

煤矿排风低浓度瓦斯节能减排潜力分析

杨启军¹, 郝小礼^{1,2}, 冯涛¹, 王鹏飞¹, 王贤来¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 矿井排风是重要的瓦斯排放源, 实现矿井风排瓦斯减排利用, 对促进我国节能减排具有重要的作用. 分析了我国矿井风排瓦斯现状, 评述了现有的矿井排风瓦斯减排利用方法, 提出了矿井风排瓦斯节能减排计算方法, 并分析了我国矿井风排瓦斯减排利用潜力. 分析结果表明, 我国目前每年通过矿井排风排放的瓦斯量在 $200 \times 10^8 \sim 250 \times 10^8 \text{ m}^3$, 通过对这部分瓦斯减排利用, 可实现年节约 $1.200 \times 10^4 \sim 1.700 \times 10^4 \text{ t}$ 标准煤, 减少温室气体排放当量 $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 \text{ t}$, 实现全国年减排 3.5%.

关键词: 煤矿; 风排瓦斯; 节能减排

中图分类号: TD712.67

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)02-0075-06

Energy saving and GHG emission reduction potentials of VAM from coal mine

YANG Qijun¹, HAO Xiaoli^{1,2}, FENG Tao¹, WANG Pengfei¹, WANG Xianlai¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Mine ventilation is one of the major emission sources of methane, and thus it has an important role in energy saving and greenhouse gas (GHG) emission reduction in China via mitigation and utilization of ventilation air methane (VAM). This paper gives an analysis of the current status of VAM in China. The mitigation and utilization technologies of VAM are reviewed. A calculations method for energy saving and GHG emission reduction of VAM is proposed, and the energy saving and GHG emission reduction potentials of VAM is analyzed. Results show that the current emission amount of VAM in China is about $200 \times 10^8 \sim 250 \times 10^8 \text{ m}^3$ every year. An energy saving of $1.2 \times 10^7 \sim 1.7 \times 10^7 \text{ t ce}$ and a GHG emission reduction of $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 \text{ t CO}_2\text{eq}$, which accounts for about 3.5% of the total GHG emission of China. Can be achieved every year, if the VAM can be mitigated and utilized in China.

Key words: coal mine; VAM; energy saving and emission reduction

大量证据表明, 全球气候正在逐渐变暖. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 最新研究报告表明, 在过去的 100 多年 (1880 ~ 2012 年) 间, 全球平均地表温度升高了 $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[1]. 全球气候变暖正严重地威

胁着人类社会的身存与发展, 成为了全球共同关注的环境问题之一. 人类大量地向大气中排放温室气体, 致使大气层中各种温室气体浓度不断增加, 导致了全球气温不断上升^[2]. 具有温室效应的气体主要包括: 水蒸气, O_3 , CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCS,

收稿日期: 2014-01-16

基金项目: 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室开放基金资助项目 (KF200903); 国家自然科学基金资助项目 (51276058); 湖南科技大学大学生科研创新基金资助项目 (SYZ2012008)

通信作者: 郝小礼 (1973-), 男, 安徽安庆人, 博士, 教授, 研究方向: 人工环境与建筑节能. E-mail: haoxiaoli2002@aliyun.com

PFCS, SF₆ 等. 最新研究结果表明^[1]: 在 1750 ~ 2011 年的 260 年间, 大气层中 CO₂ 浓度增加了 40%, CH₄ 浓度增加了 150%, 而且大气层中这些温室气体的浓度可能还会继续增加.

由于人类活动而排放最多的温室气体是 CO₂, CH₄ 紧随其后居第二. 为了比较不同温室气体排放对气候变化所产生的影响, 国际上采用全球变暖潜势 (Global Warming Potential, GWP) 作为衡量指标, GWP 值越高, 说明该气体的温室效应更显著. 将 CO₂ 的 GWP 定为 1, 则 CH₄ 的 GWP 是 23^[2]; 也就是说, 每排放单位质量的 CH₄ 气体, 则相当于释放了 23 个单位质量的 CO₂ 气体. 煤炭开采是重要的 CH₄ 排放源. 据估计, 全球煤炭行业每年所排放的瓦斯高达 $2\ 200 \times 10^4 \sim 2\ 800 \times 10^4$ t^[3]. 2003 年我国因煤炭生产而向大气中排放了约 190×10^8 m³ 瓦斯^[4], 相当于排放当量 CO₂ 3.1×10^8 t. 近年来, 随着我国原煤产量的不断增加, 煤炭生产每年所排放的瓦斯量会更大. 在这些排放瓦斯中, 有 90% 以上是通过矿井排风的形式排放到大气中, 因此, 减少煤矿风排瓦斯量, 对保护环境、减小人类对气候的干扰具有重要作用.

