

基于等效龄期的粉煤灰混凝土抗压强度计算模型^{*}

王甲春¹, 阎培渝²

(1. 厦门理工学院土木工程系, 福建 厦门 361024;
2. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 设计温度跟踪养护系统来模拟实际结构中混凝土所经历的温度历程, 通过测试在标准养护条件 20 °C、恒温 50 °C 和变温养护条件下不同强度等级的粉煤灰混凝土早龄期抗压强度的值, 分析温度历程对粉煤灰混凝土早龄期抗压强度的影响。根据混凝土早龄期抗压强度的两个主要影响因素: 温度和龄期, 引入等效龄期理论建立了粉煤灰混凝土早龄期抗压强度的计算模型, 并分析了模型参数。实际结构中的粉煤灰混凝土抗压强度可以通过测定温度场, 利用计算模型进行相应龄期的抗压强度计算。研究表明, 粉煤灰混凝土抗压强度计算模型能够较准确计算结构中粉煤灰混凝土的抗压强度, 从而有效指导粉煤灰混凝土的工程应用。

关键词: 混凝土; 粉煤灰; 抗压强度; 模型

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2014) 04-0083-06

Computational Model of Fly Ash Concrete Compressive Strength Based on the Equivalent Age

WANG Jiachun, YAN Peiyu

(1. Department of Civil Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Temperature tracking system is designed to simulate the actual curing concrete structure temperature history experienced. By the test standard curing conditions at 20°C, 50°C constant temperature and variable temperature curing conditions, early age compressive strength of different strength levels fly ash concrete is measured. According to the compressive strength of concrete at early age of the two main factors: temperature and age, the calculation model of compressive strength of fly ash concrete is established and analyze the model parameters with introduction of equivalent age theory. The compressive strength of fly ash concrete structures is predicted by measuring temperature field with computational models. The results show that the compressive strength of fly ash concrete calculation model can accurately calculate the compressive strength of fly ash concrete structures, which can effectively guide the engineering application of fly ash concrete.

Key words: concrete; fly ash; compressive strength; model

粉煤灰作为混凝土重要的矿物掺合料, 具有形态效应、微集料效应和火山灰效应, 且改善混凝土的工作性和耐久性, 在混凝土中的应用越来越广泛^[1]。近年来, 配制混凝土的硅酸盐系列水泥的

粉磨细度大, 水化放热在早期集中, 导致早期混凝土的水化放热温峰增高, 温升速度加快, 加剧了混凝土的温度应力开裂风险, 粉煤灰早期水化活性较低, 水化热很小, 可以有效地降低混凝土的温峰和

* 收稿日期: 2013-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51108396); 厦门市科技资助项目 (3502Z20113033); 福建省教育厅科技资助项目 (JA12256, JA12202); 福建省自然科学基金资助项目 (2014J01213)

作者简介: 王甲春 (1972 年生), 男; 研究方向: 混凝土材料及其力学性能; E-mail: jchwang@xmut.edu.cn

温升速率,能够有效减少混凝土的温度应力,粉煤灰混凝土早龄期的力学性能直接影响其在工程中的应用,在标准养护条件下粉煤灰混凝土的早龄期抗压强度发展较缓慢,后期抗压强度增加较大^[2-6],粉煤灰混凝土的模板拆模和养护都受到十分严格的限制,避免施工事故,在 GBJ146-90《粉煤灰混凝土应用技术规范》中限制了粉煤灰的最高掺量,但结构中粉煤灰混凝土所处的温度环境与标准养护条件不同,宫经伟等^[7]研究了温度历程不同时混凝土自收缩的发展,文献[8]研究粉煤灰混凝土的弹性模量发展规律,金贤玉和丁建彤等^[9-10]研究了温度历程对粉煤灰混凝土早龄期抗开裂能力的影响。陈文瑜等^[11]研究认为混凝土入模温度对温度应力的影响很大。粉煤灰能够明显降低混凝土的早期水化放热,明显降低混凝土的入模温度,有利于降低温度应力。本文研究在实验室标准养护制度和模拟实际结构中混凝土温度变化的变温养护条件下粉煤灰混凝土早龄期时抗压强度发展,引入等效龄期的理论,建立粉煤灰混凝土早龄期的抗压强度计算模型,并在实际工程中进行检验,有利于粉煤灰混凝土的工程应用。

