

浸没燃烧法在LNG气化工艺中的应用

□ 中国船舶重工集团公司第七一一研究所能源装备事业部 (201108) 刘世俊 郭超

摘要: 浸没燃烧法属于高效低污染的技术, LNG气化工艺中的SCV装置采用浸没燃烧法。本文介绍了浸没燃烧法的基本原理和应用, 列出中国LNG接收站的建设情况和气化方案。重点介绍了SCV的工作原理和系统构成, 分别从燃烧器、换热管束和传热传质3个方面分析了SCV的技术和难点。

关键词: 浸没燃烧 LNG接收站 浸没燃烧式气化器 换热管束 传热传质

Application of Immersion Combustion Method in LNG Gasification Process

Liu Shijun, Guo Chao

Abstract: Submerged combustion technology has the advantage of high efficiency and low pollution. It has been used to vaporize the LNG in the LNG terminal. This article introduces the basic principles of submerged combustion and its applications, and then lists the LNG terminals under construction in China and their vaporization methods. We focus on the working principles and system components of the submerged combustion vaporizer (SCV) by analyzing its key technical points from the following aspects: combustor, tube bundle, and mass transfer.

Keywords: Submerged Combustion LNG Terminal Submerged Combustion Vaporizer Tube Bundle Heat and Mass Transfer

1 引言

为了便于天然气的输送, 减少运输成本, 将天然气在常压下冷却到 -162°C , 体积缩小到常温常压下的1/600, 即为LNG (Liquefied Natural Gas)。LNG产业链包括多个环节, 其中LNG接收站负责卸载、储存LNG, 并将LNG气化后输送到燃气管网。目前, 中国沿海地区已投产、在建和规划建设的LNG接收站共有

24个。已经建成投产的有7座LNG接收站, 正在建设的有6座, 计划在2015年前陆续建成; 处于前期研究中的还有11个, 计划在2020年前相继建成投产^[1, 2]。

尽管浸没燃烧法出现了60多年, 但是由于缺乏系统的研究, 在国内并没有广泛的应用。由于存在气液两相的传热传质, 燃烧的条件要求比较高, 点火成功率较低。目前, 国内LNG接收站中的浸没燃烧式气化器基本依靠进口, 不利于LNG的产业化发展。为了

打破国外公司对SCV关键技术的垄断局面, 本文从燃烧、传热和传质角度对浸没燃烧法在LNG接收站中应用和存在的问题进行了理论分析。

2 浸没燃烧法

浸没燃烧法, 又称液中燃烧法, 是预先将燃气与空气充分混合, 送入燃烧室进行完全燃烧, 使高温烟气直接喷入液体中从而加热液体的方法。浸没燃烧法的燃烧过程大都属于完全预混燃烧, 其传热过程属于直接接触传热。^[3, 4]

最早燃烧装置是由英国的科里尔 (Collier) 于1889年发明的, 如图1所示。该装置中由于没有专门的燃烧室, 似乎火焰直接喷入液体中, 故得名浸没燃烧。由于火焰与被加热液体直接接触, 因而热损失大、火焰不稳定, 完全燃烧困难。

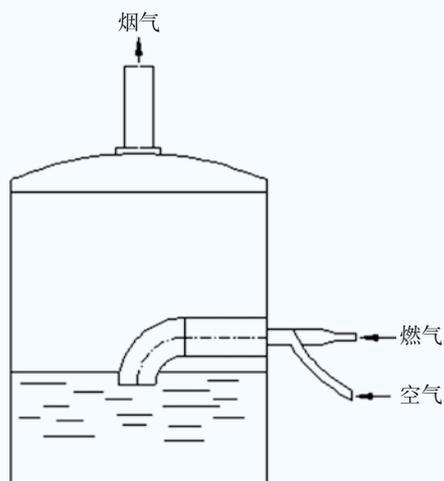


图1 柯里尔的浸没燃烧蒸发器

目前, 广泛应用的浸没燃烧装置如图2所示, 其主要特点是在液面上设置了燃烧室, 它起到保证火焰稳定和燃烧完全的作用。可以看出, 除去辅助设备外, 浸没燃烧装置一般包括燃烧装置、贮槽及排烟装置3部分。随着浸没燃烧法的应用场合不同, 各组成部分的作用也不尽相同。燃烧装置的作用主要是使燃料充分燃烧提供热源。贮槽既可以作为液体加热器, 又可以是液体蒸发器, 还可以是化工反应器。排烟装置的作用是将废气排出, 为了回收余热或余气, 在排烟系统中可以安装废热回收装置或分离器。

