

喷射压力对喷雾的影响

曹建明,李雪莉,刘朋,罗明,苏海东,陈文凤

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘要:采用闪光摄影技术,在射流试验台上进行了较低喷射压力范围内瑞利模式液膜射流碎裂过程试验,在喷雾特性试验台上进行了较高喷射压力范围内柴油雾化质量的试验,对 2 种试验结果进行了比较分析。结果表明:由小宽厚比喷嘴喷射出的瑞利模式低速液膜射流碎裂长度随喷射流速的增大几乎呈直线增加,与喷射压力没有直接关系,喷射压力只有通过喷射流速才对射流碎裂长度产生影响,喷射流速是射流碎裂过程中的稳定因素;雾化模式的喷雾质量随喷射压力的增大显著改善,喷射压力和喷射流速转变成成为液体碎裂的不稳定因素。

关键词:汽车工程;喷射压力;瑞利模式;雾化模式;射流碎裂长度

中图分类号:U464.11

文献标志码:A

Effects of injecting pressure on a spray

CAO Jian-ming, LI Xue-li, LIU Peng, LUO Ming, SU Hai-dong, CHEN Wen-feng

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: A Rayleigh mode experiment of liquid film breakup process in lower injecting pressure region on liquid jet injecting test device, and an atomization mode experiment of diesel spray quality in higher pressure region on spray characteristics test device were conducted by photograph technique. A comparison analysis was made between above two experiments. The results indicate that the breakup lengths of a liquid film injected from a smaller aspect ratio nozzle with lower velocities almost linear prolong with injecting velocities increase, and no direct concern with injecting pressures in Rayleigh region. Injecting pressures effects on the liquid jet breakup lengths are only produced by injecting velocities. Injecting velocity is a stable factor on liquid jet breakup process. The spray quality is significantly improved with injecting pressure increase in atomization region, and injecting pressure and velocity become an unstable factor in liquid jet breakup process. 4 tabs, 9 figs, 19 refs.

Key words: automobile engineering; injecting pressure; Rayleigh mode; atomization mode; breakup lengths of liquid jet

0 引言

随着喷射压力和喷射流速的提高,液体喷射雾

化逐步呈现瑞利模式、断续模式和雾化模式^[1-2]。瑞利模式喷射射流的碎裂长度较长,表面波形较为规则,气液交界面清晰;断续模式喷射射流碎裂长度缩

短,接近喷嘴出口,表面波粗糙不平,波形不规则,射流下游液束碎裂成片状或线状,并有离散液滴形成;雾化模式的射流碎裂长度极短,表面波只能维持不足一个波长,且波的表面极其粗糙,射流几乎是一出喷嘴出口,就碎裂成为大量的细小液滴。目前对射流表面波碎裂机理的研究多局限于瑞利模式,理论研究采用线性稳定性分析和非线性稳定性分析,模拟喷射表面波的波形,预测表面波的碎裂长度。Lefebvre^[3]、Li^[4-5]和史绍熙^[6-9]等应用线性稳定性理论对圆射流的碎裂机理进行了研究;Lin等^[10]、Li等^[11-13]和Cao等^[14]应用线性稳定性理论研究了平面液膜的碎裂过程;Rangel等^[15]、Antonio等^[16]、Jazayeri等^[17]、Tharakan等^[18]应用非线性稳定性理论研究了平面液膜的碎裂过程;Cao^[2]应用线性稳定性理论对环状液膜的碎裂机理进行了研究;对雾化模式下雾化质量的理论和试验研究很多,作者曾进行过回顾与总结^[19]。在射流碎裂机理的研究中,尽管喷射流速对碎裂长度的影响探讨较多,但喷射压力对瑞利模式射流碎裂长度与雾化模式雾化质量的影响的比较研究的报道还没有见到。作者在进行小宽厚比喷嘴瑞利模式低速射流碎裂长度的试验研究中发现,射流碎裂长度随喷射流速的增大几乎呈直线增加,与喷射压力没有直接关系;喷射压力只有通过喷射流速才对射流碎裂长度产生影响,喷射流速是射流碎裂过程中的稳定因素,这与喷射压力的提高是改善雾化质量的促进因素这一传统观念正相反。因此,本文进行了不同喷射压力下雾化模式雾化质量的比较试验,以便明确不同喷射压力对瑞利模式射流碎裂长度和雾化模式雾化质量的影响。