1 理论基础

20 世纪 40~50 年代,英国 Nurse 和 Saul 在研究加速养护方法的时候,需要一种方法确定不同养护温度下龄期和温度对于混凝土强度发展的共同作用,提出了被称为“Nurse-Saul”成熟度方程^[12]:

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

式中: M 为成熟度, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$; T 为 Δt 内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为强度增长停止的温度(通常取 -10°C)。

Plowman^[13]提出强度与成熟度的计算式

$$S = a + b \lg(M) \quad (2)$$

式中: S 为混凝土抗压强度; a 、 b 为常数。

式(1)和(2)奠定了混凝土抗压强度计算的基础,随着混凝土技术的发展,Nurse-Saul 成熟度方程不适合目前的现实工程情况,Hansen 和 Pedersen^[14]提出了基于 Arrhenius 方程的等效龄期公式,如式(3)所示。

$$t_e = \sum_0^t \exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T}\right)\right) \Delta t \quad (3)$$

式中: t_e 为等效龄期; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; T_r 为参考温度,一般取 20°C ; E 为混凝土表观活化能, J/mol ; R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, E/R

取 2700 K ; Δt 为时间间隔, h 。

等效龄期将混凝土实际龄期转换成等效龄期,认为其抗压强度与混凝土在参考温度下,经历等效龄期的时间所获得的抗压强度是相等的,等效龄期的计算是基于化学反应活化能,适用混凝土早龄期的抗压强度计算。为了分析等效龄期与混凝土早龄期抗压强度的关系,混凝土抗压强度随时间的变化率函数可以描述为:

$$\frac{dS}{dt} = f(S)f(T) \quad (4)$$

强度函数^[15]

$$f(S) = S_u \left(1 - \frac{S}{S_u}\right)^2 \quad (5)$$

温度函数

$$f(T) = K(T) \quad (6)$$

对式(4)进行积分

$$\int_0^S \frac{S_u}{(S_u - S)^2} dS = \int_{t_{or}}^{t_e} K(T) dt$$

当温度恒定为 T_r 时,根据 Arrhenius 公式有

$$K(T) = K(T_r) = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_r}\right) = K_r$$

得到混凝土早龄期抗压强度计算模型

$$S = S_u \frac{K_r(t_e - t_{or})}{1 + K_r(t_e - t_{or})} \quad (7)$$

式中: S 为在参考温度养护条件下混凝土的早龄期抗压强度, MPa ; S_u 为在参考温度养护条件下混凝土早龄期理论极限强度, MPa ; K_r 为在参考温度时的速率常数, $1/\text{h}$; t_{or} 为在参考温度时混凝土具有抗压强度的龄期, h 。

根据实际工程的需要,一般利用标准养护条件下 672 h 龄期时混凝土的抗压强度作为计算主要依据,式(7)变为

$$S = \beta S_{672} \frac{K_r(t_e - t_{or})}{1 + K_r(t_e - t_{or})} \quad (8)$$

式中: β 为常数。

根据式(8)可以描述粉煤灰混凝土的力学性能计算模型。

2 实验

2.1 原材料

水泥为北京兴发水泥有限公司生产的拉法基普通硅酸盐水泥 PO42.5,粉煤灰为内蒙元宝山一级粉煤灰,高效减水剂为天津 SiKa 公司生产的聚羧酸高效水剂 Viscocrete3301,砂为河砂细度模数 3.0,石子为北京门头沟产石灰石,级配 5-20 mm。原料化学成分如表 1 所示,普通硅酸盐水

