

文章编号:0253-4339(2013)04-0030-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.04.030

冷链运输装备渗风模型构建与实验研究

刘广海¹ 谢如鹤¹ 屈睿瑰²

(1 广州大学 物流与运输研究所 广州 510006; 2 中南大学 交通运输工程学院 长沙 410075)

摘要 冷链运输装备渗风直接影响运输安全与能耗,但是有的冷链运输装备标准采用压差法所测得的渗风量值难以表征车辆运行时的实际状况。针对这一问题,对冷链运输装备的渗风机制进行分析,得到渗风量与装备运行速度、老化状况、装备状况的相互关系,推导并得到冷链运输装备渗风计算模型,在实验基础上得到渗风指数、当量渗风面积等相关参数的确定方法。研究表明上述模型能较好的反映冷藏运输装备渗风特性,可为冷藏车气密性状况的整体评价和优化控制提供参考。

关键词 冷藏运输装备; 渗风模型; 机理; 计算模型

中图分类号:U270.383; U272.5; U492.3+36.4

文献标识码:A

Modeling and Experimental Study on the Air Infiltration of Cold Chain Transport Equipment

Liu Guanghai¹ Xie Ruhe¹ Qu Ruigui²

(1. Research Center for Logistics & Transportation, Guangzhou University, Guangzhou, 510006, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha, 410075, China)

Abstract The air infiltration through the cold chain transport equipment directly affects the safety during transport and the energy consumption. The existing standards on the cold chain transport equipment adopt the differential pressure method and the resulting value of air infiltration is difficult to characterize the actual running situation. To solve this problem, the mechanism of air infiltration through the cold chain equipment is analyzed and the relationship between the running speed, the aging conditions and the equipment status is gained. The computational model of the air infiltration through the vehicles is found and the definition method of relevant parameters such as air infiltration index and the equivalent infiltration area is gained through the experiment. The study showed that the model can reflect the air infiltration characteristics of refrigerated transport equipment well and provide a reference to the overall evaluation on the air tightness and optimal control of the vehicles.

Keywords refrigerated transport equipment; air infiltrated model; mechanism; calculated model

冷链运输装备渗风是指其在运行时,由于表面风压的存在,气流通过缝隙在运输装备内外进行流动的现象。由于渗风将热湿空气带入装备内部,直接影响到运输能耗,并对食品品质安全造成影响,必须加以限制。为此,国内外相关标准均对运输装备的空气渗透量和测试方法进行了规定,目前采用的多为压差法,即在某种压差条件下,装备渗风量不超过一定上限即可^[1]。然而运输装备的渗风量在运行过程中是动态变化的,它与车辆运行速度、车辆本身特性以及车辆老化程度等有着密切的联系,但当前的标准并未考虑真实运输情况,且不同运输装备的渗风量指标也各不相同。如单开门冷藏集装箱的渗风标准为250Pa压差条件下渗风量不大于 $10\text{m}^3/\text{h}$ ^[2],而铁路

冷藏车的要求仅为50Pa压差条件下渗风量不大于 $40\text{m}^3/\text{h}$ (整体式发泡)或 $60\text{m}^3/\text{h}$ (填充式发泡)^[3],公路冷藏车的要求又有所不同(测试条件为100Pa)^[4]。而50Pa、100Pa或250Pa压差条件究竟表征何种运输条件,何种指标参数更加合理,这一系列问题直接关系到相关标准的可实施性和运输设备性能指标的科学性。要解决这一问题则必须从冷链运输装备的渗风特性出发,综合分析其影响因素及其变化规律,但目前关于上述问题的系统研究仍较为缺乏。鉴于问题的重要性,国际制冷学会已将其列为未来应优先研究问题之一^[5]。这里拟针对上述问题,建立冷链运输装备动态渗风模型,并给出相关参数的确定方法。

基金项目:国家自然科学基金(51008087)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51008087).)

