

水环境下的混凝土湿度影响因素试验

张国辉^{1,2}, 李肖杭¹, 魏海¹

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500;
2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:采用电热恒温鼓风干燥箱对不同强度等级、最大骨料粒径、试件尺寸的混凝土试件进行干燥, 将干燥后试件置于水中自由吸水, 分析其含水率和饱和度的变化规律, 建立不同混凝土试件湿度随吸水时间变化的预测方程。结果表明:混凝土湿度随浸泡时间的延长而增大, 强度等级越低, 最大骨料粒径越小, 比表面积越大, 吸水速率越快, 含水率越高。浸泡时间为72 h时, C15、C20、C30混凝土饱和度分别已达96.88%、96.59%、97.70%;随浸泡时间的继续延长, 饱和度增加速度变缓。混凝土吸水过程近似可划分为近似线性吸水阶段、非线性吸水阶段、近似饱和阶段。

关键词:混凝土; 水环境; 吸水规律; 湿度

中图分类号: TU528.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)06-0051-05

Experimental study on concrete humidity under water environment//ZHANG Guohui^{1,2}, LI Xiaohang¹, WEI Hai¹
(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Concrete specimens of different strength grades, maximum aggregate particle sizes and specimen sizes were dried in an electro-thermal constant temperature blast oven. The specimens after drying were placed into water which was absorbed freely. The change rules of the moisture content and saturation were analyzed and the prediction formulas for concrete humidity with soak time were found. The results demonstrate that the concrete humidity exhibited a significant increasing trend with increasing soak time. Besides, the lower the strength grades, the smaller the maximum aggregate particle size, the larger the specific surface area, the water absorption rate is faster and the humidity is higher. When the soaking time is 72 h, the concrete saturation of C15, C20 and C30 specimens reaches 96.88%, 96.59% and 97.70%, respectively. With the extension of soaking time, the concrete humidity increases slowly, and the water absorption process of concrete can be approximately divided into linear water absorption, nonlinear water absorption and approximate saturation stages.

Key words: concrete; water environment; water-absorption regulation; humidity

混凝土结构部分或全部表面经常与水接触,如大坝、过河桥梁的基础及墩台、海岸及近海岸的结构物、海洋采油平台等,由于混凝土具有大量毛细管和孔隙,水会渗透到混凝土孔隙和裂缝中,使得混凝土结构常处于不同湿度状态^[1-3]。已有研究表明,混凝土孔隙或裂缝中的自由水对混凝土的力学特性存在较大的影响^[4-5],Rossi等^[6]通过试验研究了水对混凝土力学性能的影响规律,得到应变速率为0.50 s⁻¹时,饱和混凝土抗拉强度仅为干燥混凝土的75%。Li^[7]通过试验研究表明,干燥混凝土的强度要明显高于饱和混凝土,随浸泡时间的延长,混凝土强度逐

渐降低,且湿度对水灰比高的混凝土强度影响更加明显。王海龙等^[8]的研究表明饱和混凝土与干燥混凝土相比,抗压强度下降了4.5%,劈裂抗拉强度下降了11.41%。混凝土内部湿度的大小直接影响了混凝土力学特性的准确评价,因而混凝土吸水规律研究是混凝土力学性能研究的重要基础。

土壤物理学中首先引入了材料在非饱和状态下的吸水理论,后来通过理论及试验证实,该方法同样可以用来表征非饱和多孔建筑材料中的水分迁移过程^[9-10]。混凝土由固、液、气三相组成,这三相中均有水分的存在,按照水的存在形式,可以将混凝土中

基金项目:昆明理工大学引进人才科研启动基金(KKS201704026);清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(sklhse-2019-C-02);云南省运用基础研究计划(2019FD052)

