

· 工艺与设备 ·

径向流吸附器制氧流程的参数实验研究^①

施绍松, 刘应书, 李永玲, 孟 宇, 杨 雄

(北京科技大学 气体分离工程研究所, 北京 100083)

摘要: 建立一套径向流变压吸附制氧实验装置, 对径向流制氧流程的吸附时间、均压时间、节流孔径等参数进行研究。结果表明, 均压时间对产品气浓度影响最大, 最佳均压时间为 2 到 3s; 其次是吸附时间, 最佳吸附时间 7s; 节流孔径对产品气浓度也有很大影响, 最佳节流子孔径为 1.2 mm。装置能从空气中获取氧气浓度为 93.5% 的产品气, 产气量 0.16 m³/h。

关键词: 径向流吸附器; 制氧; 变压吸附; 流程参数

中图分类号: TQ051.8⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1007-7804(2011)06-0020-06

doi: 10.3969/j.issn.1007-7804.2011.06.005

Experimental Study on The Process Parameters of Radial Flow Absorber PSA System For Oxygen Concentration

SHI Shaosong, LIU Yingshu, LI Yongling, MENG Yu, YANG Xiong

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: We established a set of radial flow PSA oxygen experimental systems, in which the radial flow of oxygen flow adsorption method and parameters of the radial flow of oxygen flow, like, adsorption time, pressure equalization time and nozzle diameter, were studied. It shows that with the most suitable time of 2 ~ 3s, the time of pressure equalization most to oxygen concentration in gas production, followed by adsorption time, the most suitable time of which is 7s. However, nozzle diameter does have effect on oxygen concentration in gas production, and 1.2 mm is the result of the most suitable size of saving sub-aperture from our research. Oxygen purity of 93.5% can be obtained from the air with the help of this device and the gas production rate is 0.16 m³/h.

Key words: radial flow absorber; oxygen production; PAS; process parameters

变压吸附法是制氧的方法。随着工业发展, 氧气的需求量越来越大, 制氧装置大型化成为必然趋势。高气体扩散率、高选择性和细颗粒尺寸的分子筛, 浅床层和短周期循环是适应大容量 PSA 制氧装置的几个主要条件, 而径向流吸附器的特点能很好的满足这些要求。径向流吸附器易于通过增加吸附器高度来增加气流流通面积, 降低气流通过分子筛床层表面速度, 在保证压降不升高的前提下, 提

高产氧规模。同时, 由于气流流通面积沿径向的变化, 使得气流速度比轴向流更加均匀, 分子筛利用率更高, 压降更低。因此, 径向流吸附器成为变压吸附制氧技术中重要的发展方向之一。

张小里等^[1]从动量定理出发推导出动量回复模型, 测定了主流道动量恢复系数和分流、集流情况下的穿孔阻力系数, 为主流道设计、径向反应器的设计提供了依据。谭海涛^[2]研究总结了立式双

① 收稿日期: 2011-10-27

基金项目: 国家高技术发展计划 (863) 项目 (2009AA063201)

层床径向流吸附器的结构特点, 以及在大型空分设备上的开发应用。并就立式径向吸附器和卧式径向吸附器进行对比得出立式结构更加合理, 节能效果更好但制造成本较高的结论。徐懋生^[3]提出了反应器内流体流动规律的数学模型, 并应用于径向氨氧化炉操作状况模拟, 更完善地处理了流体均布设计和操作工况模拟。得到在影响流体分部的诸多因素中, 径向催化层内的流向和径向床高度的影响比较显著的结论。张成芳等^[4]详细探讨了径向反应器流体均布的合理设计, 提出了流体均布的设计原则, 计算了主流道静压分布, 对流体分布型式和流道尺寸的选择进行了研究, 具体阐述了流体均布的开孔调节问题, 提出了确定开孔率的设计方法。朱子彬等^[5]研究讨论了动量交换型流道的条件, 叙述了主流道静压的各种组合情况。并提供最佳流道截面比的开孔参数和外分布流道截面较大时的开孔参数。得出为获得开孔的均匀分布, 应使开孔控制流道的管、孔截面比大于某一临界数值的结论。提供了不同情况下此临界管、孔截面比的数值。

