

空分设备在天然气输送工艺中余压和冷量的回收利用

王晓东, 王承阳, 杨东红, 王泽鑫, 高佳兵, 赵悦

(东北大学制冷与低温工程研究所, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 介绍在天然气输送过程中的管道余压和 LNG 的冷量在空分上的利用, 用热力学方法对其进行可行性研究, 同时介绍利用余压和冷量的空分流程: 让高压天然气逐级膨胀将压力降到中压后, 产生的冷量再通过空分的主换热器, 中压再进一步膨胀到低压范围后, 产生的冷量补入空分的循环氮气; 分析对比已有的利用 LNG 冷能的空分流程, 指出由 LNG 冷能冷却的氮外循环和主换热器制冷系统, 用来补充空分系统工艺中所需的冷量, 以及由乙二醇为载冷剂把 LNG 残余冷量带入空分的空气冷却系统较为合理。讨论天然气余压和冷能回收实施过程中存在的问题。

关键词: 天然气; 余压; LNG 冷量; 空分; 利用

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1004-7948(2011)09-0024-05

doi:103969/j. issn. 1004-7948. 2011. 09. 007

引言

近年来全球天然气的生产和贸易日趋活跃, 天然气已成为稀缺清洁能源, 正在成为世界油气工业新的热点。为保证能源供应多元化和改善能源消费结构, 一些能源消费大国越来越重视天然气特别是液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)的引进。

中国在“十二五”期间, 工业化、循环经济、节能减排等重大举措, 构成了中国大规模利用天然气的历史机遇。但在利用的同时, 也要注重天然气输送中的潜在的能源回收再利用。国外已有成功投入到实际应用中的案例, 国内对于天然气在输送终端能量的回收利用不论是学术研究还是实际应用才刚刚起步。

1 天然气余压在空分上的利用

在天然气输送工艺中, 天然气的输送基本分为两种途径: 一是管道输送, 一是液化输送。而当前世界上天然气在内陆地区采用长途管道高压运输, 西欧和北美地区的天然气管道压力普遍都在 10MPa 以上。我国西气东输、川气东输管道压力也都在 10MPa 左右。输送的高压天然气经调压站降至中压后进入城市燃气管道, 再借助调压站将压

力降低至低压后供用户使用, 通过降压和节流装置后配气站压力在 4MPa 左右, 而市政(如家用天然气)管道输送出的天然气压力为 0.23MPa 左右, 显然这么大的压差靠节流是巨大的能源浪费。如果能回收天然气管道里的压力能, 对能源的回收利用又是一大举措^[1-6]。

1.1 回收余压基本原理和热力学分析

由能量守恒定律和质量守恒定律可知, 天然气管道是一个开口系统, 在理想情况下可把膨胀机看作等熵膨胀的过程, 膨胀过程熵增的关系式可表示为:

$$\Delta S_{1-2} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

式中: ΔS_{1-2} —气体膨胀过程的熵增, J/(mol·K);

C_p —气体比定压热容, J/(mol·L);

T_2 —膨胀后的气体温度, K;

T_1 —膨胀前的气体温度, K;

R —摩尔气体常数, J/(mol·K);

P_2 —气体膨胀后的绝对压力, MPa;

P_1 —气体膨胀前的绝对压力, MPa。

当等熵膨胀过程中 ΔS_{1-2} 为零时, 则式(1)变形为:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (2)$$

由式(2)知当中压管网压力 P_2 一定时, 高压天然气膨胀的制冷温度 T 主要受高压管网压力 P_1 和进气温度 T_1 影响。由于在可逆情况下做功能力为最大, 此时的绝热过程为等熵膨胀过程。因此焓差即是等熵膨胀至出口压力时的进出口的焓之差, 即:

$$W_{\max} = (h_1 - h_{2t}) - T_0(s_1 - s_{2t}) = h_1 - h_{2t} \quad (3)$$

式中: h_{2t} —等熵膨胀至出口压力 p_2 时的焓。

如果把天然气看作理想气体, 则:

$$W_{\max} = h_1 - h_{2t} = c_p(T_1 - T_{2t}) = c_p T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (4)$$

式中: T_1 —透平进口天然气的热力学温度, K;

