

合成气压缩机特性曲线及增产潜力研究

金陵石化公司 韩文光

摘要 在制定大型氨装置大幅度增产改造方案时,如何提高合成气压缩机生产能力是一个比较棘手的问题。本文结合民主德国GDR工厂改造经验,从理论和实际两个方面研究了中国法型厂合成气压缩机特性曲线及其管网(系统)联合工作曲线;探讨了现有压缩机的增产潜力,肯定了用改造合成系统的方法从而使原有压缩机增加25%生产能力是可能的,同时也指出了需要进一步研究的有关问题。

一、前言

近几年来,国内大化肥厂在增产改造方面已做出不少可喜的成绩,洞氮、泸天化已将氨装置能力提高了15%,金陵石化公司化肥厂(即原栖霞山化肥厂,以下简称金化)也已完成了增产25%的可行性研究。从国内现有装置分析,增产主要瓶颈在转化、脱碳和压缩3个环节,对于转化和脱碳,无论从理论还是实践,都已有了较好的解决办法。只有对于压缩机部分,当需要较大幅度(>20%)增产时,还缺乏比较完善的方案。例如金化增产25%方案中采用了并联1台往复式压缩机的办法。尽管从可靠性来看这是最好的选择,但由于存在占地面积多,电力消耗大,增加了操作、维修的复杂性等缺点而使人感到不够理想。1990年2月在北京举行的“制氨设备节能技术研讨会”上,民主德国代表介绍了该国彼茨特里茨合成氨厂(VEB Agrochem Piesteritz GDR)采用附加氨合成塔降低合成系统压力实现了用原有合成气压缩机提高20%生产能力的实践经验,为人们重视挖掘原有设备潜力提供了一条新的思路。如果通过这种途径能实现我国大化肥的增产,是可以减少人们的许多顾虑的。这条路线首先涉及到合成气压缩机的特性曲线及其潜力问题,这是个处在设备和工

艺两个专业边缘的问题,多年来未能引起人们的足够重视,研究资料也极少见。本文拟结合我国大型装置,尤其是法型厂的实际情况,对此问题进行初步探讨,以期引起更多同志的思考,找出一条更符合我国实际情况的改造途径。

二、制造商提供的特性曲线

对于合成气压缩机,13套大化肥的制造商都向我方提供了载有P—Q、N—Q关系的单缸和总特性曲线,法型厂K1501的总特性曲线如图1所示。

和美日型厂一样,法型厂提供的这一组特性曲线是机组的原设计者根据机组各种设计参数计算出来的预期值。为了验证它的准确性,机器出厂前必须进行性能试验。在一般情况下,制造厂试验台的条件,如试验气体的成分和各种参数,驱动机的功率和转速等等,是难于满足各种不同类型设备的要求的。为了解决这个问题,国际上通用的做法是根据相似理论,在保持试验台试验条件和现场工作条件完全相似(两者几何相似,流体的特征马赫数相等,气体的绝热指数相等)或近似相似(不能全部满足完全相似条件)时,可以在和现场条件有区别的情况下进行试验,然后根据相似理论折算到标准条件。对于多缸组合的机组,允许单缸试验并由其