1 喷射压力对瑞利模式射流碎裂长度的影响

1.1 射流碎裂长度试验

试验在水射流试验台上进行,目的是测量不同喷射压力下水射流的碎裂长度。水射流试验台由空气瓶、储水罐、压力表、玻璃转子流量计、平面狭缝喷嘴、阀门和管线等组成,如图1所示。空气瓶通向压力储水罐,对罐内水加压,试验设定的喷射压力为0.2 MPa和0.4 MPa,气体压力表的量程为1.6 MPa;玻璃转子流量计测量压力储水罐向喷嘴提供的水流量,水流量量程为160~1 600 L/h,经过换算,可测量1~5 m/s较低流速的水流;平面狭缝喷嘴是根据加拿大维多利亚大学的喷嘴仿制而成的,内部流道呈流线形,打磨光滑,并在流道内部设置导

流管束,流体流动平稳、阻力小,如图2所示。喷嘴出口尺寸为2 mm×40 mm,宽厚比为20。采用闪光摄影技术拍摄水射流的碎裂长度,成像系统为一台佳能EOS30D数码单反照相机,标准镜头,800万像素,高分辨率CCD。附件还有佳能EOS30D数码单反照相机专用快门线、三脚架、黑色PVC背景板和银燕BY-450AFD型闪光灯等。进行拍摄时,在喷嘴出口处安装标杆,粘贴钢标尺,以便显示射流的碎裂长度。

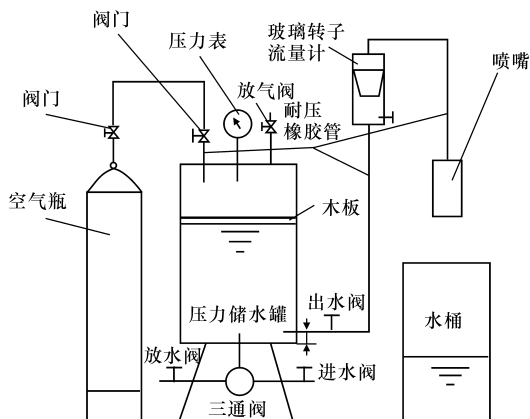


图1 水射流试验台的布置

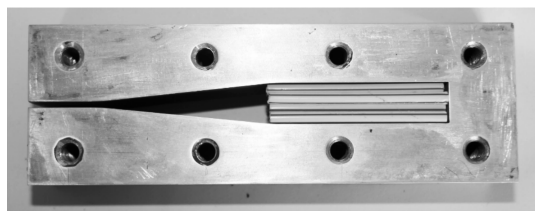
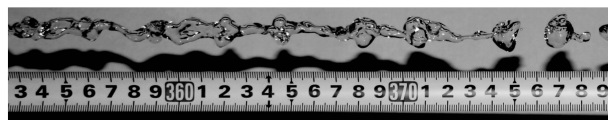


图2 平面狭缝喷嘴

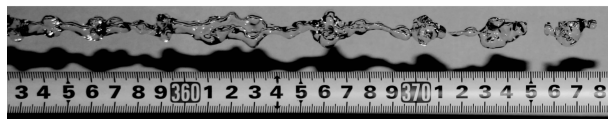
试验设置了喷射压力为0.2 MPa、喷射流速为1、2、3 m/s和喷射压力为0.4 MPa、喷射流速为2、3、4、5 m/s,共8个试验工况点。在每个工况点拍摄了约50张照片,每种工况各照片的碎裂长度最多相差1个波长(这一现象在作者以前的研究中已被发现,详见文献[2])。为了更真实地反映各工况点的碎裂长度,可取所有照片碎裂长度的算数平均值作为该工况点的碎裂长度。碎裂长度数值是按照放置在射流边上的钢标尺的刻度直接读出的。需要说明的是,钢标尺是从3 m处剪断的,也就是说,测量是从喷嘴出口为3 m的位置开始的,因此,读数时应将300 cm作为原点,如图3(见下页)所示。