收稿日期:2012年7月28日

1 冷链运输装备渗风特性分析

由空气渗透特性可知,渗风量的大小直接受到压差以及渗风路径沿途阻力的影响,但并非是线性的关系。对于冷链物流装备而言,由于其运行时渗风主要受风压的影响,在借鉴建筑渗风理论的基础上,冷链运输装备总渗风量可表述为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot l_i \cdot (\Delta p)^\beta = S \cdot (\Delta p)^\beta \quad (1)$$

式中: Q 为冷链运输装备总渗风量, m^3/h ; S 为冷链运输装备当量渗风面积, $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^\beta)$; Δp 为冷链运输装备内外压差, Pa ; α 为冷链运输装备渗风系数, $\text{m}^2/(\text{h} \cdot \text{Pa}^\beta)$; β 为冷链运输装备渗风指数; l 为冷链运输装备缝隙长度, m ; i 为冷链运输装备的第 i 条缝隙。

由上式可知,要确定渗风量的大小,首先需确定冷链运输装备与渗风相关的物理参数及内外压差的大小。对于运输装备而言,一旦其结构、材料确定,各缝隙的长度、渗风系数、装备整体的渗风指数等参数即已确定,但具体数值仍需通过实验才能获得。

冷链运输装备渗风的主要通路是门和壁体的缝隙,在冷链运输装备渗风系数 α_i 的求取方面,就壁体而言,工艺、构造、隔热材料多种多样,造成渗风系数具有差异显著;就门而言,装备不同其大小、开启方式、密闭程度等同样存在区别,而现有资料中缺乏对相关问题的研究和可供参考的数据,若全部通过实验测定不但工作量大,且因现实条件较为缺乏也易产生误差,因此可合并以当量渗风面积 S 的形式予以分析,即:

$$S = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot l_i \quad (2)$$

在冷链运输装备渗风指数 β 的求取方面,由于运输装备可以简化为一个移动的小型建筑,因此可在借鉴建筑领域相关研究成果的基础上予以确定。在这一问题上,国内外众多研究成果均表明,不论建筑的结构形式如何,渗风指数 β 的值始终间于 $0.5 \sim 1.0$ 之间,若缺乏实验条件,则可将渗风指数 β 的值取为 0.67 。而与冷链运输装备内外压差 Δp 关系最紧密的则为速度,此外,装备的老化程度等也将直接影响渗风量的多少。为此,下文分别从总渗风量与内外压差的关系、运行速度与内外压差的关系、总渗风量与装备老化程度的关系等方面对问题进行具体分析,以期获得各种运输条件下的渗风量通用表达式。

2 冷链运输装备渗风参数因素分析及模型构建

2.1 渗风量与内外压差关系分析

当冷链运输装备处于运行状态时,随着运行速度的提高,内外压差增大,渗风量也将逐步增加,其基本表达式如式(1)所示。而在现实条件下,装备运行速度与渗风量的关系难以直接测定,故各国均将内外压差 Δp 作为装备运行速度的参照值,对冷链运输装备在一定压差条件下的渗风量予以控制^[24]。就目前而言,各冷链运输装备出厂时已按相关标准进行测试,得到其标准气压差条件下的漏气量值 Q_0 ,代入式(1)可表示为:

$$Q_0 = S \cdot (\Delta p_0)^\beta \quad (3)$$

式中: Q_0 为冷链运输装备标准测定渗风量, m^3/h ; Δp_0 为冷链运输装备标准测试时内外压差, Pa 。

由式(3)可见,在具有相应实验条件时,给定不同的内外压差并测得相应的渗风量,经多组测试即可得到冷链运输装备特有的当量渗风面积 S 和渗风指数 β 值。由上节分析可知,当实验条件缺乏时,也可将 β 取为 0.67 ,采用厂家所提供的 Q_0 和 Δp_0 值,求得相应的当量渗风面积 S 值,其精确性将在下文中进行分析。

2.2 内外压差与运行速度关系分析

在运输装备运行速度方面,当外界气压大于装备内部气压时,空气由外界渗入;反之亦然。由此可见,当装备内外温度保持稳定时,装备静止,内外气压一致,渗风现象不会发生;而随着运行速度的不断提高,装备内外压差也会增大。但不同运输装备因本身的结构、材料、工艺等差异,压差变化值也是不一样的。因此,可认为冷链运输装备的内外压差受到装备特性及速度等多方面因素影响,其关系可表述为:

$$\Delta p = a \cdot v^b \quad (4)$$

式中: v 为冷链运输装备运行速度, m/s ; a 为与冷链运输装备特性有关的待定系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^b/\text{m}^b$; b 为与冷链运输装备特性有关的待定指数。

