

研究论文

水平管段塞流气量增加瞬变过程统计特性分析

陈振瑜¹ 赵庆军² 何利民¹

(¹ 石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061; ² 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要 为了探索混输管线气量瞬变过程压力、压差的变化规律, 在长 378 m、内径 0.08 m 的水平不锈钢试验环道上利用空气和水进行了段塞流气量增加瞬变试验研究。试验采用压力变送器测量压力信号, 将相邻两压力信号相减(上游减下游)得到压差信号。根据试验结果, 分析了气量增加瞬变过程中压力、压差的变化规律, 从概率密度分布和功率谱密度两方面对压力、压差信号进行了统计分析, 完善了气量增加瞬变过程中压力过增值的回归方程式。

关键词 段塞流 水平管 流量瞬变 压力过增 统计分析

中图分类号 TE 312

文献标识码 A

文章编号 0438-1157(2004)08-1274-06

STATISTICAL INVESTIGATION ON TRANSIENT CHARACTERISTICS OF GAS FLOWRATE INCREASING UNDER SLUG FLOW IN HORIZONTAL PIPELINE

CHEN Zhenyu¹, ZHAO Qingjun² and HE Limin¹

(¹ College of Transport and Storage and Civil Engineering, University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China;

² Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In order to find the characteristics of gas flowrate increasing transient under the slug flow regime, a statistical investigation was carried out in a 378 m long, 80 mm i. d. stainless steel pipeline. Air and water were used as test fluids and responses to change of gas flowrate were measured by using a series of pressure transducers. Differential pressure signal was obtained by subtracting downstream pressure signal from upstream pressure signal. According to the test results, the development trends and statistical characteristics of pressure and differential pressure along the pipe during the transient process of gas flowrate increasing was analyzed. An equation for the calculation of pressure overshoot was proposed for this transient process.

Keywords slug flow, horizontal pipe, flowrate transients, pressure overshoot, statistical analysis

引 言

段塞流瞬变过程是指管道入口或出口气液两相的质量流量随时间发生突变的过程。为了研究方便, 可以先考虑某一相入口流量不变而另一相变化的情况, 即以下几种瞬变过程: ①增加气量; ②减

小气量; ③增加液量; ④减小液量。

虽然流量瞬变过程在实际工业管线中经常出现, 但在公开出版物中这方面的报道并不多见。何利民等^[1]对一些研究者的工作^[2~6]进行了综述, 指出这些研究者虽然发现了流量瞬变过程中压力和持液率波动的一些特征, 但并没有给出这些特征量与

流量之间的关系，更没有指出该特征量沿管线的变化规律，而且针对瞬变前后的稳定流型都为段塞流的瞬变过程研究得更少。为此，文献 [1] 对多种流量瞬变过程进行了一些试验研究，分析了瞬变过程中压力、压差的变化规律，对瞬变过程中的一些现象进行了分析和解释，尤其是给出了计算气量瞬变过程某个固定点的压力过增/过降值的关系式。但对瞬变过程中的一些现象分析和解释得不够详尽，而压力过增/过降值的关系式由于没有考虑距离的影响而显得比较粗略，也没有对瞬变特征量进行统计分析。在文献 [1] 的基础上，本文对瞬变前后的稳定流型都为段塞流的气量增加瞬变过程进行了更为详细的试验研究，试图完善计算压力过增值的关系式。同时，对气量增加过程的一些特征量进行统计分析，以找出这些特征量间的一些定性及定量特征。

1 试验装置与试验方法

试验装置的试验段为长 378 m、内径 0.08 m 的水平不锈钢管线。详细流程见文献 [1]。

试验段上布置有 10 台 Rosemount 3595 压力变送器 (P0~P3, P8~P13) 和 4 台 Keller PA25e 压力变送器 (P4~P7)。试验段上仪表的详细布置见图 1。