1.2 射流碎裂长度试验结果与分析

图4(见下页)所示为水射流的碎裂长度 L_b 随水流喷射流速 U_L 的变化关系。从图4可以看出,随着水流喷射流速的增大,水射流的碎裂长度几乎呈直线增大。这说明,对于小宽厚比喷嘴喷射的瑞



(a) 喷射压力0.2 MPa, 喷射流速2 m/s



(b) 喷射压力0.4 MPa, 喷射流速2 m/s

图3 水射流的碎裂

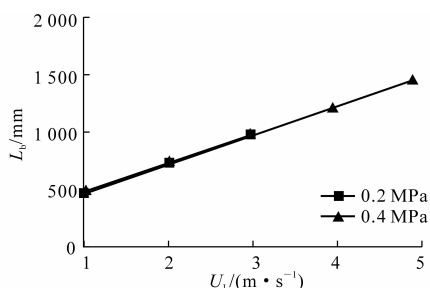


图4 水射流的碎裂长度随水流喷射流速的变化

利模式低速射流,增大喷射速度将使水膜的稳定性增大,不易碎裂;此外,也可能是由于液体的表面张力起作用的缘故。从图4还可以看出,喷射压力为0.2 MPa与0.4 MPa的曲线,在喷射速度为1~3 m/s范围内几乎重合,说明水射流的碎裂主要受喷射速度的影响,即与雷诺数和韦伯数密切相关,而与喷射压力没有直接关系,喷射压力仅通过喷射流速影响水射流的碎裂。

2 喷射压力对雾化模式雾化质量的影响

2.1 喷雾特性试验

柴油机喷嘴喷雾特性试验台布置如图5所示。试验台由手压喷油泵、喷油器、黑色光滑背景板、高分辨率数码相机和闪光灯等组成。喷油器为依维柯SOFIM8140.43柴油机用DSLA145P300型,5孔喷嘴,孔径为0.27 mm,原喷油器的启喷压力为24.8 MPa,喷油器内部油压的建立是通过压动手压喷油泵的手柄实现的。试验用油为0#柴油,实验室内使用空调,将室温控制在25℃,以保证两组试验用油的粘度不变。将柴油直接加注到手压喷油泵的油筒内,油筒通过接头连接到手压油泵,再通过高压油管与喷油器相连。喷油时,把4个喷孔用U形布帘遮住,只留1个喷孔,然后压动手压油泵手柄,完成一次喷射。照相机仍为佳能EOS30D数码单反照相机,由于原配标准镜头无法拍摄微米级的离散油滴,因此换用日本腾龙SPAF90MMF/2.8Di型微距镜头。该镜头可与佳能EOS30D数码单反照相

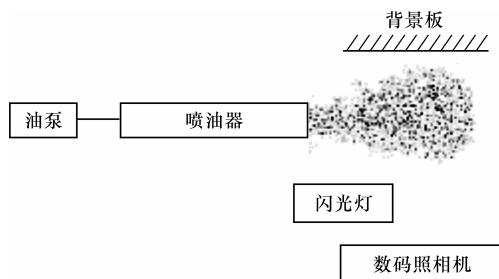


图5 喷雾特性试验台的布置

机匹配。设置黑色PVC背景板的目的是为了增大离散油滴与拍摄背景的色彩反差,增加图像清晰度。银燕BY-450AFD型闪光灯的闪光时间和闪光能量可调,闪光能量越大,闪光时间越长。经过调试,采用闪光能量较小的1/8 500 s作为闪光时间,近距离闪光。