P_1 —透平进口气体的绝对压力, MPa;

P_2 —透平出口气体的绝对压力, MPa;

c_p —天然气的定压比热容, kJ/(m³·K);

k —气体定熵指数, 可取 $k = 1.384$ 。

由式(3)可见, 透平膨胀机的天然气进口压力 P_1 越大, 它具有的做功能力越大。具体关系如图1、图2所示。

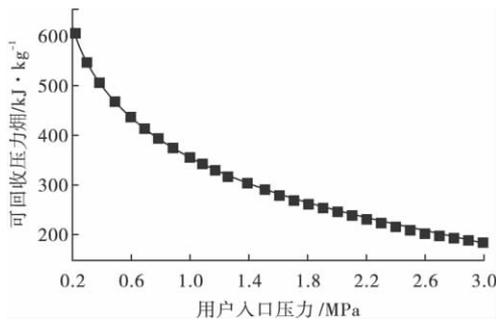


图1 不同压力下的最大可回收利用压力能

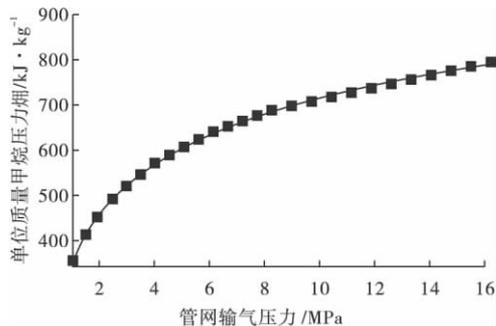


图2 不同压力下单位质量天然气的焓

显然, 从图1和图2可以看出, 当主管网压力和用户压力的压差越大, 则膨胀机获得的冷量就越

多。对于天然气实际的绝热膨胀过程, 对外做的比功仍可以根据进、出口气体的实际焓差计算。因此, 每1m³管道天然气实际做出的功可表示为:

$$W = (h_1 - h_2) = \eta_{n,T}(h_1 - h_{2t}) = \eta_{n,T} c_p T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (5)$$

当流进透平膨胀机的天然气流量为 V_B 时, 则透平膨胀机能发出的功率为:

$$p = \eta_{n,T} V_B c_p T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (6)$$

式中: V_B —天然气流量, m³/s。

由式(6)可知, 透平膨胀机回收的功率与管道天然气的流量成正比, 因此, 对于大量天然气集中的回收余压的透平膨胀机, 其经济效益将越高。

在同一输气管网压力下, 当不同用户需求压力不同时, 回收的压力能也不同。以西气东输管路为例, 管网压力为10MPa, 管道设计输气量 120×10^8 m³/a, 管路质量流量为 80×10^8 kg/a。如用户采用中压供气方式, 压力取0.3MPa, 则可回收的最大压力能为534.2kJ/kg。

1.2 回收余压应用在空分设备

关于余压回收的用途, 众多学者提出了各种各样的利用方式^[7], 本文主要注重在空分装置的应用。在高压天然气通过膨胀机将压力降到用户所需中压和低压范围, 而天然气的温度降低到深冷范围内, 可用在空分设备的冷量供给上, 具体流程简图如图3所示。

