



透平膨胀机效率剖析

计光华

(西安交通大学)

内容提要 本文阐述了透平膨胀机的效率定义、冷量损失、相似条件、带液问题及效率的估算。

主题词 轻烃回收 透平式膨胀机 等熵效率 效率估算 焓 熵 综合分析

近年来国内一些从事天然气、油田气实际工作的科技人员纷纷就如何正确评定透平膨胀机效率发表了各自的见解^{(1),(2),(3)},这对加强学术交流、统一认识、避免在工程设计和应用时产生误解,具有很好的促进作用。本文应约对讨论中产生的一些问题,特别是对效率的定义、相似条件及其估算等方面,提出一些个人的看法。

膨胀机效率的定义

透平膨胀机效率的定义是由其目的确定的。作为降低温度、制取冷量用的低温透平膨胀机,它的目的是为了在一定膨胀气量下制取尽可能多的冷量,以满足低温液化与分离装置的需要。图1反映了当压缩机的等温效

率为100%,膨胀机的等熵效率为100%时,单位质量工质在温度—熵图上的理想热力循环。1—2为等温压缩过程,2—3为等压冷却过程,3—4为等熵膨胀过程。通过上述三个过程,使工质温度降到点4。如果工质温度仍回升到点1,那末该循环可以吸收的热量为点1与点4的焓差 ΔH_{1-4} 。若从点2、点3各作等焓线至等压线 p_1 上,可得点6与点5。显然 $|\Delta H_{2-3}| = |\Delta H_{5-6}|$,也就是说可以用工质的复热 ΔH_{5-6} 来冷却膨胀前的工质,使其降低焓值 $\Delta H_{2-3} = H_2 - H_3$ 。因此 ΔH_{5-6} 属于循环内部热交换所需要的。而剩下的 ΔH_{4-5} 和 ΔH_{6-1} 则是可以用于补偿冷量损失的有效制冷量。可见,有效制冷量由两部分组成:即所谓等温节流效应 ΔH_{6-1} 和膨胀机制冷 ΔH_{4-5} 。

包玻璃钢加强的前后,威远气田的卤水污染赔偿费,从1985年的127.24元/万 $\text{m}^3 \cdot \text{a}$ 降到1987年的10.80元/万 $\text{m}^3 \cdot \text{a}$ 。按1987年全年共产卤水56.7万 m^3 计算,当年节约赔偿费6599元。

结 论

1. 利用环氧树脂玻璃钢处理腐蚀严重的卤水管道,是延长管道使用时间、减少环境污染、节省投资的一种可行措施。

2. 外包玻璃钢加强的卤水管道的使用寿命与管线内腐蚀的速度有关。在威远气田的现场条件下一般能使用3年以上。

3. 增加玻璃钢的层数可以提高管线的承压能力,但一定要按要求严格配方和精心施工,钢管表面的除锈和刷底漆尤须认真做好,以免影响粘贴强度。

参考文献略

(本文收到日期 1988年10月22日)

但是由于 $H_2 = H_5$, 所以通常就把 ΔH_{3-4} 看作是膨胀机的制冷量。

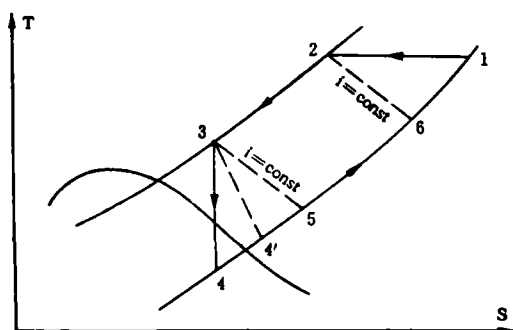


图1 理想气体制冷循环

当膨胀过程中有冷量损失时,膨胀机出口将不是点4,而是点4'。因此膨胀机实际制冷量为 $\Delta H_{4'-5}$, 或者为 $\Delta H_{3-4'}$ 。显然膨胀机所能提供的最大制冷量为等熵过程的制冷量 ΔH_{3-4} , 因此把它作为评价膨胀机热力过程优劣的标准,从而得出了膨胀机等熵效率的定义。即为膨胀机的实际焓降与等熵焓降之比:

$$\eta_e = \frac{\Delta H_{3-4'}}{\Delta H_{3-4}} = \frac{\Delta H}{\Delta H_s} \quad (1)$$