试验的目的是对高、低喷射压力下雾化油滴索特平均直径(Sauter Mean Diameter)和尺寸分布进行比较。拟进行2种喷射压力(原喷油器的24.8 MPa和10 MPa)的试验:首先进行原喷油器24.8 MPa的试验,然后拆开喷油器,通过调换不同厚度的喷油器内针阀弹簧垫片,将启喷压力调整为10 MPa,再进行下一组试验。试验时的室内温度相同,所用喷油器和柴油相同,环境大气压力相同,因此只有一个影响因素:喷射压力改变了。

镜头改用日本腾龙SPAF90MMF/2.8Di微距镜头后,拍摄图像范围大幅度缩小,仅约为2 cm,以便捕捉细小的喷雾液滴颗粒。拍摄时使用外置闪光灯,采用焦距为2.8的特写近拍模式,照相机与背景之间的距离为10 cm,拍摄位置距喷嘴出口30 cm,黑白成像,背景采用黑色光滑平板,以增大图片的反差,便于读取微粒数据。照相机使用B门,全暗室闪光拍摄。数码相机拍摄便捷,可靠性高,易于对拍摄位置和参数进行调整,图像清晰,试验成本低,拍摄到的图片可以直接存入计算机中,图片格式规范,便于图片色差等的调整,以及读片和数据处理。

试验首先进行了标准丝的拍摄,以便于对油滴粒子的直径进行比较判读。经过3次测量,标准丝直径为35 μm,占5个像素点。因此1个像素点为7 μm,也就是说,采用现有设备和方法所能读取的最小颗粒直径为7 μm。拍摄的喷射压力为10 MPa和24.8 MPa的柴油粒子,如图6、图7(见下页)所示。获取的照片使用USB通用串行缆线从数码相机传递到计算机中,照片为RAW格式(又称为CR2格式)。这种格式拍摄出的照片清晰度极高,每张照片所占内存高达46.9 MB,经照相机的专用



图6 喷射压力为 10 MPa 的柴油喷雾粒子

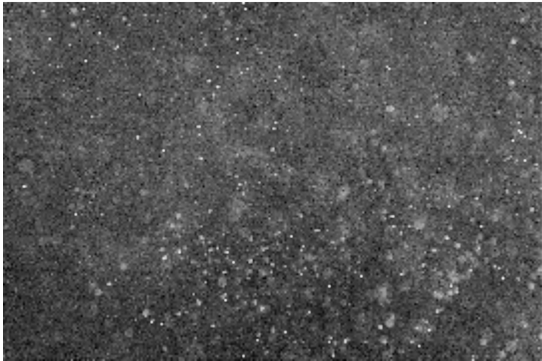


图7 喷射压力为 24.8 MPa 的柴油喷雾粒子

软件转换成可以在计算机上读取的 TIFF 格式照片。在近 300 幅照片中为每种喷射压力挑选 5 幅照片进行判读、统计分析。每张照片有 1 000 多个粒子,因此每种燃料的喷雾粒子样本大于 5 500 个粒子,试验结果在控制精度以内。试验结果采用人工判读,所有照片在同一位置选取同样大小的区域进行对比分析。选定判读区域后,先采用 Photoshop 软件进行图片处理,通过色阶处理、增强对比度、灰度拉伸等方法得到更加清晰、便于读取的粒子图像。将图像成倍放大,用标准丝定标,最后统计某一直径下粒子的数目和百分比分布。

2.2 喷雾特性试验结果与分析

2.2.1 喷雾锥角

用喷射白纸浸湿的方法测量得到各种喷射压力下的喷雾锥角,表 1 所示为喷射压力为 10 MPa 和 24.8 MPa 的喷雾锥角。由表 1 可以看出,随着喷射压力的减小,喷雾锥角明显变小,油束更加紧密,油滴在油束下游的散布范围较小。