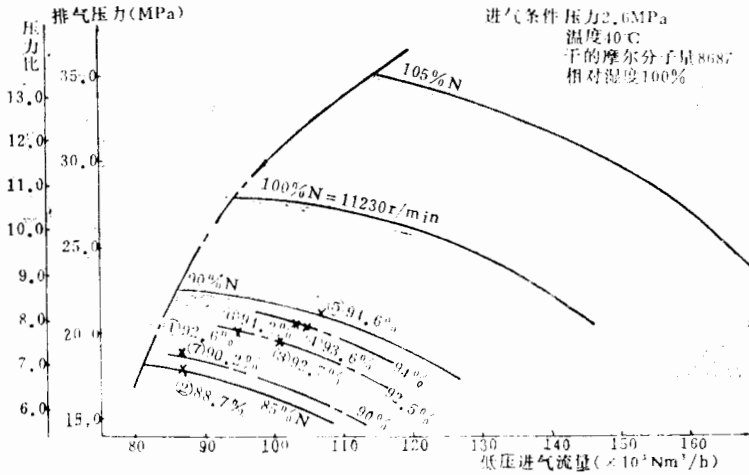


图1 法型厂K1501特性曲线

结果计算整机性能。ASME和API规范对具体实施细则做了明确的规定。

法型厂 K1501 是在法国克勒索—勒瓦工厂试验台上进行的出厂性能试验。选用氮气为试验介质,最高试验转速约6000r/min,三缸分别进行,每缸选6~8点数据,在测得单缸性能的基础上计算总特性曲线^[1]。克勒索—勒瓦提供的最终报告数据是,在一段进口正常液量(100% 负荷)121882Nm³/h时,达到设计排出压力26.2MPa(本文除另有注明外,均指绝压)时的转速为11275r/min,比预期的100% 转速11230r/min高0.4%,其所需功率为18163kW,比额定功率高1%。厂方认为,其误差范围在规范允许幅度之内,可以出厂。

从上述特性曲线产生的过程可以看出,

制造厂提供的特性曲线虽然是基于一定的理论和严格的试验得出的数据,但由于试验到单缸计算最后全机组综合整个过程很长,影响因素很多,一定的误差是难以避免的。经过长期的生产检修还有一个效率下降的问题。因此,各个生产厂在实际生产过程中应该注意积累可靠的数据并据以描绘出实际的特征曲线,以对研究机组的工况和潜力提供一个可靠的基础。

三、K1501机组的实际特性曲线

为了研究金化压缩机的实际特性,笔者在工厂同志协助下,通过原始记录收集了一批比较典型的数据,以试图描绘实际的特性曲线。这批数据如表1所示。

需要说明以下几点:(1)数据均选自车

表1

金化K1501典型实际工况

序号	时间	转速 r/min	进气条件		出压 MPa	氮产量 t/d	标准气量 Nm ³ /h	折算到特性曲线座标		
			℃	MPa				转速%	压力比 e	气量 Nm ³ /h
1	1988.4.30	10400	31	2.75	21.2	860	103189	92.6	7.71	94755
2	1988.9.2	9860	29	2.90	20.3	832	100530	88.7	7.00	86963
3	1988.9.7	10440	34	2.92	22.1	954	115272	92.7	7.57	100672
4	1988.9.30	10540	29	2.90	22.8	1004	121313	93.6	7.86	104941
5	1988.12.30	10620	27	2.85	23.2	1011	122150	94.6	8.14	106815
6	1989.3.1	10580	34	2.94	23.1	985	110018	94.2	7.86	103236
7	1989.8.13	10150	34	2.93	21.3	824	98654	90.2	7.27	86657

间原始记录,各种仪表未经过精确校正,但表列数据却是在有若干重复代表性的原始数据中选录的。(2)氨产量是按稳定的小时产量折算的,进气量是按小时产量乘以消耗定额 $2900\text{Nm}^3/\text{tNH}_3$ 折算的,其结果与现场防喘振流量计指示相符。但现场高压缸排出流量一般比低压缸进气高出约 $4000\text{Nm}^3/\text{h}$,估计是Prism回收 H_2 气造成。(3)最低转速因表1只列到88.7%,再低负荷一般均打开了低压防喘振阀,因此无法比较。由于上述情况表1的数据还只能作为大略的观察。

为了将表1数据和制造厂提供的特性曲线做比较,需要按以下程序进行计算修正(以1988年4月30日数据为例)。

1. 将图1y轴排气压力座标按原设计进口压力 2.6MPa 折算为无因次座标压力比 ϵ 。

例如原座标点 23.0MPa ,折算为 $\epsilon = \frac{23.0}{2.6} = 8.85$,其余类推。

2. 将表1数据也折算为压力比。如排气压力为 21.2MPa ,进气压力为 2.75MPa ,则 $\epsilon = \frac{21.2}{2.75} = 7.71$,并按此数据寻找y轴相应的 ϵ 座标位置。

3. 图1x轴座标的原始数据来自在设计状态(40°C , 2.6MPa)下一段入口气体的实际流量。由于考虑到使用上的方便,制造厂在提供时折算成标准状态的气量,为了简化起见,我们仍然保留这一座标。但在使用表1标准气量数据时按下述方法折算:

