和工作流体的特性是选择发电技术的主要指标。双工质发电循环有效避免了发电系统部件与高温腐蚀性烟气直接接触,在中低温地热能的热电转化效率由于蒸汽发电,因此双工质发电循环技术更适用于煤火热能提取发电。双工质发电循环是通过某种低沸点介质(如异丁烷、氟利昂等)交换热源流体的热量,再利用介质受热后产生的蒸汽发电。主要归为两

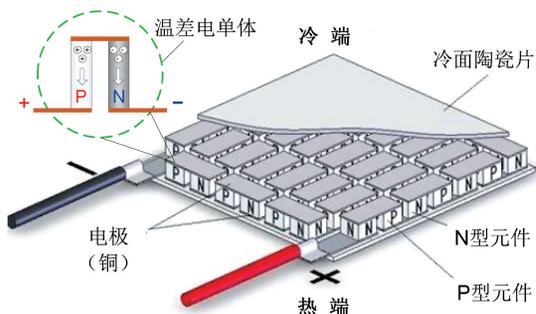


图3 温差发电组件原理

类:卡林纳循环(KC)和有机朗肯循环(ORC)^[18]。KC和ORC热电转换方法在煤火利用方面在一定程度上是可行的,同时也需要解决一些问题:双工质发电系统复杂繁琐,施工运营成本高;地层破碎和裂隙分布影响热媒提热和发电效率;煤田火区的热量提取结束后,KC和ORC系统设备搬运移动困难;此外,还需考虑火区工作条件恶劣,系统的使用寿命和效率。

温差发电技术可行性已经通过废热回收示范测试证实,被公认为是具有创新和潜力的节能和环保技术,被应用于废热回收、航空航天和无人区用电、建筑和汽车尾气热能回收、太阳能发电以及大规模燃烧,炼钢,化学和发电厂的工业余热回收^[21]。图3是温差发电元件基于 Seebeck 效应的发电原理。热电片组件(TEG)可将低级热源的热量有效地转换成清洁电能,具有质轻灵活,无噪音运行,环境友好,适应性高,制造简单,维护成本低和使用寿命长的优势^[21]。目前热电转化效率低($<5\%$)和半导体材料成本高是当前限制温差发电技术发展和推广的关键因素^[22]。但现有煤火废热能资源具有零成本、体量大的优越性,从热资源回收绿色能效和商业性上弥补了 TEG 系统在成本和效率上的不足。因此,温差发电技术将是煤火中低品位废热回收和绿色利用的发展趋势。随着热电材料和 TEG 系统设计研发的进一步突破,温差热电转化技术在地下煤火热能利用中的优势将逐渐突显。

3 实现煤火热能提取综合利用的革命性突破

3.1 热能生态利用体系

针对煤火生态治理和节能面临的新形势、新问题,为将煤火绿色防治与热能生态利用协同考虑,周福宝等^[4-8]提出了“以用代治,生态灭火,可持续发展”的煤火治理新思路。建立地下煤火热能利用与地表生态恢复的综合体系(图4)。研究如何将地下煤火的废热(气)进行高效回收,实现资源清洁化利

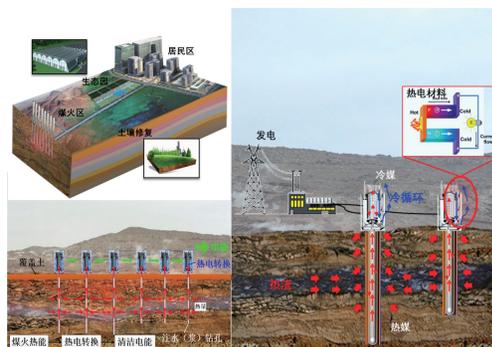


图4 地下煤火热能生态开发体系原理

用(发电、采暖)和生态调整优化。团队开展地下煤火热能提取与生态资源化利用工程,研究热电转换和供暖的综合利用技术^[23],通过对火区热量的提取利用来达到灭火降温的目的。煤田火灾科学领域的前沿研究是热能的高效提取与转化。其内涵是变革传统地热利用技术在煤田火区的创新优化应用,探索煤田火区热能综合高效利用的方式及模式,形成煤火治理、废弃热发电供暖、生态修复产业的一体化布局^[24],引导煤火治理工程走向良性循环的经济、社会和环境三重效益显著提升的新型可持续化道路。

