

煤矿低温热源利用技术研究与应用

刘 建 功

(冀中能源集团有限责任公司 河北 邢台 054001)

摘 要: 针对低温热源蕴藏量大且可再生的特点,在分析国内外低温热源利用现状的基础上,指出了煤矿低温热源利用的优势及存在的问题。根据煤矿各种低温热源的特点,在阐述热泵原理的基础上,研究了矿井回风源热泵技术、电厂冷却水热能回收技术、矿井水热能提取技术。结合煤矿低温热源多种形式并存的特点,提出了煤矿低温热源综合利用技术。冀中能源集团所属矿井的低温热源利用效果表明,煤矿低温热源应用具有广阔的发展前景。

关键词: 低温热源; 矿井水; 地热; 地源热泵; 电厂冷却水

中图分类号: X752

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2013)04-0124-05

Study and Application of Mine Low Temperature Thermal Resources Utilization Technology

LIU Jian-gong

(Jizhong Energy Group Corporation Ltd. Xingtai 054001 China)

Abstract: According to the large and regenerated features of the low temperature thermal source reserves based on the analysis on the utilization status of the low temperatures thermal sources at home and abroad the paper pointed out the advantages and problems existed in the utilization of the mine low temperature thermal sources. According to the features of different low temperature thermal sources in mine, based on the statement of the heat pump principle, the paper had a study on the thermal sources pump technology of mine air retuning sources, thermal recovery technology of cooling water in the electric power plant and thermal recovery technology of mine water. In combination with the multi form existed features of the mine low temperature thermal sources a comprehensive utilization technology of the mine low temperature thermal sources was provided. The utilization effect in the mines of Jizhong Energy Group showed that the utilization of the mine low temperature thermal energy would have a wide application prospect.

Key words: low temperature thermal resources; mine water; geothermal; ground source heat pump; cooling water of electric power plant

0 引 言

低温热源的热品位较低,但总量巨大,包括太阳能、地热能以及工业过程中的余热和冷却水热能等。据统计,人类利用的热能中有近50%以低品位废热形式直接排放^[1]。近年来,随着国家对生态环境的重视和科学技术的不断进步,低温热源的利用越来越受到重视,利用率不断提高,利用范围也不断扩大,形成了快速发展的趋势。地温是低温热源的主要组成部分,地表层是一个巨大的太阳能集热器,收集了47%的太阳能,在与地核热综合作用下形成了相对稳定的恒温层(30~100 m),储存了蕴藏量

极为丰富的再生低温热源。地下水排到地面,无论夏季还是冬季,都与地面温度形成很大的温差,这个温差就是低温热源的表现形式,地下水排到地面在提供水资源的同时,还携带大量低温热源。低温热源的商业应用已有30多年的历史,欧洲国家发展得比较快,瑞典、瑞士、奥地利、德国等主要利用地下土壤埋盘管方式获取浅层地热资源,用于室内供暖和生活用热水。20世纪末,地源热泵在家用供热装置中,奥地利所占比例为38%,丹麦为27%,瑞士达到90%以上^[2]。美国商业建筑中地源热泵系统占空调总量的19%,在新建筑中所占比例达30%^[3]。我国自20世纪50年代就已经开始了热泵研究工

收稿日期: 2012-10-10; 责任编辑: 代艳玲

作者简介: 刘建功(1956—),男,山东沾化人,教授级高级工程师,博士生导师,博士。现任冀中能源集团有限责任公司副董事长、副总经理。

引用格式: 刘建功. 煤矿低温热源利用技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 124-128.

作^[2] 90 年代后, 节能及有效利用能源的工作受到重视, 低温热源利用发展加快。目前, 低温热源技术主要应用于民用建筑、一般工业建筑的空调和供暖。低温热源利用主要局限于地下水、地表水等^[4-5]。由于煤矿井下开采环境特殊, 在井下空气和水中储存了丰富的低温能源, 而且一年四季温度基本保持恒定, 形成了储量巨大的可再生低温热源。如果开发利用, 将对煤矿能源结构的调整和绿色生态矿山的建设具有重要的推动作用。近年来冀中能源集团有限责任公司研究了煤矿井下低热值利用技术, 克服了低温热源获取和利用的困难, 将大量不能直接利用的低温热能变为有用的高温热能, 建成了煤矿低温热源应用体系, 成为煤矿生态矿山建设的示范工程^[6]。