已知当时进气条件为 31°C 和 2.75MPa ,标准气量为 $103189\text{Nm}^3/\text{h}$,折算为

$$103189 \times \frac{2.6}{2.75} \times \frac{273+31}{273+40} = 94755\text{Nm}^3/\text{h}$$

按94755查到横座标点位置并标入图中,表1所列7个工况点示于图1。根据这批座标点推出的实际特性曲线组如图1点划线所示。从这3条点划线的相对位置可以看出实际特性曲线和制造厂提供的预期特性曲线十分接

近,从工业使用的角度衡量其可能存在的误差是可以忽略不计的。

有几点情况是应该说明的。金化自1978年投产以来已进行过多次技术改造,其中对压缩机特性曲线产生影响的有2点:(1)1985年由于严重的震动问题,更换了由日本三菱重工根据德雷瑟-克拉克技术设计的463B5/5型低压缸。该缸设计完全照用了原来法国RC10-9B型低压缸的条件,这支低压缸在出厂前同样按照ASME和API规范进行了性能试验,不过试验介质用的是37.5%的氮和62.5%氮的混合气,试验结果显示其实际性能略优于设计预期性能,原设计在 $11230\text{r}/\text{min}$ 时达到的排气压力实际上在 $11095\text{r}/\text{min}$ 便可达到。其误差为 -1.2% ^[2],这使得更换低压缸后的整机性能变好,这一点和其他法型厂略有差别。(2)法型3厂均增设了中空纤维 H_2 回收装置,正常情况下向一段出口回收数千立方米气体,从现场原始记录也可以看到高压缸气体流量指示总是比一段进口高出数千立米。由于气体回收,低压缸出口压力将比原设计值升高,从而相对减少了一段进口吸气量,但从整机性能来看却使得同样条件下排气量增多。由于回收气量在总气量中所占比例约为2%左右,本文对此未做定量研究。

四、不同转速时应用近似相似理论的探讨

前已述及,相似理论是特性曲线计算的基础。在工厂条件下是否可以根据这些理论对不同工况,尤其是不同转速时机组特征的变化进行一些简便的计算呢?以下拟就此问题进行初步的探讨。

在工厂条件下,由于始终使用同一台压缩机,传送的又是同一种气体,因而其几何尺寸和气体绝热指数相等,只有机器的特征马赫数 M_{2a} 。由于工作转速的变化而不相等,因而不能满足完全相似的先决条件,理论界

为此研究了近似相似的性能换算方法。但是由于 M_{10} 对压液机性能和各种损失都有较大的影响，因此至今还没有一种可靠的方法能够十分精确的进行计算^[1]。对于多缸串联的机组影响条件就更多些，但是对于在较小范围内变转速后的工况变化，学者们推荐了不少计算公式。笔者就金化K1501的具体设备试用各种公式进行了验算，得出其中误差最小的公式，建议可在工作转速变化 $< \pm 5\%$ 的情况下使用。

对于不同转速下的压力换算，采用压力等温换算法

$$\epsilon' = \epsilon \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{RT' I_n}{RT I_n'}\right)$$

当 $T_{1n} = R'T'_{in}$ 时该式简化为

$$\epsilon' = \epsilon^A = \epsilon \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \dots\dots\dots(1)$$

式中： ϵ' 、 ϵ 为两种转速下压缩机组出口和进口压力比

n' 、 n 为两种转速，r/min

对于流量换算采用平均 ϕ 法：

$$Q'_i = \frac{n'}{n} \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{\epsilon^m}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\epsilon'^m}\right)} Q_i \dots\dots\dots(2)$$

式中： Q'_i 、 Q_i 为进口流量，Nm³/h
 ϵ' 、 ϵ 由(1)式得出的压力比 m 多变指数，可由下式求出

$$\frac{m}{m-1} = \eta_p \frac{K}{K-1}$$

式中： η_p 多变效率，可取0.8

K 绝热指数，可取1.4

由此可得 $m = 1.55$

对于法型厂K1501已知在100%转速时(11230r/min)的标准工况

$$Q_i = 121882 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\epsilon = \frac{26.2}{2.6} = 10.08$$

