地下车库火灾荷载计算模型的建立与应用研究

陈 阵[1],王 霁[2,3],张 苗[2,4],吴欣田[5],张哲源[2]

(1. 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室,北京 100190;2. 天津工业大学环境与化学工程学院,天津 300387;3. 中国人民武装警察部队学院,河北 廊坊 065000;4. 天津公安消防总队河北区消防支队,天津 300100;5. 天津易景环境科技发展有限公司,天津 300101)

摘 要: 火灾荷载的数量与分布对于火灾发展和蔓延具有决定性作用,火灾荷载的确定是地下车库消防设计的基础。本文在传统火灾荷载评估法与直接计算法的基础上,提出了地下车库火灾荷载计算的模型化方法。该方法首先对地下车库可燃物类型进行调查统计,车库中主要包括汽车轮胎、汽车塑料构件、汽车燃油和汽车座椅4种可燃物;然后根据4种可燃物的燃烧特点,对轮胎和塑料构件采用模型化方法计算火灾荷载,对燃油和座椅采用传统火灾荷载计算方法;最后以一个总面积为45 200 m^2、总车位数为936个的地下车库为实例,通过调查统计与分析计算,得出该车库总火灾荷载为4.7×10^9 kJ。

关键词: 地下车库;火灾荷载;计算模型

中图分类号: X928.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-1556(2014)04-0127-05

Calculation Model for Fire Load of Underground Garage and Its Application Research

CHEN Zhen[1], WANG Ji[2,3], ZHANG Miao[2,4], WU Xin-tian[5], ZHANG Zhe-yuan[2]

(1. *Insitute of Mechanics, China Academy of Sciences, State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Beijing* 100190, *China*; 2. *School of Environmental and Chemical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin* 300387, *China*; 3. *Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang* 065000, *China*; 4. *Tianjin Fire Corps, Hebei District Firefighting Detachment, Tianjin* 300100, *China*; 5. *Tianjin Yijing Environmental Technology Co., Ltd., Tianjin* 300101, *China*)

Abstract: The quantity and distribution of fire load plays a decisive role during the process of fire development and spread, and the fire load is the basis of fire protection design in the underground garage. On the basis of the traditional evaluation method and direct calculation method of fire load, this paper proposes a new calculation model. Firstly, the paper surveys the car types of underground garage, and finds out that there are mainly four kinds of combustible material, including automobile tyres, automotive plastic components, fuel and car seats. According to the combustion characteristics of the four kinds of combustible material, the paper calculates the fire load of tyres and plastic components by the new calculation model, and calculates the fire load of fuel and car seats by the traditional calculation method. Finally, the paper calculates the total fire load of an underground garage, whose area is 45 200 m^2 and the total number of parking lot is 936, and obtains that the total fire load of the garage is 4.7×10^9 kJ.

Key words: underground garage; fire load; calculation model

地下车库火灾由于其特殊的环境场合,火灾与烟气蔓延情况复杂,一旦发生火灾其蔓延速度快、扑救困难[1]。对地下车库火灾荷载的深入了解是研究其火灾与烟气蔓延规律的前提,而对地下车库设计合理的自动消防灭火系统具有重要意义[2]。

地下车库火灾荷载的研究主要包括两部分内容:一是可燃物的调查统计;二是不同类型可燃物燃烧热的计算模型。对于可燃物的调查统计,国际建

收稿日期: 2013-06-21 **修回日期:** 2014-05-16

作者简介: 陈 阵(1988—),男,硕士,助理工程师,主要从事化工安全风险评估等方面的研究。E-mail: cz13512956016@126.com

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

筑研究会在开展性能化防火设计的同时曾做了大量的调查研究工作，得出了商业建筑、车库、仓储库和办公室等典型场所火灾荷载密度的平均值。此外，S. Kumar 等[3-4]对 35 栋居住建筑进行了调查，认为相同功能建筑的火灾荷载密度分布符合正态分布；廖曙江等[5]对大型商场服装层的活动火灾荷载进行了调查分析，结果显示服装层的火灾荷载密度采用二项式分布描述更合适。对于可燃物燃烧热计算模型的研究，国内一些高校开展了一系列很有价值的试验，如中国科学技术大学的张和平等[6]研究了可燃物表面积和厚度对火灾荷载的影响，并提出了一种简单的计算模型；清华大学的孙旋等[7]对汽车进行了全尺度火灾试验，得出了在不同工况下汽车火灾的蔓延规律。