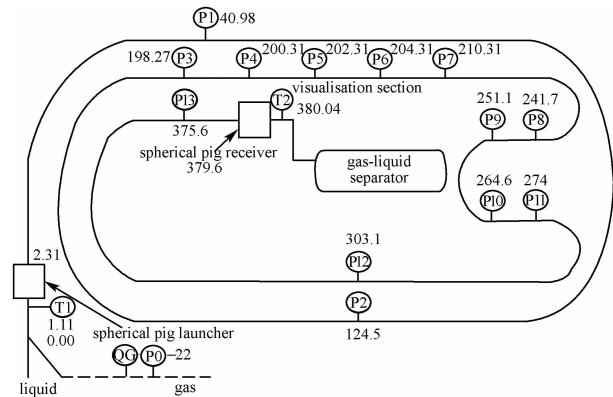


Fig. 1 Location of measuring instruments (m)

2 压力波动分析

试验的初始状态为稳定段塞流，气量为 $102.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ [对应的 P0 压力为 230 kPa (表压), $28.5 \text{ }^\circ\text{C}$]，液量为 $5.23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，管道终端气液分离器的压力始终保持为 120 kPa (表压, $28.5 \text{ }^\circ\text{C}$)。在 71.5 s 时 (自开始采集时刻 $t=0$ 算起，下同) 开始调节气体调节阀，使终态稳定气量增大为

$140.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ [对应 P0 压力为 310 kPa (表压), $28.5 \text{ }^\circ\text{C}$]，而液体调节阀开度不变 (如不特别说明，本文所指“分析工况”均指该工况)。图 2 为该工况的流量变化曲线和 P0、P1 处的压力变化曲线。

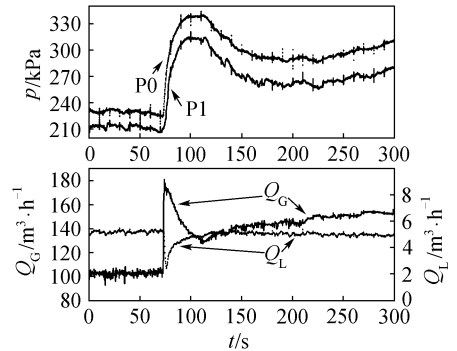


Fig. 2 Flowrate and pressure profile

在 71.5 s 时，由于气体调节阀开度变大而使气量在 2.3 s 内激增为 $180.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，而后气量又慢慢地恢复到终态稳定值。也就是说，管线运行过程包括初、终稳态段塞流和中间瞬变过程。从瞬变开始时刻到气量基本稳定所需的时间约为 40.8 s。

在气量增大的同时，虽然液体调节阀开度不变，但大量涌入的气体会对液体流入产生较大的阻碍作用，从而使液量出现瞬时减小的过程。出现该现象是由系统的本质特性决定的，无法避免。但这一液量变化一般不会给分析带来决定性的影响。

由图 2 看出，伴随着气量的增大，沿线会发生压力过增现象^[1]。P1 处压力在气量发生瞬变后 0.5 s 开始增大，当其达到压力峰值后又渐渐恢复到高于初始稳态压力的一个新稳态值，该瞬变过程持续了 95.5 s。

表 1 为分析工况下压力过增值 (即峰值压力减新稳定压力) 沿管线的变化情况。其他工况下压力过增值沿管线的变化情况列于图 3。由表 1 和图 3 看出，压力过增值沿管线有递增的趋势。这主要是由于液塞速度沿管线有增大的趋势，进而相应的加速压降便会增大，造成压力过增值沿管线增大。

Table 1 Pressure overshoot at different location from entrance

x/m	$\Delta p/\text{kPa}$	x/m	$\Delta p/\text{kPa}$	x/m	$\Delta p/\text{kPa}$
-22.00	52.6	200.31	72.3	264.60	81.3
40.98	56.6	210.31	78.2	274.00	80.0
124.50	62.7	241.70	79.9	303.10	84.8
198.27	72.0	251.10	78.6	375.60	86.6

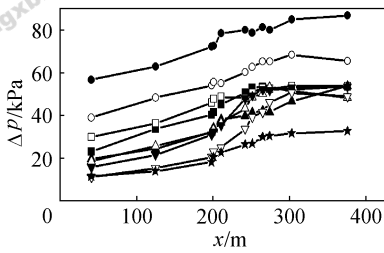


Fig. 3 Pressure overshoot of different condition at different location from entrance