泥的物理力学性能如表 2 所示。粉煤灰混凝土配合比按 JGJ55 - 2011 《普通混凝土配合比设计规程》设计，如表 3 所示。

表 1 原材料的化学组成

Table 1 Raw materials chemical composition

原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂	SO ₃	LOI	%
水泥	22.80	4.55	65.34	2.82	2.74	0.52	0.25	-	2.92	3.97	
粉煤灰	58.09	23.69	2.99	7.02	1.32	1.33	3.18	-	-	1.14	

表 2 硅酸盐水泥的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of portland cement

比表面积/(m ² · kg ⁻¹)	凝结时间		标准稠度需水量/%	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝时间/min	终凝时间/min		3 d	8 d	3 d	28 d
321	130	210	28.0	4.5	8.2	25.4	51.2

表 3 粉煤灰混凝土配合比

Table 3 Mixture of concretes

NO.	水泥	粉煤灰	砂	石子	用水量	高效减水剂	kg/m ³
FC30	294	74.0	682.3	1 111.3	184.0	0	
FC40	335	85.0	671	1 106	168.0	3.68	
FC60	416	104	660	1 077	160.0	3.3	

2.2 实验设备

实验所用混凝土绝热温升仪和变温养护箱为清华大学建材研究所研制，采用计算机自动数据采集，5 min 采集一次，控温算法采用 PID 算法，温度控制精度误差小于 ±0.1 °C；温度最小分辨率 0.02 °C，德国 Toni Technik 公司的 Toni Norm series 2000 电液伺服实验机，试样尺寸 100 mm × 100 mm × 100 mm 测试抗压强度，恒温 50 °C 采用混凝土养护箱。混凝土的水化放热能力一般用绝热温升值来衡量，在模拟实际结构中混凝土早龄期由于自身水化放热所造成的温度环境过程中，绝热温升值可以认为是混凝土在实际结构中的所能达到的温度上限，早龄期混凝土水化放热的同时身外时行散热，是一个动态的过程，在实验研究中变温环境的上升段采用绝热温升温度曲线，当达到绝热温升稳定期以后，采用以 1 °C/h 的降温速率使温度下到环境温度，形成一个变化的温度环境，如图 1 所示在实验室中模拟粉煤灰混凝土早龄期的温度环境，由于高效减水剂在水化早期具有缓凝作用，所以在 20 h 龄期之前 FC30 温升高于其他两种混凝土。

2.3 结果分析

从图 2 可以看出，168 h 龄期之前正常养护条件下粉煤灰混凝土的抗压强度明显低于其他两种养护

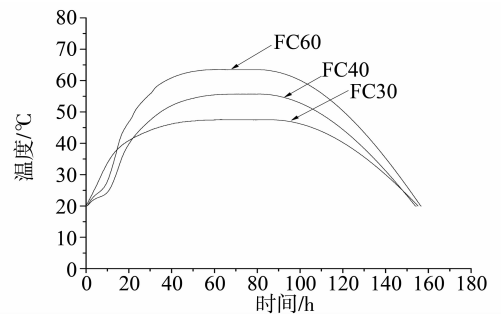


图 1 粉煤灰混凝土变温养护制度

Fig. 1 Curing temperature of fly ash concrete

条件下粉煤灰混凝土的抗压强度。672 h 龄期时，同一混凝土变温养护的抗压强度最高，50 °C 温度养护条件下 FC60 混凝土抗压强度低于正常养护条件下的抗压强度。变温养护条件下三种粉煤灰混凝土 672 h 龄期时都高于其他两种养护制度下的抗压强度，表明粉煤灰混凝土早期的放热量对于粉煤灰混凝土的抗压强度发展是有利的。

