

超低浓度煤层气能源化利用技术研究进展

杨仲卿 张力 唐强

重庆大学动力工程学院

杨仲卿等.超低浓度煤层气能源化利用技术研究进展.天然气工业,2010,30(2):115-118.

摘要 超低浓度煤层气由于甲烷含量低、浓度变化大,常规技术难以实现有效利用,世界上几乎所有超低浓度煤层气都没有经过利用而直接排向大气,不仅造成了能源的浪费,而且污染了大气。为此,综述了国内外超低浓度煤层气作为能源利用的技术、方法和机理,分析了国内外把超低浓度煤层气作为辅助燃料、主要燃料及其浓缩技术的优点和不足之处,重点介绍了超低浓度煤层气作为主要燃料的研究和应用现状,同时提出除了要加强对超低浓度煤层气燃烧机理研究之外,还应对利用技术的适应性和运行的可靠性进一步研究的建议,为减少超低浓度煤层气在世界范围尤其是在我国的排放和能源化利用提供了技术支撑。

关键词 超低浓度煤层气 辅助燃料 主要燃料 热氧化 浓缩

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.02.031

超低浓度煤层气是指煤层气中 CH_4 的体积分数低于 5% 的煤层气,通常条件下,它不能被点燃或者维持燃烧。目前,世界上几乎所有的超低浓度煤层气都未进行回收处理就直接排向大气^[1-2]。超低浓度煤层气的排放一方面造成了有限的不可再生资源的严重浪费,另一方面也加剧了大气污染和温室效应:超低浓度煤层气的主要成分 CH_4 的温室效应是 CO_2 的 20~24 倍, CH_4 对全球气候变暖的贡献占 15%,仅次于 CO_2 。因此,合理回收利用低浓度煤层气具有节能和环保双重意义。

1 超低浓度煤层气能源化利用难点

造成超低浓度煤层气难以利用的原因主要如下:

1) CH_4 含量低。低浓度煤层气常存在于废旧矿井和矿井通风气中,通常条件下,甲烷爆炸浓度(体积分数)区间为 4.5%~15%,为了安全起见,在废旧矿井和矿井通风气中的超低浓度煤层气中 CH_4 体积分数常低于 5%,甚至低于 2%。常规的方法很难实现超低浓度煤层气的能源化利用。

2) CH_4 浓度变化大。超低浓度煤层气中的甲烷含量常受到矿井下煤层气含量、煤炭开采量、通风量等

多种因素的影响,导致其中的甲烷浓度变化幅度较大,给超低浓度煤层气的利用带来了难度^[3-6]。

尽管存在诸多能源化利用的难题,美国、澳大利亚、波兰、加拿大等国已经对超低浓度煤层气展开了研究和利用,而国内的研究才刚刚起步。

2 国外研究进展

2.1 作为辅助燃料

超低浓度煤层气作为辅助燃料可以在电站锅炉内混烧,也可以在燃气轮机、内燃机中替代部分空气。

2.1.1 电站锅炉内混烧

超低浓度煤层气的主要成分为氧气、氮气和少量的可燃气体,可以作为辅助燃料在电站煤粉锅炉、循环流化床内混烧。澳大利亚新南威尔士州的 Vales Point 电站实验了在煤粉锅炉上用超低浓度煤层气替代部分空气,证实了该技术的可行性^[7-8]。目前还没有在循环流化床锅炉中混烧超低浓度煤层气的实验研究,其技术可行性以及混烧超低浓度煤层气对流化床锅炉的影响有待于研究和证实。值得注意的是从矿井抽采出来的超低浓度煤层气的气体速率和浓度常是变化的,这就给锅炉燃烧的稳定性 and 电站操作条件带来

基金项目 重庆市科技攻关重大项目(编号:CSTC,2008AC2051)。

作者简介 杨仲卿,1984年生,博士研究生;2006年本科毕业于重庆大学热能动力工程专业,研究方向为低热值能源和燃烧环保。地址:(400030)重庆市沙坪坝区重庆大学动力工程学院407室。E-mail:zhongqing_yang@foxmail.com

