

变负荷条件下的大型合成氨装置特性研究

余云松¹, 朱建立^{2,3}, 李青¹, 李云², 莫沅³, 张早校¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 3. 中国石油宁夏石化公司, 750026, 银川)

摘要: 为了探讨变负荷条件对合成氨过程的影响, 结合某大型合成氨装置的流程和运行参数, 利用 ASPEN PLUS 模拟整个合成氨过程, 分析了在常用的部分负荷下整个合成氨装置的运行性能, 获得了在部分负荷下加热炉、一段炉、辅锅等关键设备的热效率、炯效率以及反应器的反应转化率, 提出了可以通过减少加热炉和一段炉的引风量和增加一段炉对流段蒸汽过热盘管面积来有效利用能量. 采用 Newton 插值多项式的拟合方法, 拟合出产量为 1 000~1 500 t/d 的大型合成氨装置在常见 85%~100% 负荷范围内的吨氨能耗与负荷间的三次拟合曲线和公式, 得出该合成氨装置的吨氨能耗模拟值为 36.707~40.797 GJ/t, 和实测值吻合较好, 误差小于 3%. 研究结果为实际的合成氨装置在变负荷下的生产运行与操作优化提供了参考依据.

关键词: 合成氨; 变负荷; 吨氨能耗; 拟合曲线

中图分类号: TQ021.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)10-0114-05

Characteristics of Large-Scale Synthesis Ammonia Plant under Varying Load Conditions

YU Yunsong¹, ZHU Jianli^{2,3}, LI Qing¹, LI Yun², MO Yuan³, ZHANG Zaoxiao¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Ningxia Petrochemical Branch of Petro China, Yinchuan 750026, China)

Abstract: To investigate the effect of varying load on the synthesis ammonia, the process of a large-scale ammonia synthesis plant is simulated with the process and operational parameters of the petrochemical company by ASPEN PLUS, and the operational characteristics on varying load conditions from 85% to 100% are analyzed. Thermal efficiency and exergy efficiency of the key equipment, such as heating-furnace, primary reformer and auxiliary boiler are evaluated, and reaction conversion ratio of the reactors is obtained. It is suggested that reducing the amount of input air to the heating-furnace and primary reformer and enlarging the area of the steam overheating coil in the convection part of the primary reformer can utilize energy efficiently. The curve and expression between energy consumption of the ammonia synthesis with load of 85% to 100% are fitted by Newton interpolation polynomial for synthesis ammonia output in the plant from 1 000 t/d to 1 500 t/d. Thus it is predicted that energy consumption of the synthesis ammonia approaches 36.707 GJ/t to 40.797 GJ/t, which agree well with the field data with a deviation less than 3%.

Keywords: synthesis ammonia; varying load; energy consumption of synthesis ammonia; fitting curve

随着我国“十一五规划”提出的节能减排战略的具体落实,我国未来合成氨技术的发展将向“大型化、低能耗、清洁生产、长周期运行”目标前进.对合成氨装置开展节能降耗直接有益于温室气体 CO_2 减排,意义重大^[1-2].国内外很多学者都研究过不同流程和工况下的合成氨能耗^[3-9].现有的研究大部分都是考虑合成氨装置在满负荷情况下通过优化流程和使用高效的催化剂来降低能耗,对于结合中国具体情况的部分负荷运行的天然气合成氨的效率和能耗分析还比较少.