3.2 煤火热能开发瓶颈技术的攻破

团队对热管和温差发电技术开展了相关实验理论研究。构建小型煤火热提取平台^[25],进行热提取温差发电模拟试验研究,分析不同燃烧条件下热电转化性能,并综合讨论其最大热电转换效率和成本效益^[26]。与此同时,分别从热能提取与热电转换的匹配设计、热电模块层级结构优化和冷端散热模块开发三个方面,对煤火热能提取和热电转换技术的提升优化进行深入研究^[8]。综合理论试验和数值模拟分析结果,设计煤火热能提取与温差发电系统装备,并展开现场工程实践,探究发对热能提取与热电转换的影响因素^[27]。

研发的第一代自循环水冷分布式煤火热能提取与温差发电装置^[28]于 2016 年在新疆大泉湖火区进行了首次应用尝试,采用底端密闭的铝管作为流体热媒(水)的地下容器插入钻孔中提取地下煤火热量,冷端散热模块为散热管自循环冷却。之后考虑将两相闭式热虹吸管插入铝管热媒换热器中作为热传递辅助装置,使用散热水箱代替原散热管,提高散热效率,增大热流量提取,使得系统发电量大大提升,形成了小型重力热管辅助的自循环水冷分布式煤火热能提取与温差发电系统^[29]。结合热管的传热性和工艺性优势,又提出采用具有高效换热性能的重力热管代替现有热媒传热方式,设计了两代重力热管热能提取温差发电系统。它们都由重力热管热提取模块、温差发电模块、散热模块组成。第一代重力热管热提取模块使用超长碳钢管材的重力热管,散热模块采用了水源流动水冷的散热方式^[30]。第二代系统则对热管冷凝段与温差发电模块的传热结构和热管构造进行提升,有效减小了热阻,在流水散热的基础上结合了空冷散热。最新一代热提取综合利用系统从优化 TEG 冷热端结构、连接设计和匹配上提出重大改进,发电率和稳定性有所提升。还增设了自热电动态监测系统,分析和解决现场实际热电

转化故障和异常。除了热电转化之外,系统还实现了系统散热兼区域供暖的双重功效,形成了提热—发电—供暖的资源化循环模式^[24]。图 5 是自主研发的 5 代煤火热能提取发电设备优化提升现场试验情况。

3.3 煤田火区热能提取与综合利用工程试验

团队从 2015 年开始联合新疆煤田灭火工程局将煤田火区热能提取与综合利用技术在新疆大泉湖火区和三道坝火区进行工程实践,现场开展了长周期、大规模、大批量的热回收利用工程试验。在火区成立了全球首个煤火防治与利用工程试验基地(图 6),将煤火热能提取用于供暖与供电,建立了自循环散热供暖系统,至今设备现已完成了 5 代的技术升级(图 5),热能提取和发电供暖成效显著(表 3)。单孔最高发电功率超 2 kW;提热后钻孔降温效果显著,平均降幅 140 ℃。

移除地下煤火热能有利于缓解煤火燃烧,保护煤炭资源,节省灭火材料,降低治理成本,减少有毒有害气体、物质的排放。同时,热提取和转化利用工

表 3 三道坝火区热提取发电供暖设备热利用评估结果

单位钻孔热能利用情况		
区域供电	系统提热功率(kW)	182
	发电功率(kW)	2
热水供暖	水流散热功率(kW)	155
	节约用水量(m ³ /h)	7.632
	散热损失功率(kW)	25



图 5 煤田火区分布式热提取发电装置研发优化对比



图 6 煤火热能利用示范基地发电供暖现场应用

程作为绿色清洁的能源转换形式,解决了偏远地区施工用电以及生活用暖用电问题,代替常规能源,为后续的生态修复和灭火作业提供动力,对煤火区治理方法优化革新产生重大影响。

以新疆三道坝火区为例:若发电供暖设备 100 套计算,年发电量可超 1.7×10^6 万 kWh,节约电费约 85 万元;火区日平均热能降低约 1.5×10^6 kJ,平均节约钻孔注水量 35.8 万吨/年,是传统灭火总需水量的 35%。按照室内标准的热负荷计算,单孔提热可用于 500 m^2 温室供暖或 3000 m^2 住宅面积供暖。

