

地下煤炭气化发电系统运行特性的试验研究

李传统

(南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 介绍了山东新汶矿业集团在所辖的两个煤矿井进行的地下煤炭气化工艺流程、气化气态产物的主要成分和热值测定结果。地下煤炭气化的气态产物经过净化后,除了供给矿区 25 000 户居民作为家庭用燃料以外,还作为内燃机发电机组的发电燃料,内燃机发电机组的单机额定发电功率为 400 kW。实际运行结果表明,机组的发电燃料单耗由于燃烧控制系统不能保证燃料充分燃烧造成气缸积炭而增加了 15% ~ 20%。为此提出了地下煤炭气化气体产物有效的净化流程,并对发电机组的运行参数、机组出力的影响规律和地下煤炭气化内燃机发电机组的运行特性进行了研究,得出了地下煤炭气化的气态气化产物的收到基低热值在 5.72 ~ 16.161 MJ/Nm³ 范围内,气缸正常运行时的壁温范围为 370 ~ 420℃。地下煤炭气化内燃机发电机组的正常连续运行时间超过 4 500 h 为地下煤炭气化发电机组的推广应用提供了可靠的技术依据。

[关键词] 煤炭地下气化, 内燃机, 气体净化, 发电系统

[中图分类号] TK 16 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2007) 04-0028-05

An Experimental Study on Operating Features of Underground Coal Gasification Power Generation System

Li Chuantong

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract This paper introduces the technical flow of the underground coal gasification(UCG), the main components of the gas products and their heat values measured in UCG which is carried out by two coal mines belonging to Shandong Xinxin Coal Mines Group. Not only are the cleaned UCG gas products used as household fuel for the 25 000 families living in themining area but also as fuel for power generation of the generator set with the internal combustion engine whose single rated power is 400 kW. Practical operating results indicate that the fuel consumption increases by 15% ~ 20% due to carbon deposit caused by insufficient combustion in the cylinders. Hence, this paper puts forward an effective cleaning flow for UCG, studies the impacts of the operating parameters of the generator set on its output and the operating features of the UCG power generation systems. A conclusion is drawn that the UCG internal combustion engine generators can run over 4 500 hours continuously when the low heat-value in received standard Q_{ar1} of the UCG gas products ranges from 5.72 MJ/Nm³ to 16.161 MJ/Nm³ and the temperature on the cylinder under regular operating situation varies from 370℃ to 420℃. And a reliable technical support is provided for the generalization and application of the generator set of the underground coal gasification.

Key words underground coal gasification, internal combustion engine, gas cleaning, power generation system

0 引言

自 1980 年以来,煤炭在我国的一次能源中所占的比例一直保持在 75% 左右。2006 年中国原煤产量已达 23.8 亿吨,煤炭在一次能源中的比例约为 70%。我国以煤炭作为主要一次能源的能源结构,使我国的大气环境遭到严重的污染。在我国 696 个市(县)中,有 2/3 以上城市的空气污染超标,有 357 个市(县)出现酸雨,有 30% 以上的国土面积遭到酸雨的侵害。为了缓解我国现有的一次能源结构对我国环境保护造成的压力,开发和利用不同形式的新能源和再生能源,提高新能源和再生能源在我国一次能源结构中所占

收稿日期: 2007-04-23

基金项目: 煤炭加工与高效清洁利用教育部重点实验室开放基金 (CPEUKF06-02) 资助项目。

作者简介: 李传统 (1954-), 教授, 博士, 主要从事新能源与可再生能源技术方面的教学与研究。E-mail: lic2003@hotmail.com

的比例, 对我国的国民经济可持续发展具有重要的战略意义. 随着我国国民经济的快速发展, 我国的煤炭年产量逐年增加. 由于采煤工艺的需要和地质条件的限制, 我国目前的煤炭回采率与国际先进水平相比还有相当大的差距, 在煤炭的开采过程中会遗留大量的煤炭. 为了充分回收和利用遗留的煤炭资源, 我国近年来对地下煤炭气化进行了广泛和深入的研究, 并且获得了具有实用价值的研究成果, 达到了工程实用的阶段. 我国已经成功运行了 30 多个煤炭地下气化炉, 所产生的地下煤炭气化气态产物主要用作民用燃料. 在新汶矿业集团所属的煤矿中, 共有 5 个煤炭地下气化炉, 所产的煤气除了供给所在矿区 25 000 户居民用作民用燃料外, 孙村煤矿和鄂庄煤矿的煤炭地下气化产生的煤气分别各供 1 台额定发电功率 400 kW 的内燃机发电机组进行发电. 在新汶矿业集团, 还有 3 个地下煤炭气化炉已具备产气的条件, 因目前煤炭地下气化发电技术有待于完善, 地下煤炭气化炉尚处于投运备用阶段. 因此, 研究合理的煤炭地下气化产物的净化工艺和发电系统的优化运行措施, 对促进煤炭地下气化气态产物发电技术产业化和改善我国的一次能源结构具有重要的实用价值.