$U_{LS}/m \cdot s^{-1}$ $U_{GS,1}/m \cdot s^{-1}$ $U_{GS,2}/m \cdot s^{-1}$

■	0.28	2.51	5.69
●	0.289	5.67	7.75
▲	1.54	2.26	3.04
▼	1.60	2.22	3.14
★	1.73	1.44	2.14
□	0.28	5.34	6.20
○	0.29	2.46	5.14
△	1.59	2.21	2.96
▽	1.67	1.25	2.26

将表 1 的数据进行线性回归得

$$\Delta p = b \frac{x}{d} + c \quad (b=0.09971, c=53.206) \quad (1)$$

由上面的分析可知，压力过增值与气量的变化量、初终流动状态和距离有关。由此看来，式 (1) 是不完善的。考虑到压力过增值与加速压降之间的关系，何利民^[1]提出了 P3 处的压力过增值的回归模型，见式 (2)，式中 a 值为 0.00154

$$\Delta p = a\rho[(U_{GS,2} + U_{LS})^2 - (U_{GS,1} + U_{LS})^2] \quad (2)$$

为了寻求更有效的压力过增值回归方程式，本文将式 (1) 和式 (2) 组合，并考虑到气量不变时压力过增值为 0，建立新的回归模型

$$\Delta p = a\rho[(U_{GS,2} + U_{LS})^2 - (U_{GS,1} + U_{LS})^2] \times \left[b \frac{x}{d} / (U_{GS,2}^2 - U_{GS,1}^2 + U_{LS}^2) + c \right] \quad (3)$$

共进行了 9 组气量增加试验，对 99 个试验数据按式 (3) 进行多元回归，得到新的压力过增值的回归方程式

$$\Delta p = 1.017 \times 10^{-4} \rho[(U_{GS,2} + U_{LS})^2 - (U_{GS,1} + U_{LS})^2] \times \left[0.0931 \frac{x}{d} / (U_{GS,2}^2 - U_{GS,1}^2 + U_{LS}^2) + 12.11 \right] \quad (4)$$

对回归方程进行 F 检验^[7]，得到多元确定系数为 0.7135，统计量 F 为 119.5，大于自由度为 (2, 96) 的 F 分布临界值 $F_{0.001} = 7.41$ 。可见，在显著性水平 $\alpha = 0.001$ 下，回归方程的回归效果显著。试验数据及式 (2) 和式 (4) 的结果列于图 4 (图中横坐标为试验数据点序号)。从图 4 看出，式

(2) 有一个点偏大，其余均偏小；式 (4) 对于第 1 组数据偏大，其余基本符合。

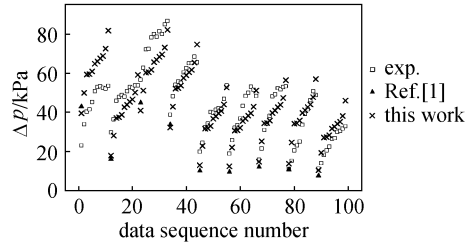


Fig. 4 Data of pressure overshoot

压力过增现象使管道中的能量以增压波的方式向下游传播。由于气液两相流体的相互作用（主要是气体的可压缩性）使得过增压力波（大扰动）不能很快传到下游，因而上下游压力信号之间有一个时间延迟。由此可以利用两传感器的间距除以两压力信号的滞后时间近似求出该工况下增压波沿管线的传播速度 U_w

$$U_w = L/\tau \quad (5)$$

表 2 是分析工况下增压波沿管线的传播速度。从表中看出，增压波传播速度随距离的增加而逐渐减小。

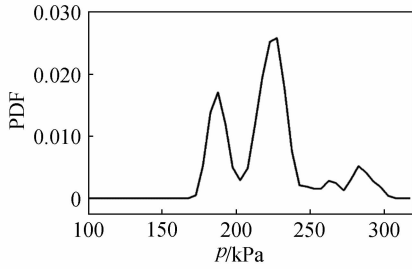
Table 2 Spread speed of pressure wave at different locations

x/m	$U_w/m \cdot s^{-1}$
83.74	18.22
161.40	16.36
220.00	12.62
257.90	10.63
188.60	8.77
339.40	7.35