由此可风,凡是使膨胀机冷量损失增加的所有因素都是对膨胀机等熵效率有影响的。

透平膨胀机的冷量损失

对透平膨胀机来说,在设计工况下影响单位质量冷量损失的主要有喷嘴(导流器)中的流动损失,工作轮中的流动损失,余速损失,内密封泄漏损失和轮背摩擦损失五大部分。在非设计工况下,除去上述五大损失外,还会存在一系列的附加损失⁽⁴⁾,例如冲击损失、湿度损失、出口旋涡损失、漏冷损失等。即使是原有的五大损失也会因工况变化而发生改变,例如焓降的增大使喷嘴出口马赫数 M 过大而引起激波损失,工作轮中由于流道中

气流的减速运动而引起的边界层脱离,扩压器中由于工作轮出口速度过大而引起余速损失增大等。因此要正确评定非设计工况下透平膨胀机的等熵效率是十分困难的。为此出现了各种近似的分析方法。实用上,非设计工况可以归纳为两类:一类是同一台透平膨胀机运行在不同于设计工况的热力参数条件下,但工质是相同的。这一类问题属于变工况设计,从[1]、[2]、[3]中看,一般都没有涉及,因此本文不再评述。另一类则是同一台透平膨胀机在使用不同工质运行时热力工况的变化,例如把空气透平膨胀机用作天然气透平膨胀,或天然气透平膨胀机用空气作试验时,就存在这个问题,大家也比较关心。本文的重点将讨论这一类情况。

透平膨胀机的相似

虽然实际上存在众多的损失,但是由流体力学相似理论可知,只要两种工况的流体动力工况相似,就可以保证损失相等和效率相等。而流体动力相似的基础是几何相似、热力相似与流动相似。对同一台透平膨胀机来说,几何相似是不成问题的,因此问题是热力相似和流动相似。

在绝热等熵膨胀过程中,存在能量方程

$$\frac{k}{k-1} R dT + \frac{dC^2}{2} = 0 \quad (2)$$

式中 k —— 等熵膨胀指数; R —— 气体常数; T —— 温度; C —— 气流绝对速度。

利用相似参数

$$K_c = \frac{C}{C_0}, K_T = \frac{T}{T_0}$$

可得

$$dK_c = \frac{dC}{C_0}, dK_T = \frac{dT}{T_0}$$

因此有

$$\frac{k}{k-1} R T_0 dK_T + C_0^2 K_c dK_c = 0$$

或

$$\frac{kRT_0}{C_p^2} \frac{1}{k-1} = - \frac{K_r dK_r}{dK_r} \quad (3)$$

在流动相似时,另一工况也存在类似的关系,即

$$\left(\frac{kRT_0}{C_p^2} \right)_n \left(\frac{1}{k-1} \right)_n = - \frac{K_r dK_r}{dK_r}$$

显然,在相似条件下,两者的相似参数是相等的,因此,

$$\frac{kRT_0}{C_p^2} \frac{1}{k-1} = \left(\frac{kRT_0}{C_p^2} \right)_n \left(\frac{1}{k-1} \right)_n$$

而且这一条件在流动过程的任一位置都应成立,即有

$$\frac{kRT}{C^2} \frac{1}{k-1} = \left(\frac{kRT}{C^2} \right)_n \left(\frac{1}{k-1} \right)_n = \text{常数}$$

或者

$$\frac{1}{M^2} \frac{1}{k-1} = \text{常数} \quad (4)$$

马赫数 M 是表征流体可压缩性影响的决定性准则,它由惯性力和弹性力之比决定,即

$$\frac{ma}{E\ell^2} = \left(\frac{ma}{E\ell^2} \right)_n$$

整理后可得

$$\frac{C}{a} = \left(\frac{C}{a} \right)_n$$

即

$$M = M_n \quad (5)$$

由此由动力相似可知,相似过程的马赫数是相等的,再结合式(4)可以看出,等熵膨胀指数 k 也应相等。如果是非等熵过程,也可以证明非等熵膨胀指数 n 相等。

同样可以证明,当 M 、 k 相等时,在两个几何相似的流道中,气体在流道中的温度比、压力比、密度比和速度比也是相等的,速度比角形是相似的。在这些前提下,反动度 ρ 和特性比 u_1/C ,也是相等的。

