

文章编号:1001-1986(2007)04-0030-04

煤矿瓦斯的微生物治理技术

侯晨涛^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学市政与环境工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 西安科技大学地质与环境工程系, 陕西 西安 710054)

摘要: 甲烷氧化菌以甲烷为其唯一碳源和能源, 在瓦斯治理方面具有潜在应用价值。介绍了瓦斯微生物治理技术的国内外研究现状、甲烷氧化菌氧化甲烷的机理和影响因素, 以及甲烷氧化菌的生态分布。分析了微生物治理技术的可行性, 并展望了今后的研究方向。

关键词: 微生物治理; 瓦斯; 甲烷氧化菌

中图分类号: TD713.3; Q939.99 **文献标识码:** A

Research prospect of applying microorganism in controlling coal gas

HOU Chen-tao^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Dept. of Geology and Environmental Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Methanotrophs can use methane as their sole carbon and energy source, which has potential value in coal gas control. The related current research status is introduced and a preliminary conclusion was drawn on the mechanism of methane oxidation by methanotroph, its physiolony and distribution in ecosystems, as well as potential use of methanotroph in biodegradation of gas. The feasibility of this kind of controlling techniques is analyzed, and the future research directions are pointed out in this paper.

Key words: biodegradation; gas; methanotroph

煤矿瓦斯是当今影响煤矿安全生产的头号杀手。据有关资料统计, 全国每年发生的重大煤矿瓦斯事故平均在30~40多起, 遍及全国15~16个省市、自治区, 造成至少数百人遇难, 给国家、社会和家庭都造成了不可弥补的损失, 而这种现象又伴随着煤矿开采强度加大, 开采深度加深, 表现出强劲上升

的趋势^[1]。

多年来, 尽管我国一直比较重视煤矿瓦斯技术的研究工作, 并经过“七五”—“十五”期间的国家科技攻关研究, 取得了一大批具国际领先水平的科技成果, 对治理煤矿瓦斯起到了很大的推进作用, 但主要治理技术仍为矿井通风、矿井瓦斯抽放和“四位一

收稿日期: 2007-01-30

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2005D01)

作者简介: 侯晨涛(1975—), 女, 河北定州人, 讲师, 硕士, 从事环境工程研究与教学。

a. 统筹规划, 煤、气共采

为有效开发和利用同源同体的煤炭资源和煤层气资源, 必须坚持统筹规划、煤炭资源和煤层气资源共采的原则, 切实做到以煤炭开采为中心, 建立采煤采气一体化开发模式。

b. 先采气, 后采煤, 协调发展

为达到保障煤矿安全生产、综合开发资源、保护大气环境之目的, 必须坚持统筹规划、先采气后采煤的基本开发原则, 建设先进高效的绿色矿山。

c. 井下抽采与地面开发并举, 分区实施

从煤气共采角度, 根据煤矿开采规划的区划, 可

分为采空区、煤矿生产区、近期煤炭开采区和煤矿规划区。由于不同区域的煤层气资源条件和开发条件差异较大, 因此, 煤层气开发应采取不同的开发模式和开发技术。

参考文献

- [1] 张新民, 张遂安. 中国的煤层甲烷[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [2] HOLLUB V A, SCHAFER P S. A guide to coalbed methane operations [M]. Chicago: US Gas Research Institute, 1992.
- [3] SAULSBERRY J L, SCHAFER P S, SCHRAUFNAGEL R A. A guide to coalbed methane reservoir engineering [M]. Chicago: US Gas Research Institute, 1996.

体”的综合防突措施等物理方法^[2]。

随着微生物技术的飞速发展,在煤层开采之前,若能利用微生物降解煤层中的瓦斯,减少煤层开采时的瓦斯涌出量,使治理瓦斯的关口前移,就可以对其他治理措施起到重要辅助作用,有助于从根本上防治煤矿瓦斯灾害的发生。

1 瓦斯微生物治理技术研究现状

微生物治理瓦斯技术是通过将选育和驯化的细菌直接喷涂煤岩表面或灌注煤层的方式,使微生物将甲烷氧化为二氧化碳,实现降低煤矿瓦斯危害的目的。该技术主要包括:在井下煤层中注入甲烷氧化菌;在矿井的巷道空间、硐室、采煤工作面、掘进工作面、采空区和封闭空间中喷涂甲烷氧化菌,或通过制备甲烷氧化菌的装置氧化降解瓦斯。