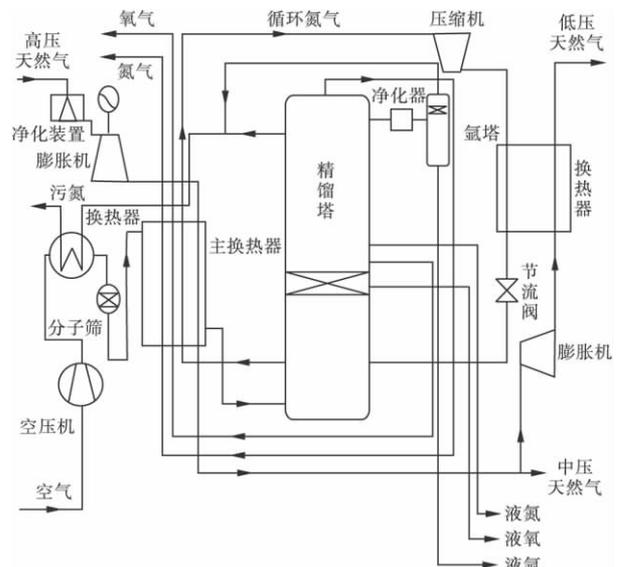


图3 在空分装置上对天然气余压回收利用的流程简图

原料空气在过滤掉灰尘和机械杂质后,进入空压机加压后再经过与污氮换热冷预后温度降低,进入分子筛吸附器后,原料空气中的水分、二氧化碳、乙炔等杂质被分子筛吸附掉,净化后的空气在主换热器中进一步降温,在主换热器中的冷量主要是由高压天然气在膨胀机内膨胀,并对外做功发电后的中压天然气带入的,其次还有产品氧气和氮气带入。空气在主换热器内被冷却至饱和温度后进入下塔,空气经下塔初步精馏后,在下塔底部获得液态空气,在下塔顶部获得纯氮,从上塔顶部获得氮气,经主换热器复热后作为产品输出。另抽取一部分液氮直接进入液氮储槽,经上塔进一步精馏后,在上塔底部获得氧气,氧气经主换热器复热,然后再并入氧气管网。从上塔适当位置抽取一定量氩气,经净化器净化,在氩塔除去氮成分,低浓度的氮气并入污氮管道去换热器预冷压缩后的空气,而氩塔精馏后得到精液氩再输入液氩槽,有一股氮气不参与精馏,只是作为循环氮气吸收由中压天然气膨胀到低压天然气放出的冷量,从而不断地为精馏塔和主换热器补入一定的冷量。

1.3 余压回收存在的问题和应对措施

由于城市中用气压力的不同,使调压站布置分散。大型电力回收系统仅能设在城市门站,使中小调压站余能回收利用难度增大;同时居民生活及商业用气的不均匀性很大,季节性用气量相差过大,不利于余压稳定的回收利用。气压的波峰、波谷都会影响到利用的效果。

但是可以构建一个工业生态园,设置如图4所示的能量逐级利用流程,让膨胀后的低温天然气依次通过各级换热器。其中,空分设备来生产氧气和氮气,氧气可以提供给众多用户,氮气供给下游产业,目前我国橡胶工业的高速发展,同时产生了大量的废旧橡胶,将废旧橡胶直接利用氮气使其低温再粉碎制成胶粉而加以回收利用。通过空分装置、干冰制造装置、低温粉碎装置的换热设备后的天然气,还有一定的冷量,恰好在冷库、冷藏、果蔬保鲜等装置中。最后流程末端的天然气供给居民和调峰发电的工业用户,其中工业发电用户产生的二氧化碳经过脱硫脱氮等净化后再回收供给上游的干冰制造装置。同时在空分装置中,应考虑到应有备用的透平膨胀机,来调节天然气余压的波动造成的影响。同时流程的线路中,设置有蓄冷装置,在

高峰时放出冷量,低峰时储存冷量。依次构成一批相关的工厂,组合在一起共生共存,相互依赖,使资源的利用率达到最高,最大限度地充分利用资源,最终达到工业可持续发展的园区。