综上所述,几何相似、马赫数相等、等熵膨胀指数相等和速度三角形相似是透平膨胀机动力相似和热力相似的基本条件。只有满足上述基本条件,才能使两台透平膨胀机或同一台透平膨胀机的两种不同工况的等熵效率相等。而由上述基本条件得出的一个决定性参数——特性比 u_1/C ,对透平膨胀机的热力性能具有重要影响, u_1/C 的变化必然要影响等熵效率。从这个意义上看,文章〔2〕对〔3〕提出的修正是对的。关于在透平膨胀机中的相似问题,作者已在文献〔5〕中详细分析,本文不再展开。

根据上述相似原理,欧美一些学者把原先用于水泵的比转速概念引入到透平膨胀机中,得出了比转速

$$n_s = \frac{nQ_1^{1/2}}{\Delta H_s^{3/4}} \quad (6)$$

式中 n —— 每秒转数; Q_1 —— 工作轮进口体积流量, m^3/s ; ΔH_s —— 透平膨胀机等熵焓降, J/kg 。

如果用于透平膨胀机,上式也可写成

$$n_s = 0.95 \frac{u_1}{C} \sqrt{\tau_1 \varphi \frac{l_1}{D_1} \sin a_1} \sqrt{1-\rho} \quad (7)$$

式中 τ_1 —— 工作轮进口叶片减率系数; φ —— 喷嘴中的速度系数; l_1/D_1 —— 工作轮叶高轮径比; a_1 —— 工作轮叶片进口安装角; ρ —— 反动度。对于常用的反动式向心径轴流透平膨胀机, $n_s = 0.037 \sim 0.118$ 。

图 2~图 4 给出了比转速与工作轮结构型式、反动度、轮径比、叶高轮径比的关系,其参数见表 1、2。

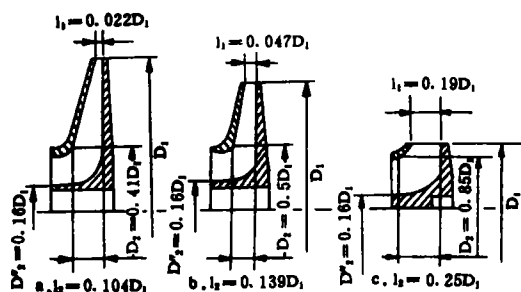


图 2 比转速与工作轮结构型式的关系

$$\alpha_1 = 20^\circ, \beta_2 = 40^\circ, \varphi = 0.95, \psi = 0.85, p_0/p_2 = 4$$

表 1

	ρ	u_1/C_s	μ	n	u_1	D_1	n_s
a	0.46	0.65	0.4	100%	100%	100%	0.014
b	0.49	0.64	0.5	138%	98%	71%	0.062
c	0	0.41	0.85	220%	63%	29%	0.094

表 2

ρ	0.6	0.5	0.4	0.3
u_1/C_s	0.73	0.68	0.6	0.5
μ	0.37	0.48	0.53	0.6
n_s				
0.05	a 0.0357	b 0.056	c 0.054	d 0.0487
$\frac{l_1}{D_1}$ 0.10	e 0.076	f 0.0792	g 0.0765	h 0.0689
0.15	i 0.093	j 0.097	k 0.0937	l 0.0844