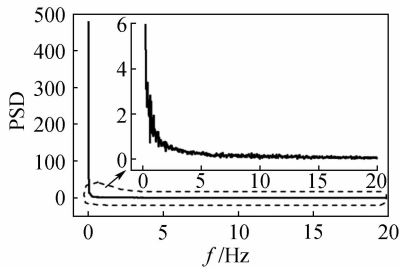
对于液量恒定、气量增大的瞬变段塞流过程，气量的增加对液塞有巨大的加速作用，新的液塞有可能超过原来的液塞而造成液塞的聚并；同时，大量气体的引入必然会使长气泡携带的液膜变薄，而管线下游尚未受影响处的液膜高度不变，从而导致液塞头的拾液量大于液塞尾的遗液量。也就是说，该瞬变过程将伴随有剧烈段塞的出现。以上压力波动的激增或过增现象正是剧烈段塞出现时的特征。

由以上分析可知，气量增加过程伴随有液塞的聚并、增长等过程。所有这些动作均会造成流动过程的复杂化。图 5 为分析工况的压力信号 (P13) 统计分布图。由图 5 (a) 看出，与流量稳定条件段塞流压力信号的概率密度分布一般呈单峰分布 [见图 6 (a)，基本呈正态分布] 不同，瞬变条件下压力信号的概率密度分布呈典型的三峰分布，而

且其分散性也大大加强. 分析认为, 气量增加引起沿线压力的激增或过增, 这一扰动的加入必然会引起系统性质的变化, 表现为压力信号的概率密度分布呈典型的三峰分布.



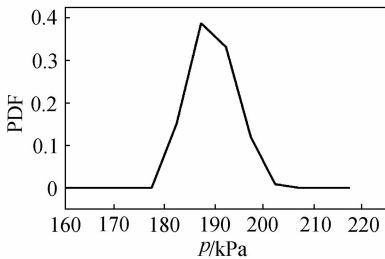
(a) probability density profile



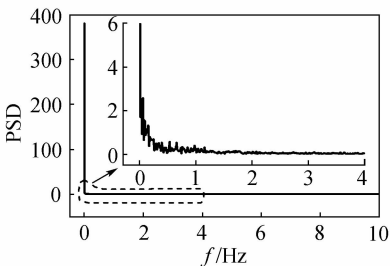
(b) power spectrum profile

Fig. 5 Statistical figures of pressure profile

($Q_L=5.23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_{G,1}=102.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,
 $Q_{G,2}=140.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)



(a) probability density profile



(b) power spectrum profile

Fig. 6 Statistical figures of pressure profile in static process

($Q_L=5.23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_G=102.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

本文利用快速傅里叶变换 (FFT), 采用矩形窗求得功率谱密度. 可以发现, 气量增加过程压力

信号的功率谱密度的频率较宽 [见图 5 (b)], 主要集中在 0~7 Hz, 且幅值较大, 为 0~480 左右. 而流量稳定时压力信号的功率谱密度频率较窄, 幅值较小, 当 $Q_G=102.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时分别为 0~1.2 Hz、0~380 Hz 左右 [见图 6 (b)]; 当 $Q_G=140.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时分别为 0~1.8 Hz、0~457 左右.

3 压差波动分析

本文将相邻两压力信号相减 (上游减下游) 得到压差信号. 图 7 是分析工况的流量和压差变化曲线, 图中 DP1 为 P4 与 P7 之差, DP2 为 P8 与 P9 之差 (见图 1).

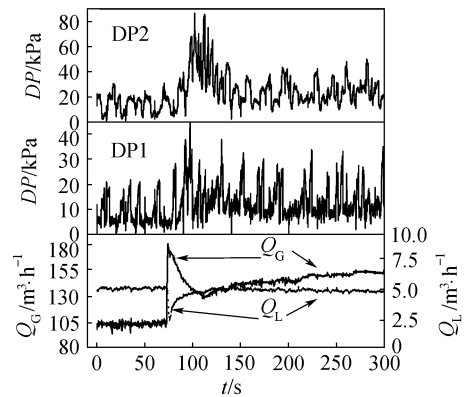
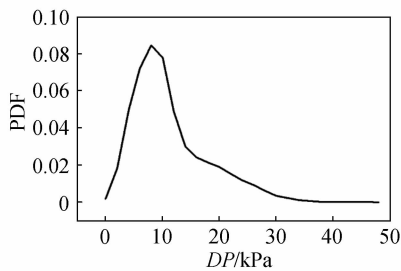