虽然径向流反应器结构和特性的研究已经较为成熟, 但径向流 PSA 制氧技术尚未达到实用化阶段, 而且相关的深入报道并不多。因此, 对径向流吸附器在 PSA 制氧技术上的应用进行探讨, 开展径向流 PSA 制氧理论分析和半工业性的对比实验研究, 对于提高我国在变压吸附制氧大型化技术领域的研究水平具有重要意义。本文对径向流吸附器制氧流程参数吸附时间、均压时间、节流孔径等进行研究, 为制氧设备大型化提供理论支持。

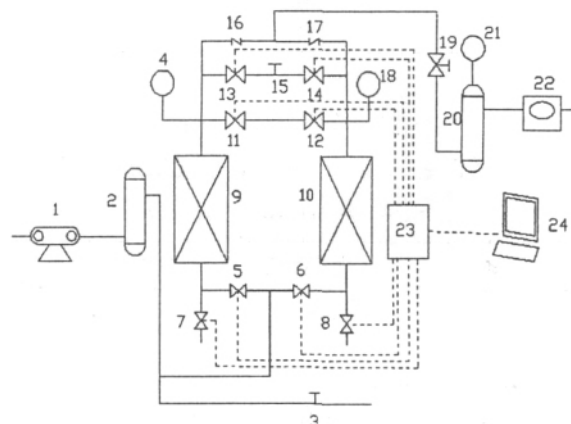
1 实验过程

1.1 实验装置

实验装置由气源系统、吸附系统、控制系统、测量系统及连接与结构系统等六个部分组成。该实验装置通过 PLC 控制电磁阀开关, 实现循环连续制氧。吸附器参数见表 1。通过与计算机相连接的可编程逻辑控制器控制吸附周期。通过测氧仪测量产品气纯度, 每种工况经过 10 min 左右达到稳定后开始记录, 记录多组数据并取其平均值。

原料气为空气, 供给量 $2.2 \text{ m}^3/\text{h}$ (20°C ,

101.3 kPa), 空气经过滤、压缩、冷却后进入吸附塔。其中氮气被吸附塔中的分子筛吸附, 氧气则被分离出来。氧气从吸附塔流出后, 分成两部分, 一部分作为产品气进入储气罐。另一部分进入正处于解吸状态的另一吸附塔吹扫尚未解吸完全的氮气。



1. 压缩机; 2. 缓冲罐; 3. 手动阀; 4、18、21. 压力表; 5、6、7、8、11、12、13、14. 电磁阀; 9、10. 径向流吸附器; 15. 反吹节流子; 16、17. 单向阀; 19. 节流阀; 20. 储气罐; 22. 氧化锆氧分析仪; 23. PLC; 24. 上位计算机。

1. compressor; 2. buffer tank; 3. manual valve; 4, 18, 21. pressure gauge; 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14. e-electromagnetic valve; 9, 10. radial flow adsorber; 15. reverse blowing throttle sub; 16, 17. check valve; 19. throttle valve; 20. oxygen storage tank; 22. zirconia oxygen analyzer; 23. ple; 24. host computer.

图1 径向流吸附器制氧实验流程图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

表1 径向流吸附器参数表

Table 1 Radial flow adsorber structure parameters

结构参数	数值
吸附器外壳内径 D_1/mm	214
吸附器外壳壁厚 δ_1/mm	4
中间分布筒内径 D_2/mm	153
内分布筒内径 D_3/mm	10
外分布筒开孔直径 d_1/mm	8
内分布筒开孔直径 d_2/mm	3
分布筒壁厚 δ_2/mm	3
吸附剂堆填垂直高度 L/mm	185

1.2 实验内容与方法

通过探索性实验确定最佳吸附时间、均压时间、节流孔径范围, 其取值范围见表2到表4, 根

据实验结果确定正交试验水平见表5,通过正交试验结果分析各参数对产品气氧浓度影响。

表2 吸附时间范围

Table 2 Experimental conditions of adsorption time

吸附时间/s	均压时间/s	节流孔径/mm
3 ~ 60	3	0.8

表3 均压时间范围

Table 3 Experimental conditions of pressure equalization time

吸附时间/s	均压时间/s	节流孔径/mm
7	0.5 ~ 5	0.8
7	1 ~ 5	0.6

表4 节流孔径范围

Table 4 Experimental conditions of nozzle diameter

吸附时间/s	均压时间/s	节流孔径/mm
7	3	0.4 ~ 1.5

根据实验结果,确定正交实验表见表5:

表5 正交实验表 ($L_{20}4^2 \times 51$)

Table 5 Orthogonal experimental table ($L_{20}4^2 \times 51$)

水平	半周期 s	充压时间 s	节流孔径 mm
1	3	1	0.5
2	5	2	0.8
3	7	3	1.2
4	9	4	1.5
5	11		

2 实验结果与分析

2.1 吸附时间对产品气氧浓度的影响

吸附时间对产品气氧浓度的影响见图2,随着吸附时间的增加,产品气氧浓度呈先增大后减小的趋势,存在一个最佳吸附时间,使得产品气氧浓度达到最大值。这主要是由于吸附时间短则吸附过程不充分,产品气氧浓度较低。随着吸附时间的增加,吸附更充分,产品气氧浓度逐渐升高,一直到

吸附剂在吸附过程中接近或达到饱和,进一步增加吸附时间将导致强吸附组分氮气穿透吸附床,从而造成产品气氧浓度的下降。

从图2还可以看出,吸附时间从3 s增加到7 s,产品气氧浓度从84.1%上升到93.1%,吸附时间从7 s增加到60 s,产品气氧浓度从93.1%降到61.3%。最佳吸附时间7 s,最高产品气氧浓度93.1%。基于以上结论正交实验中吸附时间水平选取3、5、7、9、11 s。

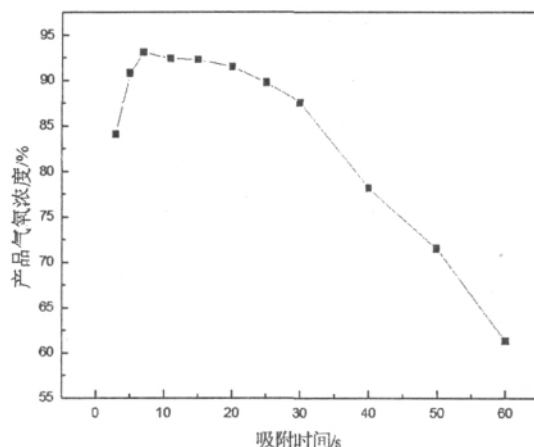


图2 吸附时间对产品气氧浓度的影响

Fig. 2 Separation performance of different adsorption times

2.2 均压时间对产品气氧浓度的影响

均压过程可以节约能源,提高产品气的浓度和回收率,降低吸附塔内的压力波动^[6-7],还可使吸附塔的压力快速升高,能回收部分的产品气和机械能。均压步骤按均压过程中两塔接通的方式不同,可分为上均压、下均压、同时均压三种情况。上均压是指均压的过程中只将吸附塔的上端相连通;下均压是指均压过程中只将吸附塔下端连通;同时均压是指均压过程中吸附塔上端和下端同时连通。均压时间和均压方式不一样,产生的效果也不一样。实验采用上均压。

均压时间对产品气氧浓度的影响见图3,随着均压时间的增加,产品气氧浓度呈先增大后减小的趋势,存在一个最佳均压时间,使得产品气氧浓度达到最大值。

由图3可知均压时间从0.5 s增加到3 s,产品气氧浓度从73.3%增加到93.4%。均压时间从3 s增加到5 s。产品气氧浓度从93.4%下降到85.9%。最佳均压时间3 s最高产品气氧浓度

93.4%。基于以上结论正交实验中均压时间水平选取1、2、3、4 s。

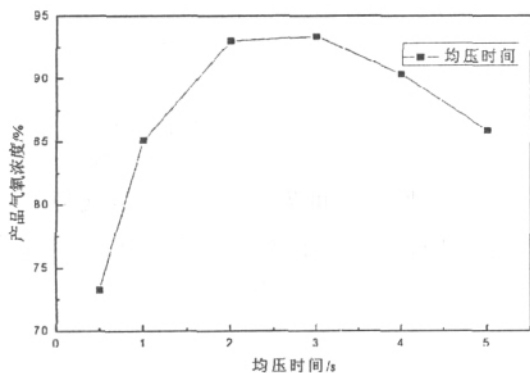


图3 均压时间对产品气氧浓度的影响

Fig. 3 Separation performance of different pressure equalization times

2.3 节流孔径对产品气氧浓度的影响

变压吸附制氧流程中, 节流孔径大小决定反吹气量与产品氧气量的比例, 节流阻力一方面起到调节反吹气量的作用, 同时还可以对吸附塔起到快速升压和保压的作用, 使吸附过程在合理的压力下进行。故节流阻力对制氧效果的影响十分明显。因此找出节流子对径向流吸附器制氧的规律, 对径向流变压吸附制氧装置的设计开发、设备参数的调节, 有重要意义。