CH₄ 是一种重要的温室气体, 是对环境有害的物质. 而另一方面, CH₄ 又是一种宝贵的化石燃料, 其氧化燃烧可以释放出大量的热能. 尽管矿井排风中的瓦斯浓度较低, 但由于矿井排风量大, 排放瓦斯的绝对量很大, 随瓦斯排放的能量也很大. 通过采取合理的技术措施, 可以回收利用这部分能量, 为矿井提供必须的生活用热能, 甚至用于发电. 这样, 在减少瓦斯排放的同时, 可减少矿井对其它不可再生能源的消耗, 进一步实现节能减排.

由此可见, 减少矿井瓦斯排放, 尤其是减少排风中低浓度瓦斯排放, 对保障矿井安全生产, 减少温室效应, 节约能源, 保护环境, 具有非常重要的作用, 可谓是一举多得. 本文将在对我国煤矿风排瓦斯数量进行分析的基础上, 研究在我国通过煤矿瓦斯减排利用所能实现的节能减排潜力.

1 我国风排瓦斯现状

矿井通风是确保煤矿安全高效生产的基本技术手段, 它一方面为井下工作人员提供生存所需的氧气, 同时还起到稀释、排出矿井瓦斯等危险、有毒、有害气体的作用. 在煤矿掘进和开采过程中, 煤、岩体

遭到破坏, 赋存在煤层和围岩中的瓦斯, 由于压力降低, 解析并释放到周围的采空空间中, 这种瓦斯释放过程称为瓦斯涌出. 涌出的瓦斯如果不能及时地排走, 将会在井下空间积聚, 结果导致瓦斯浓度超限, 形成重大的安全隐患. 为此, 需要依靠煤矿通风系统, 用地面的新鲜空气将涌入到巷道中的瓦斯稀释到安全浓度以下, 并通过风井排放到大气中.

为了减少赋存在煤层中的瓦斯直接向采掘工作面大量涌出, 通过事先抽放的方法, 将瓦斯通过管道直接抽出地面, 是一种预防瓦斯超限的有效手段. 对于有瓦斯抽放系统的煤矿, 通过矿井排风排放的瓦斯量应等于瓦斯涌出量减去瓦斯抽放量. 对于没有抽放系统的矿井, 涌出的瓦斯必须全部依靠通风系统排出, 因此, 风排瓦斯量直接取决于煤、岩层中瓦斯的涌出数量. 在我国, 尽管近年来瓦斯抽放系统得到了快速发展和应用, 但绝大部分矿井涌出的瓦斯还只能是通过通风系统排出地面. 根据估计, 我国目前通过排风系统排出的瓦斯量大约占到了煤矿瓦斯涌出总量的 70% ~ 80%^[5].

根据文献[5], 煤矿风排瓦斯量的大小与煤炭产量大小密切相关, 从国家层面来看, 煤矿风排瓦斯量可采用下式估算:

$$NVAM = 6.5779 NCP + 7.0813. \quad (1)$$

式中, NVAM: 全国煤矿年风排瓦斯总量, 10⁸ m³; NCP 全国年煤炭生产总量, 10⁸ t. 利用式(1), 根据中国最近几年的煤炭产量, 可以大致计算出中国最近几年的风排瓦斯总量, 以及当量 CO₂ 排放量, 计算结果见表 1. 表 1 中 2008 ~ 2012 年全国煤炭产量数据来自文献[6], 2015 年煤炭产量为规划数据^[7]. 表中当量温室气体排放量按式(2)计算:

$$NGHGEQ_{CO_2eq} = 23\rho_{CH_4} NVAM / 1\ 000. \quad (2)$$

式中, NGHGEQ_{CO₂eq}: 每年风排瓦斯的当量 CO₂ 排放量, 10⁸ t; ρ_{CH_4} : 瓦斯气体密度, 0.718 kg/m³.

