

毛细管流量系数实验研究

周 汉 申

(航空航天部11所)

摘 要: 在文献[1]的基础上,进一步阐述了毛细管的长径比、进口条件、转弯角等对毛细管流量系数的影响及克服的方法。还讨论了单根毛细管组成的喷注器与多根毛细管组成的喷注器流量系数的差别及热试车对喷注器流量系数的影响。

主题词: 火箭发动机, 喷射器, 毛细管, 流量系数, 流阻

EXPERIMENT ON CAPILLARY FLOW COEFFICIENT

Zhou Hanshen

(The 11st Research Institute)

Abstract: By experiment, the effect of length/diameter ratio, inlet configuration, and bend angle on the capillary flow coefficient was investigated and some methods for improving flow were presented. The difference in flow coefficient between single-pipe injector and multiple-pipe injector and the effect of firing test on the capillary flow coefficient were discussed in the paper

Keywords: Rocket engine, Injector, capillary tube, Flow coefficient, Flow resistant

1 概 述

早期的单组元催化分解发动机,喷注器集液腔紧靠着高温的喷注面,脉冲工作的发动机再起时,推进剂遇到高温的集液腔发生剧烈的热分解而爆炸。用直径小长径比大因而热阻大的毛细管代替喷孔或作集液腔到高温喷注面的供应管,能大大降低喷注面传给集液腔的热量,提高了喷注器的抗热能力及可靠性。实验得出:用外径0.8mm,长径比30~40的毛细管,集液腔温升仅75℃左右。

本文通过实验,得出了毛细管的长径比、进口条件、转弯角等对毛细管流量系数的影响及克服的方法。还通过大量实验,统计出单根毛细管组成的喷注器与多根毛细管组成的喷注器流量系数的差别。为喷注器的设计提供了可靠的实验数据。

2 长径比及压降对毛细管流量系数的影响

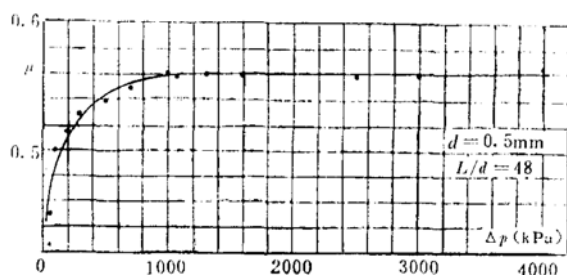


图1 流量系数与压降的关系

流体在短孔中流动时,当压降增大,常出现气蚀现象,随着压降的继续增加会产生流量系数跳跃式下降^[1]。实验得出:内径 $d=0.5\text{mm}$, $L/d=48$ 的毛细管,压降增至 3620kPa ,而未出现流量系数的跳跃。并且看出:在压降 300kPa 以前,流量系数随压降增加而迅速增加;大于这个值以后,流量系数随压降增加趋于平缓,最后趋于一常数(图1)。

流体在毛细管内流动,用于毛细管内壁的摩擦力及流体的粘性作用,在管子内壁形成一层附面层,减小了有效流通面积。压降增加则流速增加,由于管内流体强烈的质量交换,附面层迅速减薄,流通面积增加因而流量系数增加。在低压降下(小于 300kPa),压降增加,曲线陡峭上升。当压降继续增加,这时,由于近壁层摩擦力增加,附面层的附着力增加。因此,附面层减薄趋于平缓,最后几乎保持一常数,流量系数也趋于一常数。

喷孔长径比对流量系数的影响有两种情况:

(1) 当喷孔内产生汽蚀流动时, L/d 增加流量系数增加^[1], 原因是 L/d 增加流阻增加而抑制了汽蚀的扩张。当 L/d 增至某值时, 汽蚀消失。 L/d 继续增加则流量系数开始下降。因此, 曲线有一个极值点。在极值点左侧(汽蚀区), 流量系数随 L/d 增加而上升; 在极值点右侧(非汽蚀区), 流量系数随 L/d 增加而下降。

(2) 当流体在喷孔内处于非汽蚀流动时, 则流量系数永远随 L/d 增加而下降, 原因是 L/d 增加, 沿程摩擦增加。单组元催化分解发动机上用的毛细管, L/d 都相当大, 在目前的发动机压降范围内, 都处于非汽蚀流动(图2)