本文在前人研究的基础上，采用数据统计分析与部分可燃物模型化相结合的方法，针对地下车库火灾载荷提出了一种新的计算模型。该模型适用于地下车库性能化消防设计前火灾载荷的确定，对于地下车库防灭火的研究具有重要意义。

1 火灾荷载与计算方法

1.1 火灾荷载

火灾荷载是衡量建筑物室内所容纳可燃物数量多少的一个参数，也是研究火灾全面发展阶段性状的基本要素。在建筑物发生火灾时，火灾荷载直接决定着火灾的持续时间、室内温度的变化以及烟气蔓延等情况[8]。因此，采用合理的方法确定不同建筑场所内火灾荷载的数值对于建筑物的防火设计具有重要意义。

火灾荷载分为固定火灾荷载、活动火灾荷载和临时火灾荷载三类[5]。在地下车库中，固定火灾荷载数量很少，主要包括通风、排水和电路等设施中所携带的一些塑料构件等，而且所占比例很小。虽然单个汽车具有临时火灾荷载的特点，但是车库内汽车数量符合一定的分布规律，所以整体上地下车库内的汽车属于活动火灾荷载，主要可燃物为汽车的几种零部件，包括轮胎、塑料构件、燃油和座椅。

1.2 火灾荷载的计算方法

为了方便分析与设计，在火灾理论和工程应用的研究中经常采用火灾荷载密度这一概念。火灾荷载密度是指固定空间内所有可燃物完全燃烧所释放的热量与空间特征参考积之比，也即空间单位面积上可燃物的发热量。确定一个封闭空间内的火灾荷载密度通常采用的方法有：参照以往调查结果直接评估、采用传统经验公式计算和模型化的火灾荷载计算方法。

1.2.1 参照以往调查结果直接评估

国外对火灾荷载密度的实际调查结果显示[4]，相同场所的火灾荷载密度接近正态分布，因此可以根据以往调查结果评估目标场所的火灾荷载。常见场所的火灾荷载密度如表 1 所示。

表 1 不同场所火灾荷载密度的调查结果(MJ/m^2)

Table 1 Survey results of fire load density of different places

不同场所	均值	对应正态分布下的分位数		
		80%	90%	95%
居民住宅	780	870	920	970
医院	230	350	440	520
医院储藏间	2 000	3 000	3 700	4 400
病房	310	400	460	510
办公室	420	570	670	760
商店	600	900	1 100	1 300
车库	300	470	590	720
仓储库	1 180	1 800	2 240	2 690
图书馆	1 500	2 250	2 550	—
学校	285	360	410	450

注：该调查结果来自于 CIBW14《工作汇报》

虽然根据表 1 的数据能够方便、快捷地确定相应场合火灾荷载密度的大概范围，但是该方法所得的数据不够精确，有很大的缺陷，只能作为参考。

1.2.2 采用传统经验公式计算

根据火灾荷载的定义，可以采用如下公式计算不同场合内的火灾荷载密度[9]：

$$q = \frac{\Sigma m_i H_{ci}}{A} \tag{1}$$

式中：q 为指定场所的火灾荷载密度(MJ/m^2)；m_i 为第 i 种可燃材料的质量(kg)；H_{ci} 为第 i 种可燃材料的燃烧热(MJ/kg)；A 为指定场所的面积(m^2)。

常见可燃材料的燃烧热见表 2。

表 2 常见可燃材料的燃烧热

Table 2 Combustion heat value of common combustible materials

可燃材料	燃烧热/($MJ \cdot kg^{-1}$)	可燃材料	燃烧热/($MJ \cdot kg^{-1}$)
衣物	21	汽油	44
木材	20	聚乙烯	44
纸板	21	ABS 塑料	40
软木	29	酚醛树脂	30
纤维	17	甲醇	20
沥青	42	柴油	41