节流孔径对产品气氧浓度的影响见图4, 随着节流孔径的增大, 产品气氧浓度呈先增大后趋于稳定的趋势, 存在不止一个最佳吸附时间, 使得产品气氧浓度达到最大值。

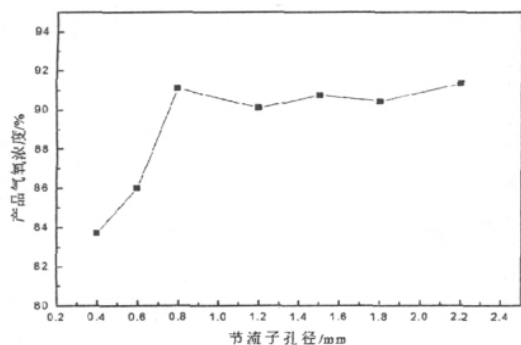


图4 节流孔径对产品气氧浓度的影响

Fig. 4 Separation performance of difference nozzle diameters

反吹孔径为0.4 mm时, 产品气氧浓度最低为83.7%。随着节流孔径的增大, 产品气氧浓度开始增加, 节流孔径0.8 mm时达到最高值, 产品气氧

浓度91.1%, 节流孔径由0.8增大到2.2 mm产品气氧浓度与0.8 mm时相差不大这一结论与郭广栋^[8]的实验相符。

基于以上结论, 正交实验中节流孔径水平选取0.5、0.8、1.2、1.5 mm。

2.4 产品气量对产品气氧浓度的影响

工业要求产气量越大越好, 氧浓度越高越好。产气量对产品气浓度有制约作用。为弄清楚产品气氧浓度和产气量之间的关系进行了实验。实验中工况系数见表6, 一塔吸附压力0.154 MPa, 二塔吸附压力0.152 MPa。

表6 产品气量与产品气氧浓度关系的工况参数

Table 6 Relationship between product rate and product concentration under different parameters

吸附时间 s	均压时间 s	产品气量 m ³ /h	反吹孔径 mm
7	3	0.16 ~ 0.32	0.8

产品气量对产品气氧浓度的影响见图5, 随着产品气量的增加, 产品气氧浓度下降。每一阶段的关系曲线斜率都不一样。产气量由0.16 m³/h加大到0.20 m³/h, 产品气浓度较大幅度下降。产气量由0.20 m³/h加大到0.24 m³/h, 产品气氧浓度大幅度下降。产气量由0.24 m³/h增大到0.32 m³/h, 产品气氧浓度下降幅度减小。产气量0.16 m³/h产品气氧浓度最高, 为91.7%, 产气量0.32 m³/h产品气氧浓度最高, 为76.5%。

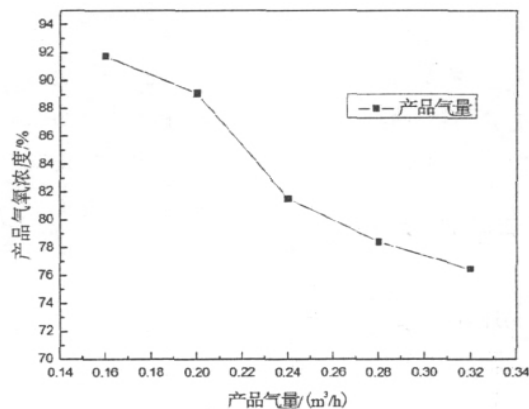


图5 产品气量与产品气氧浓度关系图

Fig. 5 Separation performance of different gas production rates

产品气量的变化不影响吸附时间、均压时间等对产品气氧浓度的影响规律, 只是随着产品气量的

增加,产品气氧浓度总体下降,即增加相同的产品气量会导致产品气氧浓度等程度的降低。吸附塔中分子筛的装入量是一定的,产品气量越少,在相同的时间内,进入吸附塔内的原料气量与流出吸附塔的产品气量的差值越大,吸附塔内的压力升高就越快,这对于提高吸附塔中分子筛的吸附容量是非常有利的。另外,吸附塔内压力高,吸附塔在解吸时,吸附塔内与外界的压力差也大,这对于吸附塔内吸附组分的彻底解吸有利。

