

文章编号:1673-5005(2009)05-0124-06

气液旋流器的分离性能

金向红^{1,2}, 金有海¹, 王建军¹, 孙治谦¹, 陈新华¹

(1. 中国石油大学 多相流实验室, 山东 东营 257061; 2. 安徽理工大学 化工系, 安徽 淮南 232001)

摘要:旋流器内气液两相的分离过程是液滴离心沉降和碰撞聚结、破碎的复合过程。对液滴的聚结、破碎机制进行分析, 试验验证液相物性、流场强度对液滴聚结、破碎以及旋流器分离性能的影响。结果表明: 液相黏度对涡流场中液滴的破碎影响很大, 黏度增大分离效率上升; 湍流强度是导致旋流场液滴破碎的主动动力, 当流量达到一定值时, 高湍流强度导致液滴破碎, 分离效率随流量上升开始急剧下降; 液滴聚结、破碎过程对分离器压力降影响不大。

关键词:气液旋流分离器; 分离效率; 液滴; 团聚; 破碎

中图分类号:TQ 051. 8; TE 969 **文献标识码:**A

Separation performance of gas-liquid cyclone separator

JIN Xiang-hong^{1,2}, JIN You-hai¹, WANG Jian-jun¹, SUN Zhi-qian¹, CHEN Xin-hua¹

(1. Institute of Multiphase Flow in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Department of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The separation of gas-liquid two-phase flow in the cyclone separator is a compound process of centrifugal separation, coalescence and breakup of droplets. The mechanism of droplets coalescence and breakup were discussed. The effects of liquid viscosity and turbulence intensity on droplets coalescence, breakup and separation performance were proved by experiments. The experimental results show that the liquid viscosity has much effect on droplets breakup in vortex field, and the separation efficiency increases with the liquid viscosity increasing. The turbulence intensity is the main force which breaks up the droplets. When the flow rate is up to some extent, the high turbulence intensity breaks up the droplets, then the separation efficiency will decrease sharply. While the coalescence and breakup of droplets has little effect on pressure fall in cyclone separator.

Key words: gas-liquid cyclone separator; separation efficiency; liquid droplets; coalescence; breakup

传统上,旋流器内气液两相的分离过程只是从离心沉降来理解,但研究者在试验研究和工程应用中,发现,气液旋流分离器内流场是三维强旋湍流,在流场内分散液滴因气液两相的密度差而受到比较大的离心力,产生离心沉降,同时在湍流场内液滴之间又会产生剧烈的碰撞、团聚、破碎和扩散,因此气液两相的分离过程是旋流场中液滴离心沉降和碰撞聚结、破碎的复合过程。其分离性能不仅受液滴的离心沉降影响,还受湍流场中液滴间碰撞、团聚、破碎以及液相扩散的影响。试验表明,对于稀相气液两相流,液滴间的碰撞、团聚、破碎不仅与气液两相时

均流场有关,还与流场湍动强度、含液浓度以及分散液相的密度、黏度、表面张力等物性密切相关^[1-2],但受试验条件限制,目前对液滴聚结、破碎的机制认识还不透彻,单从试验和理论上还很难得出准确的解释^[3-7]。笔者通过试验考察稀相状态时液相黏度对气液旋流器分离性能的影响,并对三维强旋湍流中分散液滴的碰撞、团聚和破碎机制进行分析。

1 液滴在旋流场的聚结与破碎

1.1 液滴在旋流场的碰撞聚结

旋流器内部是三维强旋湍流场,其切向速度分

收稿日期:2008-12-08

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2006AA06Z224)