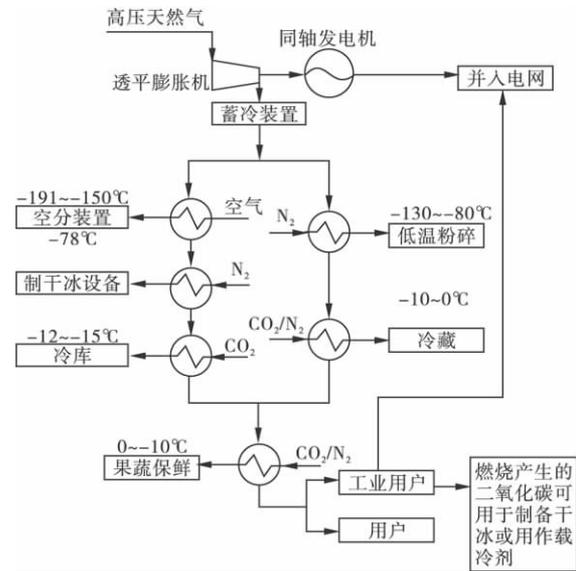


图4 利用余压生成冷量后逐级利用的工业生态园流程图

2 回收 LNG 冷量利用在空分上的可行性研究

当 LNG 由液态 -162°C 经常温常压下气化时,将释放出巨大的冷量,国外已有数据表明:平均每吨 LNG 气化过程相当于释放 $830 \sim 860\text{MJ}$ 的冷能,所以这能量是相当可观的。我国目前 LNG 冷能应用尚处于起步阶段,冷能回收利用率不到 7%。所以,天然气输送过程中不论在 LNG 冷量回收还是管道余压回收上都有着巨大的能量回收。

LNG 汽化时释放大量冷能,回收这部分可用冷能,不仅有效利用了能源,而且减少了机械制冷大量的电能消耗。一般情况下,1kg LNG 可以生产 2kg 多的液态氮,而生产 1kg 液态氮需耗电 1kWh,即是说 1kg LNG 可以转换成 2kWh 电的能量。LNG 项目的设计年接收量为 1000 万 t,若其冷能全部回收,换算成电量相当于 200 亿 kWh,除去 20% 的损耗,每年仍可以回收的冷能相当于 160 亿 kWh,因此具有可观的经济效益和社会效益。

2.1 回收 LNG 的热力学分析

能量系统中重要的分析方法有焓、熵、焓等。焓不但能从数量上反映能量种类的转换,更重要的是能清楚地揭示内部不可逆性造成的能量品质的

贬值情况,以及造成热力学损失的原因和部位,为合理利用冷能提供重要理论指导^[8-9]。即使换热设备没有热损失,热量(或冷量)在数量上完全回收,仍然有熵损失,而传热温差的大小直接影响过程的熵损失。与其他利用方法相比,空分装置中循环氮气的温度较低,在 150K 到 200K 之间,与 LNG 的温差不大,因此冷能回收过程中的熵损失相对其他利用装置较少。

LNG 冷量的利用是通过换热过程来实现的,即将 LNG 的冷量传递给需要冷却的工质,达到冷量回收的目的。由于 LNG 是高压低温液体,所以包含着压焓和温度焓。由系统稳定流动能量方程可得 LNG 完成的最大有用功。

温度焓为:

$$ex_T = c_p(T - T_0) + T_0 \int_{T_0}^T \frac{\delta q}{T} = c_p(T - T_0) + c_p T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (9)$$

压力焓为:

$$ex_p = T_0 R_p \int_{p_0}^p \frac{\delta P}{P} = T_0 R \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (10)$$

其中 T, P 为其实状态参数, T_0, p_0 与环境平衡时的状态。LNG 从 110K 汽化成常温气体时,吸收 860 ~ 883kJ/kg 的热量,如果再进行一定的加压处理,依据以上 LNG 冷能焓的分析,对于大型的 LNG 接受站来说,其蕴含的冷能相当大。

2.2 在空分上的应用

利用 LNG 进行空气分离,生产液氮和液氧,是非常好的 LNG 冷能利用方案,因为空分所需温度与 LNG 的汽化温度最接近,在能量利用上熵损失最小。传统方式生产 1m³ 的液化空气大约需要 650kcal 的冷能,而如果考虑利用空分装置回收的 LNG 冷能,电能消耗可减少 50%, 水耗减少 30%, 这样就会大大降低生产成本,具有可观的经济效益。

文献[10] ~ [11]中指出,当空气用 LNG 预冷时,在空气与 LNG 的摩尔流量比为 1:0.37 时,空气被冷却达到最低,但是当 LNG 的流量再增大时,小于此比例时,就会使 LNG 的冷量形成浪费(见图 5)。目前国内外学者提出了各种利用流程和观点,美国学者提出了采用内部储存的惰性气体的液体汽化补充冷量,以解决在使用冷源的空气分离装

置因需求波动而造成的冷量供应不足。日本学者提出不用常规高压分馏塔而只用高压分馏塔冷凝段和低压分馏塔,把低压分馏塔生产的氮气再压缩,采用氟利昂作为压缩氮气及压缩空气的载冷剂等方法,原料空气只压缩到低压分馏塔操作压力,生产液氧、液氮和液氢。