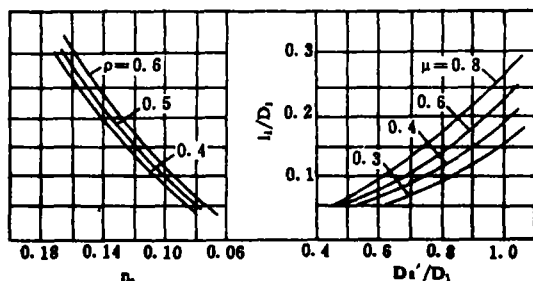


图 3 比转速与反动度、轮径比、叶高轮径比的关系

$$u_1/C_s = 0.7, \alpha_1 = 18^\circ, \varphi = 0.97$$

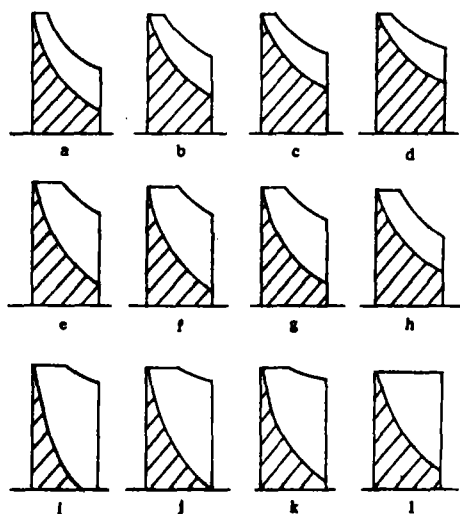


图 4 比转速与工作轮子午面形状的关系

$$\alpha_1 = 18^\circ, \varphi = 0.97, \beta_2 = 31^\circ, p_0/p_2 = 2.0$$

利用比转速的概念可以形成一定的工作轮系列,这对设计、选用透平膨胀机结构型式将带来很大方便。但是比转速是一个非决定性相似准则,在动力相似的透平膨胀机中比转速必然是相等的,而反过来在比转速相等时,两台透平膨胀机却并不一定相似。因此

在应用比转速概念时要有一定限制,同时也要受到上面提到的等熵膨胀指数相等条件的约束。比转速只能作为近似估算使用。从这个意义上说,文[2]在介绍此方法时也忽视了等熵膨胀指数相等这一影响。

透平膨胀机的带液

工质在透平膨胀机中膨胀时进入两相区,从而出现带液现象,有时甚至在透平膨胀机进口,工质就已经带液。那末带液后对透平膨胀机的热力性能有没有影响呢?这是大家所关心的问题。一般地说,液体的出现带来了一系列附加损失,这是肯定的。例如相变过程的非等熵程度、气流挟带液滴、液滴对喷嘴和工作轮流道壁面的冲击、沉积和分离、液滴的聚合和溅离等,都会使损失增加。因此,在常规的不带液透平膨胀机中,如果工作时出现液体,那末一般认为液滴对透平膨胀机等熵效率的影响是显著的,每增加1%带液量,等熵效率约降低1%。所以,如果用目前按一元流动设计的空气透平膨胀机代替天然气透平膨胀机,那末当出现液体时,膨胀机的等熵效率是较低的。文献[6]提供的国产天然气透平膨胀机效率一般都较低就有这个原因(但文中表4所提供的效率值是值得怀疑的)。在上述条件下,用空气作试验所得到的等熵效率不可能与实际采用天然气时相等。显然,这是由于两者不可能做到工况相似。

但是,如果按照带液流动的要求,专门设计带液透平膨胀机,那末有些附加损失是可

以避免或减少的。在专门设计时可按三元流动的要求设计型线,从而提高了等熵效率。因此,这种带液透平膨胀机的等熵效率同样可以达到80%以上。美国 Rotoflow 公司的天然气透平膨胀机就具有这些特点⁽⁶⁾。至于文献[7]所介绍的带液试验结果,除了上面分析的这些损失外,正如文献[2]中所指出的,还增加了由于喷嘴宽度减少而引起的额外损失。

由于带液使透平膨胀机的设计更加复杂,本文不再评述,可参见文献[7]。

透平膨胀机效率的估算

从上面的分析可知,要严格做到动力相似从而保证等熵效率完全相等,几乎是不可能实现的,为此出现了一些近似的估算方法与模化试验方法。文献[8]所介绍的比转速方法就是欧美国家常用的一种近似计算方法。图5和图6就是该文提供的估算用图。反映了比转速对特性比、反动度、等熵效率以及膨胀机基本结构型式的影响。Rotoflow 公司也利用类似方法把空气试验结果换算到天然气中。