因此,产品气量越小,对应的产品气氧浓度越高,但回收率也小。为使产品气量和回收率都在可接受范围内,产品气量取值 $0.16 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.5 正交试验及分析

根据探索实验结果确定实验因素各水平并进行正交实验,实验表见表5。实验结果见表7。

表7 正交实验结果表

Table 7 Orthogonal experiment table

实验组号	吸附时间 (A)	均压时间 (B)	节流孔径 (C)	产品气浓度 /%
1	1 (3s)	1 (1s)	1 (0.5)	68.1
2	1 (3s)	1 (1s)	2 (0.8)	73.9
3	1 (3s)	1 (1s)	3 (1.2)	72.6
4	1 (3s)	1 (1s)	4 (1.5)	70.1
5	2 (5s)	1 (1s)	1 (0.5)	71.5
6	2 (5s)	2 (2s)	2 (0.8)	85.3
7	2 (5s)	2 (2s)	3 (1.2)	90.7
8	2 (5s)	2 (2s)	4 (1.5)	92.4
9	3 (7s)	2 (2s)	1 (0.5)	91.3
10	3 (7s)	2 (2s)	2 (0.8)	85.4
11	3 (7s)	3 (3s)	3 (1.2)	93.2
12	3 (7s)	3 (3s)	4 (1.5)	91.8
13	4 (9s)	3 (3s)	1 (0.5)	90.4
14	4 (9s)	3 (3s)	2 (0.8)	91.6
15	4 (9s)	3 (3s)	3 (1.2)	90.8
16	4 (9s)	4 (4s)	4 (1.5)	86.5
17	5 (11s)	4 (4s)	1 (0.5)	87.4
18	5 (11s)	4 (4s)	2 (0.8)	89.7

实验组号	吸附时间 (A)	均压时间 (B)	节流孔径 (C)	产品气浓度 /%
19	5 (11s)	4 (4s)	3 (1.2)	87.6
20	5 (11s)	4 (4s)	4 (1.5)	87.4
K_1	284.7	356.2	408.7	
K_2	339.9	445.1	425.9	
K_3	361.7	457.8	434.9	
K_4	359.3	438.6	428.2	
K_5	352.1			
k_1	71.175	89.05	102.175	
k_2	84.975	111.275	106.475	
k_3	90.425	114.45	108.725	
k_4	89.825	109.65	107.05	
k_5	88.025			
极差 R	19.25	25.4	6.55	
主次顺序	B	A	C	
优水平	A ₃	B ₃	C ₃	
最优组合	A ₃ B ₃ C ₃			93.2

根据正交实验分析理论^[9]比较表7中的极差R可知,极差 $R_B (25.4) > R_A (19.25) > R_C (6.55)$,表明在本实验条件下,因素B均压时间在所列出因素中对结果影响最大,因素A吸附时间对实验结果的影响其次,因素C节流孔径影响最小。 $R_A/R_B = 0.756$,说明吸附时间和均压时间对结果的影响力属于同一量级。

表7中的 k 是各个试验的均值,通过分析均值 k ,可以比较出每个因素下各水平的优劣。在影响结果的因素A吸附时间的5个水平范围内, $k_{A3} > k_{A4} > k_{A5} > k_{A2} > k_{A1}$ 说明吸附时间取7s最好;在影响结果的因素B吸附时间的4个水平范围内 $k_{B3} > k_{B2} > k_{B4} > k_{B1}$ 说明均压时间取3s最好;在影响结果的因素C吸附时间的4个水平范围内 $k_{C3} > k_{C4} > k_{C2} > k_{C1}$ 表明节流孔径取1.2 mm最好。

在三个因素中 k_3 都明显大于其他值,表明最优水平都是 k_3 最优组合为 $A_3B_3C_3$,由表7可得在最优组合条件下(吸附时间7s,均压时间3s,节流孔径1.2 mm)产品气浓度为93.2%,回收率 $0.16 \times 0.932 / 0.21 \times 2.2 = 32.27\%$ 。