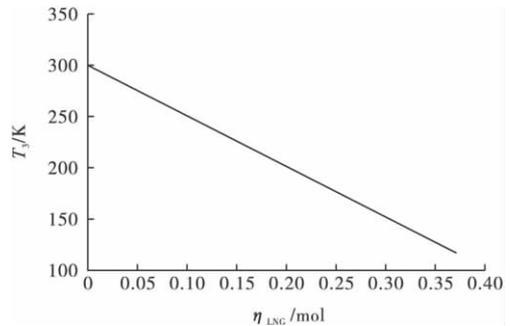


图 5 空气预冷温度随 LNG 的流量的变化

国内学者提出的具有代表性的 LNG 工艺的流程(见图 6),在该流程图中,提出了具有建设性的观点:在该工艺流程系统中设置了由 LNG 冷能冷却的氮外循环和氮内循环制冷系统,用来补充系统工艺中所需的冷量,以及由 LNG 冷能冷却的氟利昂为载冷剂的空气冷却系统,这就节约了大量的水资源,氮循环系统均用氮气低温压缩。在主热交换器中增加了循环氮换热通道,与氮气的热交器分为上下两段,即热交换器和低-高压循环氮气热交换器;设计了内循环氮节流阀、外循环氮节流阀和取消了循环氮气膨胀机,使设备简化,并增设了单向阀,能自积累高纯内循环和外循环氮气^[12]。

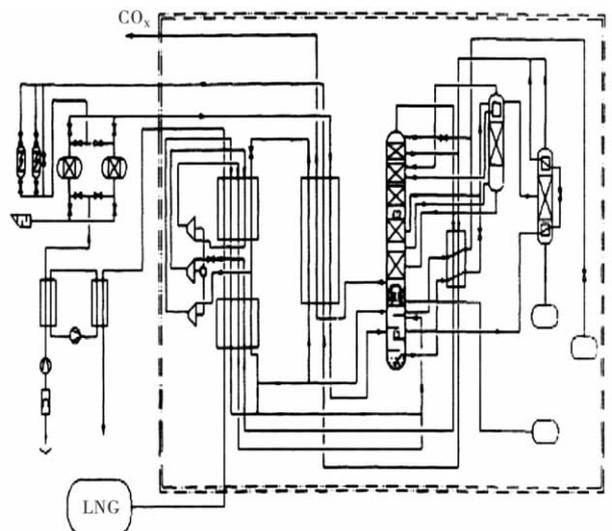


图 6 由 LNG 冷能冷却的氮外循环和氮内循环的空分系统

但是系统中将节流后循环氮气的一部分直接通入主换热器,从焓的观点看能量利用是不合理的。因为节流后的循环氮气冷能品质最高^[13],与塔内的温度端差最小,所以焓损失最小。应将这部分冷量在更低的温度下利用,所以考虑应将全部循环氮气通过低温和主换热器。同时预冷空气的载冷剂氟利昂可以考虑用乙二醇代替。

文献[14]中给出了新的流程图,在该过程中是用低温换热器而不是冷凝蒸发器来液化氧气,这样的好处是对原有的传统的冷凝蒸发器做改动。同时 LNG 不经过低温换热器,避免了与氧气的管路的接触,安全性有所提高。取消了氮气内循环,省掉了氮压机,在很大程度上节省了电能。

但是该流程还在使用水冷却塔来冷却通过空压机的空气,这就需要消耗大量的水,如果用天然气的残余冷量去冷却空气,相比之下具有明显的节水效果;同时取消了氮气内循环,塔内冷量的补给只能靠过冷空气的代入,这就给主换热器的设计尺寸提出了较高的要求,因为 LNG 要较好的与空气的各流股换热,换热器的端差温度和换热效果就要很好地考虑在内。

空分装置利用 LNG 冷能的流程可以有多种方式,但基本都是在用 LNG 冷却循环氮气和冷却压缩机出口空气的方式的基础上发展而来。具体哪种流程更合理,需视实际的具体情况而定。