4 助力煤火热资源开发领域发展的若干思考

煤田火区热能提取和利用技术尚处于初期探索阶段,在系统、工艺、材料、结构等相关技术上还存在许多问题。煤田火区地质条件复杂、燃烧强度分布不均,气候环境条件恶劣,要实现煤火地热能回收利用最终的应用推广,还面临诸多挑战,需要进一步加强以下基础理论与关键技术研究。

(1) 煤田火区热资源评估

研究煤田火区流—固—热—化多场耦合作用下的热效应机制,构建煤火阴燃热评估与地热热储体相似模型。创新煤火地热资源热异常定位勘探技术,研发煤火防治与利用智能模拟和感知监测监控技术。建立煤田火区地热资源评估体系标准,实现对地热分级与热储量估算。

(2) 煤火热能安全、高效、低成本提取

研究热机循环工质相变传热传质机理,揭示提热过程内外部热量传递和物质运移规律,提升深部燃烧区增强型换热传热技术。开展地下煤火废弃热能分级高效提取技术研究。提高极端条件下传热元件及装置的换热性、稳定性安全性,实现超长新型重力热管传热提效关键参数和工艺提升。

(3) 煤火热能有效利用及高效转化

强化煤火地热能高效清洁利用转化技术,形成完整的热电转换技术评估体系。开展关键热电材料及工艺技术前沿研究,优化温差电组件的联结和层级结构设计。研究发电元件的冷热源系统匹配耦合和可靠性问题,提高系统散热制冷再循环技术,实现火区大规模长周期地源热泵技术及系统工程的热提取发电应用。

通过以上研究,解决煤田火废热资源开发与生态利用出现的基础理论、新技术、新设备、新工艺和新材料方面的科学问题,从而不断提高提热率、发电效率和利用效率,降低成本。从而改善我国煤矿领

域热害、火灾安全问题,实现能源结构多元化,为健全国家能源资源安全提供有力的科技支撑。

5 总结

全球地下煤火造成的安全和环境问题突出,但同时也蕴藏着巨大的热能。研发适宜于地下火区废热能开发的高效技术与装备,实现传统煤火治理与地热资源开发的深度融合,完成从“治”到“用”的根本性转变,切实改善煤炭行业热害、火灾安全问题的同时,保障国家能源资源安全。本文从理论、技术和工程应用上总结了煤田火热开发与生态利用的研究现状和最新进展,并提出煤田火区热能提取与转换亟需解决的关键科学问题,为煤火的治理和热能的利用提供可参考的研究方向。除煤田火灾,研究成果还可应用于余热回收等交叉领域,如矿井采空区自燃防治、矿井深部的热害防治与利用、长隧道废热控制和利用等。

参 考 文 献

- [1] 张建民. 中国地下煤火研究与治理. 煤炭工业出版社, 2008.
- [2] Song Z, Kuenzer C. Coal fires in China over the last decade: a comprehensive review. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 133:72—99.
- [3] 梁运涛, 侯贤军, 罗海珠, 等. 我国煤矿火灾防治现状及发展对策. *煤炭科学技术*, 2016, 44(6): 1—13.
- [4] Su H, Zhou F, et al. Causes and detection of coalfield fires, control techniques, and heat energy recovery: a review. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2020, 185(3): 3—19.
- [5] Shi B, Su H, Li J, et al. Clean power generation from the intractable natural coalfield fires: turn harm into benefit. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 5302.
- [6] 仲晓星, 汤研, 田绪沛. 大面积煤田火区热能的提取与转换方法. *煤矿安全*, 2016, 47(10): 161—164.
- [7] 任小坤, 唐守胜, 孙郁, 等. 地下煤火热能利用分析. *煤矿安全*, 2017, 48(9): 160—162.
- [8] Deng J, Zhou F, Shi B, et al. Waste heat recovery, utilization and evaluation of coalfield fire applying heat pipe combined thermoelectric generator in Xinjiang, China. *Energy*, 2020, 207: 118303.
- [9] 李同彪. 地热资源评估方法综述. *能源与环境*, 2015, 132(5): 91—92.
- [10] Williams CF. Updated methods for estimating Recovery Factors for geothermal resources. *Geothermics*, 2007.
- [11] Chaudhry HN, Hughes BR, Gharri SA. A review of heat pipe systems for heat recovery and renewable energy applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4): 2249—2259.
- [12] Jouhara H, Chauhan A, Nannou T, et al. Heat pipe based systems—Advances and applications. *Energy*, 2017, 128: 729—754.
- [13] Kürten S, Feinendegen M, Noel Y. *Geothermal utilization of smoldering mining dumps*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 241—261.