3 结 论

1. 通过正交实验可以得出, 均压时间对产品气氧浓度影响最大, 吸附时间对实验结果的影响其次, 节流孔径影响最小。吸附时间和均压时间对结果的影响力属于同一量级。

2. 随着均压时间的增加, 产品气氧浓度呈先增大后减小的趋势, 存在一个最佳均压时间, 使得产品气氧浓度达到最大值。最佳均压时间 3 s。

3. 随着吸附时间的增加, 产品气氧浓度呈先增大后减小的趋势, 存在一个最佳吸附时间, 使得产品气氧浓度达到最大值, 最佳吸附时间 7 s。

4. 节流孔径在一定范围内加大, 产品气氧浓度随之增加, 超过这个范围继续增大节流孔径, 产品气氧浓度基本不变, 回收率减小, 最佳节流孔径 1.2 mm。

5. 均压时间 3 s, 吸附时间 7 s, 节流孔径 1.2 mm 时吸附器制氧效果最佳, 可得到氧浓度为 93.5% 的产品气, 产气量 $0.16 \text{ m}^3/\text{h}$ 。装置回收率 32%。

参考文献:

- [1] 张小里, 赵彬侠, 樊君, 等. 径向反应器流体流动行为研究 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 1996, 26 (3): 235-239.

- [2] 谭海涛. 大型空分设备所用立式径向流吸附器的结构优势与节能 [J]. 气体分离, 2009 (4): 26-27.
- [3] 徐懋生. II 型径向流动反应器流体力学研究 [J]. 高校化学工程学报, 1987, 2 (2): 107-114.
- [4] 张成芳, 朱子彬, 徐懋生, 等. 径向反应器流体分布设计的研究 (II) [J]. 化学工程, 1980 (2): 82-89.
- [5] 朱子彬, 李瑞. 径向流反应器的研发和应用 [J]. 化学反应工程与工艺, 2008, 24 (4): 368-374.
- [6] 李乃亮, 刘应书. 均压时间对 VPSA 分离低浓度二氧化碳的影响 [J]. 低温与特气, 2007, 25 (6): 15-18.
- [7] 卜令兵, 刘应书, 刘文海, 等. 微型变压吸附分离空气制氧均压过程 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28 (10): 989.
- [8] 郭广栋. 变压吸附浓缩低浓度煤层气的实验研究 [D]. 北京: 北京科技大学热能系, 2009.
- [9] 赵选民. 试验设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

作者简介:

施绍松 (1986), 男, 硕士研究生, 研究方向: 气体分离, E-mail: sss200591@163.com.cn.

通讯作者:

刘应书 (1960), 男, 教授, 博导, 研究方向: 气体分离及人工环境, E-mail: ysliu@ustb.edu.cn.

=====

【上接第 15 页】问题是一个国家问题, 国家已经在严格控制那些导致增加环境污染的规划方案的立项与建设。国家和各地方政府已经对那些减少二氧化碳或温室气体排放的项目给予财政支持。

5 结 语

本文旨在分析大型水源热泵技术是否适合应用在有水源条件的地区, 因此尚未深入研究出一个设计方案。由上文的分析已经可以初步看出: 采用燃油溴化锂机组供暖/供冷的能源成本最高, 大型水源热泵系统冬季供暖的能源运行成本要高于传统锅炉房系统, 但是在夏季区域供冷时, 热泵系统的能源运行成本与常规冷水机组方案相比, 节约效果非常显著。综合考虑冬/夏季工况后, 本项目采用水源热泵技术之后年耗能成本较传统锅炉房+冷水机组方案要低, 并且加

上热泵技术带来的节能效益 (节煤率)、节约了当地冷水机房 (及冷却塔) 的建筑空间、环境收益以及实现可持续发展等等, 笔者认为在有合适水源条件的地区, 采用大型水源热泵技术满足区域供暖供冷的需求是一种不错的选择。

参考文献:

- [1] 民用建筑节能设计标准 (采暖居住建筑部分) 大连地区实施细则 [S].
- [2] 清华大学热工系 [北京清源世纪科技有限公司]. 北京奥运村污水热泵可行性研究报告 [R/OL]. 中国能源网, www.china5e.com 2005-05-20.

作者简介:

孙克威 (1981), 男, 大学本科, 工程师, 从事暖通空调方面的工程设计。现工作于大连冷冻机股份有限公司空调设计部。