1 煤炭地下气化气态产物的成份与热值

对新汶矿业集团所属的孙村煤矿和鄂庄煤矿煤炭地下气化炉的气体产物进行了现场采样和定量分析, 相应的煤炭地下产物的成分和收到基低热值 Q_{ar} 如表 1 所示.

表 1 煤炭地下气化产物的成分和收到基低热值

Table 1 Components and low heat-value in received standard of underground coal gasification

炉号	取样时间	煤气成份 %						Q_{ar} MJ/m ³	产气量 / (Nm ³ / h)
		H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂		
孙村	10: 00	44. 52	10. 50	8. 30	26. 51	0. 56	9. 61	10. 30	1 200
孙村	8: 00	37. 78	6. 23	9. 11	43. 27	1. 11	2. 50	9. 23	1 300
孙村	12: 00	58. 49	12. 12	10. 12	15. 27	0	4. 00	13. 01	1 200
孙村	13: 00	55. 87	10. 01	8. 81	21. 01	0	4. 30	11. 89	1 400
孙村	14: 00	56. 06	9. 42	9. 22	20. 49	0. 74	4. 07	12. 00	1 300
鄂庄	10: 00	44. 37	12. 09	9. 20	27. 33	1. 20	5. 81	10. 66	1 800
鄂庄	12: 00	55. 46	14. 87	8. 23	16. 42	1. 60	3. 42	12. 07	1 600
鄂庄	9: 00	16. 56	5. 10	7. 47	41. 24	2. 80	26. 83	5. 72	1 500
鄂庄	10: 00	18. 76	4. 96	9. 12	42. 37	3. 00	21. 79	6. 64	1 400
鄂庄	11: 00	45. 91	9. 62	9. 32	27. 01	1. 80	6. 34	10. 59	1 500

从表 1 可以看出, 煤炭地下气化气态产物的主要成分为 H₂、CO、CH₄、CO₂、O₂、N₂ 等. 氢气具有分子量大、小热值高的特点, 其燃烧的容积浓度为 4. 1% ~ 75%, 着火能仅为 0. 013~ 0. 020 MJ. 它燃烧的产物为水, 是一种理想的清洁燃料. 煤炭地下气化气态产物的收到基低热值在 6. 64~ 16. 161 MJ/Nm³, 实测的煤炭地下气化气态产物的收到基低热值最高可达 16. 161 MJ/Nm³, 可以作为能源化利用的燃料.

2 地下煤炭气化产物的净化工艺

在煤炭地下气化产物中, 除了其所含的主要成分 H₂、CO、CH₄、CO₂、O₂、N₂ 外, 还含有少量的苯、环烷烃、氨、硫化氢、焦油等有毒有害成分. 这些有毒有害成分虽然数量很少, 但它们的存在会影响内燃机发电系统运行的可靠性和使用寿命. 如焦油会逐渐沉积在气体输送管道的管壁上, 在气体输送管道长时间运行后会导致输送管道有效流通截面变小, 增大了气体输送的功耗; 硫化氢的存在会引起内燃机气缸壁的腐蚀, 影响内燃机运行的安全性和使用寿命. 因此, 要将煤炭地下气化产物作为内燃机发电机组的燃料, 必须采用合理和有效的气体净化工艺将煤炭地下气化产物中的硫化氢等有害成分脱除, 以避免煤炭地下气化气态产物在内燃机的燃烧过程中产生气缸腐蚀. 对煤炭地下气化产物中的有害成分进行定量分析, 研究合理的煤炭地下气化产物的净化工艺, 对保证内燃机发电系统的可靠性和经济性具有十分重要的意义.

在对地下煤炭气化产物现场采样后, 对地下煤炭气化产物中的有毒有害成分在实验室进行了定量分析, 煤炭气化产物中所含的有毒有害成分的分析结果如表 2 所示.

