

煤炭地下气化与氢能的开发

Coal Underground Pneumatolysis and Development of the Hydrogen Energy

余 力

(中国矿业大学,教授 北京 100083)

鲍德佑

(北京有色金属研究总院,高级工程师 北京 100088)

一、前 言

虽然我国目前已经开始注意发展可再生和清洁能源,但我国能源结构中煤炭占 70~75%,这种现象近期内很难改变。我国的核能、风能、太阳能、水电、地热等,近期内很难占到很大比例,主要因为各类新能源研究、开发投入较大,而太阳能、风能等

又不能不间断地大量供应(有昼夜、晴天、阴雨等原因)。因此煤炭工业仍将是我国能源工业的“顶梁柱”。

面对 21 世纪全球高质高效发展的挑战,我们不得不立即着手煤炭工业的改进与提高,尤其在开采、运输、应用方面的问题更是严重紧迫,例如井下开采的危险性,伤亡事故率高以及效率低、回收率低等。

表 1 各国煤炭地下气化对比表

国别	试验地点	时间 (年)	煤气成分%						热值 Kcal/m ³
			O ₂	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	
美国	高尔加斯	1948	12.7	6.0	0.5	0.9	0.4	79.5	35~450
	高尔加斯	1952	0.6	11.7	7.1	7.6	2.1	70.9	639
	汉 纳	1979	0.0	44.0	1.9	25.1	10.1	16.1	2 010
	汉 纳	1979	0.0	15.0	8.0	12.4	2.9	49.0	1 030
英国	纽门斯平尼	1950	0.0	15.5	4.9	7.9	1.0	70.7	490
意大利	瓦里达而诺	1979	0.2	19.7	4.5	15.6	2.2	57.8	820
比利时	布阿略达姆	1979	0.07	36.1	18.5	36.1	5.4	0.0	2 041
	布阿略达姆	1979	0.08	13.4	36.2	31.8	3.0	2.0	2 310
	布阿略达姆	1979	0.09	19.3	53.3	17.6	0.7	0.0	2 190
法国	哲拉达	1955	0.0	19.5	4.0	15.0	4.5	57.0	975
前苏联	顿巴斯	1952	0.2	12.1	15.9	14.8	1.8	54.8	1 000
	莫斯科近郊	1956	0.3	19.5	7.1	14.1	1.5	55.9	835
	南阿宾斯库	1964	0.0	5.6	28.7	18.4	2.1	44.9	1 550
中国	大同胡家湾	1958	0.7	15.8	7.3	15.9	1.2	58.1	909
	蛟河煤矿	1958	2.8	8.3	15.0	10.7	0.7	62.6	834
	鹤岗兴山矿	1958	1.4	10.3	21.3	16.0	2.8	49.2	1 322
	徐州新河矿	1994	0.0	12.6	11.9	63.6	10.2	1.7	3 269

当前国内外最关心的还有环境保护问题。大量用煤造成大量二氧化碳(CO₂)及相应的大量有害温

室气体(CO₂、NO_x、SO₂、CH₄、固体微粒)排入大气。联合国早在 1979 年召开的世界煤炭远景会议

上就明确指出：“发展煤炭地下气化是世界煤炭开采的研究方向”，我国科学技术中长期发展纲要（白皮书）中，也明确提出了到 2020 年的战略目标和关键技术是要完成煤炭地下气化研究试验和建立商业性煤炭地下气化站。1991 年经国家计委批准和专家论证的徐州新河二号井煤炭地下气化半工业性试验，被列入国家“八五”科技攻关项目，于 1994 年 3 月 23 日一次点火成功，运行正常，连续产气 295 天，完成了预定的试验目标。经过试验及专家评议，认为该次试验是成功的，具有国际先进水平（见表 1）。1995 年 5 月经河北省计委批准立项，在唐山刘庄煤矿进行了煤炭地下气化工业性试验。