利用(1)(2)两式分别测算在90%、95%、105%转速时应有的压力和流量，其结果以及和由图1特性曲线查出的结果对照情况均列入表2。

表2 利用公式计算的不同转速工况对照

转 速		特性曲线流量	流量计算结果	误 差	特性曲线出压	出压计算结果	误 差
%	r/min	Nm ³ /h	Nm ³ /h	%	MPa	MPa	%
100	11230	121882			26.2		
105	11792	130000	130279	+0.2	33.2	33.2	0
95	10669	112300	112314	0	20.9	20.9	0
90	10107	100000	103470	+3.5	16.9	16.9	0

对于表2，也可以采取固定流量误差为零的办法而去比较排出压力的误差，其结果仍相似。利用公式(1)、(2)对美型、日本I型、II型工厂合成气压缩机进行计算，在转速 $\pm 5\%$ 的范围内，其结果均接近特性曲线显示的数据。因此，这些公式可以用于现场已知一种转速工况时对另一种转速工况的推算，对于研究未知领域的机组潜力也是有效的。

五、合成气压缩机和管网（系统）联合工作特性

前面讨论了压缩机自身固有的特性，压缩机的实际工作点还取决于管网的特性。在大化肥特定条件下，可以认为取决于合成系统的P—Q特性^[1]。以下将着重讨论这一问题。

合成系统的特性可以由各种公式推算

也可以由实际测定。在研究工厂实际问题时，还是应以后者为主。金化于1984年更换了S-200型内件，改造后系统压力平均下降1.0MPa。在不同负荷条件下塔压力变化情况如图2所示。

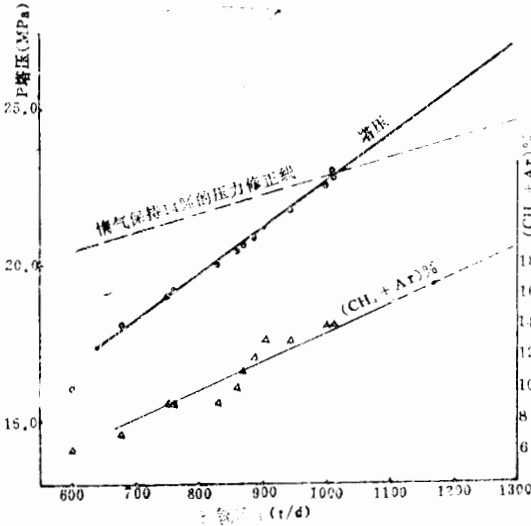


图2 不同负荷下合成塔压力变化

图2是按金化实际操作做出的图形。由图可见，实际操作中进塔气中惰气含量随负荷下降。这一般是由于两点原因：(1) 当负荷下降时气体精制部分出来的补充气中CH₄含量也相应降低。(2) 合成系统排放气量受

系统返H₂量等方面的牵制，一般不大改变，因而当负荷减少时相对排放量增大，造成系统中的惰气含量下降。众所周知，合成系统惰性气含量对系统压力影响很大。因此在使用图2数据时需要注意对惰气的修正，其计算方法将在后面述及。

图2的P—G关系呈现为一条近似直线。如果把座标放大到原点，可以看出，这是一条截距为7.0，斜率为0.0154的直线，其对应方程为

$$P = 0.0154G + T \dots\dots\dots(3)$$

式中：P塔压力，MPa

G氨产量，t/d

当然，上式只是一个经验式，其应用范围也有一定的限制，各个工厂可以根据自己的实际运转情况修正式(3)中的两个常数。

为了对系统中惰气含量的影响进行修正，可以使用下列经验公式

$$(P/P_0)^{0.820} \cdot \left(\frac{100 - I}{100 - I_0} \right)^{1.022} = 1 \dots\dots\dots(4)$$