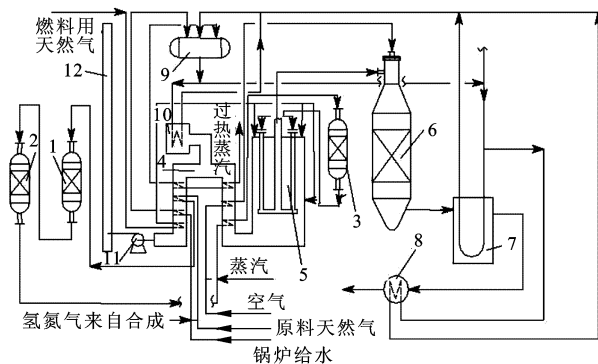
合成氨装置的负荷与综合能耗之间存在着密切的关系,负荷率越低能耗越高.但是,由于受设备、大修、季节和温度、原料及市场等诸多因素的影响,我国的多数大型合成氨装置常常在 85%~100% 的部分负荷下运行,这样导致合成氨的综合能耗相比国外同等规模企业的能耗要高 5~13 GJ/t^[1].本文以某合成氨装置的冬季运行工况数据为基础,利用 ASPEN PLUS 10.2 模拟合成氨过程,对在不同的装置负荷率情况下的能耗进行了研究,并通过模拟结果和现场数据结果的比较分析,得出了不同负荷下装置的效率及整个装置最终吨氨能耗与装置负荷间的关系表达式.

1 数据来源和模拟流程的建立

本文的数据分析和模拟采用某合成氨装置的流程和冬季运行的数据.该装置于 2005 年进行了装置 50% 的扩能改造,扩能改造后氨的生产能力(M)由 907 t/d 增加为 1 500 t/d.该装置以 $\varphi(\text{CH}_4)$ 为 97.2% 的天然气为原料,其工艺流程采用 Kellogg 工艺流程,扩能改造是在原流程基础上加装了预转化炉,同时提高加热炉、一段转化炉的发热量,从而提高整个装置合成氨的能力.该合成氨装置主要由合成氨造气系统、粗原料气净化系统、氨合成系统、余热回收系统 4 个部分组成,其中最主要的是合成氨造气系统,其原理如图 1 所示.

合成氨装置能耗中一次能源消耗主要包括作为合成氨原料和提供转化反应所需热量的天然气、驱动各类机泵设备的电力,二次能源主要是作为转化原料、提供大型机组驱动力的蒸汽.耗能介质包括循环冷却水、脱盐水、新鲜水等.合成氨装置能量分布见图 2.

基于上述的合成氨流程,利用模拟软件 ASPEN PLUS 10.2 建立了合成氨流程,结合现场合成氨的实际运行参数,对于不同工况下的设备能耗、设



1: 钴钼加氢反应器; 2: 氧化锌脱硫槽; 3: 预转化炉; 4: 对流段;
5: 辐射段(一段炉); 6: 二段转化炉; 7: 第一废热锅炉;
8: 第二废热锅炉; 9: 汽包; 10: 辅助锅炉;
11: 排风机; 12: 烟囱

图 1 合成氨的造气系统流程

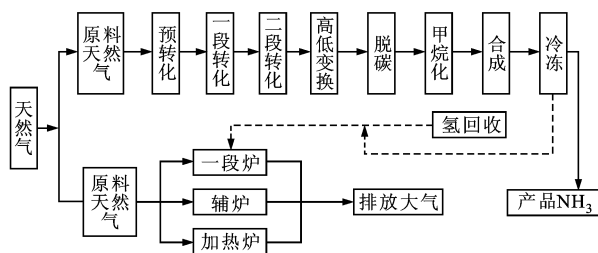


图 2 合成氨装置能量分布图

备热效率和烟效率、蒸汽系统的能量平衡、氨产品的吨氨能耗进行了分析.其中,整个流程采用 NRTL-RK 物性方法,反应器采用 RSTOIC 模型,换热设备采用 HEATER 模型.本文主要研究部分负荷运行和 100% 设计负荷工况下的系统效率和能耗的对比,分析其中能量损失比较大的环节,为系统节能降耗提供可靠的依据.

2 模拟结果及分析

2.1 变工况下的天然气合成氨装置能耗

利用 ASPEN PLUS 建立的模型,结合现场实际的运行参数可以得到不同部分负荷(η)下合成氨装置的用料和产品情况,如表 1 所示.