上述计算方法只是考虑理想状态下可燃物完全燃烧所释放的热量的累加，未对不同场所内可燃物的类型、分布特点和布置方式等因素进行全面的考虑。

1.2.3 模型化的火灾荷载计算方法

在建筑火灾中，将可燃物分为三类：固体可燃物、热塑性可燃物和液体性可燃物[6]。固体可燃物

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在燃烧过程中，其表面会有一个向内部缩进的过程，该缩进速度定义为燃烧线速度 v，其燃烧热可以通过下面公式计算[10]：

$$m'=\rho\times v \tag{2}$$

$$m''=m'\times A \tag{3}$$

$$q'=m''\times H_c \tag{4}$$

$$t=\frac{d/\beta}{v} \tag{5}$$

$$Q=q't \tag{6}$$

上式中：m' 为可燃物单位面积质量燃烧速率[kg/(s·m²)]；ρ 为可燃物密度(kg/m³)；v 为可燃物燃烧线速率(m/s)；A 为暴露面积(m²)；q' 为可燃物燃烧热释放率(MW)；m'' 为可燃物质量燃烧速率(kg/s)；H_c 为可燃物的平均燃烧热(kJ/kg)；t 为燃烧时间(s)；d 为燃烧材料厚度(m)；β 为可燃物的燃烧面，通常取 1 或 2；Q 为燃烧热(kJ)。

热塑性可燃物一般以圆形油类池火灾的燃烧过程为计算模型，该类可燃物的燃烧热释放率主要与其密度、燃烧热和燃烧尺寸等参数有关，其计算公式与固体可燃物类似，本文不再详细列出。此外，在地下车库中液体性可燃物主要为汽油，为了简化计算，直接取汽油的燃烧热与质量的乘积作为火灾荷载的一部分。

2　地下车库火灾荷载的计算模型

前已述及，地下车库内的汽车属于活动火灾荷载，主要可燃物为汽车的零部件，包括轮胎、塑料构件、燃油、座椅，因此要建立地下车库火灾荷载的计算模型，需要对各种可燃物的火灾荷载进行计算。

2.1　汽车轮胎火灾荷载的计算

汽车轮胎具有可燃性，且燃烧热值很高，大约为 9.968×10^6 kJ/m³。汽车轮胎火灾载荷的计算可采用固体可燃物计算模型。为了方便计算，首先将轮胎模型简化为具有一定厚度的环带，然后参考相关试验确定轮胎燃烧的热释放速率。

2.1.1　轮胎简化模型

本文以 195/65 R15 型号汽车轮胎为例，根据轮胎的形状特点，将其简化为体积相同的环带，并采用 3D max 建模软件对轮胎模型进行简化处理，处理前、后的轮胎模型见图 1 和图 2，其尺寸参数见表 3。

2.1.2　轮胎燃烧的热释放速率

中国科学技术大学的徐亮等[9]和许彬等[10]分别进行了轮胎全尺寸的燃烧试验，并采用耗氧原理的方法在试验中测定了轮胎燃烧的热释放速率、质量燃烧损失速率、燃烧热和烟气产生量等重要参数，

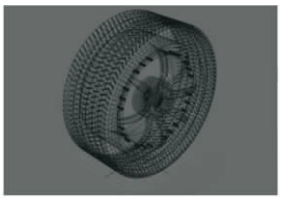

图 1　实际轮胎的 3D 模型

Fig. 1　3D model of an actual tyre

图 2　简化的 3D 轮胎模型

Fig. 2　Simplified 3D model of a tyre

表 3　轮胎模型简化处理前后的尺寸参数(mm)

Table 3　Size parameters of tyre model before and after the simplification

轮胎型号		外径	内径	宽度
215/60 R16	实际模型	535	406	215
	简化模型	513	447	215
195/65 R16	实际模型	533	406	195
	简化模型	510	442	195
185/65 R15	实际模型	501	381	185
	简化模型	471	411	185
175/70 R14	实际模型	479	356	175
	简化模型	449	387	175