2.3 装备老化与渗风量关系分析

冷链物流装备的老化在使用过程中是不可避免的。随着运输装备使用年限的增长,密封元件的老化、金属部件的锈蚀、隔热材料变形、开裂等各种问题均会使得渗风量不断增大。由于影响因素众多,冷链物流装备老化问题十分复杂:一方面,随着使用时间的增加其老化速度是逐渐加快的;另一方面,在定期

保养维修后,运输装备的气密性又将出现大幅提升。在研究中,为表征老化现象对冷链物流装备气密性的影响,设 θ 为老化系数,则:

$$Q^* = Q + \theta \cdot Q$$

(5)

式中: Q^* 为考虑装备老化影响后的总渗风量, m^3/h ; θ 为冷链物流装备老化系数, %。

2.4 渗风模型构建

由式(1) ~ (5)联立求解可知:

$$Q^* = (1 + \theta) \cdot S \cdot (a \cdot v^b)^\beta$$

(6)

由式(6)可知,要获得冷链物流装备在不同运输条件下的渗风量,可转化为求取 a 、 b 、 S 、 θ 、 β 等一系列与装备本身性能相关的参数的问题,下文将以实验的方法对各个参数分别予以确定。

由式(1) ~ (4)可知,以现有实验条件直接测得冷链运输装备运行速度 v 与渗风量 Q 之间的关系仍较为困难。因此,研究需分两步走:首先以实验确定渗风量 Q 与运输装备内外压差 Δp 之间的关系;其次,确定运输装备运行速度 v 对 Δp 的影响;二者相结合,即可得到 Q - v 表达式及各参数的具体数值。

3 模型实验分析与参数确定

3.1 渗风量与内外压差关系实验测定与分析

实验在广州大学“冷藏运输条件仿真实验台”进行。该实验台包括环境模拟单元和冷藏运输单元两部分。冷藏运输单元是一以 20 英尺冷藏集装箱为原型的实验平台,能对温度、湿度、气流组织、多温多空间等各种不同参数进行调节,也是实验所研究的冷链运输装备;环境模拟单元则是包裹在冷藏运输单元之外的一个大空间,用于模拟冷藏运输单元所遇到的不同温度、湿度、运输速度等各种条件^[6]。

在渗风量 Q 与运输装备内外压差 Δp 相关关系的确定实验中,采用补充气体法。如图 1 所示,先将实验台的环境模拟单元和冷藏运输单元均调至 20℃,且波动控制在于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 在之间(用以平衡环境模拟单元和冷藏运输单元间的热压差),之后分别将空压机、气体流量调节阀、气体流量计等连接成供气系统并接于冷藏运输单元上,此外,将压差表置于环境模拟单元和冷藏运输单元之间,完成系统安装。实验时,开启空压机,将气体流量调节阀逐渐打开,并观察压差表,通过调节阀门大小使内外压差保持在 100Pa 左右 5min 不变,而此时的气流量即为冷藏运输单元的渗风量。之后重复上述实验步骤,依次将压差稳定在 125、150、……250Pa,实验重复 5 次并取其平均值,如表 1 所示。

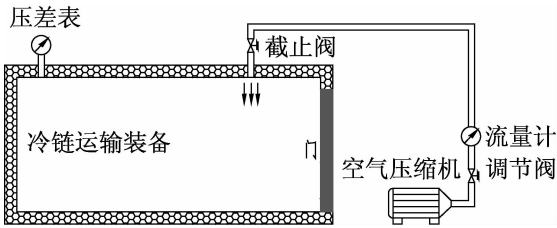


图 1 补充气体法实验系统

Fig. 1 The experiment system of supplemental gas method

表 1 渗风量与运输装备内外压差关系测试值

Tab. 1 The value relation between air infiltration and pressure difference

内外压差/Pa	100	125	150	175	200	225	250
漏气量/(m³/h)	4.61	5.62	6.22	7.01	7.61	8.29	8.90