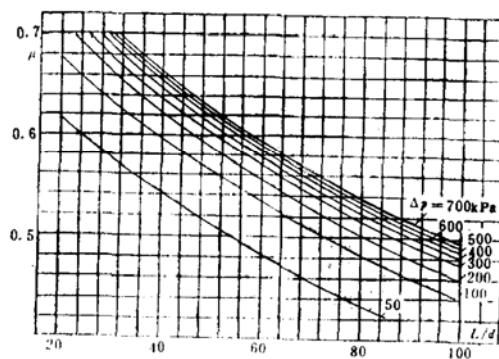


图2 流量系数与长径比的关系

3 进口条件对毛细管流量系数的影响

3.1 毛细管端面凹入集液腔平面

实验件由毛细管与集液腔组成(图3b)。喷注器集液腔平面钻有一个与毛细管配合的直径为 0.8mm 的孔, 孔两端打钝锐边 $R \approx 0.2\text{mm}$ (模拟产品实际状态)。毛细管长 39mm , 内径 0.5mm , 外径 0.8mm 。毛细管与集液腔用橡皮垫密封。

先做毛细管端面与集液腔平面齐平的液流实验。结束后,保证边界条件不变的条件下马上进行毛细管端面凹入集液腔平面深度 $b' = 1\text{mm}$ 的液流实验。实验结果列表 1。

表 1 毛细管端面齐面及凹入集液腔平面的流量系数

Δp (kPa)	98	196	294	392
μ				
$b' = 0\text{ mm}$	0.411	0.449	0.462	0.473
$b' = 1\text{ mm}$	0.418	0.458	0.472	0.489

可以看出,毛细管凹入集液腔平面,流量系数增加。这是因为凹入后,集液腔小孔起了导向作用,使流体进口条件改善。但毛细管端面低于集液腔平面给钎焊带来困难,常造成因钎焊料漫流将毛细管孔堵塞。

3.2 毛细管端面凸出集液腔平面

表 2 毛细管端面凸出集液腔平面的流量系数

$b = 0$	1.0	2.0	3.0
$b/d = 0$	2.174	4.348	6.522
$\mu = 0.508$	0.503	0.501	0.503

过 0.5mm (过高会造成滤网装配困难),这样,不但不会过多地增加进口摩阻,而且减少甚至杜绝了因钎焊料漫流而造成的堵孔现象。

3.3 毛细管端面几何形状

实验用毛细管 3 根,一端为锐边进口,一端为圆弧进口,这样便于在其他条件相同的条件下

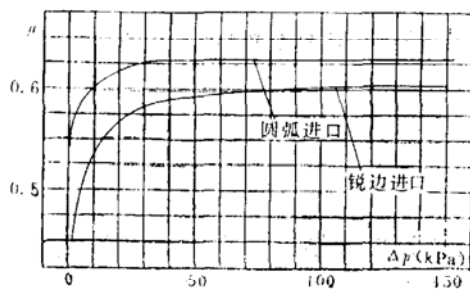
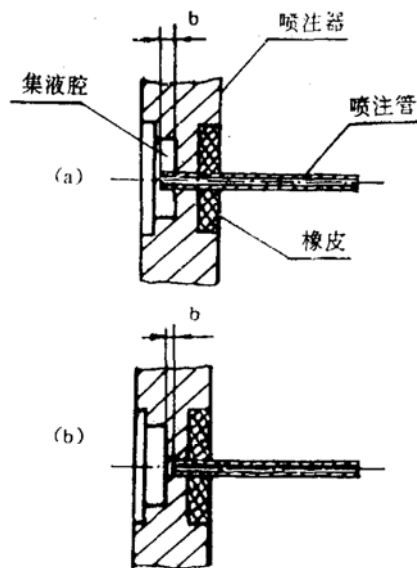


图 4 毛细管流量系数与压降的关系



(a) 毛细管端面凸出集液腔平面

(b) 毛细管端面凹入集液腔平面

图 3 流体进口示意图

毛细管端面凸出集液腔平面 (图 3a), 对流量系数的影响取决于 b/d 。据文献 [2] 介绍: b/d 对摩阻的影响只在 $b/d \approx 0.5$ 以前才表现出来。当 b/d 大于 0.5 时, 摩阻系数为常数。实验得出 $b/d = 0 \sim 6.522$ 范围内, 流量系数几乎不变 (表 2)。

试验结果告诉我们: 在组装喷嘴器时, 毛细管端面宜凸出集液腔平面, 但不能超

过 0.5mm (过高会造成滤网装配困难), 这样, 不但不会过多地增加进口摩阻, 而且减少甚至杜绝了因钎焊料漫流而造成的堵孔现象。

试验结果告诉我们: 在组装喷嘴器时, 毛细管端面宜凸出集液腔平面, 但不能超过 0.5mm (过高会造成滤网装配困难), 这样, 不但不会过多地增加进口摩阻, 而且减少甚至杜绝了因钎焊料漫流而造成的堵孔现象。