1 煤矿低温热源利用特点

煤矿低温热源在煤矿建设开始就已经形成, 是煤炭开采过程中的伴生资源, 煤矿低温热源利用的最大优势是稳定持续, 其具有以下 6 个方面的特点。

1) 蕴藏量大。煤矿建设和开采过程中, 在地下开挖了大量巷道, 围岩的热量都散发到巷道的空气中; 同时在采煤过程中, 会遇到含水层, 大量矿井水也携带着热量。在煤矿开采过程中, 必须排出井下水和有害气体, 2011 年全国煤炭产量 33.2 亿 t, 平均开采每吨煤用风量 $4.15 \text{ m}^3/\text{h}$, 排水量为 $0.5 \sim 4.0 \text{ t}$, 形成了一个相对动态的热能平衡, 蕴藏量巨大, 并可再生的低温热源。

2) 环保。煤矿低温热源利用仅提取矿井回风、排水和冷却水中的能量, 是一种可再生能源, 且无污染物外排。国际能源组织(IEA)认为, 浅层低温地热应用是地热可再生能源的首选, 在我国也大力提倡运用可再生能源来取代以前的不可再生能源。

3) 高效节能。消耗 1 kW 电能可以产生 4 kW 以上的热(冷)能, 供热能效比 1.0: 4.8, 制冷能效比 1: 5 以上, 运行费用是传统方式的 $1/2 \sim 2/3$ ^[7]。

4) 一机多用, 节约投资。在不同季节利用井下的低温热源和地面环境温度形成的温差, 热泵系统可以做到冬天供暖、夏天制冷, 一套系统可以完成锅炉和空调的功能, 减少了设备的初期投资^[8]。

5) 运行稳定可靠。矿井低温热源温度一年四季相对稳定, 是很好的热泵热源和空调冷源, 且不存在空气源热泵冬季除霜等难题。热泵系统采用模块

化设计, 可实现智能化控制和多重保护, 机组运行可靠、稳定, 可保证正常运行 20 年。

6) 减少准备性投资。对于低温热源的利用系统, 很大一部分投资用于热源工程和换热装备, 而在煤矿低温热源利用中, 该部分的投资可大为减少, 因此, 降低了低温热源利用的费用^[9]。

2 煤矿低温热源利用技术

低温热源的特点是热量大、热值低, 因此热值的高效获取是低温热源应用的一个重要关键技术, 对于煤矿低温热源的应用, 又要针对不同热源的存在形式, 采用不同的获取方式, 同时, 不同的季节和不同的应用需求, 也给低温热源的利用提出了新的技术要求。煤矿低温热源利用系统主要有回风源热泵系统、水源热泵系统; 利用技术包括风源热能提取、水源热能提取和矿井低温热源综合利用技术。目前煤矿低温热源利用存在的问题主要有以下 3 点:

①煤矿热源和热阱都是在时变的工况下, 因此需要提高运行控制技术; ②煤矿热源的种类多, 需要研究不同形式的热能提取方式, 提高提取效率; ③热泵系统效率的提高是煤矿低温热源利用的关键^[6]。

1) 热泵原理。热泵是一种将低温热源的热能转移到高温热源的循环系统, 相当于电力系统的“变压器”。按照换热原理不同, 热泵有压缩式、吸收式、吸附式 3 类, 其中, 吸附式热泵目前尚处于研发阶段; 吸收式热泵研究逐步深入, 正开始商业化发展; 压缩式热泵已广泛应用于建筑采暖和空调, 是比较常用的机型。热泵系统原理图 1 所示, 热泵由压缩机、冷凝器、蒸发器和膨胀节流阀形成一个密闭的系统, 制冷剂在系统中不断地循环流动, 发生状态变化, 与外界进行热量交换。制冷剂在系统中经过蒸发、压缩、冷凝、节流 4 个基本过程完成一个制冷循环, 将能量从低温热源搬运到高温用户。在这个循环过程中, 冷凝器是热源, 蒸发器是冷源, 用户如果和冷凝器连接则提供供热、洗浴热水; 用户和蒸发器连接则提供中央空调冷源, 即该套热泵系统可以同时提供供热和制冷 2 种工况^[10]。