由表 1 可知,合成时的进料原料气、蒸汽、空气基本上是按照负荷比例进料的,但是产品量都达不到该负荷下的理论产量.85% 负荷的氨产品只是 100% 设计工况的 80.8%, CO_2 只是 100% 设计工况的 79.4%;90% 负荷的氨产品只是 100% 设计工况的 87.8%, CO_2 只是 100% 设计工况的 86.3%;95% 负荷的氨产品只是 100% 设计工况的 93.5%, CO_2 只是 100% 设计工况的 92.8%.这是由于部分

表 1 实际运行的部分负荷工况与设计 100%负荷工况进出料对比表

$\eta/\%$	入料				出料		
	原料天然气量	水蒸气量	空气量	燃料天然气量	液氨流量	二氧化碳流量	烟气流量
	$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
85	33 892	86.04	45 133	19 533	51.00	30 766	276 200
90	35 635	90.80	50 450	19 525	55.41	33 437	267 048
95	37 614	95.80	53 580	19 646	59.00	35 952	257 874
100	39 594	100.83	56 105	19 767	63.11	38 754	24 8978

注:反应中入料、出料气体均为标准状态.

负荷下装置的工艺气的状态与设计值有较大偏差,导致转化率不高所造成的.但是,部分负荷下的燃料天然气消耗量与 100%负荷设计工况却几乎相等,可见部分负荷下能量利用率不高,能量消耗设备效率不高.同时,部分负荷下的烟气排放量较设计值偏大,这是由于实际运行时的助燃风机的引风量过剩,造成排烟中 $\varphi(\text{O}_2)$ 高达 4.98%(100%负荷设计工况为 1.29%),造成大量能量以排放能的形式损失掉.

由模拟得到的不同负荷下合成氨装置的运行数据可以计算出在不同工况下的吨氨能耗.合成氨综合能耗是合成氨工艺消耗的各种能源折算成标准能量之和与合成氨的产量之比,计算公式为

合成氨的综合能耗(GJ/t)= $[\text{单位时间合成氨装置消耗的各种能量总和}(\text{GJ/h})-\text{输出能量}(\text{GJ/h})]/\text{单位时间的氨产量}(\text{t/h})$ (1)

单位时间合成氨装置消耗的各种能量总和(GJ/h)= $\sum \text{各种能源消耗量}(\text{t/h}) \times \text{低位发热值}(\text{kJ/kg})/1000$ (2)

合成氨消耗的各种能源包括原料天然气、燃料天然气、电、蒸汽、循环水、公用工程(包括脱盐水、工厂空气、仪表空气、氮气、工艺冷凝液等),其能耗折算到吨氨的结果如表 2 所示.

由表 2 可见,100%负荷的设计工况的吨氨能耗为 36.7 GJ/t ,而实际在 85%~95%负荷范围运行的吨氨能耗为 38~40.8 GJ/t .除了循环水外的各种

吨氨消耗能量指标都是随着负荷的上升而减小,而且从 85%负荷到 90%负荷各种能耗减小的幅度比较大,90%负荷至 95%负荷减小的幅度比较缓慢.部分负荷由于是参考冬季运行的参数,而比较基准 100%负荷设计工况是春季运行参数,所以循环水部分负荷相比 100%设计负荷偏小.

2.2 部分负荷下重要设备运行状态分析

加热炉、一段炉、辅锅是为整个合成氨装置提供外部热能的基础,是合成氨装置热量供给的核心设备.燃料在这几台设备中燃烧产生热能,加热各种工艺介质以达到原料反应条件,同时加热除盐水,产生装置所需的蒸汽,为整个系统的运行提供动力.

由模拟结果,考虑上述 3 个热能生产核心设备在 85%~100%负荷间的热效率和烟效率,由此可分析它们在部分负荷时的运行情况,结果见图 3.

由图 3 可知,这些设备在装置低负荷时的热效率和烟效率都远低于设计效率,其中以加热炉和辅锅最为严重.设备热效率低说明散热能耗、排烟能耗等损失偏大.热效率和烟效率基本都是在 85%~90%负荷间上升较快,而 90%负荷以后提高幅度随负荷上升略微缓慢.从烟效率上考察,其中加热炉和一段炉部分负荷下的烟效率与设计值比较接近,但是辅锅部分负荷下的烟效率较设计值低,说明辅锅的无用动力较大,所以有很大的提升空间,可以通过加大一段炉中的过热盘管来吸收辅锅排出的高温烟