作者简介:金向红(1965-),男(汉族),河南驻马店人,副教授,博士,研究方向为多相流分离技术。

布近似地看作由内部的准强制涡和外圈的准自由涡组成的兰金涡,在准强制涡和准自由涡的交界面上切向速度最大。轴向速度分布外圈速度向下,内圈速度向上,即逆向内旋流,在两反向轴向速度的交界面存在一个0轴向速度,即存在一个零轴向速度包络面LZVV。旋流器内的径向速度相对较小^[8-11]。旋流过程中由于气液两相的密度差,液滴在离心力及重力作用下向筒壁迁移并向下沉降,即离心沉降。由于旋流器中液滴粒径不同而使得它们的离心沉降速度也不同,同时在准自由涡区,流体在径向上具有一定的角速度梯度,这样邻近径向位置的颗粒就有了碰撞的机会。

两颗液滴碰撞以后有两种可能,一是碰撞以后聚合,二是碰撞后两颗液滴分开。当小液滴碰撞时,如果促使液滴聚结的力超过液滴与气相间的界面张力,则两颗液滴将发生聚结,否则就会分开^[12-13],即液滴聚结的条件是

$$\sum F > \pi d_p \sigma \quad (1)$$

式中, d_p 为液滴直径; σ 为界面张力; $\sum F$ 为促使液滴聚结的各类力的合力。旋流场中作用在液滴上的力有离心力、曳力、重力、Magnus力、Saffman力、压力梯度力、虚假质量力和Basset力等,其中促使液滴径向聚结的主要因素是液滴在旋流场所受的离心力,即

$$F_{pi} = \frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_p - \rho_g) \frac{v_{pi}^2}{r} \quad (2)$$

式中, ρ_p 和 ρ_g 分别为液相、气相密度; v_{pi} 为液滴切向速度; r 为液滴位于旋流场的半径。

处于准自由涡的液滴,有一个自转角速度,由此造成垂直于液滴与流体相对速度方向的径向升力,称作Magnus力,表达式为

$$F_{pM} = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \Delta v |\bar{\varepsilon}_p - \bar{E}| \quad (3)$$

式中, Δv 为气液间的相对速度; $\bar{\varepsilon}_p$ 为液滴旋转角速度; \bar{E} 为流体涡量的一半。

同时考虑流场对液滴的径向曳力

$$F_{pS} = 3 \pi d_p \mu_g v_{pi} \quad (4)$$

式中, μ_g 为气相黏度。

忽略其他力的影响,可以得出液滴聚结的条件为

$$F_{pi} + F_{pM} - F_{pS} > \pi d_p \sigma \quad (5)$$

由式(5)可以看出:液滴切向速度越大,促使液滴聚结的力也越大;气液两相密度差越大促使液滴

聚结的力也越大;界面张力越小则液滴碰撞聚结的可能性越大。因此,旋流器内液滴的聚结应主要发生在切向速度较大的准自由涡区,并且随着小液滴聚结成成大液滴,液滴受到的离心力增加,进一步促进液滴的聚结,同时液滴的聚结也利于分离。由此可以看出,旋流器内液滴粒径的分布,在径向上由内向外越来越大。进入旋流器外围的大液滴大部分会到达筒壁,在筒壁上聚结形成液膜,并在重力作用下进入集液槽;少部分大液滴则会在近壁处流体强湍流度的作用下产生破碎,一部分到达筒壁,而部分破碎的小液滴有可能被再次带入内旋流。

1.2 液滴在旋流场的破碎

在气液旋流分离器中,气液两相间存在着速度差,这个速度差使高速气流绕过低速运动的液滴,这样在液滴的前后驻点就形成了压力差,这个压力差会使液滴发生变形,中心变薄、拉长甚至破裂。在高速湍气流中,液滴表面在气流湍动能作用下发生持续的压力脉动,液滴持续振荡,导致变形后液滴的进一步破碎。