热泵虽然需要消耗一定量的电能, 但所供给用户的热量却是消耗的热能与吸取的低位热能的总和, 因此, 热泵是一种节能装置。热泵由动力机和工作机组成热泵机组, 用电动机驱动工作机运转, 将低位的热能输送至高温用户, 向用户供热。

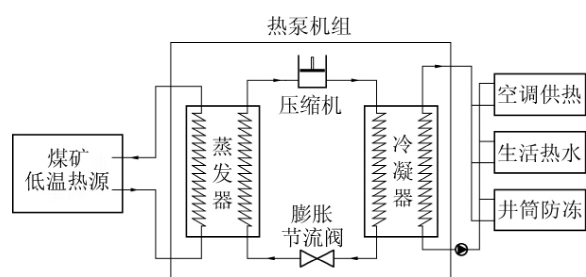


图1 热泵系统原理

在压缩式热泵系统中,提高热泵系统效率是关键技术,主要有3个技术途径:①从设计和加工环节提高压缩机效率,减少压缩机的各种固有损失,按照煤矿各种热源的实际应用进行选型,为发挥压缩机的最高效率,应选择压缩机效率为0.6~0.7;②换热温差是导致实际热泵循环偏离理想状态的重要因素,可通过增加换热面积和采用换热器结构分区设计的方式降低系统中的换热温差;③使用膨胀机代替节流阀回收部分膨胀功,提高热泵循环性能。总体来看,热泵系统效率的提高,能更有效扩展煤矿低温热能应用范围^[11]。

2) 矿井回风源热泵技术。通风是煤矿开采中必不可少的安全行为,每个煤矿都要保证一定风量,因此通风形成的低温热源是稳定的。矿井风热能的提取是在矿井通风系统中安装喷水排管向下喷水,与矿井回风形成逆流换热;也可在矿井排风的风道内通过空气对流的方式提取热能。如果在风道内设计一个空气喷淋室,矿井回风在空气喷淋室内形成矿井风和循环水换热,可利用高密度水幕对矿井排风进行逆向雾化喷淋,使换热温差增大,换热时间延长,充分回收矿井排风中的低热资源,这是一种较好的矿井风热能提取方式。但是由于矿井风中含有粉尘和腐蚀性气体,因此仍存在防腐的问题,工程中利用沉淀池解决粉尘问题,同时采用定期更换循环水的方式去除水中的 SO_4^{2-} 和 Cl^- (图2)。

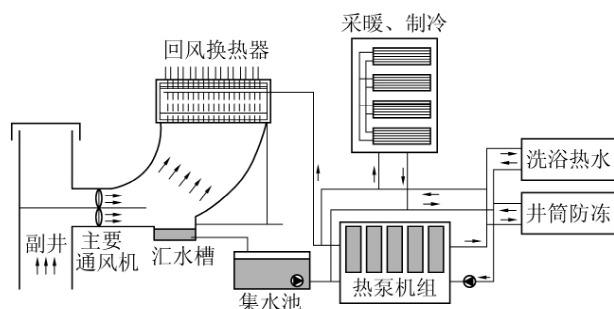


图2 矿井回风源热泵系统

夏季矿井回风换热器系统和热泵冷凝器连接,大量的冷凝热通过回风带走。冬季矿井风温度高于地面,热泵系统处于制热状态,所以冬季矿井回风源热泵系统可以为煤矿提供建筑供热、井筒防冻、洗浴热水热源,夏季提供中央空调冷源。

3) 电厂冷却水热能回收技术。电厂冷却水水温高,作为供热热源节能效果显著,但不能提供冷源。电厂冷却水在进入冷却塔之前,冷却水与热泵系统连接,蒸发器直接回收其热量,可充分回收电厂冷却水低温废热,用于冬季采暖、洗浴、井筒防冻。对于不同的用途,电厂冷却水热能回收有2种选择方案,其中方案1(图3a)可用于新建的供热系统,具有系统相对简单、供热效率高的特点;方案2(图3b)可以实现大型区域锅炉房的供热,对已经形成的原供热系统可以不加改造,就可形成新的供热系统,并且可满足用户对温度的不同需求,但热泵系统相对复杂。