试验结果告诉我们: 在组装喷嘴器时, 毛细管端面宜凸出集液腔平面, 但不能超过 0.5mm (过高会造成滤网装配困难), 这样, 不但不会过多地增加进口摩阻, 而且减少甚至杜绝了因钎焊料漫流而造成的堵孔现象。

表3 弯管和直管流量系数

编号	d mm	l/d	R mm	α 度	$\Delta p=98$ (kPa)		196		294		392		490		588		686	
					直管	弯管	直	弯	直	弯	直	弯	直	弯	直	弯	直	弯
1	0.970	165		$2 \times 90^*$	0.348	0.348	0.362	0.365	0.371	0.371	0.378	0.375	0.383	0.379	0.387	0.382	0.390	0.387
2	0.970	124	31	113	0.355	0.411	0.411	0.421	0.419	0.428	0.425	0.433	0.431	0.436	0.437	0.444	0.440	0.445
3	0.970	124	14/22**	114/ 123**	0.401	0.411	0.434	0.428	0.435	0.435	0.442	0.438	0.450	0.444	0.454	0.448	0.456	0.452
4	0.970	124	17	55	0.410	0.403	0.427	0.420	0.435	0.426	0.444	0.434	0.453	0.439	0.458	0.446	0.460	0.444
5	0.974	93	16/16	2×135	0.402	0.450	0.429	0.464	0.473	0.473	0.484	0.478	0.486	0.481	0.492	0.485	0.492	0.459
6	0.964	106	9/15	2×118	0.378	0.429	0.444	0.444	0.453	0.452	0.458	0.455	0.464	0.465	0.468	0.466	0.472	0.465
7	0.970	82	13	2×38	0.443	0.447	0.54	0.466	0.511	0.473	0.516	0.476	0.523	0.482	0.527	0.484	0.542	0.487
8	0.610	164	15/15	2×105	0.346	0.291	0.337	0.337	0.338	0.346	0.342	0.348	0.344	0.352	0.349	0.354	0.348	0.357
9	0.610	98	12/15	125/140	0.447	0.415	0.509	0.458	0.471	0.465	0.458	0.464	0.459	0.464	0.462	0.465	0.462	0.464
10	0.520	195	12/12	2×100	0.299	0.262	0.314	0.368	0.317	0.317	0.318	0.329	0.326	0.331	0.329	0.336	0.330	0.336
11	0.520	154	12/12	2×110	0.336	0.254	0.336	0.272	0.341	0.284	0.349	0.281	0.352	0.290	0.357	0.310	0.358	0.377
12	0.510	78	7/13	2×125	0.437	0.349	0.484	0.384	0.453	0.403	0.454	0.412	0.449	0.412	0.452	0.427	0.457	0.421
13	0.480	62	3.5	107	0.509	0.459	0.580	0.516	0.605	0.543	0.591	0.556	0.574	0.555	0.559	0.556	0.556	0.551
14	0.500	60	4	107	0.505	0.462	0.527	0.519	0.529	0.525	0.522	0.536	0.515	0.537	0.515	0.542	0.516	0.542
15	0.470	110	8/11	2×130	0.344	0.302	0.377	0.342	0.380	0.362	0.378	0.366	0.383	0.373	0.386	0.376	0.392	0.379
16	0.460	133	8.5/12	2×115	0.348	0.298	0.364	0.340	0.356	0.355	0.361	0.361	0.365	0.367	0.374	0.372	0.375	0.373

注: * 2×90 表示转两个90°角; ** 14/22、114/123: 分子表示 $R=14$, 对应角 $\alpha=114^\circ$; 分母表示 $R=22$, 对应角 $\alpha=123^\circ$

面的圆弧半径或几何形状有轻微的差异便会导致流量系数较大的波动。而锐边进口的毛细管,由于各根管子的锐边及几何形状容易保持一致,因而流量系数散差小。实验还发现:用电解磨床磨出的毛细管端面,多为圆弧状,各根之间流量系数散差大。而用线切割加工的毛细管,由于它能较好地保证锐边及几何形状一致性,流量系数散差小。因此,单组元催化分解发动机的喷注器,推荐用线切割的具有锐边的毛细管。

4 转弯角对流量系数的影响

由于热补偿及喷注器结构工艺的需要,毛细管常有“S”形弯曲。实验用转弯角从 $38^\circ \sim 140^\circ$,转弯半径从3.5mm变至31mm的毛细管16根。