表 2 煤炭地下气化产物中的有毒有害成分
Table 2 Content of hazardous and poisonous gases

成分 / (mg/Nm ³)	苯	环烷烃	氨	硫化氢	焦油
含量	90~110	90~120	50~70	130~1140	900~4200

对新汶矿业集团所属的孙村矿和鄂庄矿的煤炭地下气化炉的气体产物采用的净化流程如图 1 所示。

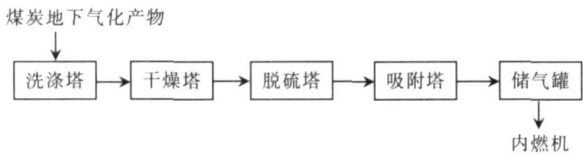


图 1 煤炭地下气化产物净化流程示意图
Fig.1 Cleaning process of product of UCG

在图 1 中,来自地下煤炭气化炉的气体产物首先进入洗涤塔,在洗涤塔内,经过雾化的水与煤炭气化气态产物进行逆流充分接触,将气态产物的温度降到 90℃以下;煤炭气化气态产物流经洗涤塔时,气态产物中夹带的固体颗粒被有效脱除.冷却后的气化气态产物的水分含量很高,其相对湿度接近 100%,因此要在洗涤后采用干燥塔脱除煤炭气化气态产物中的水分;在煤炭气化气态产物脱除约 70%水分之后,将煤炭气化气态产物送入脱硫塔,脱硫塔中的脱硫剂与煤炭地下气化气态产物充分接触后,使煤炭气化气态产物中的硫得到有效脱除,脱硫效率超过 99%;煤炭气化气态产物脱硫后,再将其送入吸附塔,吸附剂在吸附塔内将煤炭气化气态产物中的有毒有害成分脱除,使其成为可供民用和内燃机发电机组使用的清洁气体燃料,将其送入储气罐进行储存备用。

3 地下煤炭气化气体发电系统

在将煤炭地下气化产物作为燃料的发电系统中,通常采用燃气轮机或内燃机作为将煤炭地下气化气态产物的化学能转化为机械能的装置.由于我国目前尚没有以煤炭地下气化气态产物为燃料的燃气轮机定型产品,所以新汶矿务局的孙村煤矿和鄂庄煤矿均采用额定功率为 400kW 的 12缸内燃机发电机组作为煤炭地下气化产物的发电设备.在对孙村煤矿和鄂庄煤矿的煤炭地下气化产物成分的组成进行分析中发现,煤炭地下气化气体产物中的氢气容积浓度有时高达 60%.为了保证发电机组运行的安全性,我国规定气体燃料中的氢气容积浓度不能超过 20%,因此煤炭地下气化的气态产物用作内燃机的燃料时,在进入内燃机之前要采用气体混合器稀释煤炭地下气态产物中氢气的浓度,使其中的氢气容积浓度降到 20% 以下之后,再送入内燃机进行发电.为了保证内燃机 12个气缸中的气体燃料进行合理的分配,并保证气态燃料在不同的气缸内进行高效燃烧,采用电控装置控制进入各气缸的气体燃料量和空气量,防止含有氢气的气体燃料发生爆燃,实现内燃机的安全、高效运行.内燃机发电机组的实际运行结果表明,内燃机发电机组的连续正常运行时间超过 4 500 h,年运行时间平均超过 6 800 h,实现了内燃机发电机组的商业化运行。

4 地下煤炭气化气体发电系统的运行特性

在内燃机发电机组中,为了研究内燃机气缸壁温和内燃机冷却水温度变化对内燃机发电功率和运行工况的影响,对孙村煤矿和鄂庄煤矿的内燃机发电机组的气缸壁温和冷却水进、出口温度采用热电偶进行了实时测量.内燃机气缸壁温随机组运行时间的变化如图 2所示.对于收到基低热值在 5.72 ~ 16.161 MJ/Nm³ 范围内的地下煤炭气化的气态产物,从图 2可以看出,气缸在内燃机正常运行时的最高壁温范围为 370~420℃,气缸的最低壁温为 160~197℃,内燃机运行过程中气缸壁的最高温度与最低温度的最大温差为 217℃,容易造成气缸壁的附加热应力,影响内燃机的使用寿命.根据孙村煤矿和鄂庄煤矿内燃机发电机组的实际运行经验,为了保证内燃机发电机组的安全性,防止含有氢气的气体燃料发生非正常的爆燃,内燃机气缸的最高壁温控制在 370~400℃温度为宜。

内燃机冷却水进、出口温度随机组运行时间的变化如图 3所示.从图 3可以看出,冷却水在内燃机中的温升为 2~4℃,能保证气缸壁水侧的温度比较均匀,使气缸壁得到有效的冷却。