国外利用微生物技术治理煤矿瓦斯的研究已取得初步成果。20世纪70年代初,俄罗斯科学院的微生物专家和莫斯科采矿研究院的科研人员共同努力开发出一种有效控制煤矿甲烷含量的生物治理瓦斯技术。该技术基于在有氧条件下噬甲烷菌将甲烷氧化为二氧化碳的原理,在采空区喷射活性噬瓦斯生物菌,形成一个具有吞噬瓦斯作用的氧化菌生物过滤层,或将活性噬瓦斯生物菌通过特殊的钻井系统将细菌培养物注入到煤层中。该技术已在顿涅茨克和库兹涅茨克煤田的矿井中进行了工业化试验,甲烷含量降低30%~60%^[3]。

在第四届国际矿山通风学术会议上,加拿大学者查克拉沃蒂等提出的“消除瓦斯危险的新技术”。查克拉沃蒂发现,在加拿大西部煤矿采取的大多数水样中都发现存在氧化甲烷的细菌,且目前已有办法从这些水样中分离出甲烷氧化细菌。查克拉沃蒂还在模拟筒仓内分别对开仓、关仓和连续送风条件下加入氧化甲烷微生物进行观测。最佳一次试验未经细菌处理的煤的甲烷体积分数为5%,而经过细菌处理的甲烷体积分数为0.05%。试验表明,经过细菌处理后甲烷浓度呈10倍甚至100倍降低^[4]。

澳大利亚研究人员在这方面的研究也取得了一定的成功。他们把降解甲烷的细菌菌液喷洒到煤壁上,细菌以甲烷为唯一碳源而繁衍,20 d后,井下甲烷含量减少了66%^[5]。美国研究人员在自然界也发现一种高效降解甲烷的细菌贝耶林克氏菌(*Beijerinckia* sp.),它们生活在酸性沼泽地环境,除了具有固定大气氮素的能力之外,还能降解大气中90%的甲烷^[5]。也有报道称,一种甲烷氧化菌在含有瓦斯的环境中对甲烷的清除率达99%,1周内的清除

率为97%^[6]。

国内利用微生物技术治理瓦斯的思路刚刚提出,目前,还没有引起有关方面的足够重视。北京科技大学的王璐、陈东科等人^[7],利用筛选、培育和驯化的M3011与GYJ³混合菌种,将采自河南平顶山不同矿区、不同深度的12块含瓦斯煤样进行瓦斯降解试验。结果显示,与参照样品相比,加入甲烷氧化菌的试验组的甲烷含量在24 h内均有降低,且有4个煤样甲烷含量下降非常明显:煤样解吸的瓦斯体积分数最大由10.00%降解到4.80%,降解率达52%;最小由1.68%降解到1.07%,降解率达36%;平均降解率为44%。这表明,甲烷氧化细菌对所选煤样中的瓦斯(体积分数0.60%~15.0%)有明显的生物转化作用。试验结束后,对加入甲烷氧化菌的煤样经电镜观测分析发现,GYJ³在试验煤样中生长良好,能够附着在煤样孔隙的表面,起到了降解煤层瓦斯的作用;而M3011则在试验后期过早衰亡,其原因还有待进一步研究。

2 降解瓦斯的微生物及其特性

2.1 降解瓦斯的微生物

煤矿瓦斯的主要成分为甲烷(CH₄)气体,要防治瓦斯灾害就要从降低超标的甲烷浓度入手。广泛存在于自然界的嗜甲烷菌或甲烷氧化菌(被列为古菌行列),可以甲烷为碳源,且表现为在这方面的专一性^[5],是理想的降解瓦斯的微生物菌源,可有效降低地面甲烷,对减少温室效应有很大贡献^[8~13]。