研究发现,液滴的破碎主要与无量纲韦伯数 We 和昂色格数 Oh 有关。 We 数是气动力和表面张力在液滴表面产生的无因次压强比,前者压缩液滴表面使其变形破碎,后者反抗变形使其保持球状。其计算公式为

$$We = \rho_r \Delta v^2 d_p / \sigma \quad (6)$$

Oh 数表示黏性与表面张力之比,即

$$Oh = \mu_l / \sqrt{\rho_l \sigma d_p} \quad (7)$$

数值计算和试验结果都证明: We 数越大,液滴所受气动力与表面张力的内聚力之比越大,气流中的液滴越不稳定,越易于变形破碎; Oh 数越大,液滴越稳定,越不易变形破碎。根据 We 数和 Oh 数的定义可以看出,大液滴更易于变形破碎,气液两相间的速度差越大液滴越易破碎,而液相黏度越大,液滴越不易破碎,液相的黏性起到阻止液滴破碎的作用,这是因为液滴的黏性能够耗散周围的扰动能量。

对于气液旋流分离器,气液两相间的速度差并不大,其 We 数也不大,因此此时均速度差所形成的气动力并不是液滴破碎的主要动力,它一般是使液滴变形而不是破碎,而大的湍动能对变形液滴表面的剧烈扰动才是液滴破碎的主要动力。因此,当流场湍动强度不高时,液滴的破碎并不明显,增大流场湍动强度,会增加大液滴破碎的几率。同时,在低 We 数条件下,液体的黏度对液滴的破碎有很大的影响,液滴黏度越大,抗湍流扰动的能力也越强,液滴也越

不易破碎。

对旋流器内气相三维湍流场结构的 LDV 测定结果表明^[1,8-10],分离空间内切向湍流强度和轴向湍流强度具有类似的分布形态,并有同一数量级。在轴心处湍流强度最大,随着半径 r 增大,湍流强度急剧降低;随着半径 r 继续增大,湍流强度不再变化,趋于一定值;到达筒壁时,湍流强度再次急剧上升。因此,在分离空间,湍流强度分布是中心和边壁处高,而其他涡旋区低。

通过上面分析可以看出,旋流器中心部分的小液滴所受的离心力较小,而且湍动强度较大,聚结成大液滴的几率较小,所以这部分小液滴易于被上旋的内旋流带进排气管随气体排出,并降低分离效率。

随着旋流半径 r 增大,液滴离心力增大,促使液滴聚结的力也增大,液滴开始碰撞聚结,并且随着小液滴聚结成大液滴,液滴受到的离心力增加,将会进一步促进液滴的聚结,而且这时湍动强度较低,液滴破碎的几率较小。因此,液滴在这里主要是碰撞聚结。

当聚结的大液滴到达边壁处时,速度梯度急剧增加,湍流强度也急剧上升,液滴受到的气动压力和湍动扰动都会增加,加之大液滴的不稳定性,液滴破碎的几率大增,如果流动的湍流强度较大,将有部分液滴破碎成小液滴,这部分小液滴有可能随径向气流再次进入内旋流,从而降低分离效率^[1]。

2 试验装置与工质

2.1 试验工质

试验的目的是验证液体物性、湍流强度对气液旋流分离性能的影响,解释液滴在旋流场内聚结、破碎对分离性能的影响,因此采用了常温时水-空气、不同黏度的甘油水溶液-空气作为试验工质,进料的含液浓度控制在 10~30 g(液)/m³(空气)。试验空气流量范围在 30~110 m³/h。试验前采用旋转黏度计对甘油水溶液的黏度进行测定,根据试验要求分别配制了 10, 15, 20 mPa·s 的甘油水溶液,配制甘油-水溶液物性参数如表 1 所示。

表 1 甘油-水混合物物性参数
Table 1 Properties of discrete phase

甘油与水的 体积比	液体黏度 μ/(mPa·s)	液体密度 ρ/(g·cm ⁻³)
纯水	1	1
3.24: 1	10	1.199
3.66: 1	15	1.205
3.96: 1	20	1.208