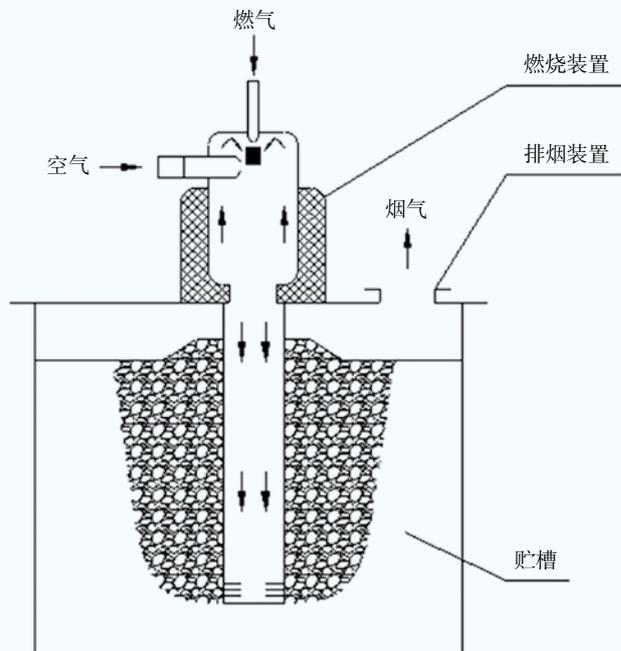


图2 浸没燃烧蒸发装置

随着燃烧技术的发展和完善, 浸没燃烧技术也逐步完善, 使用范围逐步扩大。为了克服浸没燃烧动力消耗大的缺点, 出现了改良浸没燃烧装置。目前, 浸没燃烧装置可以分为浸渍型、填充层型、多孔板型、两相流型。

浸没燃烧系气-液两相直接接触传热, 其最大特点: 一是不需要间壁式换热器或蒸发器所必需的固定传热面, 因此, 不存在传热面上的结晶、结垢和腐蚀问题, 节省了耐高温、耐腐蚀材料。二是高温烟气从液体中鼓泡后排出, 由于气液混合和搅动十分强烈, 大大增加了气液间的接触传热面积, 强化了传热过程。因此, 排烟温度低, 热效率高, 单位产品能耗少, 设备简单, 投资少。^[5, 6]

3 LNG气化工艺简析

在LNG接收站中, 不管是民用燃气还是工业用气, LNG总是要气化并恢复到常温以后才能使用。气化器就是专门用于LNG气化的换热器。因此, 气化器是保证接收站功能的关键设备, 影响并决定着整个LNG接收站及外输管道的正常运行, 并且在很大程度上决定了接收站的成本。一般, 基本负荷LNG接收站有3种气化方式: 70%用开架式气化器 (Open

Rack Vaporizer, ORV), 25%用浸没燃烧式气化器 (SCV), 剩余5%用中间介质气化器 (Intermediate Fluid Vaporizer, IFV)。除了上述气化方式, 空温式气化器常用于小型气化站和调峰接收站。^[7]

LNG气化系统主要由ORV及SCV构成, 当海水温度满足ORV运行要求时, 来自高压外输泵的LNG进入ORV被海水气化, 气化后的天然气(以下简称NG)少量进入燃料气系统, 大部分进入外输计量系统, 通过超声波流量计计量后外输。当冬季来临时, 来自高

压外输泵的LNG进入SCV, 通过来自燃料气系统的NG燃烧加热的方式气化LNG, 气化后的NG同样少量进入燃料气系统, 大部分进入外输计量系统, 通过超声波流量计计量后外输, 其工艺流程图见图3。^[8]