前述瓦斯治理的研究成果大部分为甲烷氧化菌的应用。目前,也有研究者在研究土壤微生物对降低温室效应的贡献时,从土壤中分离出了更高级的菌种,如Wolf和Hanson等^[12~13]描述了5株能利用甲烷作能源的酵母菌。中国的陈中云,吴伟祥等^[14]在对水稻土甲烷氧化菌种种群的研究中,分离获得了两种能利用甲烷的吸水链霉菌Z_{5~6}和J_{2~6},168 h后可使甲烷体积分数从100%降至90.89%和89.94%。不过,目前大部分研究仍集中于甲烷氧化菌^[8~21]。

2.2 甲烷氧化菌降解(氧化)甲烷的途径

甲烷氧化菌氧化甲烷生成CO₂,在此过程中获得生长所需的能量。甲烷氧化菌的典型特征是其含有的甲烷单氧酶(methane monooxygenase, MMO),其催化甲烷转化为甲醇。如图1所示,首先由MMO将甲烷活化生成甲醇;甲醇进一步氧化为甲醛;甲醛再同化为细胞生物量或通过甲酸氧化为CO₂;然后,经过一系列的脱氢反应生成CO₂,重新回到大气的碳

库中。整个过程即: 甲醇 \rightarrow 甲醛 \rightarrow 甲酸盐 \rightarrow CO_2 ^[7]。

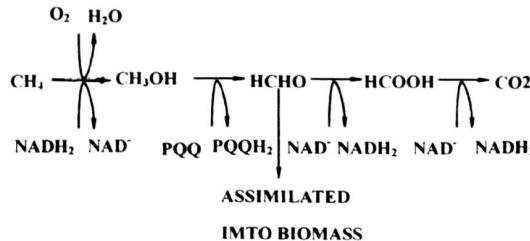


图 1 甲烷氧化菌对甲烷的降解途径

Fig. 1 Biodegradation route of methanotroph

2.3 甲烷氧化菌研究现状

甲烷氧化菌于 1906 年首次被分离出来, 1970 年 Whittenbury 等分离和鉴定了 100 多种能利用甲烷的细菌^[15]。目前, 甲烷氧化菌的研究集中于其对降低温室效应的贡献 (CH₄ 是主要的温室气体之一) 及存在于土壤、稻田、垃圾、油田等内部的甲烷氧化, 内容包括其代谢途径、营养、分离、甲烷降解效果等^[8-13]。研究表明, 这些甲烷氧化菌可有效降解地面甲烷, 如 Conrad^[16] 得出, 甲烷氧化速率为 100~1 000 pmol/(h·g) 干土, 理论上以此速率每 g 干土应能支持 10⁶~10⁷ 个甲烷细菌。虽然这些研究针对于低浓度的地面甲烷, 但其研究成果对降解高浓度瓦斯仍有借鉴意义。除闵航等曾经从水稻土中分离出 1 株厌氧菌^[17] 外, 绝大部分甲烷氧化菌的生长必须有甲烷和氧同时存在, 都只能利用甲烷、甲酸、甲醇等简单的甲基物, 不能利用其他复杂有机物^[8-21]。甲烷、氧气及结合态氮 (combined nitrogen) 的浓度是环境中甲烷氧化菌分布的决定性因素^[20]。

3 甲烷氧化菌治理煤矿瓦斯的可行性

微生物治理瓦斯技术, 难点主要在两方面: 甲烷氧化菌的筛选培养及菌剂的投放。根据目前的研究, 这两方面都是可以解决的。

3.1 甲烷氧化菌的筛选培养

甲烷氧化菌普遍存在于自然界, 运用富集培养和现代分子生物学手段, 从农田、草地、垃圾填埋厂、湖泊、沼泽、地下水、海洋以及高温、高酸碱、高盐^[8-21] 等各种环境的土壤或水样中, 均可检测到甲烷氧化菌的存在。大多数甲烷氧化菌具有休眠状态, 一些甲烷氧化菌的外生孢子和孢囊在干旱和营养缺乏的环境下也存活得很好^[15]。它们也可生活在矿井水中, 但甲烷浓度必须保持最低水平, 通常高于 1.25% 就具有相当的危险性^[5]。Roslev 等^[20] 发现一种Ⅱ型甲烷氧化菌在甲烷和氧缺乏的条件下能存活 6 周, 当加入甲烷和氧气后数 h 内即可恢复对甲