利用(3)式计算粉煤灰混凝土的等效龄期，以 0 至 672 h 之间的抗压强度为数据组，利用 Matlab 编程最小二乘法计算粉煤灰混凝土抗压强度的模型参数如表 4 所示，参考温度定为 20 °C，三种混凝土 K_v 值一样，t_{0r} 是混凝土的具备抗压强度的起始时间，

一般由混凝土的初凝时间相关,应用贯入阻力方法测定混凝土初凝时间时,混凝土已经具备了一定的抗压强度,因此 t_{0r} 值比混凝土的初凝时间值小,随着粉煤灰混凝土强度等级的增加, t_{0r} 值越小。图 3 描述了粉煤灰混凝土早龄期抗压强度发展与等效龄期的关系,可以看出利用(7)式的计算曲线与实验测试值有较好的吻合,能够满足实际工程的计算精度。粉煤灰混凝土的标准条件下 672 h 龄期的抗压强度与 S_u 的关系如图 4 所示,为了能够使得粉煤灰混凝土抗压强度计算模型有更好的通用性,模型中使用 S_{672} , $\beta = 1.1$ 。

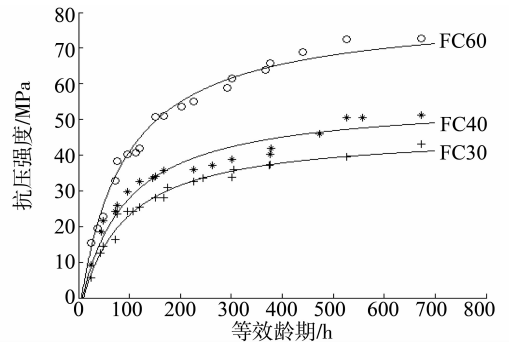


图 3 粉煤灰混凝土抗压强度模型计算值与实测值
Fig. 3 The calculated value and the measured value of compressive strength of fly ash concrete with age

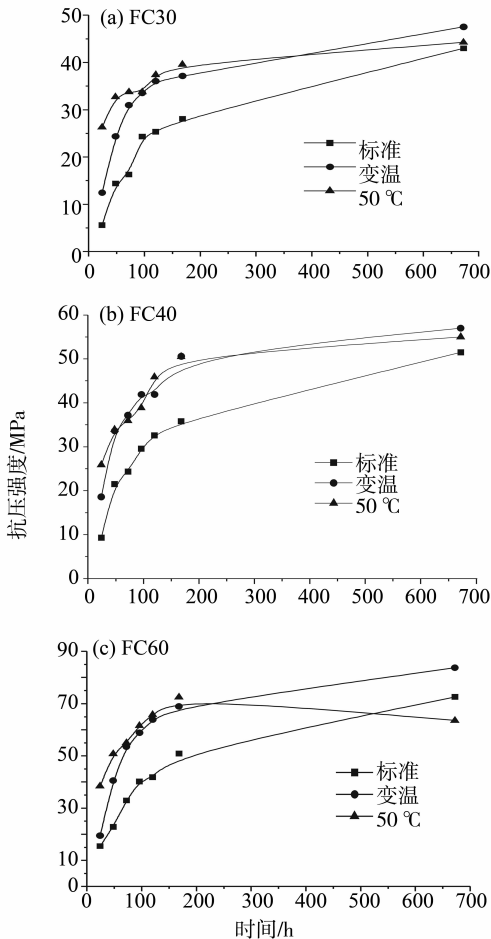


图 2 粉煤灰混凝土抗压强度随龄期发展
Fig. 2 The development of compressive strength of fly ash concrete with age