4 浸没燃烧式气化器

浸没燃烧式气化器 (SCV) 的工作原理如图4所示, 天然气和空气在特制的燃烧装置中边混合边燃烧

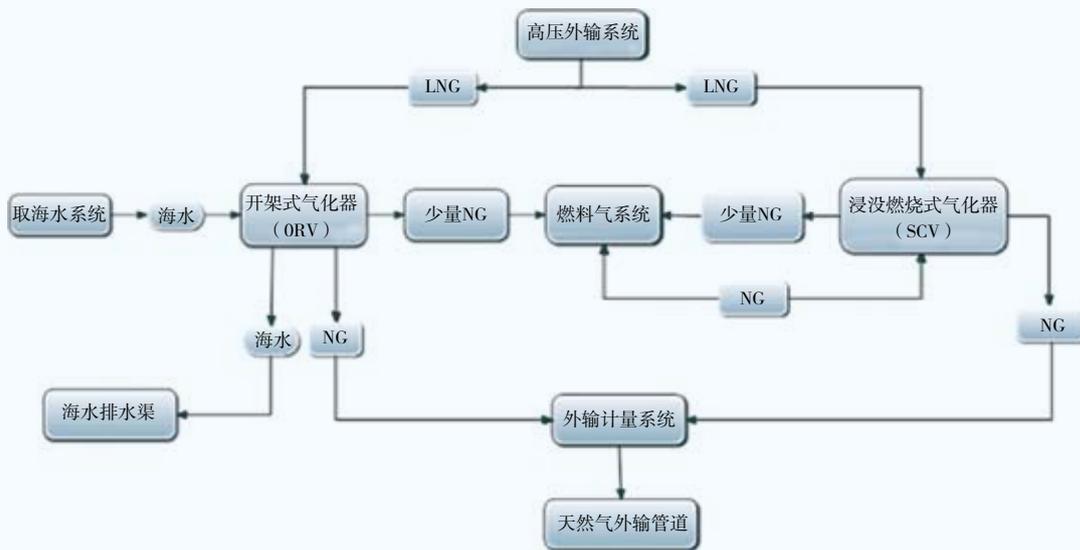


图3 LNG接收站气化系统流程图

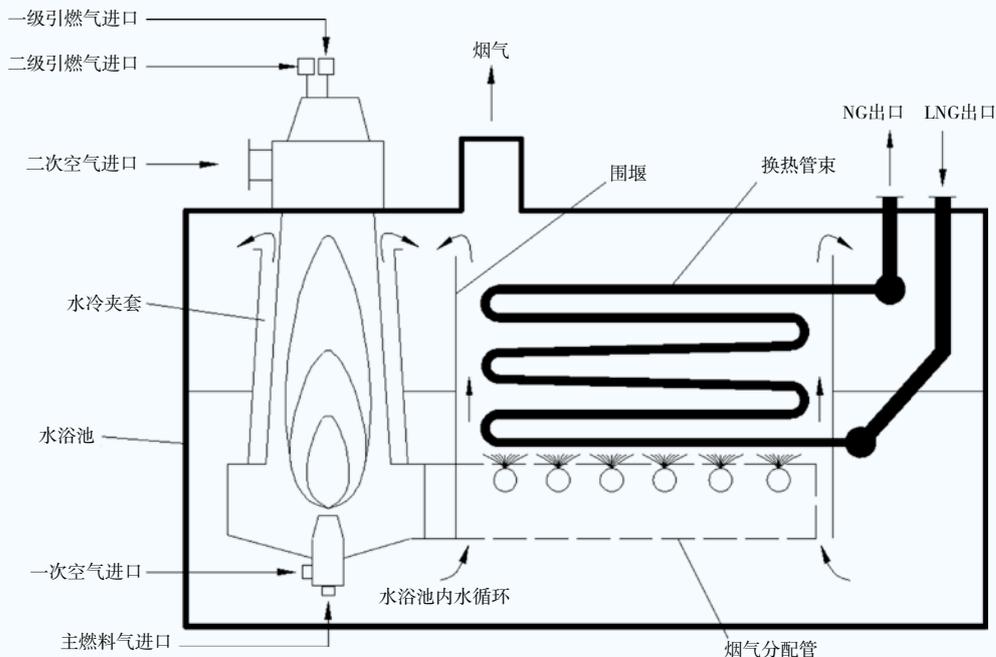


图4 SCV气化器工作原理

后, 高温的烟气从烟气分配器中鼓入水浴中, 高温烟气激烈搅动水, 再通过与换热管束交换热量使管内的LNG气化, 燃气的放热量基本相当于LNG气化所需的热量, 水浴的温度保持不变。