从表中可以看出,水与甘油水溶液间有一定的密度差,而试验用的不同黏度的甘油水溶液的密度相差不大,甘油与水的体积比也相差不大,因此在分析试验结果时,可以不考虑密度差以及水的蒸发对分离性能的影响。

2.2 试验装置

试验采用负压操作,供风系统采用抽风机。试验时,在风机抽吸作用下,外部空气与雾化的气-液混合物从进口管一起进入分离器,在进料室充分混合雾化后进入导叶,在导叶作用下形成高速旋转流,在离心沉降和团聚的共同作用下,大液滴被甩到旋流器的边壁,并顺壁面向下进入集液槽,而气体则从上部排气管排出,经风机直接排空。

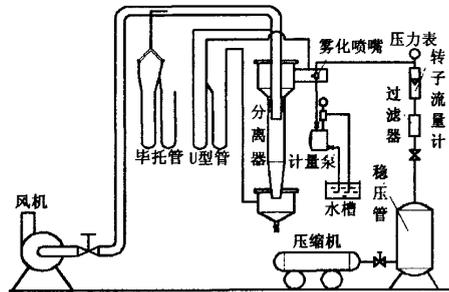


图 1 气液旋流分离试验流程简图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental flowsheet of gas-liquid cyclone separator

空气压缩机、缓冲罐、空气转子流量计、液体计量泵、内混式双流体喷嘴组成了雾化系统。压缩空气与计量泵提供的液体同时进入喷嘴,液体在压缩空气作用下通过喷嘴形成雾化。试验压缩空气压力为 0.18~0.22 MPa,压缩空气流量为 5 m³/h,试验前采用激光烟雾粒度分析仪对雾化液滴粒径进行了测定,粒径分布范围控制在 2~10 μm。

本试验采用轴流导叶式气液旋流分离器进行分离性能试验,分离器内径为 D_n = 100 mm,分离器全部采用有机玻璃制成。

3 试验结果分析

3.1 不同工质分离效率随流量的变化

图 2 为进料含液浓度为 20 g/m³,液相分别采用水(1 mPa·s)、甘油水溶液(10, 15, 20 mPa·s)时,分离效率随气体流量的变化情况。可以看出:对于一定的工质,在气体流量较小时,分离效率随流量的增加而上升,这是因为流速较小时,液滴的离心力较小,部分液滴来不及分离会被气体带出分离器,所以

分离效率较低,这时被带出旋流器的液滴主要来自短路流,随着流量增加,流速增大,液滴受的离心力也增大,被短路流带出排气管的液滴量降低,液滴的离心沉降和碰撞聚结都随之加强,加上这时流动的湍流强度并不高,所以这时液滴的破碎并不明显,因此分离效率会随之增大。

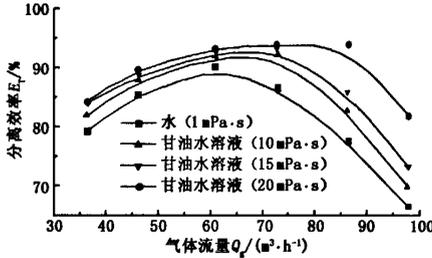


图2 不同工质分离效率随流量的变化

Fig.2 Effect of flow rate on separation efficiencies

当流量达到一定的值时,分离效率达到最高值,这时随着流量的继续增加,分离效率开始急剧下降。分离效率最大时的流量称为临界流量 Q_{cr} 。在试验中观察到,对于一定的工质,当流量达到 Q_{cr} 时,随着流量继续增加,排气管中开始出现一层液膜,并随流量的增加越来越厚,旋转上升,这说明在流速较高时,大量的小液滴被内旋气流带进排气管,这些小液滴一部分被直接带出排气管,一部分在排气管内高速旋转的气流中再次碰撞聚结,并润湿聚结到排气管壁上形成液膜,液膜在上旋气流作用下不断向上攀升,最后排出排气管。