将表 1 中数据按准则方程式的参数确定法进行处理。先将式(1)两端取对数,得:

$$\log Q = \log S + \beta \cdot \log \Delta p$$

(7)

可见,式(7)的斜率值即为渗风指数 β 。将渗风量与运输装备内外压差的对数值作图(如图 2 所示),算得在此次实验中 $\beta = 0.72$ 。因 $S = Q/(\Delta p)^\beta$,代入 Q 、 Δp 和 β 值,进而求得 $S = 0.168 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^{0.72})$ 。将 S 、 β 值代入式(1),则对于实验的冷藏运输单元,渗风量与压差的关系式可写为:

$$Q = 0.168 \cdot (\Delta p)^{0.72}$$

(8)

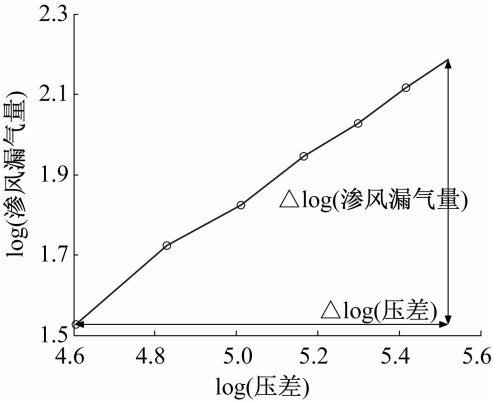


图 2 运输装备差压与渗风量关系的对数坐标图

Fig. 2 The logarithmic coordinate value relation between air infiltration and pressure difference

将实验渗风量 Q 与运输装备内外压差 Δp 之间的测试值和实验拟合值进行比较(如图 3 所示),结果表明二者之间误差满足计算要求。此外,在对式(3)进行分析时曾提到,在现实条件无法进行实验时,可将渗风指数 β 取为 0.67,由厂家所提供的 Q_0 和 Δp_0 值求得相应的当量渗风面积 S 值,从而简化分析。对于实验,按此方法,仅需一组 Q 和 Δp 的数据

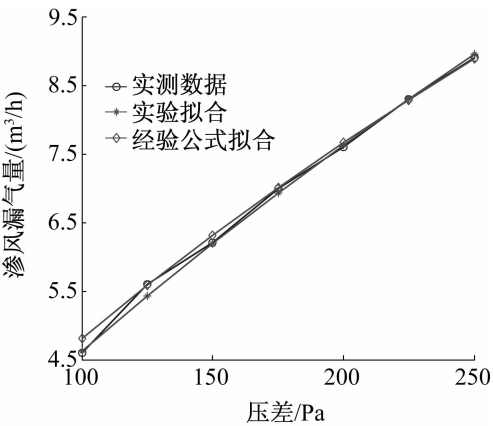


图 3 渗风量与运输装备内外压差关系值
Fig. 3 The relation between air infiltration and pressure difference

(在此取 $\Delta p = 250\text{Pa}$, $Q_0 = 8.90\text{m}^3/\text{h}$) 即可算得 $S = 0.220$ 。则式(1)可写为:

$$Q = 0.220 \cdot (\Delta p)^{0.67}$$

(9)

将经验公式式(9)算得的数据也列于图 3 中,如图所示,虽误差较实验拟合组有所增大,但与实测数据仍基本保持一致,误差控制在 5% 以内,因而认为该方法也是合理的。由此可见,在确定当量渗风面积 S 和渗风指数 β 时,在实验条件具备时则优先进行实验;若无法进行实验,则可固定取 $\beta = 0.67$,采用 $S = Q_0/(\Delta p_0)^{0.67}$ 来确定当量渗风面积值。

3.2 内外压差与运行速度关系实验测定与分析

在确定运输装备运行速度 v 对 Δp 的影响上,仍采用“冷藏运输条件仿真实验台”展开实验(环境模拟单元可为冷藏运输单元营造静止至 120km/h 的各种运行环境)。调节环境模拟单元送风速度(将变频系统从 15Hz 开始,以 5Hz 为增量,逐渐提高至 60Hz,速度逐渐提高),实验重复 5 次并取其平均值,分别记录各种条件下的运输装备运行速度 v 值和相应的 Δp 值,如表 2 所示。