表 1 喷雾锥角

喷射压力/MPa	10.0	24.8
喷雾锥角/(°)	15.4	21.5

2.2.2 雾化油滴的 Sauter 平均直径

喷雾液滴平均直径的定义是:设想一个液滴尺寸完全均匀一致的喷雾场,代替实际不均匀的喷雾

场,这个假想的均匀喷雾场的液滴直径称为平均直径。试验处理了 2 组照片,表 2 列出了 Sauter 平均直径 SMD 的处理结果。由表 2 可以看出,随着喷射压力的减小,Sauter 平均直径明显增大;喷射压力减小 60%,Sauter 平均直径增大了 43%。

表 2 雾化油滴的 Sauter 平均直径

喷射压力/MPa	10.0	24.8
Sauter 平均直径/ μm	103	59

2.2.3 雾化油滴的尺寸数目分布

试验给出了 10 MPa 和 24.8 MPa 喷射压力下柴油油滴的尺寸数目分布和累积体积分布,图 8 为喷雾油滴尺寸数目分布的比较,反映了液滴数目百分比 P_N 随液滴直径 D 的变化关系。从图 8 可以看出,10 MPa 喷射压力下的曲线峰值明显比 24.8 MPa 喷射压力下的低,说明 10 MPa 喷射压力下小颗粒的雾化油滴尺寸分布明显较少。在喷射的雾化区域,较高的喷射压力能够明显提高燃料的雾化效果。图 9 所示为 10 MPa 与 24.8 MPa 喷射压力下柴油油滴累积体积分布的比较,反映了液滴累积体积 V_c 随液滴直径 D 的变化关系。从图 9 可以看出,10 MPa 喷射压力下的曲线位于 24.8 MPa 喷射压力下曲线的下方。这说明,随着喷射压力的降低,到达某一直径的油滴累积体积明显减少,或者说,到达某一累积体积的油滴直径明显增大,大颗粒油滴的分布较多。

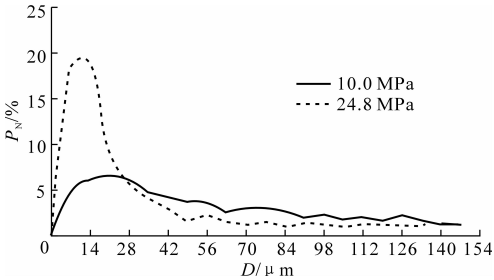


图 8 10 MPa 与 24.8 MPa 喷射压力下柴油油滴尺寸数目分布的比较

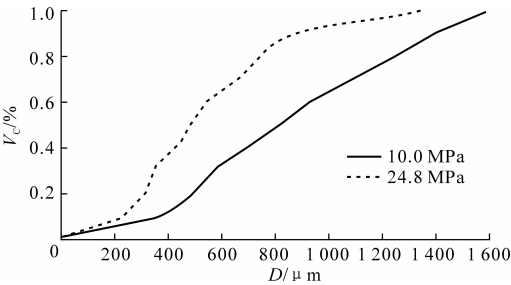


图 9 10 MPa 与 24.8 MPa 喷射压力下柴油油滴累积体积分布的比较

2.2.4 雾化油滴的特征直径和发散度

分布曲线中的特征直径对于液滴尺寸发散度的探讨很有价值。在液滴尺寸累积体积分布曲线中,特征直径代表某一直径以下的所有液滴的体积占全部液滴总体积的百分比。本文研究的特征直径是根据油滴尺寸的累积体积分布曲线图得到的,表 3 列出了 10 MPa 和 24.8 MPa 喷射压力下柴油油滴尺寸累积体积分布的特征直径。由表 3 可以看出,到达某一累积体积的油滴直径随喷射压力的降低而增大,最大油滴尺寸也随喷射压力的降低而增大。根据特征直径,可以求出喷雾油滴的发散范围。

表 3 雾化油滴的特征直径 μm

喷射压力/MPa	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$	$D_{0.999}$
10.0	357	826	1 414	1 610
24.8	231	476	896	1 351