表 4 模型参数

Table 4 Model parameters

项目	S_u	K_r	t_{0r}
FC30	46.6	0.011	10.0
FC40	55.5	0.011	8.0
FC60	80.6	0.011	6.0

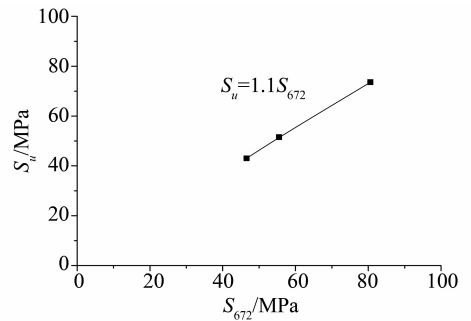


图 4 粉煤灰混凝土 S_u 与 S_{672} 的关系
Fig. 4 The relation between S_u and S_{672} of fly ash concrete with age

3 工程应用

某工程主塔楼高 330 m, 地下 3 层, 地上 74 层, 主塔楼基础采用桩筏基础, 底板混凝土量为 22 000 m^3 , 底板平均厚度为 4.5 m, 底板混凝土采用一次性连续分层浇筑, 浇筑时间为 60 h, 混凝土的强度等级要求 C40, 内部埋设温度传感器, 以监测混凝土内部的温度发展情况。为了控制混凝土温度应力, 要求混凝土的浇筑入模温度不超过 32 $^{\circ}C$, 混凝土养护期间内部最高温度不得高于 85 $^{\circ}C$, 混凝土内任何两点的温度差值不能大 25 $^{\circ}C$ 。在不增加过多的施工成本条件下, 只有掺加粉煤灰来降低混凝土的早龄期的水化热, 配合比如表 5 所示, 实测混凝土坍落度 230 mm, 混凝土入模温度 22 $^{\circ}C$, 实测底板中心混凝土和表面的温度发展如图 6 所示, 7 d 龄期时中心混凝土与表面混凝土的最大温差约为 20 $^{\circ}C$, 满足要求。利用式 (8) 计算出底板中心和表面粉煤灰混凝土早龄期抗压强度的发展如图 7 所示, 表面混凝土钻心取样实测抗压强度值与计算值比较接近。

表 5 混凝土配合比

Table 5 Concrete mixture kg/m^3

水泥	粉煤灰	砂	石子	水	减水剂
300	120	800	1 030	170	4.2

$$S = \beta S_{672} \frac{K_r(t_e - t_{0r})}{1 + K_r(t_e - t_{0r})} =$$

$$1.1 \times 48 \times \frac{0.011 \times (t_e - 8)}{1 + 0.011 \times (t_e - 8)} \text{MPa}$$



图 5 温度传感器布置

Fig. 5 Sensor of temperature

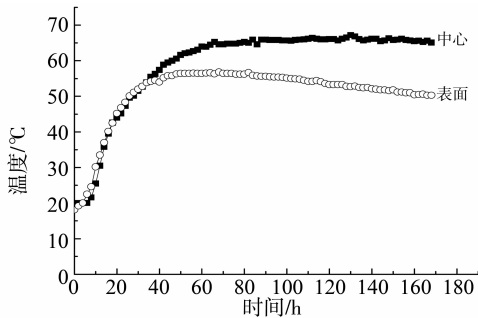


图 6 底板中心混凝土的温度随龄期的变化

Fig. 6 The center of the bottom plate concrete temperature varies with age

4 结 论

1) 比较了正常养护和变温养护条件下, 不同强度等级的粉煤灰混凝土的抗压强度发展, 发现温度历程对粉煤灰混凝土早龄期的抗压强度发展有明显的影响, 和标准养护条件相比, 温度升高对粉煤灰混凝土的抗压强度有利。

2) 以等效龄期为基础, 建立了粉煤灰混凝土早龄期抗压强度计算公式: $S = \beta S_{672} \times \frac{K_r(t_e - t_{0r})}{1 + K_r(t_e - t_{0r})}$ 。利用粉煤灰混凝土在实验室标准养护条件下 672 h 的抗压强度和测定工程中粉煤灰