表 2 不同运行速度条件下运输装备内外压差的测定

Tab. 2 The value relation between velocity and pressure difference

风速/(m/s)	7.3	9.7	12.1	14.9	17.8	20.3	22.9	25.6
压差/Pa	25	40	55	85	112	145	190	230

将表 2 中数据仍按准则方程式的参数确定法进行处理。先将式(4)两端取对数:

$$\log \Delta p = \log a + b \cdot \log v$$

(10)

如图 4 所示,采用最小二乘法处理 v 与 Δp 之间的关系式,求得: $a = 0.7, b = 1.78$,代入式(3):

$$\Delta p = 0.7 \cdot v^{1.78}$$

(11)

将实验运输装备内外压差 Δp 与运行速度 v 之间的测试值和实验拟合值进行比较(如图 5 所示),二者之间误差小于 5%,满足计算要求。

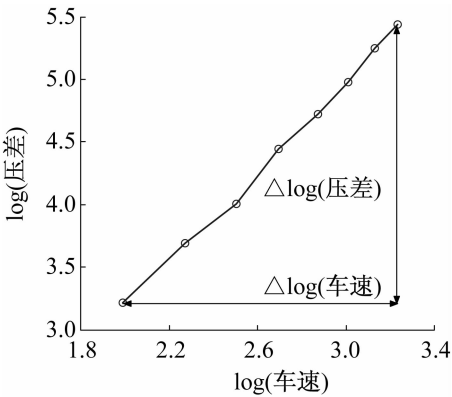


图 4 确定速度-压差相关参数的对数坐标图
Fig. 4 The logarithmic coordinate value relation between velocity and pressure difference

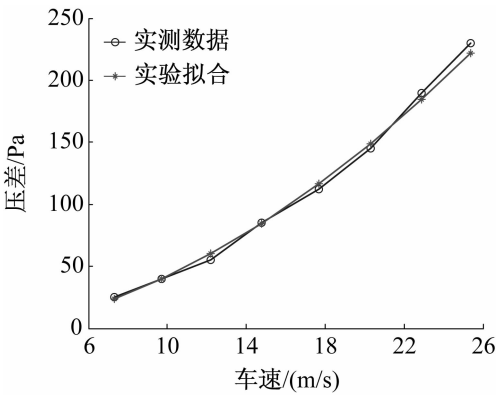


图 5 不同运行速度条件下运输装备内外压差
Fig. 5 The relation between velocity and pressure difference

3.3 老化率影响分析与计算

老化率的获得以实验测定为佳,即定期对冷链运输装备的气密性进行检测,求得 θ 的变化情况。但对于大多数未进行复检的运输装备,可参照国际上对冷藏运输装备性能的规定(一般要求装备使用 6 年性能整体下降不超过 10%),将其简化为以随时间变化的量:

$$\theta = 0.0167\text{year}$$

(12)

式中: year 为冷链物流装备使用时间,以年为计算单位。

应该看到,上述处理是由于缺乏实验数据而进行的假设分析,存在一定误差,但在研究中采用的老化率是按冷链运输装备设计要求中的极限值进行处理,本身是偏安全的,因此不会对设备选型等造成影响。但在以后的研究中仍需加强。鉴于问题的复杂性,上述问题现已被国际制冷学会列为未来应重点研究问

题之一^[5]。

3.4 模型推导与分析

由于实验所有参数为新测值,因此 $\theta = 0$ 。对于实验所采用的冷藏运输装备而言,将所求得的 a 、 b 、 S 、 β 值代入式(6),即可得到装备渗风量与运行速度的关系:

$$Q = 0.13 \cdot v^{1.28} \quad (13)$$

在考虑装备老化问题后,上述表达式可改写为:

$$Q^* = 0.13 \cdot (1 + \theta) \cdot v^{1.28} \quad (14)$$

可见,由上式可方便的得到所测试的冷藏运输装备各种运行速度条件下渗风量变化情况。设该冷链运输装备分别以36km/h、72km/h和108km/h的速度运行,按式(13)计算得到其渗风量分别为 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 、 $6.2\text{m}^3/\text{h}$ 和 $10.1\text{m}^3/\text{h}$,可见随着运输速度的提高,渗风量也在成倍增加,若考虑运输装备长期使用老化问题的影响,上述差距还将扩大。