了困难。同时,还要求电站建设离矿井较近,便于超低浓度煤层气的输送。

2.1.2 燃气轮机、内燃机中替代部分空气

在常规燃气轮机中可以利用超低浓度煤层气替代部分空气。Solar 气轮机公司对该项技术进行了研究,但发现煤层气浓度过高时,会因燃烧温度升高过快而引起转子损坏,甲烷体积分数应低于 0.5%^[9]。对于内燃机也可以利用超低浓度煤层气替代补充空气,但内燃机的工作温度介于 1 800~2 000 ℃,因而会产生更多的 NO_x^[7-10]。由于开采出来的超低浓度煤层气常含有细小的煤炭颗粒和粉尘,会对燃气轮机和内燃机的运行带来一定的危害,所以要求在进入燃气轮机和内燃机之前对超低浓度煤层气进行净化和除尘,这就增加了投入,同时运行均要求超低浓度煤层气在浓度和输送方面有较好的稳定性。

2.2 作为主要燃料

利用超低浓度煤层气作为主要燃料,主要分为两大类,一类是利用材料蓄热特性的 TFRR (Thermal Flow Reversal Reactor)、CFRR (Catalytic Flow Reversal Reactor)、CMR (Catalytic Monolith Reactor) 技术;另一类为贫燃气轮机。

2.2.1 TFRR、CFRR、CMR 技术

2.2.1.1 TFRR 技术

TFRR 是由美国 Sequa 公司和瑞典 ADTEC 研制开发的(图 1)。由图 1 可见,反应器的两端是石英砂或者陶瓷颗粒构成的热交换介质,热交换介质中心装有电热元件,反应器周围有较好的绝热层。基本原理是气体与热交换介质在反应区进行热交换,气体受热达到燃烧所需要的温度,发生氧化反应,放出热量^[11-12]。

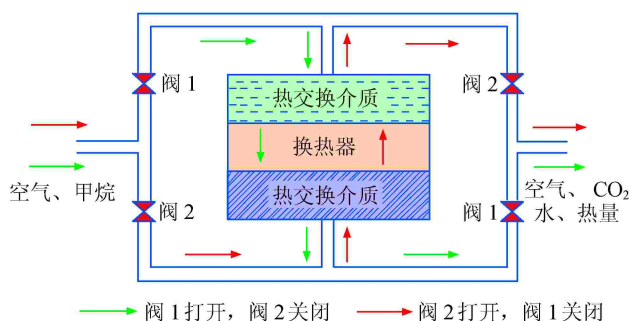


图 1 TFRR 装置示意图

开始运行时,电热元件对热交换介质进行预热,使之达到反应所需要的温度。一个循环包括两次风流转向,每一次转向称为一个半循环。在第一个半循环中,

甲烷和空气的混合物以常温通入反应器,阀 1 打开,阀 2 关闭,风流从反应器顶部流向底部,当空气和甲烷的混合物到达热交换介质时发生氧化反应,放出热量。产生的热量及反应产物持续通过反应器的出口,出口处的热交换介质不断吸热,从而温度不断升高。而入风侧因风流以常温通过,热交换介质不断被冷却,当冷却到一定温度时,反应器自动转换风流方向,进入第二个半循环。风流从高温侧进入,并吸收热交换介质的热量,从而达到自燃温度。反应生成的热量,一部分被热交换器吸收,另一部分用于补偿热损失,从而往复循环。

2.2.1.2 CFRR 技术

CFRR 和 TFRR 在设计和运行上有着相似之处(图 2)。CFRR 是加拿大能源多样化实验室和 NRCan 研制的,与 TFRR 相比,在换热器和热交换介质之间加了催化剂层,其目的是使风流中甲烷的自燃温度降低,使风流转向的周期延长^[13-14]。由于增加了催化剂层,也使得 CFRR 燃烧超低浓度煤层气的最低甲烷浓度有所降低。