表 2 不同负荷下合成氨装置的吨氨能耗 $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$

$\eta/\%$	原料气 折算能耗	燃料气 折算能耗	电折算能耗	蒸汽 折算能耗	循环水 折算能耗	公用工程 折算能耗	模拟总能耗	实测总能耗
85	23.174	13.356	0.119	1.888	1.335	0.883	40.755	41.530
90	22.427	12.288	0.112	1.794	1.432	0.848	38.901	38.420
95	22.248	11.612	0.107	1.718	1.495	0.813	37.993	37.164
100	21.738	10.853	0.103	1.664	1.571	0.778	36.707	36.397

注:标准状况下天然气的热值取 34 872 kJ/m^3 .

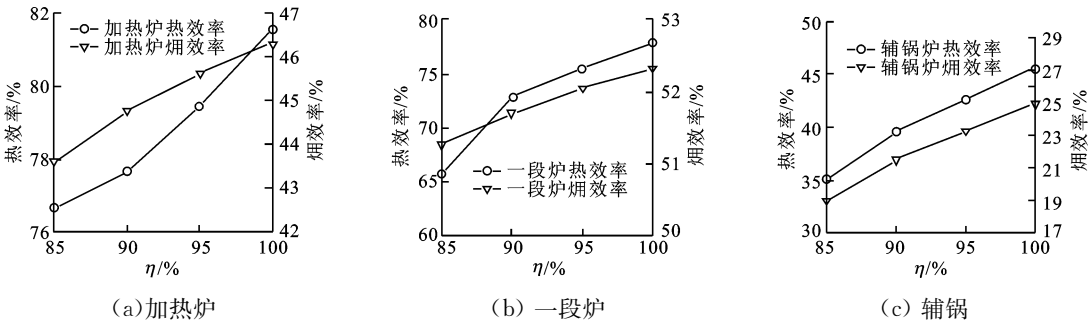


图 3 不同负荷下加热炉、一段炉、辅锅的热效率与烟效率变化情况

气中的能量。

反应器预转化炉、一段炉、二段炉、高低温变换炉、甲烷化炉、氨合成塔是转化、合成反应发生的场所,是决定整个装置产量高低的关键因素,部分负荷下由于整个合成氨流程物料的温度、压力分布与设计负荷有较大的差别,所以对各个反应器的转化率有较大影响.通过分析模拟数据,可以得到不同部分负荷下这些反应器中各种物料的转化率,如表 3 所示。

由表 3 可知,在部分负荷下 CH_4 转化率均较 100%设计负荷偏低,而且氨合成塔由于进口的压力、温度偏低,使得 H_2 的转化率也比设计值低 1.4%~5.6%. 转化率不高导致转化气的 H_2 摩尔分数偏低,而 CH_4 转化为 H_2 的转化率也低,最终导致氨的产量不能达到该负荷下的理论产量。

2.3 蒸汽系统和冷冻系统分析

由于各种原因,主要是蒸汽过热器盘管换热面

积小,部分负荷下合成氨装置的蒸汽系统所产生的高压蒸汽达不到 100%负荷设计时的品质要求,冷冻系统的蒸发气氨量也较 100%负荷时要少,如表 4 所示。

部分负荷下的自产蒸汽量不够,装置需要从外部引入更多的高压蒸汽,而高压蒸汽的品质达不到设计值将造成透平等蒸汽使用设备的效率下降,能量利用率不高。

对于冷冻系统,部分负荷下合成氨装置的物料需要冷却能减少,所以冷冻系统用于提高冷却能的液氨气化量比 100%设计负荷时小,随着负荷的提高气氨蒸发量几乎是线性上升.但是,当负荷过低时,气氨量较小,有可能小于冷冻系统的气氨压缩机发生喘振的最小氨流量的下限,造成压缩机喘振,所以合成氨装置低负荷对冷冻系统影响非常大。