表 1 我国近几年风排瓦斯量与当量温室气体排放量

年份	年煤炭生产量 /(10 ⁸ t)	年风排瓦斯量 /(10 ⁸ m ³)	年当量 CO ₂ 温室 气体排放量/(10 ⁸ t)
2008	28.0	191.4	3.16
2009	29.7	202.6	3.35
2010	32.4	219.9	3.63
2011	35.2	238.6	3.94
2012	36.5	247.2	4.08
2015*	39.0	263.6	4.35

注: 表中 2015 年数据为预测值.

从表1可以看出,我国每年通过矿井排风排放的瓦斯量大约为 $200 \times 10^8 \sim 250 \times 10^8 \text{ m}^3$,数量相当巨大,由此导致的温室效应也相当严重。

2 风排瓦斯减排利用技术

为满足我国煤矿安全规程的要求^[8],矿井总回风巷瓦斯浓度应小于0.75%,同时考虑一定的安全系数,多数煤矿风排瓦斯浓度一般在0.40%左右。由于风排瓦斯浓度太低,采用提纯分离来提高瓦斯浓度的方法,存在成本高、能耗大的缺点,因此在现实中是不可行的。所以,可行的风排瓦斯减排利用技术主要可分为2大类:一类是风排瓦斯作为辅助燃料进行氧化减排利用技术;另一类是风排瓦斯作为主要燃料进行氧化减排利用技术。

2.1 风排瓦斯作为辅助燃料减排利用技术

该技术主要是将煤矿排风作为氧化燃烧的助燃剂,通过风机将其送入动力设备的燃烧器或者锅炉、窑炉的炉膛中,与主要燃料混合后进行燃烧反应,产生热能或者动力,其基本原理如图1所示。地面空气在洗刷煤矿井下采煤、掘进工作面之后,虽然 O_2 浓度有所下降,但 O_2 在排风中所占的比例仍然较高,完全可以满足燃烧的需要。与此同时,空气在流经井下巷道时,带走了煤矿开采过程中涌出的瓦斯和产生的粉尘,因此,增加了一定数量的 CH_4 、煤尘等可燃成分,在高温下,低浓度瓦斯也能发生氧化,生成 CO_2 和 H_2O ,并释放一定能量。这样利用煤矿排风作为辅助燃料进行燃烧,一方面可以利用排风中的可燃成分 CH_4 来替代部分主燃料,从而减少主燃料的消耗,而另一方面,由于 CH_4 氧化而生成 CO_2 和 H_2O ,从而减少了温室气体的排放当量。



图1 煤矿风排瓦斯作为辅助燃料减排利用技术的基本原理

利用煤矿排风作为辅助燃料的氧化减排利用技术主要有:燃气轮机、燃气内燃机、燃煤锅炉、矸石废煤燃烧技术等。另外,煤矿排风还可以用做矿

井风井附近的火电厂锅炉、钢铁厂、水泥厂、陶瓷厂等工业窑炉的供风,以减少工业炉窑对主燃料的消耗和减少瓦斯的排放。

采用矿井排风作为燃气轮机的助燃空气是一种可行的煤矿风排瓦斯减排利用技术。例如,美国西北燃料公司生产的小型燃气轮机技术,就完全可以用于煤矿排风进行减排发电,Caterpillar公司开发的3~8 MW燃气轮机技术也可用于矿井排风减排利用。利用天然气或者高浓度抽放瓦斯作为主要燃料,采用矿井排风作为助燃空气和辅助燃料,达到节能减排的目的。

燃气内燃机具有燃烧温度较高的优点,可以保证排风中的瓦斯被充分氧化燃烧,是目前最成熟的一种风排瓦斯作为辅助燃料进行减排利用技术,并且已经有成功的应用范例^[9]。该技术可使用煤矿抽放瓦斯作为主要燃料,利用煤矿排风作为助燃剂和辅助燃料,在内燃机内充分氧化燃烧,推动发电机发电,为煤矿提供动力,同时可利用联产技术,为煤矿提供低位热能。该技术一方面可充分利用煤矿抽放瓦斯和风排瓦斯,同时可减少排风温室效应。工程应用结果表明,采用矿井排风作为助燃剂比直接采用空气作为助燃剂可节约10%的主燃料消耗,同时可实现减少瓦斯排放20%左右。