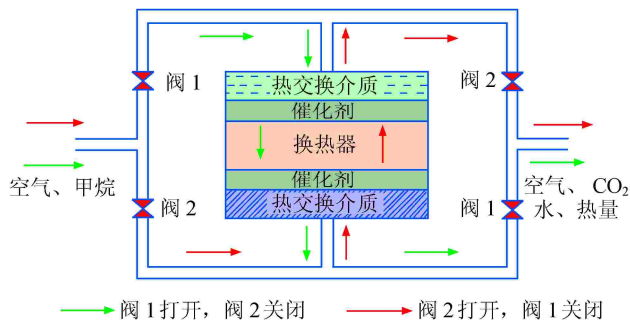


图 2 CFRR 装置示意图

2.2.1.3 CMR 技术

CMR 技术应用了一种蜂窝状的整体反应器,反应器的整体框架由许多平行的管道组成,管道壁面是多孔的支撑结构,上面附有很多具有催化特性的活性颗粒。这种反应器在高质量流时有较低的压降、大的几何面积以及高的机械强度,并对超低浓度煤层气里所含的灰尘有较好的阻碍效果。Shi Su 等^[15]研究表明,在 CMR 中 Pd/Al₂O₃ 对超低浓度煤层气的氧化利用有着较好的催化效果。

从实验和商业运行情况来看,TFRR 要求超低浓度煤层气中甲烷的体积分数至少在 0.2% 之上,CFRR 由于有催化剂层,只要求甲烷体积分数在 0.1% 之上就可以运行,而 CMR 则要求甲烷体积分数在 0.4% 之上,当甲烷体积分数低于 0.4% 时,要求有额外的能量补充才能继续运行。从技术可行性和适用性角度来考

虑,TFRR单元如果要处理 $150\text{ m}^3/\text{s}$ 的气体,其装置占地面积约为 $(63\times14.62\times4.49)\text{m}$,占地相对较大,但CMR处理相同的气体量只需要其 $1/8$ 的占地面积。但TFRR、CFRR的大尺寸装置由于热惯性较大,在处理甲烷浓度变化方面有优势。无论是TFRR、CFRR还是CMR,只有甲烷浓度和通风气速度比较稳定时,燃烧释放的热量才可以用来发电,一般情况下都需要补充天然气。

2.2.2 贫燃气轮机

对贫燃气轮机的研究和开发包括EDL的间壁回热式气轮机、CSIRO的贫燃催化气轮机和IR的带有催化燃烧室的微型气轮机。

2.2.2.1 间壁回热式燃气轮机

EDL开发的燃烧超低浓度煤层气的间壁回热式气轮机,利用从燃烧过程产生的热量来预热气体,使其达到自动点火的温度($700\sim1\,000\text{ }^\circ\text{C}$),然后用燃烧气驱动气轮机。据报道,这种气轮机在甲烷体积分数高于 1.6% 时,就可以把气体加热到 $700\text{ }^\circ\text{C}$,从而使系统能够连续运行,但它需要在矿井通风气中另外增加一定的甲烷来达到要求的浓度^[16]。进气在预热腔内被加热到 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 。然后燃烧腔又把燃料—空气混合物加热到着火点。燃料和气体通过不锈钢管通入到燃烧区,燃烧气体在钢管外加热来气,然后驱动气轮机。

2.2.2.2 催化式燃气轮机

催化式燃气轮机是指带有催化燃烧室的燃气轮机,包括CSIRO开发的催化式燃气轮机^[17]和美国IR研究开发的催化微型燃气轮机^[18]。其共同点是燃烧室采用整体蜂窝状结构,不同的是微型燃气轮机的单机功率更小,一般在 $25\sim300\text{ kW}$,其基本技术特征是采用径流式叶轮机以及回热循环。研究表明,催化燃烧室中 $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 是首选的催化剂,因为它有更高的操作温度和更高的催化剂负载,允许有更宽泛的操作条件。采用催化剂后,只要超低浓度煤层气中的甲烷体积分数大于 1% ,两种燃气轮机系统都可以持续运行,但仍然要求煤层气中甲烷浓度稳定才能产生电能。