同时对试验所得的轮胎质量燃烧速率曲线(见图 3)进行处理，得到了轮胎质量损失速率的拟合方程，即轮胎的质量燃烧速率 m''(kg/s)随燃烧时间 t 的变化曲线拟合方程：

$$\begin{cases} m''=-1.267\times10^{-6}t^3+8.056\times10^{-4}t^2-6.457\times10^{-2}t+1.711\ (R=0.989)\quad 0<t<275 \\ m''=-1.221\times10^{-7}t^3+2.904\times10^{-4}t^2-2.292\times10^{-1}t+61.879\ (R=0.976)\quad 275<t<1\,000 \end{cases}$$

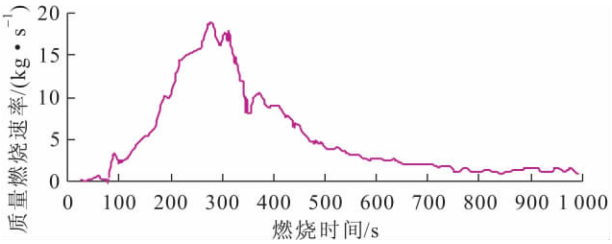

图 3　燃烧试验中轮胎的质量燃烧速率随燃烧时间的变化曲线

Fig. 3　Variation curve of the line combustion rate in tyre combustion experiment

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 汽车塑料构件火灾荷载的计算

汽车构件中，保险杠、立柱、发动机盖、仪表组件、散热器格栅等均为塑料制品，塑料构件一般占汽车自重的7%～10%。根据相关统计，汽车零部件常用的塑料种类包括PP、PVC、PU、ABS、FRP、PA等。

多数汽车所用塑料属于热塑性可燃物，在火灾中先形成熔滴再进行燃烧，其火灾荷载的计算可采用油类池火灾计算模型。

由于汽车内部塑料构件较多，如果将同一种塑料看作一块截面积为0.1 m×0.1 m的长方体则会大大简化计算过程。但是此时需要考虑两方面的问题：一是实际燃烧过程中的暴露面积与理想化状态下的误差；二是实际燃烧过程中不连续塑料构件的火焰蔓延方式与理想状态下连续长方体塑料燃烧过程中的区别。根据对某一汽车的各个部件进行计算与统计分析的结果显示，可采取η这一修正系数使模型化的火灾荷载计算结果与实际较为接近。几种常见塑料在汽车中的用量及修正系数的取值范围见表4。

表4 几种常见塑料在汽车中的用量与修正系数

Table 4 Dosage of several common plastics in the automobile and their correction coefficients

塑料类型	用量/kg	修正系数η	塑料类型	用量/kg	修正系数η
PP	15.5～21.4	1.2～1.5	ABS	3.5～6.8	1.5～1.6
PVC	8.6～12.7	1.3～1.6	FRP	8.4～11.6	1.4～1.6
PU	7.4～9.5	1.1～1.4	PA	2.6～4.3	2.1～2.5

2.3 汽车燃油火灾荷载的计算

当前汽车用燃油绝大多数为汽油，汽车油箱盖一般都有泄压设计，油箱在火灾高温环境下会有汽油大量泄漏[11]。汽油的具体燃烧过程比较复杂，有时还会发生爆炸事故，本文在计算燃油中的火灾荷载时，只考虑汽油全部燃烧的热值，不对火灾场景进行讨论。为了简化计算，假设火灾过程中所有汽油完全燃烧，其火灾荷载为汽油燃烧热与质量的乘积。其中，汽油的燃烧热值可通过查阅表2确定，取44 MJ/kg；汽油质量则需要根据车辆油箱大小和充装水平确定。

2.4 汽车座椅火灾荷载的计算

汽车座椅主要由表层和衬里两部分构成，一般都经过阻燃处理，但在火灾环境下也可燃烧。表层材料一般为真皮、仿真皮或者纤维材质，衬里一般为泡沫。汽车座椅的火灾荷载一般采用传统经验公式计算，主要由座椅的表层材料及泡沫的燃烧热和质量确定。

3 实例应用

3.1 某地下车库介绍

本文以某地下停车场为例，对其火灾荷载进行计算分析。该地下车库所在的地下一层尺寸为236.4 m×191.2 m，总面积达45 200 m²，其中车库所占面积为22 500 m²，总计有936个车位，其平面图见4。