注: $D_{0.1}$ 为液滴体积占全部液滴总体积 10%时对应的特征直径;其余以此类推。

表达液滴尺寸发散度最常用的指标是相对尺寸范围 Δ_s ,定义为

$$\Delta_s = \frac{D_{0.999} - D_{0.1}}{D_{0.5}} \tag{1}$$

式(1)划定了液滴直径相对于质量中值直径 $D_{0.5}$ 的范围。为了评价最大液滴直径的发散程度,定义了发散边界 Δ_b

$$\Delta_b = \frac{D_{0.999} - D_{0.1}}{D_{0.5}} \tag{2}$$

显然,它表示最大直径 $D_{0.999}$ 相对于质量中值直径 $D_{0.5}$ 的发散程度。

表 4 给出了 10 MPa 和 24.8 MPa 喷射压力下油滴的相对尺寸范围和发散边界。从表 4 可以看出,随着喷射压力的降低,雾化油滴的相对尺寸范围和发散边界都明显减小,说明雾化的均匀度提高。从雾化油滴尺寸数目分布的比较中(图 8)也可以看出,10 MPa 喷射压力下的曲线峰值明显比 24.8 MPa 的低,且曲线平缓,说明油滴尺寸的分布更加均匀。

表 4 雾化油滴的发散

喷射压力/MPa	Δ_s	Δ_b
10.0	1.28	0.95
24.8	1.40	1.84

3 结 语

(1)对于小宽厚比喷嘴喷射的瑞利模式低速水射流,射流的碎裂长度随喷射流速的增大几乎呈直线增加,喷射流速是水射流碎裂过程中的稳定因素,

水射流的碎裂与喷射压力没有直接关系,喷射压力只有通过喷射流速才会对水射流的碎裂过程产生一定的影响。

(2)在喷射的雾化模式下,随着喷射压力的减小,雾化油滴的喷雾锥角变小,Sauter 平均直径增大,油滴尺寸数目分布曲线的峰值降低,曲线平缓,累积体积分布曲线降低,达到某一累积体积的油滴尺寸增大,大颗粒油滴变多,特征直径增大,相对尺寸范围和发散边界变小;说明随着喷射压力的降低,雾化质量变差,但尺寸分布更加均匀;在该模式下,喷射压力和喷射流速转变成了射流碎裂过程的不稳定因素。

(3)雾化效果的好坏取决于液体喷射的模式,随着喷射压力或流速的增大,从小宽厚比喷嘴喷射瑞利模式低速射流的稳定性到雾化模式喷雾的不稳定性的过渡边界是今后需要研究的问题。

参考文献:
References:

[1] 曹建明. 喷雾学 [M],北京:机械工业出版社,2005.

[2] Cao J M. Theoretical and experimental study of atomization from an annular liquid sheet [J]. Journal of Automobile Engineering,2003,217(8):735-743.

[3] Lefebvre A H. Atomization and sprays [M]. New York:Hemisphere Press,1989.

[4] Li X G. Mechanism of atomization of a liquid jet [C]//ASME. Proceedings of Energy-Sources Technology Confonrence and Exhibition. New York: ASME,1995:113-120.

[5] Chen T B,Li X G. Liquid jet atomization in a compressible gas stream[J]. Journal of Propulsion and Power,1999,15(3):369-376.

[6] 史绍熙,杜 青,秦建荣,等. 液体圆射流破碎机理研究中的时间模式与空间模式 [J]. 内燃机学报,1999,17(3):205-210.

SHI Shao-xi,DU Qing,QIN Jian-rong,et al. Temporal mode and spatial mode in the study of liquid jet breakup [J]. Transaction of CSICE,1999,17(3):205-210.

[7] Shi S X. Unstable asymmetric modes of a liquid jet [J]. ASME Journal of Fluids Engineering,1999,121(2):379-383.

[8] 杜 青,史绍熙,刘 宁,等. 液体燃料圆射流最不稳定频率的理论分析(1):液体燃料圆射流的最不稳定频率及无量纲数的影响 [J]. 内燃机学报,2000,18(3):283-287.