2.3 浓缩技术

超低浓度煤层气的浓缩技术有流化床浓缩技术、变压吸附技术和膜分离技术。ECC设计了流化床浓缩技术,主体为流化床浓缩器,包括一个吸收器、一个储存器、一个释放器和一套传送及给料系统。床料由吸收介质组成,常选用的吸收介质是活性炭或者沸石。超低浓度煤层气在上升过程中,其中的甲烷被吸附,吸满甲烷的吸收介质会因密度增加而落入流化床底部,从而被收集至储存器然后至释放器。但该技术在实际

应用中没有获得成功。Warmuzinski K等^[19]对含有 $0.25\%\sim1.5\%$ (体积分数)甲烷的超低浓度煤层气利用变压吸附技术进行了研究,变压吸附过程在两个柱状装置中进行,装置中堆积了 5A 的碳分子筛,在供气速率为 $0.49\text{ m}^3/\text{s}$ 时获得的气体浓度是送气中甲烷浓度的2倍。Zielinska I、Warmuzinski K等对含有 0.5% (体积分数)甲烷、送气压力为 100 kPa 的超低浓度煤层气利用膜分离技术进行了研究,分离膜采用二甲基硅氧烷橡胶(PDMS),得到的分离效率为 3.34 。

对于超低浓度煤层气,无论采用何种浓缩技术,其富集的气体浓度仍很低。通常只能作为逆流反应器或者贫燃气轮机的进气,且富集气体的运行费用超过了气体浓度提升后所产生的经济收益,工业应用受到了限制。因此,超低浓度煤层气的浓缩提纯技术还应在降低成本费用、提高成品气的浓度方面进一步努力。

3 国内研究进展

国内对超低浓度煤层气的研究才刚刚起步^[20]。上海交通大学和CSIRO合作,对超低热值燃料催化燃烧燃气轮机系统特性进行了研究,开展了稳态热力循环性能计算,对其压气机和透平等主要部件进行了结构和气动特性设计,并对变工况下的动态特性进行了仿真模拟^[21],研究分析了超低热值燃料中甲烷体积分数为 $0.8\%\sim2\%$ 、压气机压比在 $1.5\sim3.5$ 之间变化时的燃气轮机机组热力循环效率。研究表明超低热值燃料催化燃烧燃气轮机系统热效率可达 8.43% 。

重庆大学能源与环境研究所针对超低浓度煤层气的特点,研究开发了流态化蓄热技术。该技术将流化床燃烧和蓄热式燃烧的优点结合起来,采用流化床反应器作为燃烧装置,反应器内填充石英砂作为蓄热材料,从底部通入超低浓度的煤层气,流化床反应器就为蓄热体,可以维持 $900\sim1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 高温;反应器上部高温颗粒可以运动到反应器下部,传递大量的热量;能够适应煤层气中甲烷浓度大幅度变化;启动方便,可以用油、气或电启动;装置的散热较少,热能回收的受热面布置比较灵活。

4 存在问题及展望

1)发达国家已对超低浓度煤层气能源化利用技术进行了研究和开发,这些技术不仅可以减少甲烷的排放,当超低浓度煤层气中甲烷浓度稳定时还可以用来产生饱和蒸汽和发电。但由于受超低浓度煤层气甲烷含量、流量和浓度变化、输送距离、经济成本等因素制约,上述技术的大规模推广还存在一定的困难。

2)我国是煤层气排放大国,但对超低浓度煤层气利用技术的研究和开发才刚刚起步。目前,上海交大、重庆大学等单位对超低浓度煤层气的能源化利用开展了研究,但离技术的大规模推广应用还有一定距离。

3)目前的研究主要针对超低浓度煤层气利用技术,对煤层气中超低浓度甲烷的着火机理、燃烧反应动力学等问题的研究报道较少,还有待深入研究。

4)超低浓度煤层气催化燃烧利用时,往往受到催化剂使用寿命的限制,催化剂的良好性能和如何延长其使用寿命需进一步研究。

5)超低浓度煤层气作为辅助燃料为其利用提供了多种途径,但有些技术如在循环流化床中混烧等还需要进一步实验验证,同样,超低浓度煤层气加入后对装置的影响以及污染物的排放特性也要进一步研究。