内燃机发电机组的输出功率与气体燃料单耗随煤炭地下气化气态产物的收到基低热值的变化如图 4

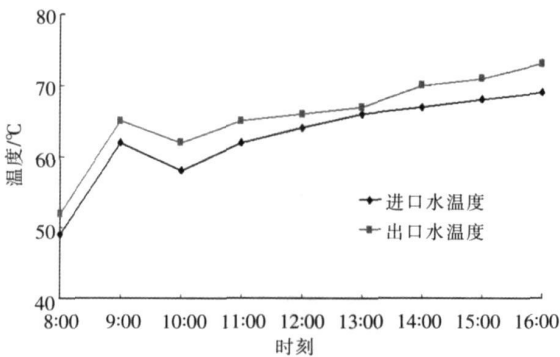


图2 内燃机气缸壁温随机组运行时间的变化
Fig.2 Temperature of cylinder wall with operating time of internal combustion engine

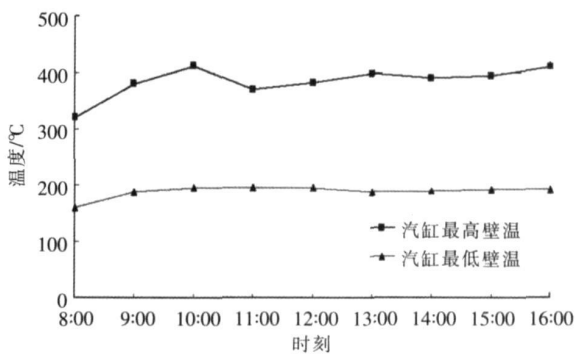


图3 内燃机冷却水进出口温度随时间的变化
Fig.3 Temperature of cooling water with operating time of internal combustion engine

所示。从图 4 可以看出, 煤炭地下气化气态产物净化后作为内燃机发电机组的气体燃料时, 在其收到基低热值超过 9.2 MJ/Nm^3 时, 随着内燃机发电机组输出功率的增加, 气体燃料的单耗随之下降。这表明, 当内燃机发电机组的输出功率接近额定功率时, 内燃机的燃烧状况逐渐趋近于设计的最佳燃烧工况, 从而降低了气体燃料的发电单耗。

实际上, 内燃机的热效率不能从本质上反映出内燃机发电机组中不可逆热损失存在的准确部位, 难以找出提高内燃机发电机组热效率的有效途径, 而分析则可以找出内燃机发电机组中不同子系统造成的损失的大小, 可以得出提高机组热效率的有效途径。

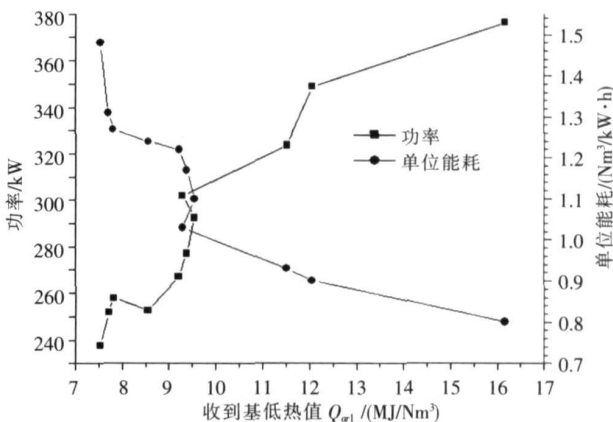


图4 机组输出功率和气体单耗随气体燃料热值的变化
Fig.4 Fuel consumption of output power with low heat-value of the UCG gas products

现对孙村煤矿和鄂庄煤矿煤炭地下气化气态产物内燃机发电机组进行分析。孙村煤矿和鄂庄煤矿的内燃机发电机组相同, 以孙村煤矿内燃机发电机组为研究对象, 将内燃机发电机组分为燃料混合器、燃烧室、气缸等 3 个子系统进行分析。以该机组某一天的实际运行工况为例, 煤气平均收到基低热值为 8.725 MJ/Nm^3 , 煤气耗量 4332 Nm^3 , 发电 3450 kWh 外供电量 3285 kWh 运行结果表明, 发电热耗率为 11882 kJ/kWh , 煤气单耗为 $1.26 \text{ Nm}^3/\text{kWh}$ 机组发电效率为 30.2% , 供电热耗率为 12487 kJ/kWh 供电效率为 28.9% , 供电单耗为 $1.32 \text{ Nm}^3/\text{kWh}$

由效率 η_e 的定义知:

$$\eta_e = \frac{(E_B^- - E_B^+) + \alpha(E_C^- - E_C^+)}{(E_A^+ - E_A^-) - (1 - \alpha)\beta(E_C^- - E_C^+)}, \quad (1)$$

式中, $(E_A^+ - E_A^-)$ 为主源提供的净 /J $(E_B^- - E_B^+)$ 为主收益户的净 /J $(E_C^- - E_C^+)$ 为辅助收益户的净 /J α 和 β 是介于 $0 \sim 1$ 之间的系数。