另一方面,仍以所测试冷藏运输装备为例,其在50Pa、100Pa、250Pa条件下的渗风量分别为 $2.8\text{m}^3/\text{h}$ 、 $4.6\text{m}^3/\text{h}$ 、 $8.9\text{m}^3/\text{h}$ 。相应的,铁路冷藏运输、公路冷藏运输、集装箱冷藏运输的限值分别为 $60\text{m}^3/\text{h}$ (所测试的装备为填装式发泡)、 $50\text{m}^3/\text{h}$ (所测试的装备体积间与 $20 \sim 30\text{m}^3$ 之间,此时渗风量 $\leq 25\text{m}^3/\text{h}$ 为A级, $25 \sim 50\text{m}^3/\text{h}$ 之间的为B级)、 $10\text{m}^3/\text{h}$ (所测试的装备为单开门)。计算可知,冷藏运输装备渗风量已基本达到集装箱运输的上限,却仅为铁路冷藏运输上限的1/20、公路冷藏运输上限的1/10,可见上述标准间存在巨大差异。在多式联运愈来愈广泛的今天,渗风指标的巨大差异使得管理部门在监管实施时存在困难,亟待改进。

4 结语

1)这里对冷链运输装备的渗风机制进行分析,初步得到渗风量与装备运行速度、老化状况、装备状况的相互关系,推导并得到冷链运输装备渗风计算模型,在实验基础上得到渗风指数、当量渗风面积等相关参数的确定方法。研究表明上述模型能较好的反映冷藏运输装备渗风特性,可为冷藏车气密性状况的整体评价和优化控制提供参考。

2)现有冷链运输装备标准评价指标、测试条件均不统一,且不能很好的反映冷链运输装备实际渗风状况,给现场实施和运输监管带来困难,亟待改进。

3)冷链运输装备渗风直接影响运输安全与能

耗,必须予以控制,鉴于问题的重要性,国际制冷学会已将其列为未来应优先研究问题之一。在今后的工作中,应加强研究力度,扩大实验规模,推动相关问题研究与解决。

本文受珠江科技新星专项项目(2012J2200098)资助。
(The project was supported by the new star of science & technology special funded of Pearl River(No. 2012J2200098).)

参考文献

- [1] Chatzidakis S, Rouvas A, Chatzidakis K. Uncertainty and ATP tests-an approach for the calculation procedure of the k-value estimation [C] // International ATP Test Stations Meeting 2003, Vienna, Austria, 2003.
- [2] GB/T 7392. 系列1:集装箱的技术条件和实验方法 保温集装箱[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [3] GB/T 5600. 铁路货车通用技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [4] QC/T 450. 保温车、冷藏车技术条件及试验方法[S]. 北京:中国计划出版社,2010.
- [5] 国际制冷学会. 国际制冷学会关于制冷领域应优先研究的问题列表[J]. 制冷学报,2006, 27(3): 59-62. (IIR. IIR list of research priorities [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3): 59-62.)
- [6] 谢如鹤,刘广海,郭成. 冷藏运输条件仿真试验台的设计与测试[J]. 制冷学报,2006, 27(6): 52-58. (Xie Ruhe, Liu Guanghai, Guo Cheng. Design and test on the simulating test-bed of refrigerated transportation condition [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(6): 52-58.)

通信作者简介

刘广海,男(1978-),博士,副教授,广州大学物流与运输研究所所长,(020)39366822, E-mail: broadsea@126.com。研究方向:冷藏运输装备优化与设计,食品冷链物流安全品质与监控。研究项目有:国家自然科学基金项目(51008087),广州市珠江科技新星专项研究(2012J2200098)等。

About the corresponding author

Liu Guanghai (1978-), male, Ph. D./associate professor, Director of Research Center for Logistics & Transportation, (020) 39366822, E-mail: broadsea@126.com. Research fields: The optimization and design of refrigerated transport equipment, the safety quality and monitoring of food cold chain. The author takes on project supported by the Natural Science Foundation (No. 51008087) and the new star of science & technology special funded of Pearl River (No. 2012J2200098).