各种电厂锅炉以及工业窑炉在使用过程中也需要消耗大量的助燃空气,将矿井排风作为这些锅炉或窑炉的进风,用于全部或部分替代新鲜空气,也是一种减排利用矿井风排瓦斯的方法。澳大利亚通过工业性实验验证了这种矿井排风利用方法的可行性,文献[10]的理论研究结果也表明,在矿井建设坑口电站时,采用矿井排风作为电站锅炉燃烧空气具有系统简单、投资小、回报率高的优点,在设计中应优先采用。然而,这种将煤矿排风作为锅炉或窑炉的助燃空气而实现矿井风排瓦斯减排利用技术,需要在煤矿排风井附近建造电厂或其他工业设施,这要求在煤矿设计之初,就应该对煤矿工业广场用地和布局上进行整体规划,否则很难实施。

利用煤矿排风与矸石、废煤混合进行燃烧是一种新的煤矿排风减排利用技术,该技术一方面可以减少煤矿风排瓦斯的排放,另一方可实现对矸石、

废煤等资源的利用,而且还可以通过回收利用其燃烧过程所产生的热能,用于煤矿供热或供电,真正实现一举多得.然而,目前该项技术还处在研究阶段,燃烧过程中的各种运行参数还需进一步地检验和优化^[11].

2.2 风排瓦斯作为主要燃料减排利用技术

以煤矿排风低浓度瓦斯作为主要燃料进行减排利用技术主要包括3种:热逆流氧化反应技术、催化热逆流氧化反应技术、整体式催化氧化反应技术.

对于矿井排风中的低浓度瓦斯,在正常情况下,是不可能直接被点燃的,也不可能自身维持稳定氧化,除非环境温度超过1 000 ℃.热逆流氧化反应技术与催化热逆流氧化反应技术在基本原理上是相似的,即通过保持反应装置内较高的温度,来促使低浓度瓦斯发生氧化,生成 CO_2 和 H_2O ,并放出热量.在反应之初,需要利用外部加热元件对热交换介质进行预热,使其达到 CH_4 氧化反应所需温度.当系统运行正常后,依靠反应自身的放热就可以维持反应所需要的温度,而不需要再依靠外部加热装置来加热以维持高温反应环境.当反应所产生的热量大于维持反应所需要的热量时,多余的热能可以通过热交换装置,进行回收利用,用于供热或者发电.

热逆流氧化技术与催化热逆流氧化技术在装置结构上是基本相同的,其工作原理和 workflow 分别如图2和图3.这2种技术的主要不同在于,催化热逆流氧化装置中加入了特定催化剂.在没有催化剂的情况下,反应能够正常进行的温度大约为1 000 ℃,通过选择合理的催化剂,可以使该温度下降到800 ℃,甚至更低,这样就可以减少设备的热损失、降低设备的耐热性能要求^[12,13].