式中：P、P₀两种工况下的塔压，MPa

I、I₀两种工况下惰气含量，%

表3给出了根据图2查出的压力和相应的气含量，然后利用式(4)全部修正到惰气含量为14%时的压力数据。

表3 不同惰气含量合成塔压力修正表

氨产量 (t/d)	700	800	900	1000	1100	1250
由图3查出的惰气含量 (%)	8.0	9.8	11.6	13.5	15.3	18.0
由图3查出的塔压力 (MPa)	18.4	19.7	21.3	22.7	24.2	26.5
惰气保持14%折算的塔压 (MPa)	21.0	21.6	22.5	23.0	23.5	24.2

根据表3数据在图2相应标出了一条虚线，其斜率明显地低于实际操作线。

在压缩机和管网联合工作情况下，管网特性和机组特性的相交点便是压缩机的实际工作点。在大型氨装置的具体情况下，合成系统的P—G特性可以直接代替管网特性。

但在使用时要做以下处理：首先将横座标氨产量折为小时产量，然后乘以吨氨补充气定额(取2900Nm³)，变化标准气量Nm³/h。其次，在压力数值上加上压缩机出口和合成塔进口的压力差，本文取0.4MPa。按此修正后，图2的P—G线就可以直接标注在压缩

我们再来研究一下当压缩机进气条件发生变化时产生的影响。进气压力的影响可以从图 1 纵坐标压力比变化中查出, 这里不再赘述。如果在压缩机进口增设氨冷器, 使一段进口温度由原设计 40℃ 降到 4℃ (洞氮已进行了这种改造, 效果良好), 则同样负荷下横坐标位置将向左移动, 其幅度为原气量的 $\frac{273+4}{273+40} \% = 88.5\%$ 。例如 125% 负荷的

座标点将移到 $151042 \times 88.5\% = 133672$ 处; 110% 负荷的座标点将移到 $132910 \times 88.5\% = 117625$ 处; 在这种条件下, 压缩机在 125% 负荷下的工作点将移到 F 点 (其压力与 A 点压力相对应), 或者 G 点 H 点 (分别与 B 点 E 点对应), 其工作转速将下降到 101.6%、100.7% 和 99.6% N。在 110% 负荷下的工作点将转移到 I 点 (与 D 点压力对应) 或 J 点 K 点, 其工作转速分别为 98.4%、98.2% 和 97.4% N。

从上述分析可以得到以下几点认识:

1. 在目前不进行任何改动的情况下将压缩机转速升高到 103%~103.6% N (11567~11634r/min), 可以满足 125% 负荷对气量的要求, 转速在 100.3% N (11264r/min) 时可以达到 110% 的负荷。

2. 如果对现有合成系统进行改造扩大容量, 使负荷提高到 125% 时, 合成塔压力仍能维持现有 22.7MPa 的水平, 则 125% 负荷下的转速将下降到 102% N。

3. 如果再在压缩机气体进口处增加氨冷措施使进气温度下降到 4℃, 则 125% 负荷的转速仅为 99.6% N (11185r/min), 110% 负荷的转速仅为 97.4% N (10938r/min)。由此也可见, 降低气体温度的效果比改造合成系统的效果更加明显。

4. 如果压缩机进口压力高于设计的 2.6 MPa, 则上述各点的工作转速均会降低。从图 8 的特性曲线推算, 由于压缩比下降和进气比重增加两方面的影响, 进口压力每上升

0.1MPa, 工作转速将下降 130r/min, 反之亦然。

六、特性曲线以外的有关问题

本文着重研究了合成气压缩机的特性曲线。其目的是用有限的篇幅回答一个问题, 即首先就压缩机本身性能而言, 还有无可能满足较大幅度增产的需要。通过上述的分析, 回答应当是肯定的。但是一个大型工业装置的增产挖潜, 是有很多复杂的制约因素的。这些问题的解决还需要做更多的理论研究和实际工作, 尤其是以下几点。

1. 提高现有运行转速的风险问题。我国十几套大化肥的合成气压缩机, 投产十几年以来, 从未有过超 100% 转速运行的实践, 尤其是法型 3 厂。由于其先天不足带来的许多灾难性事故, 常常使人谈虎色变, 不敢或不愿涉足这一领域。这种心情是可以理解的。因此对于提高转速的问题要做好充分的酝酿和准备工作。在设计转速 105% 以下长期连续运行是符合 API 规范和制造厂规定的^[5], 这和拼设备不是一回事。事实上, 不但国外许多同类型工厂已有大量实例, 就是我们自己在 CO₂ 压缩机和空压机超 100% 转速运行方面也都有长期的实践经验, 我们应当破除对未知领域风险的顾虑, 用科学的态度去研究和探索设备的潜力, 从实践中寻求正确的结论。