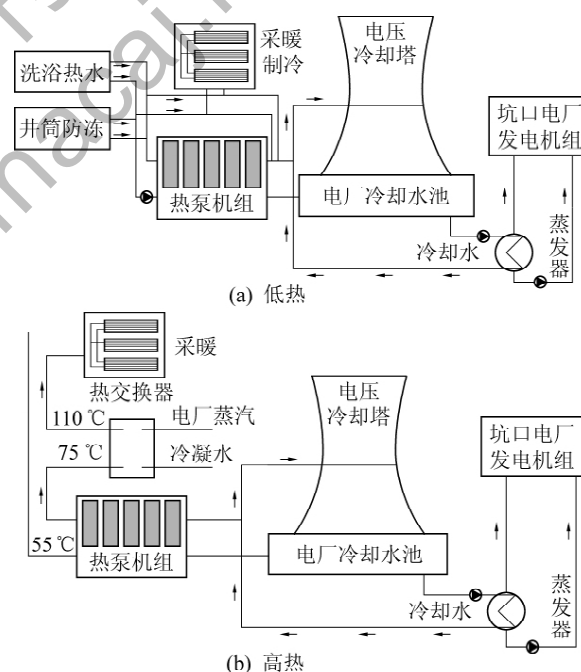


图3 电厂冷却水热泵系统

对于电厂冷却水热能利用,入水水温高,机组运行效率高,热泵系统从电厂进入冷却塔的上水管直接取水,充分利用了原有电厂冷却水循环水泵压力,节约了热泵系统循环水泵能量。同时降低了冷却塔负荷和电厂冷却水蒸发损失,是一种效率非常高的低温热能利用方式。电厂冷却水的热能利用效率高、效果好,但不是每个煤矿都有电厂,因此这种方式的应用有局限性。

4) 矿井水热能提取技术。传统矿井水热能利用是提取处理后的矿井水中的热能。处理后的矿井水受环境温度影响较大,已经损失了大量热能,为了减少热量损失,应在矿井水未经处理前就提取热能^[12]。这时矿井水仍保留着地下热能,热泵系统效率高。但利用未经处理的矿井水作为热源,换热器的研究是一个重点,由于污水中悬浮物、污垢沉淀物较多,而且污水的酸碱度较大,极易对换热器产生腐蚀、结垢、堵塞等现象,从而严重影响传热效率^[13]。现在,已经采用改进材料和设立栅格以及反冲洗装置,解决了上述问题。矿井水热泵系统如图 4 所示。

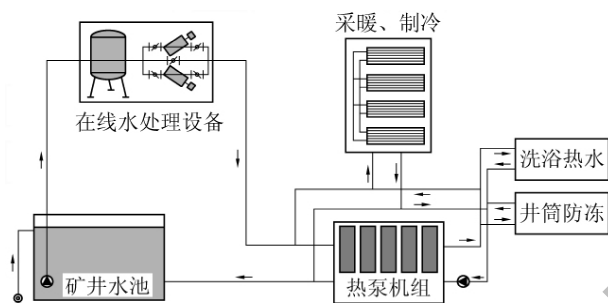


图 4 矿井水热泵系统

煤矿矿井水的涌出量不同地区和不同水文地质条件差别很大,且具有不稳定的特点,尽管矿井水热量的提取非常可观,但利用受到限制。

5) 煤矿低温热源综合利用技术。煤矿是一个完整的生产系统,有多个低温热源,也有多个热阱,所以,煤矿低温热源的综合利用效果更好,对热源分别提取,热阱分梯级利用。煤矿低温热能的综合利用技术就是用一整套系统综合回收煤矿回风、矿井排水、废弃冻结管、电厂冷却水、生活废水等低温热能(图 5)。煤矿低温热源综合利用系统彻底取消煤矿锅炉房,一套系统解决了煤矿冬季建筑供热、井筒防冻、洗浴热水、夏季中央空调供冷等问题^[14]。

3 煤矿低温热源利用经济效益分析

利用低温热源的热泵技术可以节约燃料,合理利用能源,减轻环境污染。研究表明^[15],与区域锅炉房的能耗比较,相同容量热泵站的能耗,用河水(5.0 ~ 6.6 °C)作为低温热源时,年节煤率为 12.68% ~ 14.08%;用海水(12.0 ~ 13.6 °C)作为低温热源时,年节煤率为 21.59% ~ 39.98%;用工业废水(18 ~ 20 °C)作为低温热源时,年节煤率为 39.00% ~ 39.98%。煤矿回风和矿井水的温度都在