2.3 LNG 冷能回收存在的问题

LNG 冷能综合集成利用产业链,涉及下游众多的行业、部门和企业。LNG 汽化操作和下游用户对冷能的利用在时间和空间上不同步。主要是 LNG 接收站气化负荷必须根据下游用气需求而变,有季节性和昼夜性波动和由于 LNG 接收站只需考虑码头、储罐、气化设施等,占地面积并不大;而冷能利用项目占地面积都较大,这就会产生冷能输送距离较远、运送成本较高、经济效益减少的问题。

3 结论

对天然气输送工艺中余压和冷量在空分上的回收利用进行了系统的分析,天然气余压经过高压和中压膨胀获得冷量分别供给空分系统,对于回收

过程中存在的问题,提出构造工业生态园的观点来逐级利用余压膨胀后的冷能。对已有的利用 LNG 冷能的空分流程,进行了对比分析,并指出有效合理利用 LNG 能的路径,使 LNG 冷能更经济合理回收在空分装置中。

参考文献

- [1]和永超,侯予,赵红利,等.三种膨胀装置不可逆损失的比较[J].低温与超导,2005,33(2):53-57.
- [2]闻菁,徐明仿.天然气管道压力能的回收及利用[J].天然气工业,2007,27(7):106-108.
- [3]陈绍凯,李自力,雷思罗,等.高压天然气压力能的回收利用技术[J].煤气与热力,2008,28(4):39-43,48.
- [4]郑志,王树立,王帮华.天然气城市门站调压过程的分析[J].天然气工业,2009,29(5):104-106.
- [5]严铭卿,廉乐明.天然气输配工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [6]罗东晓.高压天然气压力能回收利用技术研究[A].节能环保和谐发展—2007中国科协年会论(二)[C].北京:科学出版社,2007.
- [7]J D. M. adalon, J A. M. Row e. Natural gas energy powering distributed hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32: 557-566.
- [8]罗东晓.回收高压管输气压力能用于冷库的技术[J].城市燃气,2010,(4):5-7.
- [9]潘家华.我国的能源战略及石油天然气的输送[J].焊管,2006,(6):6-10,91.
- [10]王强,厉彦忠,等.液化天然气(LNG)冷能回收及其利用[J].低温工程,2002,128(4):28-31.
- [11]林文胜,顾安忠,等.空分装置利用 LNG 冷量的热力学分析[J].制冷技术,2003,(3):26-30.
- [12]张中秀,周伟国.利用液化天然气冷能的空气分离技术[J].煤气与热力,2007,(6):18-20.
- [13]陈则韶,程文龙.一种利用 LNG 冷能的空气分离装置新流程[J].工程热物理学报,2004,25(6):913-915.
- [14]金滔,胡建军.一种利用 LNG 冷能的空分流程[J].空气分离,2005,9(5):15-20.

作者简介:王晓东(1983-),男,内蒙古卓资县人,硕士,研究方向:空分系统、LNG 的冷量回收利用、低沸点工质的运用。

收稿日期:2011-07-05;修回日期:2011-08-08

Energy Conservation(Monthly)**Sponsor:** Liaoning Provincial Institute of Science and
Technology Information**Publisher:** Energy Conservation Magazine Publishing
House**Chief Editor:** JIN Na**Address:** No. 8 ,Hunnan 2 Road ,Shenyang high-tech in-
dustrial development zone ,Shenyang City ,Lia-
oning Province ,China**Post Code:** 110181**CONTENTS**

Sep. 2011 Vol. 30 ,No. 9 Total Issue No. 349

**Air distribution and human thermal comfort evaluation
of the partition-type task-ambient
air-conditioning system**WU Tao JING You-yin
(North China Electric Power University ,
Baoding 071003 ,China)

Abstract: The turbulence model were used to simulate the partition-type task-ambient air conditioning system in typical office work environments analyzed the uniform environmental parameters field around the person and further researched the human thermal comfort by the influence of the non-uniform. The environmental parameters around the person and the thermal comfort were researched using different parameter of air distribution. Simulation results show that the air conditioning air supply can make indoor temperature partitions ,air supply station on high efficiency ,energy saving can realize the overall in the appropriate location supply air conditions for workers ,can provide better working conditions.