2. 压缩机增加负荷还有许多相应的问题需要解决。如蒸汽透平的功率能否满足要求, 高中压蒸汽是否平衡, 机组各中间冷却器是否需要换大, 冰机负荷能否适应等。都需要进行全面的核算, 并采取相应的措施。

3. 对合成系统进行改造, 以求降低压缩机排出压力。既降低了压缩机的转速, 又减少了功率消耗, 再加上增设进口氨冷器的措施, 有可能实现在 100% 转速以下达到增产 25% 的目的。对于工厂的安全可靠性与技术先进性来讲, 应该说是上策, 但是还应该

就其经济性进行比较，首先是固定资产投资比较，同时还要对日常操作费用进行比较，以得出综合性的结论。

七、结 论

1. 通过改造合成系统以降低合成气压缩机排气压力，同时采取增设一段入口气体氨冷器以提高气体重度的措施，从压缩机特性曲线角度进行观察，是有可能实现在不超过设计的100%转速情况下达到增产25%的目标。但要进一步对蒸汽透平的能力和机组辅助设备的能力等问题进行研究核算。

2. 对实现增产的两种方案，即改造合成系统或改造压缩机(包括改造原有压缩机或增设并联压缩机)的经济效益对比(包括固

定资产投资和日常操作费用)需要进行工作。但从减少工厂运转设备风险和降低日常生产费用的观点出发，改造合成系统以达增产目的无疑是更为稳妥易行的选择。

参 考 文 献

- (1) 陕西鼓风机厂编印，合成气压缩机检验综合试验报告，1976，8
- (2) 栖霞山化肥厂压缩机检验组，463B5/5型压缩机检验技术总结，1984，12
- (3) 西安交大，离心式压缩机原理，1980，9浙江大学，北京化工学院合编，化工机器，1987，1
- (4) (美)民森弗尔德，离心式压缩机操作与控制原理，机械工业出版社，1988，6
- (5) 韩文光，大型氨厂增产改造技术研究，《大氮肥》No.5 1988

南化化机厂首次采用液压胀管技术制造大型合成氨冷却器

液压胀管技术是目前国外最新发展的技术。它通过超高压工作介质使管子产生永久变形，完成管子与管板的胀接。和常规机械胀管相比较，液压胀管能有效消除管子与管板之间的间隙，产生的内应力也较小，故应力腐蚀也小。应用液压胀管法还能进行任意长度的纵深胀管，并能精确确定胀管的区域，这是其它机械胀管技术所难以达到的。

南化公司化机厂近年从日本松野机械株式会社引进了液压胀管装置，该装置自动化程度高，完成一次胀管过程仅需数秒钟，且胀管质量稳定可靠，

最大压力可达583.40 MPa(6000kgf/cm²)，可满足各种不锈钢及合金钢管的胀接工艺。该厂在承接四川化工厂年产20万t合成氨改造工程的关键设备——新型组合式氨冷却器的制造中，对距离3.5m，7.2m，10.8m处的管子—管板的胀接采用了液压胀管技术。此种技术的应用在国内尚属首创。液压胀管技术的应用为今后在国内制造新型组合式高效节能热设备创造了条件。

南化研究院 孙锦宜

103-J测振探头失效原因

据沧州化肥厂刘林生来稿介绍，该厂1986年大修后不久，103-J/JT机组上的所有探头曾一度全部失效。经过试验和研究找到了探头失效的根

本原因是润滑油中的水质使探头中毒失效，因此在大机组的运行过程中一定要严格控制油中的水含量。

(上接第457页)

时，自产蒸汽量减少，PIC-6很容易一下子关死，从而造成系统波动。假设一台快锅出

故障检修一天，将少产1000t合成氨，经济损失近5万元。