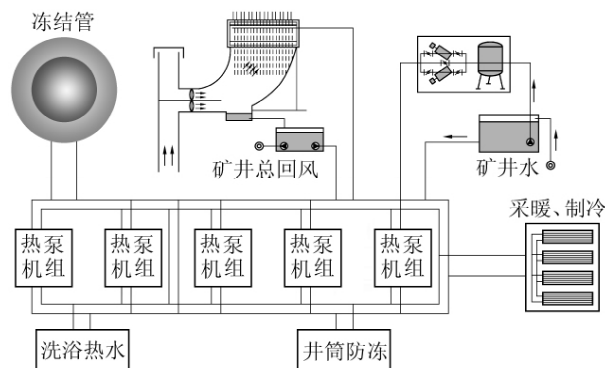


图 5 煤矿低温热源综合利用系统

20 °C 左右,其节煤率也会在 40% 左右。根据 2011 年全国煤炭产量 33.2 亿 t,可利用回风量总计约 382 835 m³/s,利用焓值算法,可利用热能(2.47 ~ 3.29) × 10¹⁴ kJ,可节约标准煤 1 710 万 ~ 2 066 万 t,减少 CO₂ 排放量 4 275 万 t,减少 SO₂ 排放量 68 万 ~ 83 万 t。全国重点煤矿年排水量按 70 亿 m³ 计算(0.5 ~ 5.0 m³/t 煤),每吨水中提取 5 ~ 8 °C 热能,可利用热量(3.88 ~ 4.20) × 10¹⁴ kJ,年可节约标准煤 2 010 万 ~ 2 386 万 t。

热泵的效率与热阱环境的温差有关,温差越小,热泵的效率越高,同时,低温热源温度越高,越容易蒸发吸热,热泵系统效率越高,热泵系统将低温热源的热品位提高,需要消耗能量通常用 COP 描述,理想热泵系统的 $COP = \text{供热温度} / (\text{供热温度} - \text{低温热源温度})$,一般低温热源温度超过 10 °C,消耗 1 kW 的热量可以回收 4.5 kW 以上的热量。对于部分煤矿远高于此数值。尽管煤矿低温热能总量较大,但品质较低,如果按实际利用热量折算的方法评价煤矿低温热能利用系统,虽有一定作用,但可能会低估煤矿低温热能的实际价值。现在对于低温热源利用,采用“烟”经济学评价分析,这种方式结合了“烟”效率分析过程的经济学评价方法,同热经济学相比,“烟”经济学从“烟”效率分析的观点,在整个系统的基础上,考虑影响系统效率的各个因素,反映了低温热源的能源转换效率,可对低温热能系统做出更为合理的经济评价^[16]。

4 冀中能源集团矿井低温热源的应用

低温热源利用是冀中能源集团有限责任公司研究的主要新节能技术之一,已在东庞矿、章村矿、梧桐庄矿、葛泉矿、云驾岭矿和万峰矿得到应用,并取得了良好效果。

1) 东庞矿北井利用热泵技术回收北风井的热量,不仅能够解决北井建筑供暖、井筒防冻问题,且可以满足浴室的热水供应。风源热泵设备的引进,为东庞矿每年节省冬季供暖和夏季制冷费用100余万元,年减少CO₂排放7 000余t,并取消了锅炉房,达到了节能减排的目的。

2) 梧桐庄矿有着良好的节能技术条件,存在大量余热废热可以利用,采用地源热泵技术非常适宜,节能减排潜力巨大。根据初步测算:回收梧桐庄矿生产过程中现有的29℃左右的矿井排水,通过热泵系统可以满足矿区全部建筑物(51 000余m²)的采暖和制冷、主(副)井的保温和防冻、洗浴用水的加热和烘干房用热等全部需求。通过采用先进的地源热泵技术,对传统燃煤锅炉进行完全替代。地源热泵系统正常运行后,每年直接减少费用1 300余万元,减少原煤消耗13 230余t,减少SO₂排放318t,减少CO₂排放33 075t,烟尘排放量2 646t,煤渣排放量3 969t,节能减排效益明显。