由损失系数 Ω_i 的定义知:

$$\Omega_i = \frac{\Pi_i}{(E_A^+ - E_A^-) - (1 - \alpha)\beta(E_C^- - E_C^+)}, \quad (2)$$

式中, Π_i 是局部损失系数。

分析结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 内燃机发电机组的效率为 28.3% , 损失主要集中在燃烧过程中的能量转换、机组冷却过程中传热温差大和机组排烟温度高等 3 个方面。孙村煤矿的内燃机发电机组运行结果表明, 机组经过长时间的运行后, 由于燃烧控制系统不能保证燃料充分燃烧造成气缸积炭, 使内燃机发电机组的气体燃料单耗增加了 $15\% \sim 20\%$ 。

表 3 分析结果

Table 3 Summary of exergy analysis results

项目		/kJ	损失 /kJ	$\eta_E / \%$	Ω_i
气体混合器	输入	9 532. 54	1. 30	99. 99	0. 000 14
	输出	9 531. 24			
燃烧室	输入	9 531. 24	5 574. 74	41. 51	0. 584 81
	输出	3 956. 50			
气缸	输入	3 956. 50	1 258. 97	68. 18	0. 133 07
	输出	2 697. 53			
η_{Et}		—	—	28. 29	—
$\Sigma \Omega_i$		—	—	—	0. 717 02

注: $\Sigma \Omega_i$ 为发电系统 损失系数.

5 结语

煤炭地下气化气态产物富含氢气,采用气体混合器降低煤炭地下气化气态产物中氢气的浓度,并采用电控装置控制内燃机的燃烧,可以有效地保证内燃机发电机组的安全性和可靠性.

煤炭地下气化气态产物中含有微量的有毒有害成分,采用净化工艺脱除后,在保证内燃机发电机组安全、高效运行的同时,可使内燃机发电机组的污染物排放符合我国有关的排放标准.

内燃机发电机组的热效率随其气缸壁温的增加而提高,为了保证内燃机发电机组的安全性,内燃机的气缸壁温应控制在煤炭地下气化气态产物的着火点以下. 内燃机发电机组的分析表明,内燃机机组的损失系数很大,主要集中在燃烧过程中的能量转换、机组冷却过程中传热温差大和机组排烟温度高等 3 个方面. 采用内燃机与燃气轮机组成联合循环,可有效提高以煤炭地下气化气态产物为燃料的发电系统的效率.

内燃机发电机组适合作煤炭地下气化气态产物的发电系统,为我国地下煤炭残余资源的开发和有效利用开辟了新途径,是地下煤炭残余资源应用的一种新途径,在我国具有实际推广应用价值.

[参考文献] (References)

[1] 新汶矿业集团技术中心气化办公室. 孙村煤矿地下气化技术研究与应用 [R]. 新汶, 2000
Underground Coal Gasification Research Center of Xinwen Coal Industry Group. Underground coal gasification research and application in Suncun Coal Mining [R]. Xinwen 2000 (in Chinese)

[2] 刘宝银, 张立军, 邱波. 高含氢地下气化煤气发电技术研究与应用 [J]. 洁净煤技术, 2002, 8(2): 19- 22
Liu Baoyin, Zhang Lijun, Qiu Bo. Research and application of high hydrogen content underground coal gasification gas for power generation [J]. Clean Coal Technology, 2002, 8(2): 19- 22 (in Chinese)

[3] 于洪军, 王成. 新汶矿区煤炭地下气化技术的成功实践与启示 [J]. 中国矿业, 2001(1): 57- 59.
Yu Hongjun, Wang Cheng. Successful application and experience of underground coal gasification in Xinwen coal industry group [J]. China Mining 2001(1): 57- 59. (in Chinese)

[4] 朱明善. 能量系统 分析 [M]. 北京. 清华大学出版社, 1988 182- 187.
Zhu Mingshan. Exergy Analysis of Energy Systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988 182- 187. (in Chinese)

[5] 何光艳, 李传统. 地下煤炭 气化发电机组运行特性 分析 [J]. 能源研究与信息, 2004, 20(4): 205- 209.
He Guangyan, Li Chuantong. Exergy analysis of the performance of underground coal gasification and power generation units [J]. Energy Research and Information, 2004, 20(4): 205- 209 (in Chinese)

[6] He Guangyan, Li Chuantong. Experiment study on performance of underground coal gasification and power cogeneration system [C] // Proceedings of the International Conference on Energy and the Environment. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 2003: 346- 349.

[责任编辑: 刘 健]