Fig. 7 Flowrate and differential pressure profile of different locations

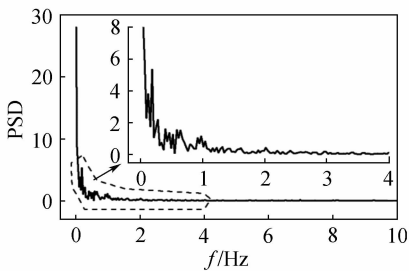
由以上压力波动分析可知, 气量突增的瞬变过程将伴随有剧烈段塞流的出现. 从图 7 看出, 气量从 71.5 s 开始突增, 相应的压差波动曲线表现出高频率、大幅波动, 从而说明该瞬变过程确实伴随有剧烈段塞的出现. 当然, 由于气体具有可压缩性, 因而气量瞬变的扰动不能很快地传到压差测量点, 相应的滞后时间对 DP1 和 DP2 分别为 10.91 s 和 15.27 s. 从图中还可看出, 新稳态的液塞波动频率与流量瞬变前基本相同, 只是瞬变后的波动幅度较大. 与流量瞬变的恢复时间相对应, 压差信号的恢复时间对于 DP1 和 DP2 分别为 50.79 s 和 56.54 s. 在压差信号的恢复期间内, 液塞波动频率明显高于瞬变前后稳态的液塞波动频率, 图中还表明, 随距离的增大, 沿线的压差值增大, 压差恢复期内的液塞频率升高, 段塞发展得更剧烈. 这是因为气量增加导致管线中产生较大的加速压降, 加速压降沿管线递增, 从而造成压差信号沿管线递增的现象.

对气量增加过程的压差信号 (DP2) 进行统计

分析表明, 其概率密度分布呈对数正态分布 [见图 8 (a)], 这与气量增加过程压力信号的概率密度分布呈三峰分布不同, 与流量稳定时压差波动的概率密度呈正态分布 [见图 9 (a)] 也不同. 与压力信号的功率谱相比较, 压差信号功率谱 [见图 8 (b)] 的频率波动范围更窄 (0~3 Hz)、幅值较小 (0~28). 压差信号的功率谱也与流量稳定时不同, 流量稳定时压差信号功率谱的频率波动范围更小、幅值更小: 当 $Q_G=102.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时频率波动范围为 0~1.2 Hz、幅值为 0~17.5 [见图 9 (b)], 当 $Q_G=140.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时频率波动范围为 0~2 Hz、幅值为 0~25 (见图 10).



(a) probability density profile



(b) power spectrum profile

Fig. 8 Statistical figures of differential pressure profile ($Q_L=5.23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_{G1}=102.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_{G2}=140.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

以上统计分析说明, 气量增加瞬变过程已经改变了系统原有的波动特征, 从而使流动更趋复杂化.

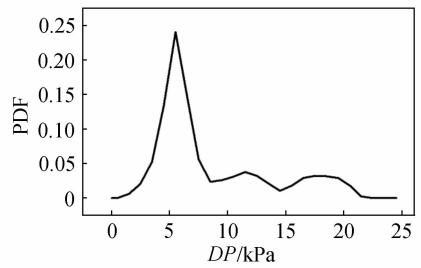
4 结 论

(1) 气量增加过程的压力过增值与气量的增加量、初终流动状态和距离有关. 本研究完善了压力过增值的计算关系式.

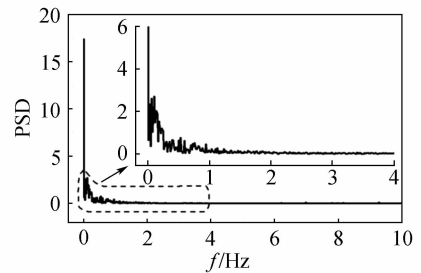
(2) 压力信号的概率密度呈典型的三峰分布, 分散性较强, 其功率谱密度的频率波动范围较窄、幅度较大.

(3) 压差信号的概率密度呈对数正态分布, 其

功率谱的频率波动范围更窄、幅值较小.