刘庄煤矿现可供地下气化的煤储量有 300 万吨，目前的试验区由两槽煤层组成，9 号煤层储量 3 万吨，通道长度 117M。12 号煤层储量 12 万吨，通道长度 200M。两槽煤的倾角为 55~60°。每个气化通道除进、出气孔外，还有 2 个辅助孔，每个气化发生炉共由 4 个钻孔组成。

刘庄煤矿与中国矿业大学合作，仅用 10 个月时间，投入 1 700 万元资金，在徐州新河二号井煤炭地下气化半工业性试验的基础上，建成了我国第一个煤炭地下气化工业性示范工程。自 1996 年 5 月 18 日一次点火成功以来，通过 9 个多月的运行取得了丰硕的成果，其空气煤气产量为 12 万 M³/天，热值为 4.2~5.7MJ/M³；水煤气产量为 5 万 M³/天，热值为 12.56~15.7MJ/M³。其中氢气含量占 50%以上，所产空气煤气用于烧锅炉，锅炉中的水蒸汽用于生产中热值的地下水煤气，供煤气公司使用。本次工业性试验的成功，是我国煤炭地下气化走向商业化应用的里程碑，并在以下几个方面有所创新：

(1) 用双火源两阶段气化工工艺提高煤气的热值，延长第二阶段生产水煤气的时间，最长为 12 小时，比地面水煤气生产每个循环延长了数百倍；

(2) 双炉交替运行，确保连续稳定产气；

(3) 边气化边充填，改善燃烧空间，防止地面塌陷；

(4) 辩证掌握各钻孔的多功能特点，优化组合气化工工艺，以达到可调与推进气化，使气化的全过程顺利进行；

(5) 利用测氢技术，对地下气化区进行测量，加深了对火焰区移动速度，氧化区、还原区等形成与发展的认识。

二、地下煤气化技术将开创煤炭工业在开采、应用等方面的新时代

本世纪初原苏联、美国、英国等国对地下煤气化技术进行了大量的研究与开发，但至今未能实现商业化。近年来中国矿业大学煤炭地下气化研究中

心在吸收国内外先进技术的基础上，结合我国实际创造性地利用原有报废矿井，经过技术上的改进，采用长通道、大断面、两阶段、双火源、多功能钻孔、双炉交替等新工艺理论体系，在唐山刘庄矿成功地进行了工业性试验，试验产气中氢气含量可达 50%以上。根据 9 个月试验的结果推算，唐山刘庄矿的两槽煤可分别连续产氢 4 年和 10 年，日产氢可达 2.5~5 万 M³，如再经变压吸附处理，就可以得到 99.9% 的纯氢，其成本仅为 0.50 元/m³。地下煤气化技术有以下作用与贡献。

(1) 可以充分利用报废的煤炭资源。据统计，我国有已报废的矿井 300 多处，总贮煤量可达 300 亿吨；

(2) 可加以充分利用原来矿区的所有基础设施，从而节省大量的基建投资；

(3) 因为是利用报废矿井，对矿井地下的地质结构、矿井通道都比较熟悉，因而可以节省大量勘探费用；

(4) 由于地下煤气化是把采煤、地质勘察、产气三结合，因而成本可大大降低；

(5) 地下煤气化可以把大量煤灰尘留在井下，因而对环境保护有利；

(6) 地下煤气化不再新建厂房，可以节约大量土地；

(7) 如将地下煤气化所得的氢用于燃料电池发电，则相当于每吨煤可比现有电力发电厂多发 400 度电，同时还可以大大降低发电厂对周围环境的污染；

(8) 如将地下煤气化所得的氢，或者将煤气合成甲醇，并通过燃料电池，装配、发展电动汽车，则可大大降低汽车废气对城市环境的污染；

(9) 我国的地下煤气化技术的投资小，因而为我国电力工业开辟了新途径，也为煤炭行业开展综合利用、开发煤化工创造了条件；

(10) 如果将地下煤气化所得氢气进行液化，则 1 吨液氢的能量，相当于 7 吨煤的热能，即运输量可减少 6/7，而所得收益可提高 3~4 倍，因此可节省大量运输能力；