SCV主要应用于调峰负荷型接收站、基本负荷型接收站的备用和卫星型LNG站的气化装置。除了LNG的气化, 还可以应用于液氮、液氧、液氩、液态二氧化碳等大流量的低温液体气化。在美国, 由于法律考虑到向海里排放冷水会影响海洋生命, 因此限制了开架式气化器这类充分利用海水能量的装置的使用。故SCV广泛应用于美国的LNG接收站, 并且大多是提供基本负荷的气化器^[9, 10]。

SCV属于直接接触传热, 与其余气化器相比, 具有如下特点:

(1) 设备投资低, 启动快, 能在15min内迅速达到稳定操作, 气化器的负荷调节范围在10%~100%, 适用于紧急情况或调峰使用;

(2) 换热管束的管外传热系数很高, 可以达到 $5\ 800\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \sim 8\ 000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[11];

(3) 天然气燃烧后的水蒸气充分释放冷凝热, 使得总体热效率较高, 达到98%左右;

(4) 运行时消耗1%~2%的天然气作燃料, 操作成本较高;

(5) SCV中发生了燃烧的化学变化, 安全要求更高, 控制更为复杂。

5 SCV分析

5.1 浸没式燃烧器

浸没式燃烧器将燃料气和空气充分混合燃烧后鼓入水浴中, 提供低温液体气化的热量。燃烧器的稳定和安全运行, 关系到SCV运行是否正常, 是SCV的核心所在。

LNG气化所需的热量可以由单燃烧器提供, 也可以由多燃烧器提供。在早期, 燃烧器的结构比较简单, 单燃烧器的负荷不大, SCV气化器通常由多个燃烧器组成, 如图5所示。随着燃烧器技术的发展, 大负荷单燃烧器, 结构足够紧凑的SCV装置, 已经成为SCV发展的趋势, 见图6。^[12]有另外一种观点认为, 当SCV用在基本负荷时, 燃烧器的负荷长期不变, 推

荐用单燃烧器结构; 当SCV用在调峰负荷时, 燃烧器的负荷经常变化, 可能在一天中的变化较大, 推荐用多燃烧器结构, 小负荷时只开启部分燃烧器, 满负荷时同时开启所有燃烧器。

通常采用大负荷燃烧器, 因为比起多个较小的燃烧器, 采用单燃烧器结构更加紧凑、更加经济, 同时产生的 NO_x 和CO也更少。另外, 随着燃烧器负荷的增加, 燃烧器炉膛高度增加, 需要更高水位的水浴来冷却燃烧器, 导致燃烧器的背压增加, 相应的鼓风机功率增加, 运行成本也随之增加。