- [14] Chiasson AD, Yavuzturk C, Wairath ED. Evaluation of electricity generation from underground coal fires and waste banks. *Journal of Energy Resources Technology*, 2007, 129: 81—88.
- [15] 张新浩. 煤田火区浅部钻孔内嵌式热能提取装置与技术. 徐州:中国矿业大学, 2019.
- [16] 庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用. *能源研究与利用*, 2000(5): 41.
- [17] 张亚平, 王建国, 姬长发, 等. 热管抑制煤自燃的降温效应分析. *煤炭工程*, 2017, 49(2): 100—102.
- [18] 王会勤, 谷明川. 自燃矸石山热管深部移热技术的研究和可行性分析. *能源环境保护*, 2008, 22(2): 1—3, 6.
- [19] Lund JW, Freestod DH, Boyd TL. Direct utilization of geothermal energy. *Geothermics*, 2011, 40(3): 159—180.
- [20] DiPippo R. Geothermal power plants: evolution and performance assessments. *Geothermics*, 2015, 53: 291—307.
- [21] Kajikawa T. Approach to the practical use of thermoelectric power generation. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(7): 1083—1088.
- [22] Wei HA, Gan ZA, Xz B, et al. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, 2015, 143: 1—25.
- [23] 周福宝, 苏贺涛, 陈小雨, 等. 一种煤田火区热能可持续利用与煤火治理系统及方法: 中国, CN106026778B. 2017-10-24.
- [24] 齐海宁, 邓进昌, 刘鹏, 等. 一种煤田火区热能综合利用系统: 中国, CN109724278A. 2019-05-07.
- [25] Su H, Qi H, Liu P, et al. Experimental investigation on heat extraction using a two-phase closed thermosyphon for thermoelectric power generation. *Energy Sources, Part A. Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2018, 40(12): 1485—1490.
- [26] Su H, Zhou F, Qi H, et al. Design for thermoelectric power generation using subsurface coal fires. *Energy*, 2017, 140(1): 929—940.
- [27] 苏贺涛. 基于重力热管换热的地下煤火治理与应用研究. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [28] 周福宝, 苏贺涛, 史波波, 等. 一种分布式煤田火区废弃热能发电系统: 中国, CN106288465A. 2016-09-06.
- [29] 周福宝, 苏贺涛, 史波波, 等. 一种新型地下煤火热能提取温差发电系统: 中国, CN106452186A. 2017-02-22.
- [30] 周福宝, 苏贺涛, 李金石, 等. 一种新型热管煤田火区热能提取发电系统: 中国, CN106787951A. 2017-05-31.

Research Progress on Thermal Energy Development and Ecological Utilization of Coalfield Fire Underground

Zhou Fubao^{1*} Deng Jinchang¹ Shi Bobo¹ Qi Haining¹ Su Hetao² Ge Shaokun¹

1. *School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116*

2. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083*

Abstract The problems of geological hazard, resource economy and ecological environment caused by underground coal fires are outstanding, but there are abundant waste heat resources in the geodogied hazard. Carrying out research and engineering application of coal fire thermal recovery and utilization is of great significance for speeding up fire suppression, energy saving and emission reduction. This article focuses on common basic scientific issues of coal fire and the clean utilization technology of coal-fire thermal conversion. Firstly, it summarizes the existing domestic and foreign literatures in depth, and analyzes the key basic theories and core technologies of coal fire geothermal energy resource development and utilization in the field of thermal resource evaluation, geothermal extraction systems and methods, thermal energy conversion and utilization. The latest researches and applications of coalfield thermal energy extraction and comprehensive utilization system and engineering are also demonstrated. Finally, we point out the key issues and research trends in the field of coal fire prevention and utilization from the aspects of the basic theoretical study, techniques and equipment development.

Keywords coalfield fire; waste heat recovery; thermal utilization; gravity heat pipe; thermoelectric generation

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: f. zhou@cumt.edu.cn