(11) 地下煤气化可大大改善我国采煤业的劳动条件和劳动方式，减少伤亡事故。

三、氢能技术的进展和突破为地下煤气化产品提供了广阔的市场

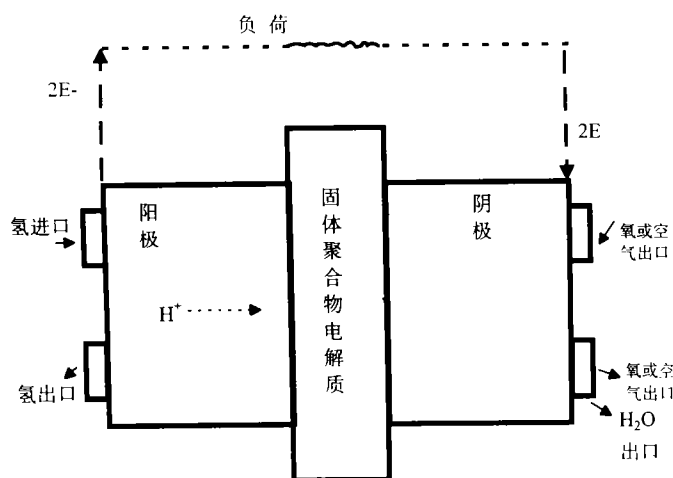
现已证明，氢能是人类最理想的清洁能源，但关键是大量的、廉价的氢从何而来？过去认为，以太阳能（包括风能、水力能等）所得到的电力，经电解水制氢是最理想的方法。但从我国的经济情况来看，要大规模利用太阳能、风能、水力能以充分满足

大量需要,在短时间内几乎是不可能的,因为现在太阳能发电装置所发的电每千瓦需投资 5 000 美元以上,即相当于 4 万多人民币。

根据我国的实际情况,采用由煤制氢实现清洁能源的技术,是一条可行的道路。只要将气化后分离的 CO_2 加以隔离贮存,就可实现以氢能为主的能源结构。

国家科委 1994 年 7 月制定的我国“1995~2010 年新能源和可再生能源发展纲要”中指出,要在 2010 年建成具有商业意义的太阳能—氢能系统和煤气化制氢装置,煤炭地下气化将有可能是有效利用煤炭资源的一种切实可行的途径,可以达到清洁、低成本的目标,这将使我国在全世界首先实现清洁的氢能技术,为全世界提供经验。因此,地下煤气化技术,不仅可以改进采煤技术,同时还可以促进氢能技术及早在我国推广。

再从氢能燃料电池技术最新进展方面看,更显示其优越性。最新的第五代离子交换模式燃料电池(简称 PEM 燃料电池)具有以下优点:操作温度低($50\sim 90^\circ\text{C}$),能量密度大(最高可达 3KW/kg),热效率高(最高可达 80%),成本低(最低可达 $70\sim 80$ 美元/ KW),寿命长(可运行 10 万小时不变化),起动快(在 $5\sim 8$ 秒内即可达全荷),并且无噪音,可模块式组装,排气中无污染物,对环境保护非常有利。科学家预言,它将是 21 世纪最先进的发电设备。由于有了这种先进的发电设备,再加上煤的气化技术,煤的利用热效率可提高 50% 以上,并极大地减少对环境的污染。由于它可以小型化,将这种燃料电池组装备电动车,将是 21 世纪最先进的“零排放车”(Zero Emission Vehicle),而且可实现无级调速和刹车时电能的反馈,因而是最节能的。PEM 燃料电池的原理和结构如下图所示:



阳极上的化学反应 $\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

阴极上的化学反应 $2\text{e}^- + 2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$

总反应 $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{eE} + \text{Q} - \frac{3}{2}\text{RT}$