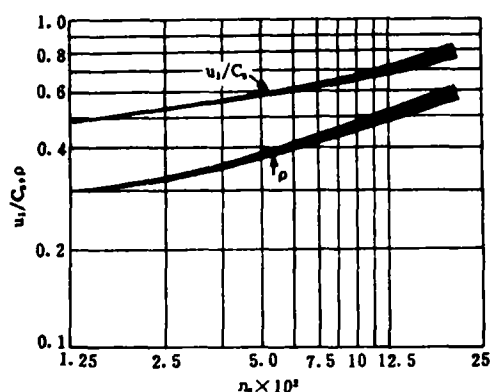


图5 比转速对特性比、反动度的影响

在应用比转速概念时必须注意到,对已定结构的一台透平膨胀机,比转速是一定的。

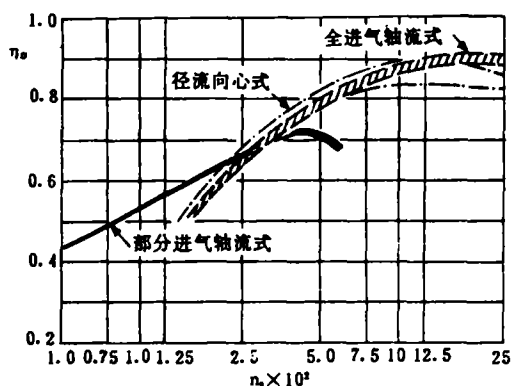


图6 比转速对效率与型式的影响

因此当膨胀气量一定时,焓降的改变必然要求转速的改变,它们的关系是 $\pi \propto \Delta H^{1/2}$ 。但是为了保证等熵效率相等,也即有 $\pi \propto \Delta H^{1/2}$ 。显然这是矛盾的,这就要求膨胀气量也要改变,以保证特性比和转速都相等。可见在不同工况下作试验时,必须很好地选择运行参数,才有可能做到工况相似。由此可知,文献[6]所作的试验参数是不合理的。

因为两种工况的试验都采用了相同的膨胀比,相同的进口压力,而冷却工况是常温进口,两相工况是低温进口。显然两者的焓降差别大,常温时的焓降要比低温工况大一倍以上。如果常温试验时效率处于最佳值附近,那末低温试验时将小于常温试验,因此两相试验时使效率降低很多。

当采用不同工质时,由于等熵膨胀指数 k 不同,就无法满足式(4)的要求,因此就更难保证工况相似。生产厂家只能按照本厂产品的特点进行近似模化试验,然后用经验系数加以修正。

实用上,为了快速估算给定参数条件下透平膨胀机的几何参数、效率和转速,可以采用下述方法。

先根据同类型的透平膨胀机或参照图5、图6所提供的曲线图,估计一个比转速值。

然后把式(6)转换一下,即由

$$Q_1 = \frac{m'}{\rho_1} \approx \frac{m'}{\rho_0} \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\rho = 1 - \frac{1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

$$\Delta H_s = \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

可得

$$n_s = \frac{\pi \sqrt{m' RT_0}}{\sqrt{p_0}} \times \frac{\left\{ 1 - (1 - \rho) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{-\frac{1}{k-1}}}{\left\{ \frac{k}{k-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{k}}} \quad (8)$$

由已知的进口压力 p_0 、进口温度 T_0 、出口压力 p_2 、膨胀气量 m' 及气体常数 R 和等熵膨胀指数 k , 就可以估算转速 n 。然后再由图 2~图 6 估算出特性比 u_1/C_s 、轮径 μ 、叶高轮径比 l_1/D_1 及等熵效率 η_s 。最后算出透平膨胀机工作轮直径 D_1 及发出的功率 N 。

例: 已知一天然气透平膨胀机的热力参数为 $p_0 = 1.23 \text{ MPa}$, $p_2 = 0.41 \text{ MPa}$, $T_0 = 231 \text{ K}$, $m' = 1.06 \text{ kg/s}$, $k = 1.43$, $R = 418.4 \text{ N} \cdot \text{m/kg} \cdot \text{K}$ 。要求估算该透平膨胀机的主要几何参数及等熵效率。

解: 先估取该透平膨胀机的比转速 $n_s = 0.05$, 并参考图 5 估取反动度 $\rho = 0.5$, 则可求得工作转速:

将(8)式变换为 n 的公式, 并将上述参数代入, 解得 $n = 754.3 \text{ r/s} = 45260 \text{ r/min}$, 然后由图 2~4 查得 $\mu \approx 0.45$, $l_1/D_1 \approx 0.04$, 由图 5~6 查得 $u_1/C_s \approx 0.65$, $\eta_s \approx 0.82$ 。这时的等熵效率没有考虑到带液。如果带液, 则按每增加 1% 的带液量, 等熵效率相应减少 1% 估计。

最后可估算工作轮直径

$$D_1 = \frac{60 u_1}{\pi n}$$

$$= \frac{60 \frac{u_1}{C_s} \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}}{\pi n}$$

$$= \frac{60 \times 0.65}{\pi \times 45260} \times \sqrt{\frac{2 \times 1.43}{1.43-1} \times 418.4 \times 231 \times \left[1 - \left(\frac{0.41}{1.23} \right)^{\frac{1.43-1}{1.43}} \right]}$$

$$= 0.116 \text{ m} = 116 \text{ mm}$$

及透平轴功率及制冷量

$$N = Q_0 = \eta_s \Delta H_s m'$$

$$= \eta_s \frac{k}{k-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] m'$$

$$= 0.82 \times \frac{1.43}{1.43-1} \times 418.4 \times 231 \times \left[1 - \left(\frac{0.41}{1.23} \right)^{\frac{1.43-1}{1.43}} \right] \times 1.06 = 78.5 \text{ kW}$$

参 考 文 献

- [1] 桑田 透平膨胀机应用效率计算方法探讨《石油与天然气化工》1983年 No. 4
- [2] 张庆年 透平膨胀机效率《石油与天然气化工》1988年 No. 4
- [3] 万芳林 膨胀机等熵效率探讨《天然气工业》1988年 No. 4
- [4] 计光华《透平膨胀机》机械工业出版社 1982
- [5] 计光华《透平膨胀机》机械工业出版社 1989
- [6] 阿尔达切也夫《低温透平膨胀机两相工况的研究》XHM, 1984年 No. 4
- [7] 计光华《透平膨胀机中的三元流动与两相流动》西安交通大学出版社 1989年
- [8] H. D. Linhardt, Cryogenic Turboexpanders, LNG/Cryogenics, Vol. 1, No. 1 1973.

(本文收到日期 1989年5月10日)

STORAGE/TRANSPORTATION/SURFACE CONSTRUCTION

53 Application of Brine Pipeline Externally Strengthened by Glass Fiber Reinforced Plastic in Weiyuan Gas Field

The corrosion of brine transportation pipeline is very serious in Weiyuan Gas Field of Sichuan. The test of the technological method for repairing them with epoxy resin and glass fiber cloth as the coating for continuously using has met with success. This paper introduces the technological calculation, operation requirement and economic benefit gained of the test.

Subject Headings: Weiyuan Gas Field, brine-transporting pipeline, epoxy resin, glass fiber reinforced plastic, coating.

Li Weiziang, Luo Zhirong, Muo Ziyun

GAS PROCESSING AND UTILIZATION

56 Efficiency Analysis of Turbine Expansion Machine

This paper describes the efficiency definition, cold-losing, similar conditions, liquid-carrying problem and efficiency estimation as well as efficiency testing of turbine expansion machine.

Subject Headings: light hydrocarbon recovery, turbine expansion machine, isentropic efficiency, efficiency estimation, enthalpy, entropy, comprehensive analysis.

Ji Guanghua

62 A Discussion on the Process of Absorbing H_2S by Amine Method

According to the partial pressure at the interface, the equilibrium of $[HS^-]$ in liquid phase and the mass transmission relationship, Ouwerkerk deduces that although the equilibrium constants $[K_{eq}]$ of primary, secondary and tertiary amine largely differ from each other, the highnesses of absorbing H_2S towers are near equal. The paper discusses this deduction.

Subject Headings: gas desulfurization, alcohol-amine method, mass transmission mechanism, gas-liquid equilibrium.

Zhu Likai

67 Volume Specific Concentration and Mole Specific Concentration of Gas

The concept of volume specific concentration and mole specific concentration of gas as well as their applied situation in gas analysis and mutual conversion are introduced in this paper.

Subject Headings: natural gas composition, component analysis, volume specific concentration, mole specific concentration.

Tang Meng