通过试验证实了前面的推理,即当流量达到一定值时,随着流速的增加,流场的湍流强度加强,这时虽然液滴的离心力继续增加,但聚结后的大液滴在边壁处受到较大的气动力和湍流扰动,使大液滴破碎成小液滴,大量的小液滴被强旋流带进内旋流甚至排气管而无法分离,从而导致了分离效率的急剧下降。分析认为这部分小液滴来自两部分,少量是进口的短路流,大部分是大液滴破碎后形成的小液滴径向进入内旋流,因此减小短路流、降低大液滴的破碎是提高分离效率的有效途径。由此还说明,旋流器内部径向速度虽然相对较小,但对分离性能却有较大的影响,它是边壁处破碎的小液滴被裹带进内旋流的主要因素。

从图2还可以看出,在一定的含液浓度下,当流量一定时,不同的工质分离效率也不同,这说明液相物性对分离效率影响很大。当含液浓度、流量一定时,水的分离效率远低于甘油水溶液,这其中与水的

密度低于甘油水溶液,液滴所受的离心力较小,液滴的聚结几率也低于甘油水溶液有关,同时还与水滴的黏度(1 mPa · s)低于甘油水溶液有关。当液相是不同配比的甘油水溶液(10,15,20 mPa · s)时,尽管其密度相差不大,但其分离效率也有很大的不同,其中黏度高(20 mPa · s)的分离效率最大,低黏度(10 mPa · s)的最小。不同液相最大分离效率时的临界流量也不同,水的 Q_{cr} 约为 60 m³/h,10 mPa · s 和 15 mPa · s 的甘油水溶液的 Q_{cr} 差不多,约为 72 m³/h,20 mPa · s 的甘油水溶液的 Q_{cr} 约为 80 m³/h。这也验证了前面的分析,即低 We 数条件下,液体的黏度对液滴的破碎有很大的影响,液滴黏度越大,抗湍流扰动的能力越强,液滴也越不易破碎。所以低黏度的水滴在旋流场更容易破碎,其分离效率和临界流量都比较低,而高黏度的甘油水溶液液滴的抗破裂能力更强,所以随着液滴黏度的增加,其分离效率和临界流量都增大。

3.2 不同工质时流量对压力降的影响

图3为含液浓度 20 g/m³时,不同工质旋流器压力降随气体流量的变化情况。对于不同的液体,其压力降随流量的变化趋势基本相同。当流量一定时,其压力降差别不大,这说明当含液浓度比较低时,液相的物性对压力降的影响不大,液滴在流场中的团聚和破碎对整个分离过程压力降的影响可以忽略。因此,可以认为气液旋流分离器的压力降仅受旋流器结构和气相流量的影响。

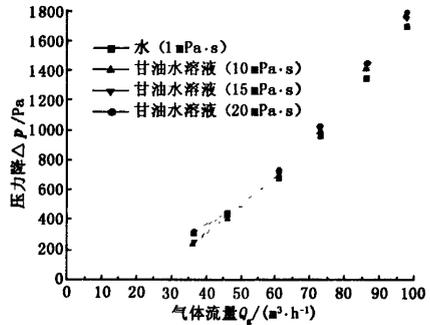


图3 不同工质压力降随流量的变化

Fig.3 Effect of flow rate on pressure fall

3.3 不同工质分离效率随含液浓度的变化

图4为气体流量 72.9 m³/h时,不同工质的分离效率随含液浓度的变化情况。可以看出,对于一定的液相,其分离效率随含液浓度的增大而上升。这是因为当流量一定时,含液浓度越大,流场中液滴的个数就越多,液滴碰撞聚结的机会也就越多,因此