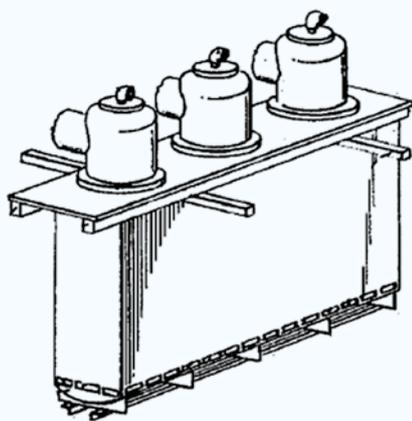


图5 多个燃烧器结构

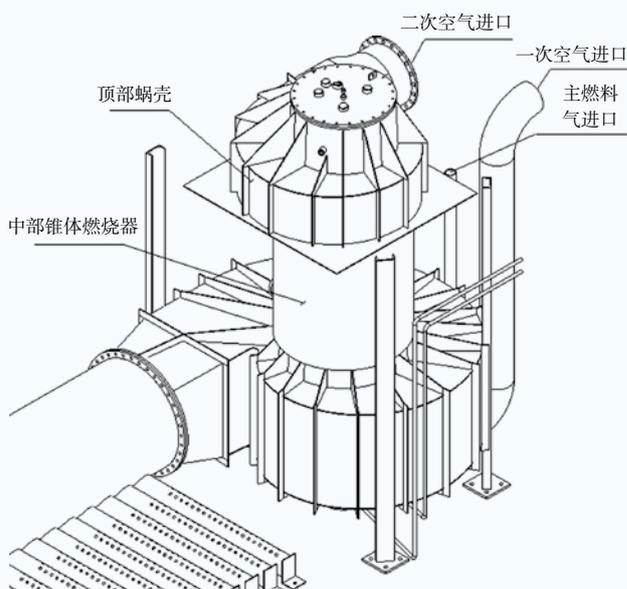


图6 单个燃烧器结构

在国内, LNG接收站的SCV基本采用单个燃烧器作为热源, 燃烧器由上部蜗壳、中部锥形燃烧室和下

部锥形燃烧室3部分组成,属于全金属结构燃烧器,如图6所示。主燃烧器位于下部锥形燃烧室底部中心处,一、二级引燃位于上部蜗壳盖板上。

浸没燃烧器的工作条件比其他任何燃烧装置要恶劣很多,如燃烧室受到较大的背压作用,点火较困难;烟气与液体直接接触传热时,火焰可能与液体接触而形成不完全燃烧;烟气鼓泡穿过液体层时液面波动大引起燃烧不稳定;烟气 CO_2 和 NO_x 被水浴吸收形成酸性环境等。

SCV的点火程序很复杂,高能点火器点燃一级引燃,一级引燃点燃二级引燃后关闭一级引燃,主燃烧器通过二级引燃火焰点燃。正常运行时,燃烧器的负荷全部由主燃烧器提供。

目前应用较为广泛而效果较好的稳焰措施是高速旋流稳焰法。高速旋流烟气的回流促进了燃气与空气的混合、预热及着火,强化了燃烧过程,提高了火焰的稳定性。

浸没式燃烧采用分级燃烧技术,燃烧空气分为两路:一次空气从主燃烧器处鼓出;二次空气从上部蜗壳切向进口鼓入。一次空气在主燃烧器处与燃料气边混合边燃烧,故属于预混燃烧,同时燃烧器在一次空气处处于贫氧状态,降低 NO_x 的生成量。二次空气自上而下通过中部锥形燃烧室进入下部蜗壳,强烈的旋流提供稳定的点火源,使燃烧更加稳定,同时冷却燃烧器,提供未完全燃烧所需的空气。

由于SCV的排烟温度很低,烟气中的 CO_2 、 NO_x 等酸性气体会溶于水浴中产出酸性物质,这时需要向水浴中加入碱性化合物(如碳酸钠、碳酸氢钠等)以调整水的PH值。PH控制系统由一个自动定量注入系统通过系统自动检测的水浴PH值来注入25%的NaOH溶液以控制水浴的PH值。

5.2 换热单元

换热单元全部浸没在水浴中,LNG在管内流动,吸热后气化。换热单元由多通道蛇形管并列组成,安装于围堰板中。LNG从下部集液总管进入,经并行安装的多通道蛇形管吸热后气化,从上部集气总管排出。为了在低温环境下安全运行,防止腐蚀,换热管束材质为304/304L双相钢。

换热管束属于三类压力容器,制造资质要求较高,材质要求严格,在生产过程中需要对质量严格把关。

内部走LNG的换热管束由于不断受到高温烟气的冲击和自身的振动,采用特殊的材质消除应力。换热管束的支撑和吊架结构设计的合理性对振动的消除也非常重要。换热管束的支撑和吊架结构较为复杂,以吸收热应力、机械载荷和地震产生的振动。

5.3 传热传质分析

SCV中传热传质过程是同时进行的,可分为3步:一是高温烟气鼓入水浴中,与水浴的传热传质;二是上升气泡与换热管束的传热传质;三是换热管束与LNG的传热^[8]。

高温烟气从烟气分配器上的小孔鼓入水浴中,使烟气以无数个细小气泡分散于液体之中,高速的两相流从围堰板底部喷入,与换热管束换热后从围堰板顶部沿四周返回贮水池中,形成一个不断循环的高速扰动的两相流,解决换热管束局部结冰的问题。这股激烈扰动的循环水流使换热管束管外的传热系数达到 $5\ 800\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})\sim 8\ 000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$,且传热系数基本上维持在1:3的范围内,管外的污垢热阻很小^[3]。

从烟气到LNG的传热过程涉及多学科内容,除了管外的两相流传热,管内LNG属于超临界换热,目前并没有详细研究的报道。多种复杂的因素影响着换热的好坏,需要对换热过程进行分析优化,找到主要的影响因素。