表 3 不同负荷下反应器的反应转化率

$\eta/\%$	转化率									
	预转化炉			一段炉		二段炉	高低温变换炉	甲烷化炉		氨合成塔
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	CH_4	CH_4	O_2	CO	CO	CO_2	H_2
85	0.019	1.000	1.000	0.566	0.913	1.000	1.000	1.000	1.000	0.254
90	0.025	1.000	1.000	0.584	0.927	1.000	1.000	1.000	1.000	0.272
95	0.027	1.000	1.000	0.602	0.940	1.000	1.000	1.000	1.000	0.286
100	0.030	1.000	1.000	0.613	0.948	1.000	1.000	1.000	1.000	0.300

表 4 不同负荷下蒸汽系统和冷冻系统的变化

$\eta/\%$	蒸汽系统自产的高压蒸汽			冷冻系统蒸发的气		
	产量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/ MPa	产量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/ kPa
85	235.59	411	9.49	80 225	-12.2	0.26
90	250.40	423	9.72	85 967	-12.2	0.26
95	263.20	431	9.87	91 610	-12.2	0.26
100	274.00	440	10.10	97 282	-12.2	0.26

3 部分负荷下天然气合成氨的吨氨能耗分析

通过分析模拟数据,可以得到不同负荷和天然气合成氨吨氨能耗之间的关系.考虑合成氨装置的实际负荷为 85%~100%,可以拟合出产量为 1 500 t/d 的大型合成氨装置的吨氨能耗和负荷率的关系,见图 4.

合成氨装置的产品主要是 NH₃ 和 CO₂,这两种产品是合成尿素的基础原料.由图 4 可知,合成氨装置的产品 NH₃ 和 CO₂ 几乎随着负荷的增加线性增长,但吨氨能耗随负荷率上升而下降.将吨氨能耗与负荷率拟合可以得到一个三次函数的关系.

利用 Newton 插值多项式的拟合方法,可以准确地拟合出氨产量 1 500 t/d 时在 85%~100%负荷范围内的吨氨能耗与负荷率间的函数关系式.该厂在扩能改造前的氨产量为 1 000 t/d 时,100%负荷运行时能耗为 43.5 GJ/t^[10].考虑到合成氨装置的规模对吨氨能耗有较大影响,可以对吨氨能耗进行修正,修正因数 γ 与日产量 M 的关系

$$\gamma = \frac{5\,708.6 - 1.359M}{100}$$

(1 000 t/d ≤ M ≤ 1 500 t/d) (3)

故产量为 1 000~1 500 t/d 的大型合成氨装置在 85%~100%负荷范围内时,负荷率 η 与吨氨能耗 Q 的关系

$$Q = \gamma(44.879 - 5.701\eta + 1.797\eta^2 - 0.221\eta^3)$$

(85% ≤ η ≤ 100%) (4)

由图 4 可见,负荷为 95%时拟合曲线吨氨能耗与实际生产中的吨氨能耗偏差最大,相对误差为 2.23%,负荷为 100%时偏差最小,相对误差为 0.85%.负荷为 85%和 90%时模拟值与实际值相对误差分别为 1.87%和 1.25%,所以拟合曲线与实际生产中的吨氨能耗符合较好.通过验证,该拟合公式与文献[11]的结论比较吻合.

4 结 论

本文结合大型合成氨装置的运行参数,利用 ASPEN PLUS 来模拟整个合成氨过程,分析了在 85%~100%负荷下整个合成氨装置的运行性能.根据模拟结果,详细地给出了各个主要部分负荷点合成氨原料用量和产品的产量.主要分析了在部分负荷下加热炉、一段炉、辅锅的热效率和烟效率,得出可以通过减少加热炉和一段炉的引风量、加大一段

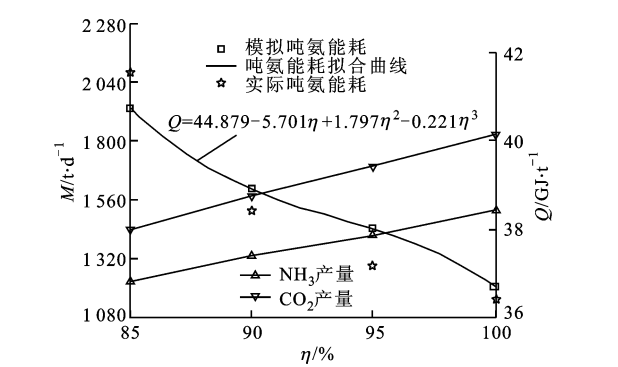


图 4 生产能力和能耗随负荷变化曲线

炉对流段蒸汽过热盘管面积来有效利用能量,同时分析了各个反应器的反应转化率随负荷的变化和部分负荷对蒸汽系统和冷冻系统的影响.