小液滴聚结成大液滴并最后聚结到筒壁的可能性就越大。图中还显示,相同的含液浓度时,高黏度甘油水溶液的分效率最高,低黏度和低密度水的分效率最低,这和前面的结论一致。

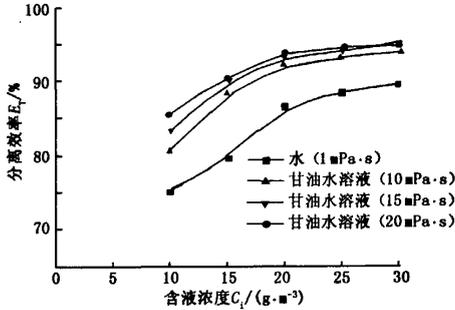


图4 不同工质分离效率随含液浓度的变化
Fig.4 Effect of inlet droplet concentrations on separation efficiencies

3.4 不同工质时含液浓度对压力降的影响

图5为气体流量72.9 m³/h时,不同工质条件下,旋流器压力降随含液浓度的变化情况。图中浓度为0时的压力降是不含液相的纯气流时的压力降。图5显示,气体流量一定时,对于一定的工质,压力降几乎不随含液浓度变化,因此可以认为,在低含液浓度时含液浓度变化对旋流器的压力降影响不大,近似等于纯气流时的压力降。同时可以看出,对于不同的工质,其压力降相差不大,因此液相物性对压力降影响也不大,这与前面的结论也一致。

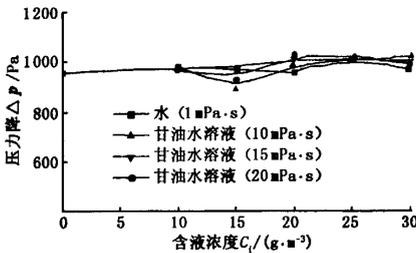


图5 不同工质压力降随含液浓度的变化
Fig.5 Effect of inlet droplet concentrations on pressure fall

4 结论

(1)气液旋流分离过程是旋流场中液滴离心沉降和碰撞聚结、破碎的复合过程。加强液滴的聚结,降低液滴的破碎几率是增大分离效率的有效途径。

(2)对于气液旋流分离器,We数较低,液体的黏度对液滴的破碎有很大的影响,液滴黏度越大越不易破碎,其分离效率和临界流量都越大。

(3)气液旋流分离过程有一个临界流量,当流量低于这一值时,流场湍流度较低,液滴破碎几率较低,分离效率随流量的增加而上升。当流量高于这一值后,筒壁处的剧烈湍流导致大量聚结后的液滴破碎,分离效率急剧下降。

(4)稀相时,液滴的碰撞聚结、破碎过程对旋流器压力降影响不大,因此物料中液相的物性以及含液浓度对气液旋流分离器的压力降影响可以忽略,压力降主要受旋流器结构以及流动速度影响。

参考文献:

- [1] 金有海,王建军,王宏伟,等. PSC型旋流管内气相流动的实验与数值研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(6):71-76.
JIN You-hai, WANG Jian-jun, WANG Hong-wei, et al. Experimental and numerical study of gas flow in PSC type cyclone tube[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(6):71-76.
- [2] 金向红,金有海,王振波,等. 气液旋流分离器排气管结构的实验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2):108-113.
JIN Xiang-hong, JIN You-hai, WANG Zhen-bo, et al. Experimental study on the geometry of gas outlet in gas-liquid cyclone separator [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(2):108-113.
- [3] WIERZBA A, TAKAYAMA K. Experimental investigation on liquid droplet breakup in a gas stream[J]. Rep Inst High Speed Mech,1987,53(382):1-99.
- [4] JOSRPH D D, BELANGER J, BEAVERS G S. Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high speed air stream [J]. Int J Multiphase Flow, 1999, 25 (6/7): 1263-1303.
- [5] MACK Clark M. Drop breakup in a turbulent flow-II. Experiments in a small mixing vessel [J]. Chemical Engineering Science, 1988,43(3):681-692.
- [6] BORISOV A A. On the mechanisms of droplet breakup and criteria of their existence [J]. Eng Phys, 1981, 40 (1):64-70.
- [7] 蔡斌,李磊,王照林. 液滴在气流中破碎的数值模拟 [J]. 工程热物理学报,2003,24(4):613-616.
CAI Bin, LI Lei, WANG Zhao-lin. Numerical analysis of liquid drop breakup in airflow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003,24(4):613-616.
- [8] HOEKSTRA A J, DERKSEN J J, VAN Den Akker H E A. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones [J]. Chemical Engineering