先作直管液流实验,再将毛细管弯曲作实验。这样能保证在其他条件相同时得出流体在毛细管中的转弯摩阻,实验结果列于表3。

流体方向发生改变时,由于惯性力作用,流体的一面脱壁产生涡流区,而另一面则受压缩后产生突然扩大。因此,流体的转弯压力损失主要由涡流损失及流体再扩大损失组成。由于毛细管内径小,相对曲率半径一般很大,转弯时流体不易脱壁,因此,转弯损失很小。

实验得出:弯管流量系数有60.7%的数据小于直管,这说明流体在毛细管内存在转弯压力损失;有39.3%的弯管流量系数大于及等于直管,这是由于测试时随机误差造成的。也就是说,正因为流体在毛细管内转弯损失很小,才有可能因随机误差引起弯曲后的流量系数大于或等于直管流量系数的现象。

5 单根与多根毛细管组成的喷注器流量系数的差别

单根毛细管及多根毛细管组成的喷注器共进行573台液流试验。其中9根毛细管的286台毛细管内径0.5mm,长径比 $L/d=60$;单根毛细管的284台,毛细管内径0.5mm, $L/d=48$ 。

实验得出:单根毛细管组成的喷注器流量系数散差比9根的喷注器大(图5)。

影响喷注器流量系数的因素很多,如毛细管内径公差,端面几何形状、内孔清洁程度、钎焊时焊料漫流堵孔等等将导致同一批喷注器的流量系数散差较大。

单根毛细管组成的喷注器对这些因素特别敏感,各台间流量系数变化较大。9根毛细管的喷注流,虽然影响的因素相同,但由于多根毛细管之间不同因素的互相补偿,特别是内径公差的互相补偿,因此,流量系数的散差比单根的喷注器小。

6 热试车对喷注器流量系数的影响

发动机热试车后的喷注器进行了125台液流实验。实验得出:60%的喷注器流量系数大于热试车前的喷注器。原因有二:一是

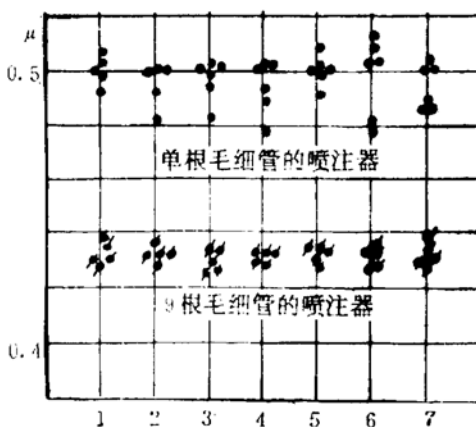


图5 喷注器流量系数星布图

液流试验系统存在误差；二是因毛细管内存在油污引起的。拉制钢管时，为减小管子内壁与心棒的摩擦力，管子内孔用机油润滑。因此，毛细管内存在油污。对孔径小（一般内径 $d=0.4\sim 1\text{mm}$ ），长径比又大的毛细管，普通的清洗工艺是很难将油污清洗干净的。这些油污经过喷注器高温钎焊后变成燃烧产物附着在管子内壁，液流实验流体很难将它带出。在热试车中，由于发动机的压力脉动，大的压力尖峰作用及热起动时高温的毛细管骤然受低温的推进剂的热冲击，使产物脱落被推进剂带出毛细管，流通面积增大因而流量系数增加。

7 喷注管流阻

实验获得：流体在毛细管内的沿程摩阻用勃拉修斯公式计算更接近实验结果^[3]。对进口为锐边的毛细管，考虑到流体进出口损失，流阻用下式计算^[3]：

$$\Delta p_b = 5 \times 10^{-4} \rho \omega^2 (K + 0.3164l/Re^{0.25}d)$$

式中 $Re = \omega d/\nu$ ；

ω ——流体在毛细管内平均流速， m/s

l ——毛细管长度， cm ；

ρ ——流体密度， g/cm^3 ；

ν ——流体运动粘性系数， m^2/s ；

d ——毛细管内径， cm ；

K ——局部摩阻系数。当喷入大气或 D/d （ D 为喷入的容气当量直径）很大的容器时， $K=1.5$ ；当 D/d 较小，则根据 D^2/d^2 算出毛细管出口摩阻系数 ζ ，这时 $K=0.5+\zeta$ 。

参 考 文 献

- [1] 周汉申. 流体在喷孔中的流动特性分析. 推进技术, 1991 (3)
- [2] 依傑里奇 И Е著. 黄骏, 夏颇佑译. 水力摩阻. 电力工业出版社, 1957:31
- [3] 周汉申. 单组元催化分解发动机参数设计. 上海航天, 1990 (5)