Key words: partition-type station; air distribution; human comfort

10

**The energy saving potential analysis of air conditioning
exhaust heat recovery is applied in China**WANG Xin-hua ,LIU Ze-hua ,JIN lei et al.
(The School of Urban Construction University
of South China ,Hengyang 421001 ,China)

Abstract: Introduced the working principle of air conditioning exhaust heat recovery system and analyzed the outdoor temperature and the enthalpy value's hourly running parameters of different areas. On the basis of meteorological data dynamic analyzed the adaptability and the choice of the ways of heat recovery in different typical climatic regions in China. The energy saving potential was analyzed and then it obtained the adaptation range of heat recovery system in different climatic regions. The study shows that energy saving effect of exhaust heat recovery unit is obvious.

Key words: exhaust heat recovery; climate; hourly change; energy saving

17

**The air separation system by using cold energy
of LNG and natural gas pressure energy**WANG Xiao-dong ,WANG Cheng-yang ,
YANG Dong-hong et al.
(Refrigeration and Cryogenic Engineering Institute of
Northeastern University ,Shenyang 110819 ,China)

Abstract: Some kinds of air separation system by using nature gas pressure energy and LNG cold energy was introduce and use thermodynamic to analysis the feasibility study ,also describe the detail of the

several kinds of air separation system by using cold energy of LNG and natural gas pressure energy ,let high-pressure pipe natural gas has to be integrated decompressed into medium-pressure and low-pressure , a large amount of cold energy is generated then bring into the Primary System Heat Exchanger and cycle nitrogen; and this article make an analysis and a comparison between the air separation systems by using cold energy of LNG ,indicate the outer nitrogen cycle and Primary System Heat Exchanger cooled by cold energy of LNG ,and the compressed air is pre-cooled by Glycol in cold agent by residual cool energy of LNG are more reasonable ,and debate the existing problems in the process of implementing.

Key words: natural gas; pressure energy; LNG cold energy; air separation; utilization

24

**Henan oil-field boiler heat stove application economy
energy new product new technique
of applicability research**DU Yao-zhou ,WANG Hua
(Henan oil-field technique monitor center economy
energy monitor station ,Nanyang 473132 ,China)

Abstract: For the sake of economy energy reduce row ,exaltation economy performance ,in recent years ,the oil-field provide hot the equipments adopted a series economy energy ,and obtained economy energy effect and economy performance. For the sake of bitterly exertive economy energy measure of should have a great achievement an effect ,this text main combine river south the oil-field is in the boiler in recent years ,heat stove application of economy energy new product , new technique of the technique condition carried on analysis evaluation ,with period bitterly attain economy energy new product ,new technique of application effect ,real realization economy performance of exaltation.

Key words: boiler; economy energy measure; apply a condition; hot efficiency

29

**Research on numerical simulation of combustion
for 440t/h circulation fluidized bed boiler**BAI Zhi-gang ,WANG Yan-ping
(State Nuclear Electric Power Planning Design &
Research Institute ,Beijing 100094 ,China)

Abstract: Numerical simulation is a very powerful method assisting the test method in research of gas-solid multiphase flow. Focuses on the burning process of the DG440/13. 7-II 2 CFB boiler ,the paper shows the results of numerical simulation and analyzes it qualitatively. The results showed pay special attention to the following points: the boiler furnace flow; temperature distributions ,which hope to provide instructive guidance for the optimum design and operation of the boiler.

Key words: circulation fluidized bed boiler; numerical simulation; combustion model; temperature distributions

35

**Medium mill hot air preparation and experimental
investigation under cold furnace**LIU Hai-long
(Tianjin Datang International Panshan Power
Generation Co. Ltd. Jixian 301907 ,China)

Abstract: In using plasma ignition system to solve the problem of pulverized coal sources was proposed. Introduced the datang circle mountain air cooling power plant furnace pulverizing mill system with steam heaters ,inlet air through research and experiment ,accounting ,and proved in coal pulverizer entrance duct mounted and rational selection of steam heating steam source reasonable design fully discussed the parameters could be achieved under the condition of cold mill start-up of the furnace could realize smoothly plasma ignition energy saving.

Key words: plasma ignition; sirocco preparation; cold furnace; coal pulverizer

38