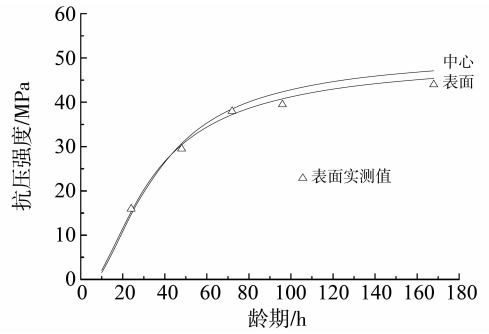


图 7 粉煤灰混凝土计算抗压强度与实测值

Fig. 7 Fly ash concrete compressive strength and the measured value

混凝土的温度变化历程, 能够较准确计算结构中粉煤灰混凝土的早龄期抗压强度, 经过实际工程使用, 能够有效指导粉煤灰混凝土的工程应用。

参考文献:

- [1] AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(1) 327 - 363.
- [2] ONER A, AKYUZ S, YILDIZ R. An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete [J]. Cement Concrete Research, 2005, 35(12):1165 - 1171.
- [3] OBADA K, SHARFUDDIN M. Assessment of high volume replacement fly ash concrete concept of performance index [J]. Construction and Building Materials, 2013, 39: 71 - 76.
- [4] 胡晓鹏, 牛获涛, 张永利. 粉煤灰混凝土早期强度的现场调查与试验研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 676 - 680.
- [5] 张立明, 余红发, 宁作君. 浸烘与加载耦合作用下混凝土的损伤失效研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(3): 40 - 44.
- [6] 叶茂, 皮音培, 任珉等. 分散式钢棒混凝土柱非线性数值模拟研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(1): 23 - 28.
- [7] 宫经伟, 周宜红, 黄耀英, 等. 考虑温度历程的早龄期大坝混凝土自生体积变形分离方法现场试验 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(4): 90 - 95.
- [8] YOSHITAKE I, ZHANG W, MIMURA Y et al. Uniaxial tensile strength and tensile Young's modulus of fly-ash concrete at early age [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 514 - 521.
- [9] 金贤玉, 田野, 金南国. 混凝土早龄期性能与裂缝控制 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 204 - 212.

(C-2, d)。

化合物 6: 无色片状结晶 (MeOH-H₂O), C₈H₈O₄, θ_{mp} 134 ~ 136 °C, ESI-MS m/z 167 [M - H]⁻; ¹H NMR (400 MHz, CD₃OD) δ_H : 7.56 (1H, br. s, H-2), 7.54 (1H, d, J = 8.5 Hz, H-6), 6.84 (1H, d, J = 8.8 Hz, H-5), 3.81 (3H, s, -OCH₃); ¹³C NMR (100 MHz, CD₃OD) δ_C : 168.2 (C-7, s), 152.8 (C-4, s), 148.8 (C-3, s), 125.4 (C-6, s), 123.3 (C-1, s), 115.9 (C-2, d), 114.0 (C-5, d), 56.5 (C-8, q)。

化合物 7: 无色针状结晶 (MeOH), C₇H₆O₅, θ_{mp} 235 ~ 237 °C, ESI-MS m/z 169 [M - H]⁻; ¹H NMR (400 MHz, CD₃OD) δ_H : 7.06 (2H, s, H-2, 6); ¹³C NMR (100 MHz, CD₃OD) δ_C : 170.5 (C-7, s), 146.5 (C-3, 5, s), 139.7 (C-4, s), 122.1 (C-1, s), 110.5 (C-2, d)。

致谢: 感谢 11 级林秋纯、邓迪和 10 级杨敏、叶书豪和陈婉文五位同学在化合物分离过程中的实验工作。感谢中山大学分析测试中心姚俊华、关山越老师对化合物结构测试工作的支持。

参考文献:

- [1] 何蓉蓉, 姚新生, 栗源博. 广东凉茶的“泻火”作用与物质基础研究[J]. 世界科学技术: 中医药现代化, 2009, 11(6): 834 - 839.
- [2] 王志芳, 符崖, 向俊, 等. 广东凉茶颗粒苷类化学成分研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(2): 79 - 83.
- [3] 钟浩, 薛晓霞, 姚庆强, 等. 半枝莲化学成分的研究[J]. 中草药, 2008, 39(11): 21 - 23.
- [4] 林小静, 王岱杰, 耿岩玲, 等. 金银花主要成分对铜绿假单胞菌多耐药菌株的抑制作用研究[J]. 食品与药品, 2013, 15(1): 12 - 15.