6)下一步研究的重点应该放在超低浓度煤层气利用技术和装置对其浓度和流量的适应性、运行成本的降低以及运行的可靠性上。

参 考 文 献

- [1] KRZYSZTOF WARMUZINSKI. Harnessing methane emissions from coal mining[J]. Process Safety and Environment Protection, 2008(86): 315-320.
- [2] 胡殿明,林柏泉. 煤层气瓦斯赋存规律及防治技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2006: 232-273.
- [3] NAKAYAMA S. Simulation of methane gas distribution by computational fluid dynamics [J]. Mining Science and Technology, 2002(99): 259-262.
- [4] SHI SU, HONGWEI CHEN. Characteristics of coal mine ventilation air flows[J]. Journal of Environment Management. 2008(86): 44-62.
- [5] SRIVASTAVA M. Systematic quantification of ventilation air methane and its evaluation as an energy source [J]. Mining Engineering, 2006, 58(11): 52-56.
- [6] SHI SU, ANDREW BEATH. An assessment of mine methane mitigation and utilization technologies [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31: 123-170.
- [7] CAROTHERS P, DEO M. Technical and economic assessment: mitigation of methane emissions from coal mine ventilation air[R]// Coalbed Methane Outreach Program. Washington: US Environmental Protection Agency, 2000.
- [8] MALLETT C W. Opportunities for utilization of mine methane in Australia—a technological and economic review [C]. Sydney: The Australian coal seam and mine methane conference, 2003.
- [9] BAGHERI, HAMID. Ventilation of gas turbine package

enclosures: Design evaluation procedure [C]. Hamburg: Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2006.

- [10] XIAO F, SOHRABI A. Effects of small amounts of fugitive methane in the air on diesel engine performance and its combustion characteristics [J]. International Journal of Green Energy, 2008, 5(4): 334-345.
- [11] GOSIEWSKI K, WARMUZINSKI K, JASCHIK M, et al. Kinetics for thermal oxidation of lean methane-air gas mixtures in reverse-flow reactors [J]. Chemical and Process Engineering, 2007(28): 335-345.
- [12] GOSIEWSKI K. Efficiency of heat recovery versus maximum catalyst temperature in the reverse-flow combustion of methane[J]. Chemical Engineering Journal, 2005(107): 19-25.
- [13] GOSIEWSKI K, WARMUZINSKI K. Effect of the mode of heat withdrawal on the asymmetry of temperature profiles in reverse-flow reactors [J]. Chemical Engineering Science, 2007(62): 2679-2689.
- [14] GOSIEWSKI, KRZYSZTOF. Effective approach to cyclic steady state in the catalytic reverse-flow combustion of methane[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(19): 4095-4101.
- [15] SHI SU, JENNY AGNEW. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane [J]. Fuel, 2006(85): 1201-1210.
- [16] FIASCHI D. The recuperative auto thermal reforming and recuperative reforming gas turbine power cycles with CO₂ removal—Part II: The recuperative reforming cycle [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(1): 62-68.
- [17] SU SHI, BEATH A C. Coal mine ventilation air methane catalytic combustion gas turbine[J]. Greenhouse Gas Control Technologies, 2003(2): 1287-1292.
- [18] KOSMACK, DEBORAH A. Use of coal mine methane in a microturbine at Consol Energy's Bailey Mine[C]// Pittsburgh: 23rd Annual International Pittsburgh Coal Conference. [S.l.]: Environment and Sustainable Development, 2006.
- [19] KRZYSZTOF WARMUZINSKI, MAREK TANCZYK. Multicomponent pressure swing adsorption part modelling of large-scale PSA installations[J]. Chemical Engineering and Processing, 1997(36): 89-99.
- [20] 范庆虎,李江艳,尹全森,等. 低浓度煤层气液化技术及其应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 117-120.
- [21] 王艳杰,翁一武,尹娟,等. 燃用超低热值燃料的燃气轮机及其热力分析[J]. 热能动力工程, 2007, 22(3): 259-263.