3) 章村矿利用高温热泵机组和低温热泵机组优化组合,系统以电厂冷却水、矿井排水、水池清水等多水源为热泵系统低温热源,热源温度在7~50℃变化,系统可以输出70~80℃高温热水、40~55℃中温热水和7~12℃空调冷水,可为章村矿工业广场地面建筑冬季供暖(夏季制冷)、井筒防冻及提供洗浴热水,每年节约燃煤10 192.7t,减少CO₂排放26 501t,减少SO₂排放204t,环保效果显著。

4) 云驾岭矿利用井下矿井水和邻近矸石电厂的冷凝水水温恒定的特点,实施了水源热泵技术,冬天可以取代锅炉房给工业广场、办公楼、职工澡堂和主副井口供热,夏天可以制冷。从运行情况来看,基本达到了设计要求,效果良好。该项目可减少燃煤5 800t,折标准煤4 100t,每年减少SO₂排放116t,减少CO₂排放13 499t,效果显著。

煤矿低温热源综合利用技术作为一种高效、节能、环保技术,符合国家节能减排政策及建设资源节约型、环境友好型社会的战略部署,具有非常广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 常乐,李强,朱子涵,等.低温热能高效利用途径分析[J].中外能源,2012,17(7):85-92.
- [2] 孙士辛,凌武.地源热泵的工作原理及技术经济性分析

[J].机械制造与自动化,2011(3):182-186.

- [3] 蒋慧颖,张铭,闫明.水源热泵系统探讨与应用[J].建筑节能,2007(10):18-21.
- [4] 詹麒.国内外地热开发利用现状浅析[J].理论与实践,2009(7):71-75.
- [5] 刘峰.煤炭行业低碳生态矿山建设模式及评价研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2011.
- [6] 刘建功.冀中能源低碳生态矿山建设的研究与实践[J].煤炭学报,2011,36(2):143-147.
- [7] 施长信,杨运海.水源热泵技术在煤矿上的应用[J].河北煤炭,2009(3):53-54.
- [8] 刘德庆,常智静.浅谈中央空调节能与冷热源选择[J].科技信息,2007(8):332.
- [9] 姬洵,孙潇,权犇,等.利用水源热泵全面回收矿井排风中的余热资源[J].建筑节能,2010(12):14-15,24.
- [10] 李振华.矿井回风源热泵节能技术应用[J].能源与节能,2012,33(10):43-44.
- [11] 马一太,刘春涛,田华,等.提高水源热泵机组效率的技术条件分析[J].太阳能学报,2012,33(1):34-40.
- [12] 张辉.矿井回风及矿井水热能综合利用技术全面推广[J].山西煤炭,2011(6):11-14.
- [13] 杨作义.水源、污水源热泵空调系统简介[C]//第一届中国(西安)采暖通风、制冷空调节能减排技术研讨会论文集.西安[出版者不详],2009:60-63.
- [14] 魏京胜,张党育,岳丰田,等.梧桐庄矿热泵系统可用热源分析及利用[J].煤炭科学技术,2012,40(5):124-128.
- [15] 刘东,陈沛霖,张旭.地源热泵的特性研究[J].流体机械,2001,29(7):42-45.
- [16] 李国栋.水源热泵系统的能效率分析与节能研究[J].铁道标准设计,2010(S1):100-103.

(上接第99页)

- [4] 姜亮.东海陆架盆地第三系煤系烃源岩油气生成与聚集研究[D].北京:中国科学院地球化学研究所,2001:28-31.
- [5] 李家彪.东海区域地质[M].北京:海洋出版社,2008:121-133.
- [6] 蔡乾忠.中国海域油气地质学[M].北京:海洋出版社,2000:68-75.
- [7] 覃建雄,田景春.东海盆地第三系层序地层学初探[J].成都理工大学学报,1998,25(4):508-510.
- [8] 王池阶,冯天元.展望煤成气资源的前景[J].煤炭科学技术,1982,10(6):2-4.
- [9] 刘金水,廖宗廷,贾健谊,等.东海陆架盆地地质结构及构造演化[J].上海地质,2003(3):1-6.
- [10] 高乐.东海陆架中生代残余盆地特征及勘探方向探讨[J].中国海上油气,2005,17(3):148-152.
- [11] 武法东,张燕梅,周平,等.东海陆架盆地第三系沉积-构造动力背景分析[J].现代地质,1999,13(2):157-161.
- [12] 王池阶.世界煤炭资源及其分布规律[J].煤炭科学技术,1980,8(9):63-64,68.