- [5] 宝丽, 姚新生, 何蓉蓉, 等. 广东凉茶颗粒对应激小鼠生殖器官过氧化状态的改善作用[J]. 中药新药与临床药理, 2008, 19(4): 253 - 256.
- [6] 杨丽娟, 羊晓东, 李良. 藏药云南兔耳草的化学成分研究[J]. 中药材, 2005, 28(9): 767 - 768.
- [7] 陆颖, 段书涛, 潘家祜, 等. 中药大蓟的化学成分研究[J]. 天然产物研究与开发, 2009, 21: 563 - 565, 615.
- [8] 唐全勇, 贾志宇, 赵云转, 等. 咖啡酸对破骨细胞形成及组织蛋白酶 K 基因表达的抑制[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(46): 8561 - 8565.
- [9] 黄婷, 吴霞, 王英, 等. 地胆草化学成分的研究[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2009, 30(5): 553 - 555.
- [10] 赵军, 杨伟俊, 任远, 等. 刺山柑化学成分研究[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24: 52 - 54.
- [11] 魏金霞, 李丹毅, 华会明, 等. 金莲花化学成分的分选与鉴定(II)[J]. 沈阳药科大学学报, 2012, 29(1): 12 - 15.
- [12] 关水, 李海华, 葛丹, 等. 原儿茶酸调节神经干/祖细胞分化的作用研究[J]. 中国药理学通报, 2012, 28(9): 1218 - 1223.
- [13] 郑丹, 张晓琦, 王英, 等. 桂艾纳香地上部分的化学成分[J]. 中国天然药物, 2007, 5(6): 421 - 424.
- [14] 王晓梅, 张倩, 热娜·卡斯木, 等. 锁阳全草化学成分的研究[J]. 中草药, 2011, 42(3): 458 - 460.
- [15] 张雷红, 张晓琦, 江永南, 等. 宽叶大戟全草化学成分研究[J]. 中药材, 2008, 31(12): 1820 - 1822.
- [16] 陈碧琼, 聂咏飞, 涂华. 中药青果的化学成分及药理作用研究进展[J]. 广州化工, 2012, 40(21): 16 - 17.
- [17] DENG J W, FAN C L, JIANG Z G, et al. Quality assessment and origin tracing of Guangdong Liangcha granules using direct mass spectrometry fingerprinting [J]. Analytical Methods, 2012, 4: 3638 - 3645.

(上接第 87 页)

- [10] 丁建彤, 陈波, 蔡跃波, 等. 温度历程对早龄期混凝土抗裂性的影响[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2011, 32(2): 236 - 240.
- [11] 陈文瑜, 黄小清, 汤立群. 混凝土连续刚构箱梁桥的温度场分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(S2): 114 - 116.
- [12] SAUL A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure [J]. Magazine of Concrete Research, 1951, 2(6): 127 - 140.
- [13] PLOWMAN J. Maturity and the strength of concrete

[J]. Magazine of Concrete Research, 1956, 8(22): 13 - 22.

- [14] HANSEN P F, PEDERSEN J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete strength [J]. Nordic Concrete Federation, 1977, 1(19): 21 - 25.
- [15] BERNHARDT C J. Hardening of concrete at different temperatures [C] // RILEM Symposium on Winter Concreting, Copenhagen, Danish, Institute for Building Research, Session B-II, 1956: 10.