作出 2eE 的电功 $\text{E} = \text{电动势}$

$e = 1$ 克氢的电荷量, $96\,500$ 库仑

Q 为电化学反应中对外释放的外界吸收的热量。

$\frac{3}{2}\text{RT}$ 是外界对输送 1 克分子氢和 $\frac{1}{2}$ 克的氧所作的功, R 为气体常数, T 为绝对温度。

以上仅是 1 个单体电池的模型,由于材料科学的进步,中间的电介质膜可起双重作用,即不使氢与氧直接接触,并只允许氢离子通过。现代科学技术可以将这种膜和正负极制成复合组件,即电极隔膜复合件,简称 EM 件。每一片复合件只有 1 毫米左右,甚至更薄,再加上电流导出板,引出正负极就成为 1 个电池,无数复合件叠加,就成 1 个电池组。每一个单体电池的电压仅为 $0.5\sim 0.8\text{V}$,但组合起来就可得到高电压。

燃料电池与一般可反复充放的蓄电池(即二次电池)不同,只要能连续不断地供给氢气,即可不断发电,故燃料电池实际上是一种连续的发电设备。

虽然燃料电池不一定都用氢为燃料,其他如甲烷(天然气)煤气、轻质石油、甲醇等醇类均可,但氢气效率最高,从氧化还原电化学反应原理来看,也是氢的效率最高。

这是因为氢和空气的燃料电池能量密度最高。氢的原子核最小,从氢原子中得到 1 个电子最容易,相对所消耗的活性物质的量也就最少。一般火力发电厂发电用汽轮机、发电机因受到热力学卡诺理论的限制,其热效率只有 $37\sim 45\%$,而 PEM 燃料电池的热效率可以高达 $62\sim 85\%$ 。燃料电池在低温下操作,经电化学反应直接将能量转化为电能,几乎没有热损失,特别是 PEM 燃料电池,它的运行温度是 $50\sim 95^\circ\text{C}$ 。

燃料电池和电动车,在德国、加拿大、日本、美国已经研制成功。如日本的 11 兆瓦级燃料电池发电站已开始商业运行,加拿大 200KW 级 PEM 燃料电池已经研制成功并运行,日本丰田的金属氢化物 PEM 电动车也已试运行,奔驰公司推出的 PEM 电动车已在 1996 年 6 月召开的 11 届国际氢能大会上展出并试运行,美国 Energy Partner 公司已提出 PEM 燃料电池可降至 $50\sim 70$ 美元/ KW 。美国虽是一个电力比较充裕的国家,但经市场预测,预计未

(下转第 57 页)

决策。这加重了他们要求更多信息和试图制定无风险决策的神经质。如果不设法纠正和消除这种神经质的决策方法,就可能使向管理者的转变趋于复杂化或徒劳一场。

3. 习惯于亲自动手工作。有效的企业经理总是注重于需要完成什么,应该什么时候完成和将要花费多大代价,而不注重如何去完成。因为,企业经理必须通过其下属人员来完成工作,所以,如何完成的问题是留给下属人员去做的事情。专业科技工作者常常认为这是很难理解的,他们往往热诚地保持自己的专业能力,习惯于亲自动手完成各项工作。结果,他们缺乏委派的能力。当他们由科学研究和工程技术岗位转向企业经理岗位后,他们试图同时做管理和技术两种工作。这往往导致经营管理的失败。实际上,企业经理之所以得到酬劳,完全是因为他们指挥、协调下属人员完成了工作任务,而不是因为他们自己去亲自完成了工作任务。牺牲他们的某些技术能力,放弃某些亲自动手的机会,在一定意义上讲,这是高技术企业经理为保持管理能力必须付出的代价。

4. 性格的内向性。在某种程度上讲,性格内向与创造能力相联系。创造是一种个体的内向活动,而经营管理则是一种群体外向活动。与他人进行密切合作的技巧,努力做一个优秀的群体活动家的能力,是成功的企业经理所必须的。因此,许多科技人员所具有的那种内向的性格,给他们行使企业经理的职能增加了成倍的困难。