从换热管束的角度,换热器的换热面积,蛇形盘管如何分布是需要确定的参数。从热烟气的角度,烟气分配器上的小孔分布和数量密切影响着换热的效果,同时小孔到液面的浸没深度直接影响着换热量和鼓风机的能耗。理想的换热工况是从水浴鼓出的烟气温度与水浴温度相等,同时鼓风机的能耗最低。这些都需要做大量的研究,找到相互的联系,确定最优的方案。

6 结论

浸没燃烧法属于高效低污染的技术,LNG接收站的SCV装置就采用浸没燃烧法。

(1) LNG接收站大都采用ORV、SCV和IFV的组合作为气化方式;

(2) 为了提高点火的可靠性和安全性,SCV装置采用高能点火装置引燃小火,小火引燃大火,大火

引燃主燃烧器的点火方式。进口的高能点火装置和复杂的点火方式，可以大大提高点火时的成功率；

(3) 浸没燃烧器的工作条件比其他任何燃烧装置要恶劣很多，如燃烧室受到较大的背压作用；烟气与液体直接接触传热时，火焰可能与液体接触而形成不完全燃烧；烟气鼓泡穿过液体层时液面波动大等；

(4) 为了燃烧稳定，采用了高速旋流技术；

(5) SCV工作过程中会产出酸性物质，通常向水浴中加入碱性化合物（如碳酸钠、碳酸氢钠等）以调整水的PH值；

(6) 浸没燃烧法排出的尾气中NO_x含量较低，属于一种低污染的燃烧方法；

(7) 为了消除振动，需要对换热管束的支撑和吊架结构进行合理的设计；

(8) 气化的传热过程涉及多学科内容，需要进行大量的研究找到最优化方案。

参考文献

- 1 高重建. 液化天然气（LNG）在浙江省城市燃气中的应用研究[J]. 城市燃气, 2005; 10: 3-7
- 2 蔡国勇. 中国LNG接收站布局[R]. 2014
- 3 同济大学, 重庆大学, 哈尔滨工业大学等. 燃气燃烧

与应用[M]. 中国建筑工业, 2011: 479

4 傅忠诚, 薛世达, 李振鸣. 燃气燃烧新装置[M]. 中国建筑工业出版社, 1984

5 Bagley J L. Consider submerged combustion for hot water production[J]. Chemical Engineering Progress. 2002; 98 (3): 48-51

6 Gong X, Liu Z, Jiang H. Emissions and thermal efficiency investigation of a pressurized submerged combustion evaporator[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies. 2012

7 裘栋. LNG项目气化器的选型[J]. 化工设计, 2011; 21 (4): 19-22, 6

8 王格新, 邓冬. 山东LNG工程气化工艺技术及设备研究[Z]. 乌鲁木齐, 2013; 1173-1178

9 Vendors Analysis of Regasification Vaporizers[R]. LNGExpress, 2004

10 Lower Emission LNG Vaporization [J]. LNG, 2004; 12: 24-25

11 顾安忠编. 液化天然气技术手册[M]. 机械工业, 2010: 586

12 High capacity submerged hot gas heat exchanger[P]. US3368548

13 Leite O C. Submerged combustion vaporisers for LNG distribution facilities[J]. PETROLEUM TECHNOLOGY QUARTERLY. 1997: 71-78

工程信息

邯郸东部8县（市）开通天然气

2015年10月15日，邯郸气化工程一期项目竣工投用，该市东部肥乡、广平、大名等8个县（市）开通天然气。

2012年，邯郸市政府与中石化签署《气化邯郸战略框架协议》，分别从河南南乐和山西黎城分输站引入气源，工程总投资20.6亿元，年输气能力30亿m³，由中石化天然气公司与河北华燃长通燃气公司投资建设，分东西、南北两条线路，东西线起点位于涉县与山西省黎城县交界处，向东经武安、

磁县、邯郸县、肥乡、广平至馆陶县结束，全长约200km，南北线由大名县经广平县到达曲周县，全长106km。

邯郸气化工程一期项目年输气能力约15亿m³，投用后将有效缓解邯郸清洁能源紧缺现状，改善空气质量。按照规划，该市2016年起将逐步向乡村供气，2018年实现“气化邯郸、县县通气、乡村并网、户户受益”的目标。

（本刊通讯员供稿）