烷的氧化。更有研究者发现, 有一种Ⅱ型甲烷氧化菌, 在高浓度甲烷和低浓度氧气条件下生长更好, 理论上讲该菌会很容易适应煤层瓦斯环境^[21]。因为甲烷氧化菌仅能利用 C₁ 化合物而不能利用糖类或其他有机物, 其具有高度的专一性, 所以, 选择性培养可将甲烷氧化菌从其他细菌中分离出来。同时, 迅速发展的物理、紫外诱导等技术有助于选育出处理能力更强的菌种。因此说, 可以用选择性培养基扩大培养出足量的菌种用于瓦斯治理。

3.2 菌剂的投放

结合煤炭行业生产实际, 可通过以下几种方式进行菌剂的投放:

a. 使甲烷氧化菌通过导风筒, 直接对掘进工作面(特别是高瓦斯及其涌出量特别大的工作面)的瓦斯进行生化反应, 消耗瓦斯气体。这既可应用于正常施工的工作面, 同时又可用来进行专门的瓦斯排放工作。

b. 在掘进工作面打眼时, 利用打眼工具将甲烷氧化菌直接注入工作面煤岩体内, 来进行消耗瓦斯的生化反应。

c. 利用超前钻孔将甲烷氧化菌超前注入待掘的煤岩体中, 提前进行生化反应。这种做法不影响采煤工作, 可能更具优越性。

3.3 菌剂投放对环境及人体的影响

在自然环境中, 甲烷氧化菌本身对人无害^[5], 不会影响采掘人员的身体健康。相反, 甲烷氧化菌可发挥其独特的嗜甲烷功能, 有效地减少或清除瓦斯及其扩散, 避免矿难的发生, 同时也可为减轻地球温室效应做出特殊贡献。

4 结语

目前, 用甲烷氧化菌治理煤矿瓦斯的研究还多处于实验室研究阶段, 有很多方面有待研究:

a. 现阶段的少量试验仅为初步试验, 今后应研究甲烷氧化菌在煤矿无氧和缺氧环境下的适应性。通过不断培养、驯化和诱导, 使甲烷氧化菌能够适应煤矿的温度、压力和氧化环境。