(a) probability density profile



(b) power spectrum profile

Fig. 9 Statistical figures of differential pressure profile ($Q_L=5.23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_G=102.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

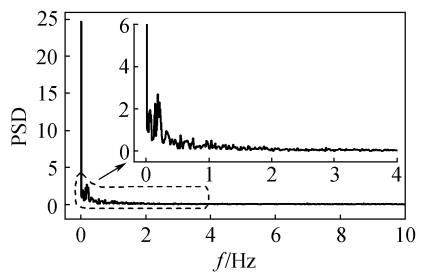


Fig. 10 Power spectrum profile of differential pressure profile

($Q_L=5.23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $Q_G=140.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

符 号 说 明

a, b, c ——回归方程系数

DP ——压差, kPa

d ——管径, m

f ——频率, Hz

L ——压力传感器间距, m

Q_G, Q_L ——分别为气、液流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

PDF——概率密度分布

PSD——功率谱密度

p ——压力 (表压), kPa

Δp ——压力过增值, kPa

t ——时间, s

$U_{GS,1}, U_{GS,2}$ ——分别为气量增加前、后气相折算速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

U_{ls} ——液相折算速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

U_w ——压力波速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

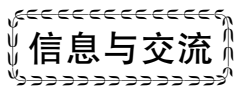
x ——距管道入口的距离, m

ρ ——水的密度 (取 $\rho=1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

τ ——滞后时间, s

References

- 1 He Limin, Guo Liejin, Chen Xuejun, Chen Zhenyu, Kou Jie. An Experimental Study of the Flowrate Transients in Slug Flow. *Chinese J. Chem. Eng.*, 2002, **10** (4): 396—403
- 2 Sakaguchi T, Akagawa K, Hamaguchi H, Ashiwake N. Transient Behaviour of Air-Water Two-phase Flow in a Horizontal Tube. In: Winter Annual Meeting of Heat Transfer Division ASME. Detroit, 1973. 11—15
- 3 Caussade B, Fabre J. Unsteady Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. In: European Two-phase Flow Group Meeting. Trondheim, 1987. 1—4
- 4 Minami K. Transient Flow and Pigging Dynamics in Two-phase Pipelines: [dissertation]. Tulsa: University of Tulsa, 1991
- 5 King M J S, Hale C P, Mendes-Tatsis M A, Hewitt G F. An Experimental Investigation of the Effect of Flowrate Transients Within Slug Flow Regime in Horizontal Pipes. In: The 7th International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels. Harrogate, 1996. 16—18
- 6 King M J S, Hale C P, Lawrence C J, Hewitt G F. Characteristics of Flowrate Transients in Slug Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 1998, **24** (8): 825—854
- 7 Lin Honghua (林洪桦). Data Processing of Dynamic Measurement (动态测试数据处理). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995



石油和化工行业发展形势良好

尽管统计数字还没有正式出来,但上半年我国石油和化工行业产销两旺的势头已成定局:生产和需求稳定增长、产品价格整体上扬、进出口贸易持续扩大、经济效益随之提高;产值、销售收入、利润、税金等经济指标全面“飘红”。

世界经济的复苏和国内宏观经济环境的持续走好为石化行业的快速发展奠定了基础,同时,作为基础原材料行业,其相关产业如轻工、纺织、房地产、电子电信、建材、汽车等工业的快速发展所形成的强劲的拉动作用也相当重要。今年 1~5 月份,全国石油和化工行业实现现价工业总产值 9093.4 亿元,同比增长 23.2%;销售收入 8810.5 亿元,同比增长 25.2%,产销率达到 98.12%,同比提高 0.49 个百分点;利润总额达到 1013.1 亿元,同比增长 32.3%;税金总额为 572.8 亿元,同比增长 24.9%;同时前 5 个月全行业进出口贸易总额达到 586.2 亿美元,同比增长 31.7%。

行业产品结构调整继续得到改善,1~5 月份实现新产品产值 305.4 亿元,同比增长 24.6%。柴油比有较大提高,由去年的 1.76:1 提高到 1.89:1;化学农药结构继续向合理化方向发展,杀虫剂比重下降,杀菌剂、除草剂比重上升;轮胎外胎、子午线轮胎的比重也比去年同期提高了 1.1 个百分点。

专家预计,石油和化工行业现价产值可能达到 22230 亿元,比上年增长 20.8%;产品销售收入 21910 亿元,比上年增长 21.7%;利润总额 2210 亿元,比上年增长 25.3%;税金总额 1320 亿元,比上年增长 17.3%。

(摘自:中国化工信息网)