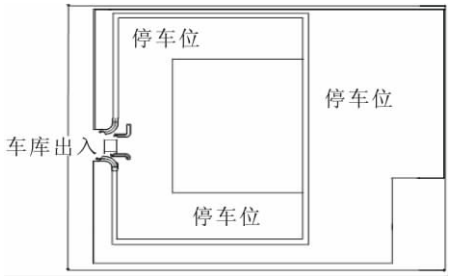

图4 某地下停车场平面图

Fig. 4 Plan of an underground garage

该地下车库有一对机动车辆出入口，两对非机动车辆出入口，共分12个防火分区，采用自动喷水灭火系统进行消防防护。

3.2 车辆统计

本文在对该地下车库火灾荷载进行计算时，首先统计了车库内的汽车类型与数量。经统计，最常见的汽车型号有14种，为了方便计算，假设车库内所停留车辆没有其他型号。14种汽车的型号与主要参数见表5。

表5 地下车库中最常见的汽车型号与主要参数

Table 5 Main parameters and proportion of the most common types of cars in the underground garage

车型	尺寸/mm（长×宽×高）	油箱容量/L	轮胎型号	座椅材质	所占比例/%
科鲁兹	4 598×1 797×1 477	60	215/60 R16	仿真皮	11.47
卡罗拉	4 545×1 760×1 490	55	195/65 R15	真皮	10.29
福克斯	4 342×1 840×1 500	55	195/65 R15	仿真皮	8.44
奥迪	A44 587×1 772×1 427	70	215/60 R16	真皮	8.26
捷达	4 487×1 706×1 470	55	175/70 R14	仿真皮	7.95
宝马	3 4 734×1 811×1 455	60	215/60 R16	真皮	7.33
帕萨特	4 870×1 834×1 472	70	215/60 R16	真皮	7.10
福克斯	4 342×1 840×1 500	55	195/65 R16	仿真皮	6.96
景逸	4 320×1 804×1 620	68	195/65 R16	仿真皮	6.56
伊兰特	4 545×1 725×1 425	55	185/65 R15	仿真皮	6.18
悦翔	4 080×1 710×1 475	45	185/65 R14	仿真皮	6.04
朗逸	4 605×1 765×1 460	55	195/65 R15	仿真皮	4.92
凯美瑞	4 825×1 825×1 480	65	215/60 R16	仿真皮	4.37
高尔夫	4 199×1 786×1 479	55	195/65 R15	真皮	4.13

注：表中不同车型所占的比例为实际调查的该车型数量占14种车型总数量的比例。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3　地下车库火灾荷载的计算

由于该地下车库处于市区繁华地段，所以在确定火灾荷载时，按车位停满的状态计算。根据前述的火灾荷载计算模型，首先确定 4 种可燃物的数量，再进行简化处理与计算。

3.3.1　汽车轮胎火灾荷载的计算

由表 5 可见，14 种车型的轮胎型号不尽相同，因此可分别采用第 2.1 节中轮胎简化计算模型进行处理，得出汽车轮胎的火灾荷载为

$$Q_1 = \Sigma 4ny_iV_i\overline{H}_c = 1.45\times10^9\ \text{kJ} \tag{8}$$

式中：n 为车辆总数，取 936 辆；y_i 为第 i 种车所占的比例(%)；V_i 为第 i 种车轮胎模型化后的体积(m^3)；$\overline{H}_c$ 为轮胎平均燃烧热，取 9.968×10^6 kJ/m^3。

3.3.2　汽车塑料构件火灾荷载的计算

经调查统计，14 种车型中塑料构件的材质和用量见表 4，因此塑料构件的火灾荷载为

$$Q_2 = \Sigma nm_i\eta_i\overline{H}_c' = 2.14\times10^9\ \text{kJ} \tag{9}$$

式中：m_j 为第 j 种塑料的用量(kg)；η_i 为第 i 种塑料的修正系数；$\overline{H}_c'$ 为塑料构件的平均燃烧热，取 2.8×10^3 kJ/kg。