5. 缺乏人际关系技巧。管理人员面临的各种问题主要在于人。然而,业已发现许多转向企业经营管理的科技人员不善于掌握人际技巧,这是造成经营管理失败的一个主要因素。管理需要善于发现、调动和发挥人的特性和特征,这与大多数工程技术人员和科学研究人员的意识是格格不入的,因为他们习惯于和愿意同事物打交道。

为了使那些具有经营管理潜力的理工科学生在日后能够比较顺利地转向高技术企业的经营,有必要对现行的教育培训进行较大的改革,其中主要

的有两点:首先,在理工科学生的课程设置中应增加人文科学和管理科学的课程,使他们通过书本知识的学习,尽快尽早吸收一些人文社会科学知识和管理理论的精华;其次,理工类学生的教育培训计划中,应增设一些在相关技术领域企业中进行技术与管理实习的内容,因为经营管理的实践性是非常强的,通过这些活动,可以使那些有潜力,又有经营管理志向者,较早地拥有对经营管理的感性认识。

此外,有志于经营管理的理工类学生和科学技术人员,要想成功地进入经营管理,成为科技型企业家的,还应针对自身特点,加强自我教育。虽然一个成功的科技型企业家背后可能有各种各样促使其成功的因素和机遇,但他个人的充分准备和努力往往是其中最重要的。

主要参考文献

- [1]比尔·盖茨,未来之路,北京大学出版社,1996
- [2]虞有澄,我看英特尔,生活、读书、新知三联书店,1995
- [3]杨德林,联想集团的成长与国际化经营,中国工业经济,1996(3)
- [4]康彼得,电脑灵龙——计算机世界的中华英雄,当代世界出版社,1996
- [5]杨德林、张建中、迪晶,现代企业国际化经营,经济管理出版社,1997
- [6]陈春宝、杨德林,利用高技术创造我国产品国际竞争优势,财贸经济,1997(1)
- [7]陈春宝、杨德林,发展高技术产业创造中国产业国际竞争优势,经济学家,1997(2)
- [8]A. David Silver, Entrepreneurial Megabucks, John Wiley & Sons, 1985
- [9][美]乔治·吉尔德,企业之魂,上海译文出版社,1992
- [10]周正贤,施振荣与宏基电脑,生活、读书、新知三联书店,1996年版
- [11][日]池本正纯,企业家的秘密,辽宁人民出版社,1985
- [12][美]M. K. Badawy 著,苏新民、秦斐译,怎样成功地做一名管理人员,内蒙古人民出版社,1987

(责任编辑 孙立明)

(上接第41页)

来燃料电池仍有17500兆瓦的市场潜力,主要用于建设分散的应急电站,如大公寓、大型超级市场、校园、医院、俱乐部、大旅馆,预计3~5年内燃料电池电站、燃料电池电动车,就可投入商业生产。

过去,我国由于没有大量的廉价氢源,因此在发展燃料电池方面无能为力,而现在有了成熟的地下煤气化制氢技术,使这一愿望能得以实现。

参考文献

- [1]Steinberg, M.: Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 14, P. 797(1989). (NO. 11)
- [2]Audus, Harry: Proceedings of 11th World Hydrogen

- Energy Conf. 23~28 June 1996, Vol. 1, P. 525
- [3]Williams, H. Robert: Fuel Cells, Fuel Cell Vehicles, and Fuel for Fuel Cell Vehicles. Energy Strategies and Technology Working Group CCICED. 12 Dec. 1996 Beijing
- [4]Bao Deyou, Zhu Yajie: Proceedings of the 6th International Energy Conf. 3~7 June 1996 Beijing
- [5]鲍德佑:发展氢能,集中处理二氧化碳是治理生态环境的当务之急,全国气候变化环境问题学术讨论会文集汇编(NO. 141), 1991, 北京

(责任编辑 肖庆山)