- Science, 1999, 54(1):2055-2065.
- [9] ERDAL F M. Local measurements and computational fluid dynamics simulations in a gas-liquid cylindrical cyclone separator[D]. Tulsa;The University of Tulsa, 2001.
- [10] 胡栋元,时铭显. 蜗壳式旋风分离器全空间三维时均流场的结构[J]. 化工学报, 2003, 54(4):549-556.
HU Li-yuan, SHI Ming-xian. Three-dimensional time-averaged flow structure in cyclone separator with volute inlet[J]. Journal of Chemical, 2003, 54(4):549-556.
- [11] 胡栋元,时铭显. 蜗壳式旋风分离器内的湍流特性(I):分离空间[J]. 化工学报, 2004, 55(3):345-350.
HU Li-yuan, SHI Ming-xian. Turbulence properties in cyclone separator with volute inlet(I): separation space [J]. Journal of Chemical, 2004, 55(3):345-350.
- [12] BLASS E, RAUTENBERG D. Coalescence of drops in liquids on inclined plates[J]. Ger Chem Eng, 1984, 7: 207-219.
- [13] MEON W, BLASS E. Coalescence on inclined plates in liquid[J]. Chem Eng Tech, 1999, 14(1):11-19.
- (编辑 韩国良)

(上接第118页)

- [11] 吴家龙. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [12] 赵玉成,张亚红,白长青,等. 固体火箭发动机模态分析的缩聚方法[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(2):98-100.
ZHAO Yu-cheng, ZHANG Ya-hong, BAI Chang-qing, et al. Modal analysis of solid rocket motors by means of a reduced method[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(2):98-100.
- [13] 朱安文,曲广吉,高耀南. 航天器结构动力模型修正中的缩聚方法[J]. 中国空间科学技术, 2003(2):6-10.
ZHU An-wen, QU Guang-ji, GAO Yao-nan. Matrix reduction method for updating dynamic model [J]. Chinese Space Science and Technology, 2003(2):6-10.
- (编辑 沈玉英)

(上接第123页)

- [14] 王清印,赵秀恒. C型关联分析的概念及性质[J]. 华中理工大学学报:自然科学版, 1999, 27(3):24-28.
WANG Qing-yin, ZHAO Xiu-heng. The relational analysis of C mode [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 1999, 27(3):24-28.
- [15] 王清印,郭立田. 广义关联分析方法研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2005, 33(8):32-36.
WANG Qing-yin, GUO Li-tian. Generalized relational analysis method [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(8):32-36.
- [16] 吕锋,刘翔,刘泉. 七种灰色系统关联度的比较研究[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 24(2):13-17.
LÜ Feng, LIU Xiang, LIU Quan. The theory of gray relative analysis and it's new research [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 24(2):13-17.
- [17] 唐伟勤,肖新平. 灰关联分析在复杂系统多层次评估中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28(2):36-40.
TANG Wei-qin, XIAO Xin-ping. Application of grey relation analysis to multi-level evaluation in complex systems [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 28(2):36-40.
- [18] 党耀国,刘思峰,刘斌. 多指标区间数关联决策模型的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 26(3):26-31.
DANG Yao-guo, LIU Si-feng, LIU Bin. Study on incidence decision making model of multi-attribute interval number [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 26(3):26-31.
- [19] 刘思峰,郭天榜,党耀国. 灰色系统理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 1999:40-77.
- (编辑 沈玉英)