b. 应着重研究甲烷氧化过程中起重要作用的甲烷单氧酶的产生与温度、压力、氮源和氧气浓度等的关系。

c. 应研究甲烷氧化菌在代谢过程中的中间产物及其对降解效果的影响, 甲烷氧化菌在不同煤质条件下与外源微生物、煤层养分条件的关系等内容。

d. 尝试矿井现场试验, 将从自然界驯化出的甲烷氧化菌制成菌剂灌注入煤层。研究菌剂加入

量、加入方式,以及煤层地质条件(如温度、压力)等因素对菌剂处理甲烷效果的影响,找出最佳操作条件。

e. 利用基因工程、人工诱导和生物固化等生物技术,提高甲烷氧化菌在特定煤层中的转化效能及稳定性,实现菌种的高密度培养,以便节约治理成本。

目前,尽管国外的研究结果尚未应用到煤矿生产中,但已取得可喜成果。一旦研究获得突破,必将对煤矿瓦斯的防治,进而对煤矿安全生产发挥相当重要的作用。

参考文献

- [1] 张铁岗.矿井瓦斯综合治理技术[M].北京:煤炭工业出版社,2001.
- [2] 王显政.煤矿安全新技术[M].北京:煤炭工业出版社,2002.
- [3] KOTELNIKOVA S. Microbial production and oxidation of methane in deep subsurface [Review] [J]. *Earth—Science Reviews*, 2002, 58(3—4): 367—395.
- [4] 宋继臣,刘靖阳.讨论对掘进工作面末端通风及瓦斯管理[J].煤炭技术,2001,20(7):33—34.
- [5] 柯为.治理煤矿瓦斯爆炸的微生物生物技术[J].生物工程学报,2005,21(3):460—460.
- [6] NIKIEMA J, BIBEAU L, LAVOIE J, et al. Biofiltration of methane: An experimental study [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 113(2—3): 111—117.
- [7] 陈东科,王璐,金龙哲,等.利用微生物技术治理煤矿瓦斯的研究展望[J].矿山安全与环保,2005,32(6):49—52.
- [8] 丁维新,蔡祖聪.温度对土壤氧化大气的影响[J].生态学杂志,2003,22(3):54—58.
- [9] 陈忠云,闵航,陈美慈,等.同水稻土甲烷氧化菌和产甲烷菌数
- 量与甲烷排放量之间相关性的研究[J].生态学报,2001,21(9):1498—1505.
- [10] 王长科,吕宪国,蔡祖聪,等.北三江平原土壤氧化CH₄研究[J].环境科学学报,2004,24(5):939—941.
- [11] 何品晶,瞿贤,杨琦,等.填埋场终场覆盖层甲烷氧化行为实验室模拟研究[J].环境科学学报,2006,26(1):40—44.
- [12] WOLF H J, HANSON R S. Isolation and characterisation of methane utilizing yeasts [J]. *Journal of General Microbiology*, 1979, 114: 187—194.
- [13] WOLF H J, HANSON R S. Identification of methane — utilising yeasts [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1980, 7: 177—179.
- [14] 陈中云,吴伟祥,闵航,等.两株能利用甲烷的吸水链霉菌(*Streptomyces hygroscopicus*)的分离和鉴定[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2000,26(4):384—388.
- [15] 梁战备,史奕,岳进.甲烷氧化菌研究进展[J].生态学杂志,2004,3(5):198—205.
- [16] CONRAD R. Soil microorganism oxidizing atmospheric trace gases (CH₄, CO, H₂, NO) [J]. *Indian J. Microbiol.*, 1999, 39: 193—203.
- [17] 闵航,谭玉龙,吴伟祥,等.一个厌氧甲烷氧化菌菌株的分离、纯化和特征研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(6):619—624.
- [18] 刘颖,闵航,陈美慈,等.甲烷氧化菌分离物的分离及其特性[J].上海铁道大学学报,2000,21(11):8—11.
- [19] YUE J, SHI Y, LIANG W, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice field and related microorganism in black soil: northeastern China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 73(2—3): 293—301.
- [20] ROSLEV P, IVERSEN N. Oxidation and assimilation of assimilation of atmospheric methane by soil methane oxidizers [J]. *Environ. Microbiol.*, 1997, 4(63): 874—880.
- [21] DNNFIELCL PF, LIESACK W. High-affinity methane oxidation by a soil enrichment culture containing a type II methanotroph [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999, 65: 1009—1014.

《煤田地质与勘探》被美国《化学文摘》和《剑桥科学文摘》收录

经中国科学技术期刊编辑学会国际交流工作委员会推荐,2007年7月,《煤田地质与勘探》杂志通过美国《化学文摘》(CA)和《剑桥科学文摘:材料信息》(CSA:MI,即工程技术)的评估,成为其源期刊。至此,《煤田地质与勘探》已被美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、美国能源研究院《煤文摘》(COAL ABSTRACT)、国际能源机械《煤文摘》(COAL HIGHLIGHTS)、《日本科学技术社数据库》(JST)、美国《乌利希国际期刊指南》(Ulrich's IPD)等国际重要检索数据库收录。

美国《化学文摘》(Chemical Abstracts,简称CA),是国际六大检索(SCI、EI、CA、AJ、CBST、SA)工具之一,由美国化学文摘服务社(CAS)编辑出版。CA是涉及学科领域最广、收集文献类型最全、提供检索途

径最多、部卷也最为庞大的著名的区域性检索工具。收录的学科领域包含:化学、化工、生物化学、生物遗传、农业和食品加工、医用化学、药物、毒物学、环境化学、地球化学以及材料科学等。

《剑桥科学文摘》(CSA)是美国 Cambridge Scientific Abstracts 公司出版发行、基于网络服务的文献信息检索系统,包含 70 多个数据库,主要编辑出版科学技术研究文献的文摘及索引。

期刊进入国际检索系统是期刊达到一定质量水平的体现,是期刊走向世界和提高国际影响力的重要途径。《煤田地质与勘探》被美国《化学文摘》(CA)和《剑桥科学文摘:材料信息》收录,标志着《煤田地质与勘探》的办刊水平又上了一个新台阶。

(梅新)