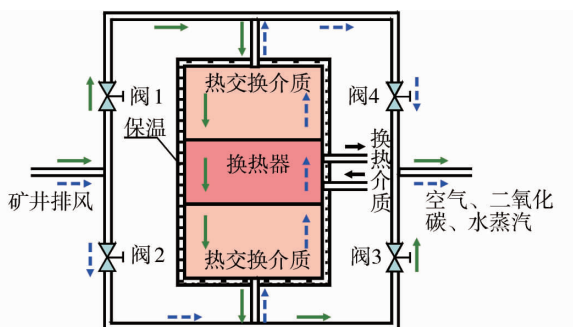


图2 矿井排风热逆流氧化技术工作原理

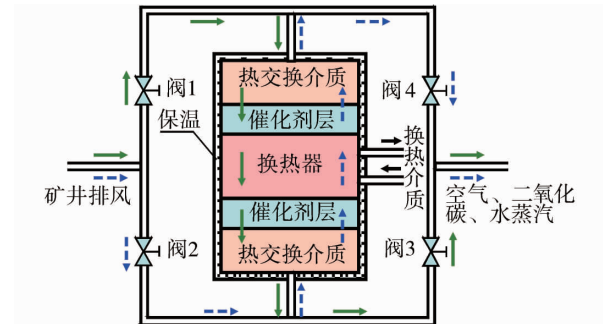


图3 矿井排风催化热逆流氧化技术工作原理

目前,热逆流氧化减排利用技术已经趋于成熟,并开始了一些工业化应用.例如:美国研制生产的热逆流氧化装置已经成功地应用于煤矿风排瓦斯减排利用,该装置稳定运行的最低瓦斯浓度为0.1%,瓦斯氧化效率达到了97.5%,反应产生的热量可用于生产热水、热油或蒸汽.我国研制生产的煤矿排风热逆流氧化装置也得到了工业性实验验证,最低瓦斯浓度为0.2%,瓦斯氧化效率达到了98%^[14,15].由于增加了催化层,催化热逆流氧化装置的瓦斯反应温度更低,瓦斯氧化效率更高,但该技术还处于由实验室向工程应用转化阶段,国内外多家科研单位正致力于该装置的研发生产工作,目前还没有大规模的工程应用实例.与热逆流氧化技术、催化热逆流氧化技术相比,整体式催化氧化技术具有系统结构更加简单、使用操作更加方便、处理风量更大的优点,但该装置需要一个大的进风预热器,才能保证进风在进入加热器之前,达到氧化反应所需要的环境温度^[16,17].

3 节能减排潜力计算方法与计算结果

3.1 计算方法

风排瓦斯减排的本质是将瓦斯与氧气发生反应,生成 CO_2 和 H_2O ,从而减少当量 CO_2 排放量.瓦斯在氧化成 CO_2 和 H_2O 的同时,会产生大量的热量,这部分反应热可以通过热交换器,产生热水或者高压蒸汽.这部分回收的热能,既可用于煤矿生产或生活用热,例如制取澡堂热水、冬季供暖、食堂用热等等,又可用于驱动汽轮机发电,为煤矿企业供电.由于回收了这部分瓦斯氧化过程中的放热,从而可减少对其他传统能源的消耗,实现了节能.通过矿井风排瓦斯氧化可实现的节能量可按

式计算:

$$ES = VAM\eta_0HV_{CM}\eta_{TU}/\eta_T \quad (3)$$

式中,ES:能源节约量,kJ;VAM:风排瓦斯量, m^3 ; η_0 :风排瓦斯的氧化效率,即被氧化的瓦斯占总风排瓦斯的百分数; HV_{CM} :瓦斯的热值, kJ/m^3 ; η_{TU} :风排瓦斯氧化热利用率,即瓦斯氧化过程中所放出的热量被有效利用的百分数; η_T :常规锅炉的热效率.

风排瓦斯氧化及热利用所产生的温室气体减排效应包括2个方面:一方面是由于 CH_4 和 CO_2 的温室效应潜力不同, CO_2 的温室效应潜力比 CH_4 小,因此,将瓦斯转换成 CO_2 ,可减少温室气体排放当量;另一方面,由于合理回收利用瓦斯氧化过程中所释放的热能,因而可减少常规化石能源的消耗,从而减少了相应的温室气体排放.所以,风排瓦斯减排潜力可用下式计算:

$$GHGER = 20.25\rho_{CH_4}VAM\eta_0 + \frac{VAM\eta_0HV_{CM}\eta_{TU}GHGE_{SC}}{HV_{SC}\eta_T} \quad (4)$$

式中,GHGER:温室气体当量 CO_2 排放减少量,kg; $GHGE_{SC}$:标准煤的温室气体当量 CO_2 排放系数; HV_{SC} :标准煤发热量, kJ/kg .

3.2 节能减排潜力计算

下面以一通风量为 $100 \times 10^4 m^3/h$ 的高瓦斯矿井为例,计算分析矿井风排瓦斯节能减排潜力.风排瓦斯平均浓度为0.5%,风排瓦斯的氧化效率

η_0 按90%计算,瓦斯氧化热利用率 η_{TU} 按50%计算,常规锅炉的热效率 η_T 取85%.瓦斯(按纯 CH_4 计算)热值 HV_{CM} 为 $35\ 800 kJ/m^3$,标煤发热量 HV_{SC} 为 $29\ 300 kJ/kg$,标煤温室气体当量 CO_2 排放系数 $GHGE_{SC}$ 为 $2.77^{[18]}$.按每年365 d计算,该矿井每年的风排瓦斯量NVAM为 $4.38 \times 10^7 m^3$,可见瓦斯排放量是很大的.利用式(3)可以计算出,通过瓦斯氧化热回收利用,可实现年节能 $2.83 \times 10^4 t$ 标煤.通过式(4)可进一步计算出可实现的温室气体当量 CO_2 减排量为 $65.16 \times 10^4 t$,温室气体减排效果相当明显.