通过模拟,得出在 85%~100%负荷范围内,该合成氨装置的吨氨能耗为 36.707~40.797 GJ/t,与实测值比较相对误差小于 3%.根据 Newton 插值多项式的拟合方法,拟合出产量在 1 000~1 500 t/d 的大型合成氨装置在常见 85%~100%负荷范围内的吨氨能耗与负荷间的三次拟合曲线和公式.通过文献验证,该公式在 85%~100%负荷范围内有较高的准确性.

本文给出的大型合成氨装置吨氨能耗与负荷的关系式,为实际合成氨装置在变负荷下的生产运行和操作优化提供了一定的参考依据.

参考文献:

[1] 蒋德军. 合成氨工艺技术的现状及其发展趋势[J]. 现代化工, 2005, 25(8): 9-16.
JIANG Dejun. Present situation and development of technology for ammonia synthetic process [J]. Modern Chemical Industry, 2005, 25(8): 9-16.

[2] 李青, 余云松, 姜钧, 等. 一种改进的二氧化碳吸收减排法研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1413-1417.
LI Qing, YU Yunsong, JIANG Jun, et al. Improved CO₂ capture method by absorption [J]. Journal of Xi'anJiaotong University, 2008, 42(11): 1413-1417.

[3] KIROVA-YORDANOVA Z. Exergy analysis of industrial ammonia synthesis [J]. Energy, 2004, 29(8): 2373-2384.

[4] XU Q C, LIN J D, FU X Z, et al. Effects of solvent stabilizer in the preparation of highly active potassium promoted Ru/MgO catalysts for ammonia synthesis [J]. Catalysis Communications, 2008, 9(6): 1214-1218.

[5] HAGEN S, BARFOD R, FEHRMANN R, et al. Am-

- monia synthesis with barium-promoted iron-cobalt alloys supported on carbon [J]. Journal of Catalysis, 2003, 214(8):327-335.
- [6] SKOGESTAD S. Control structure design for the ammonia synthesis process [J]. Computer and Chemical Engineering, 2008, 32(12):2920-2932.
- [7] 陈志奎,武宝琛. 合成氨(油头)甲醇洗流程模拟——Aspen Plus 应用范例[J]. 化学工程, 1999, 27(3):52-55.
- CHEN Zhikui, WU Baochen. Simulation of methanol washing process in ammonia synthesis — Aspen Plus application [J]. Chemical Engineering, 1999, 27(3):52-55.
- [8] 陈实,袁令,高林. 合成氨工艺系统的焓分析及节能研究[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(11): 1016-1019.
- CHEN Shi, YUAN Ling, GAO Lin. Exergy analysis on texaco synthetic ammonia system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(11): 1016-1019.
- [9] 张杰卿. 影响合成氨综合能耗主要因素的分析[J]. 大氮肥, 2002, 25(2):116-118.
- ZHANG Jieqing. Analysis of the main factors affecting the comprehensive energy consumption of synthetic ammonia[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2002, 25(2):116-118.
- [10] 袁红年. 宁夏石化合成氨装置节能改造方案分析[J]. 石油和化工节能, 2006(2):10-13.
- YUAN Hongnian. Analysis on refinery project of equipment in ammonia synthesis system in Ningxia Petrochemical [J]. Petroleum and Chemical Energy Conservation, 2006(2):10-13.
- [11] 蒋蓉. 论合成氨综合能耗的影响因素[J]. 化工技术经济, 2002(2): 33-35.
- JIANG Rong. Influential factors of general energy consumption in ammonia production [J]. Chemical Techno-Economics, 2002 (2): 33-35.

(编辑 杜秀杰)