DU Qing,SHI Shao-xi,LIU Ning,et al. A theoretical analysis of most frequency of a liquid fuel jet breakup (1):effects of dimensionless numbers on most unstable frequency [J]. Transaction of CSICE, 2000, 18 (3):283-287.

[9] 杜 青,史绍熙,刘 宁,等. 燃料圆射流最不稳定频率的理论分析(2):液体圆射流参数对最不稳定频率的影响及试验观察 [J]. 内燃机学报,2000,18(3): 288-292.

DU Qing,SHI Shao-xi,LIU Ning,et al. A theoretical analysis of most unstable frequency of a liquid fuel jet breakup (2):effects of injecting parameters on most unstable frequency and experimental observation [J]. Transaction of CSICE,2000,18(3):288-292.

[10] Lin S P,Lian Z W,Creighton B J. Absolute and convective instability of a liquid sheet [J]. Journal of Fluid Mechanics,1990,220(4):673-689.

[11] Li X G,Tankin R S. On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet [J]. Journal of Fluid Mechanics,1991,226(3):425-443.

[12] Li X G. On the instability of plane liquid sheets in two gas streams of unequal velocities [J]. Acta Mechanica,1994,106(1):137-156.

[13] Li X G. Spatial instability of plane liquid sheets [J].

.....

(上接第 90 页)

ZHOU Wei,LUO Shi-gui. Traffic conflict identification of road accident blackspots[J]. China Journal of Highway Transport,2000,13(1):81-86.

[10] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.

[11] Mao M Z,Chirwa E C. Application of grey model GM (1,1) to vehicle fatality risk estimation[J]. Technological Forecasting and Social Change,2006,73(5): 588-605.

[12] 谭冠军. GM(1,1)模型的背景值构造方法 and 应用 (I) [J]. 系统工程理论与实践,2000(4):98-103.

TAN Guan-jun. The structure method and application of background value in grey system GM(1,1) model (I) [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000(4):98-103.

[13] 郭应时,袁 伟,付 锐. 道路交通安全评价指标特性

Chemistry of Engineering and Science,1993,48(12): 2973-2981.

[14] Cao J M,Li X G. Stability of plane liquid sheets in compressible gas streams [J]. AIAA Journal of Propulsion Power,2000,16(4):623-627.

[15] Rangel R H,Sirignano W A. Nonlinear growth of Kelvin-Helmholtz instability:effect of surface tension and density ratio [J]. Physics of Fluids,1988,31(11): 1845-1855.

[16] Antonio L,Antonio G O,Cesar D. The instability growth leading to a liquid sheet breakup [J]. Physics of Fluids,1998,10(12):2188-2197.

[17] Jazayeri S A,Li X G. Nonlinear instability of plane liquid sheets [J]. Journal of Fluid Mechanics,2000, 406(1):281-308.

[18] Tharakan T,John,Ramamurthi K,et al. Nonlinear breakup of thin liquid sheets [J]. Acta Mechanica,2002, 156(1):29-46.

[19] 曹建明. 喷雾学研究的国际进展 [J]. 长安大学学报: 自然科学版,2005,25(1):82-87.

CAO Jian-ming. Review of international evolvement of spray investigation [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition,2005,25(1):82-87.

分析[J]. 公路交通科技,2006,23(5):102-105.

GUO Ying-shi,YUAN Wei,FU Rui. Research on characteristics of assessment indexes for road safety [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2006,23(5):102-105.

[14] Chang S C,Lai H C,Yu H C. A variable P value rolling grey forecasting model for Taiwan semiconductor industry production [J]. Technological Forecasting and Social Change,2005,72(5):623-640.

[15] 罗鄂湘,钱省三,李 锐. 可变参数动态灰色预测模型的建立与实证研究[J]. 上海理工大学学报,2006,28 (5):465-468.

LUO E-xiang,QIAN Xing-san,LI Rui. Construction and empirical research of the variable parameter value rolling grey forecasting model[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology,2006,28 (5):465-468.