利用表1中所计算出的全国每年风排瓦斯量,同样可以计算出通过风排瓦斯减排利用,我国每年可实现的能源节约量和温室气体减排量,计算结果见表2,计算参数与前面计算实例中相同.从表2可以看出,就全国层面来看,通过风排瓦斯减排利用的节能减排潜力是相当巨大的,每年可节约标准煤 $1\ 200 \times 10^4 \sim 1\ 700 \times 10^4 t$,每年可减少温室气体排放当量 CO_2 $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 t$.根据文献[19]测算的中国总净碳排放量,可以计算出通过矿井风排瓦斯节能减排可实现的温室气体排放减少百分比,从表2可以看出,在2008~2011年间,这个百分比在3.48%~3.63%之间,大约在3.5%左右.也就是说,通过矿井风排瓦斯减排利用,可以帮助我国减少温室气体排放3.5%.

表2 我国煤矿风排瓦斯节能减排潜力

年份	可实现的能源节约量/($10^4 t$)	可实现的当量温室气体减排量/($10^8 t$)	中国的净总温室气体当量 CO_2 排放量/($10^8 t$) ^[19]	可实现的减排百分比/%
2008	1 238	2.85	78.60	3.63
2009	1 310	3.01	86.44	3.48
2010	1 422	3.27	92.20	3.54
2011	1 543	3.55	100.38	3.53
2012	1 599	3.68	-	-
2015	1 705	3.92	-	-

4 结论

1) 煤矿排风是重要的 CH_4 排放源,全国每年通过矿井排风排放的瓦斯高达 $200 \times 10^8 \sim 250 \times 10^8 m^3$.

2) 通过煤矿风排瓦斯减排利用,每年可节约标准煤 $1\ 200 \times 10^4 \sim 1\ 700 \times 10^4 t$,减排温室气体 $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 t$ 当量 CO_2 ,占全国每年温室气体排放量的3.5%.

3) 我国是一个煤炭生产大国,实现煤矿节能

减排是我国长期可持续发展的需要.低浓度瓦斯减排利用技术正逐步走向成熟,在我国有着广泛的应用前景,实现我国矿井风排瓦斯减排利用,潜力巨大.

参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013; the physical science basis – contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. The scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Sapoundjiev H. Economic heat recovery and greenhouse gas elimination from ventilation air of underground coal mines [C]// International Coalbed Methane Symposium, 1999.
- [4] 周世宁. 瓦斯发电——煤矿瓦斯利用的好途径[J]. 能源技术与管理, 2005(1): 1-1.
- [5] 胡予红. 加强通风瓦斯利用, 实现减排目的[J]. 中国煤炭, 2009(5): 83-85.
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [7] 国家发展和改革委员会. 煤炭工业发展“十二五”规划[EB/OL]. http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2012tz/t20120322_468769.htm.
- [8] 国家安全生产监督管理局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [9] Su S, Beath A, Guo H, et al. An assessment of mine methane mitigation and utilisation technologies [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31: 123-170.
- [10] 杨俊辉. 矿井通风瓦斯综合利用[J]. 中国煤层气, 2012(1): 43-46.
- [11] Ledwich J, Su S. Catalytic combustion of coal mine ventilation air; literature review and experimental preparation[R]. CSIRO Exploration and Mining, 2001.
- [12] Su S, Beath A, Mallett C. A method and system for combustion of methane [P]. Australian Patent No. 2002951703, 2002.
- [13] Warmuzinski K. Harnessing methane emissions from coal mining[J]. Process Safety and Environment Protection, 2008, 86: 315-320.
- [14] 郑斌, 刘永. 煤矿乏风的蓄热逆流氧化[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1475-1478.
- [15] 马晓钟. 煤矿乏风氧化装置的研制[J]. 煤矿安全与环保, 2011, 38(1): 16-19.
- [16] Su S, Agnew J. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane [J]. Fuel, 2006, 85: 1201-1210.
- [17] Cimino S, Pirone R, Russo G. Thermal stability of perovskite-based monolithic reactors in the catalytic combustion of methane [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 40: 80-85.
- [18] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Published: IGES, Japan, 2006.
- [19] 樊星. 中国碳排放测算分析与减排路径选择研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.