3.3.3　汽车燃油火灾荷载的计算

根据汽车内燃油充装水平的调查结果，假设所有汽车的燃油充装水平均为 60%，因此，汽车燃油的火灾荷载为

$$Q_3 = \Sigma nV_i'y_iH_c = 1.03\times10^9\ \text{kJ} \tag{10}$$

式中：V_i' 为第 i 种汽车的油箱容积(L)；H_c 为汽油的燃烧热，取 31.24 MJ/L。

3.3.4　汽车座椅火灾荷载的计算

汽车座椅的材料由于经过阻燃处理，其燃烧热占总火灾荷载的比例较小。本文以奥迪 A4 汽车座椅为标准，每辆车座椅所含泡沫的质量为 40 kg，表层材料质量为 12 kg，对车库内 936 辆汽车的座椅燃烧热进行统一计算，得到该部分火灾荷载为

$$Q_4 = n\cdot(m_lH_{c1} + m_2H_{c2}) = 7.58\times10^7\ \text{kJ} \tag{11}$$

式中：m_1 和 m_2 分别为汽车座椅泡沫和表层材料的质量(kg)；H_{c1} 和 H_{c2} 分别为汽车座椅泡沫和表层材料的燃烧热(MJ/kg)。

3.3.5　地下车库总火灾荷载的计算

该地下车库总火灾荷载为

$$Q_{总} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 4.7\times10^9\ \text{kJ} \tag{12}$$

根据表 1 中不同场所火灾荷载密度的调查结果显示，车库的火灾荷载密度为 300 MJ/m^2，而该车库面积为 22 500 m^2，可参照以往调查结果直接评估，即得到该地下车库总火灾荷载为 6.75×10^9 kJ。这一数据与本文计算结果相差 2.05×10^9 kJ，分析原因认为，这一误差主要是由于汽车所用材料不断改进造成的，尤其是车厢内阻燃材料的使用显著地降低了火灾荷载值。

4　结　论

本文在前人火灾荷载调查分析的基础上，针对以往火灾荷载评估方法与传统计算模型的缺陷，结合数据统计分析与可燃物模型化的方法，提出了一种新的地下车库火灾荷载的计算模型，并通过实例应用，得出以下结论：

(1) 地下车库火灾荷载主要由汽车轮胎、汽车塑料构件、汽车燃油和汽车座椅构成，其余可燃物的火灾荷载可以忽略不计。

(2) 汽车塑料构件的燃烧热所占比例最大，因此要采用难燃或不燃塑料构件以降低地下车库的火灾荷载。

(3) 通过采用模型化火灾荷载计算方法对一个有 936 个车位的地下车库的火灾荷载进行计算，计算结果为 4.7×10^9 kJ，参照以往调查结果直接评估的结果为 6.75×10^9 kJ，笔者认为导致这一误差的原因是评估的依据年份已久，不适用于当前的大型地下车库。

参考文献：

[1] 程远平，张孟君，陈亮. 地下汽车库火灾与烟气发展过程研究[J]. 中国矿业大学学报，2003，32(1)：12－17.

[2] 张新. 地下机械式汽车库火灾模型试验及蔓延机理研究[D]. 长沙：中南大学，2012.

[3] Kumar，S. Live loads in office buildings：Lifetime maximum load [J]. *Building and Environment*，2002，37(1)：91－99.

[4] Kumar，S.，C. K. Rao. Fire load in residential building[J]. *Building and Environment*，1995，30(2)：299－305.

[5] 廖曙江，付祥钊，刘方. 对某大型商场服装层活动火灾荷载的调查和研究[J]. 消防科学与技术，2003，22(1)：14－16.

[6] 张和平，亓延军，徐亮，等. 可燃物表面积和厚度对建筑物内火灾载荷的影响[J]. 火灾科学，2003，12(2)：90－95.

[7] 孙旋，王婉娣，李引擎，等. 全尺寸汽车火灾实验[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2010，50(7)：1090－1093.

[8] 吴凤，邓军. 地下商业街火灾烟气流动实验研究[J]. 中国安全科学学报，2005，15(12)：60－64.

[9] 徐亮，张和平，杨昀，等. 废旧轮胎全尺寸火灾实验研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2006，14(1)：33－39.

[10] 许彬，张永明，刘申友，等. 轮胎的全尺寸火灾实验研究[J]. 热科学与技术，2006，5(2)：163－167.

[11] 程远平，R. John. 小汽车火灾试验研究[J]. 中国矿业大学学报，2002，31(6)：557－560.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net