作者简介:张国辉(1988—),男,讲师,博士,主要从事水工混凝土材料耐久性研究。E-mail:zgh_water@kmust.edu.cn

通信作者:魏海(1975—),男,副教授,博士,主要从事水工结构数值分析研究。E-mail:weihai2005@126.com

的水分分为自由水(毛细孔水)、吸附水、结晶水和结构水(层间水)^[11-12]。当混凝土处于不平衡状态时,混凝土内部不同形式的水分是可以相互转化的,在湿润过程中,一部分自由水会转变为吸附水。混凝土中水分存在形式通常难以确定,因而要精确测定混凝土中的水分分布和形式是较为困难的,现有研究通常将不同形式的水分作为一种整体水分来分析^[13]。非饱和状态的混凝土试块或结构的部分表面或全部表面同液态水直接接触,通过混凝土孔的毛细吸附力将液态水吸入混凝土内部,在这个过程中除非外界压力很大,否则毛细吸附力作用是水分进入混凝土内部的主要驱动力。研究者常采用剖开测重法直观测量混凝土毛细吸水速度,但难以表征其动态吸水过程。核磁共振、中子照相射线技术能够将混凝土整个吸水过程可视化,但普通实验室因缺乏设备而难以实现^[14]。李洪马等^[15]通过剖开法测量吸水高度,得出混凝土中的毛细吸水过程是一个早期吸水速度较快、吸水量较大、曲线呈线性增长,而后吸水速度降低、吸水量减少、曲线较为平缓的过程。Hall 等^[16-17]通过核磁共振试验得到了混凝土内部水分分布规律,并分析了温度、流体特性对混凝土吸水的影响规律。

综上,目前研究者主要关注于混凝土一维毛细吸水和一维吸水扩散理论与试验研究,较少关注混凝土三维吸水规律,缺乏不同混凝土在三维吸水环境下的湿度变化规律研究。鉴于混凝土结构服役环境多为复杂的三维吸水工况,且试件湿度状态将影响到试件室内力学性能检测结果的准确性,本文研究不同最大骨料粒径、强度等级、试件尺寸的混凝土在三维吸水条件下,混凝土自由吸水规律及其影响因素,为不同湿度下的混凝土力学性能研究提供支撑。

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥采用 P · C 32.5R 级复合硅酸盐水泥,标

准稠度用水量为 28.6%,安定性合格,初凝时间 4.2 h,终凝时间 5.3 h,28 d 抗压强度 38.58 MPa;砂子采用天然中砂,细度模数为 2.43,泥沙质量分数为 0.8%,表观密度为 2.59 g/cm³,堆积密度为 1 540 kg/m³,有害物质含量均在规定值以下;粗骨料采用粒径为 5 ~ 20 mm 和 20 ~ 40 mm 的卵石,泥沙质量分数为 0.6%,表观密度为 2.65 g/cm³,堆积密度为 1 563 kg/m³。

混凝土强度等级设置为 C15、C20、C30,每种强度等级的混凝土采用 2 种最大骨料粒径,分别为 20 mm 和 40 mm,即 5 ~ 20 mm、5 ~ 40 mm 的单级配与两级配粗骨料。混凝土拌合过程按照 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》进行,试件养护条件为标准养护。

1.2 试验设计与方法

试验控制因素为强度等级、最大骨料粒径、试件尺寸和浸泡时间,按照预设的控制因素设置 9 个试验组,每组 6 块试件,总计 54 块试件,具体分组及主要参数如表 1 所示。试件标准养护后放入电热恒温鼓风干燥箱内,干燥控制条件采用本团队研究确立的最佳干燥工艺^[18-19],即在 105℃ 持续干燥 120 h。完全干燥的试件待自然冷却后,记录其质量,然后将试件分组放入水箱中,慢慢加入自来水,让水面与试件顶面平齐,并且保证试件吸水后仍能被淹没。在开始浸泡的 10 h 内每隔 0.5 h 将各组试件取出,然后用湿布擦拭表面,使表面不存在水滴,但仍保持湿润状态,称取浸泡后试件质量,再放回水箱中继续浸泡。在浸泡时间为 10 ~ 20 h 内每隔 1 h 检测一次质量,随着浸泡时间的延长适当增大试件质量检测的间隔时间,各试验组浸泡时间总长均为 270 h。通过分别间歇记录 9 个试验组试件质量随浸泡时间的变化过程,按照式(1)(2)分别计算含水率和饱和度。当混凝土试件吸水速率(混凝土试件单位时间单位表面积吸收水的质量)不大于 2×10⁻³ kg/(m² · h) 时,即认为试件达到近似饱和状态,每个试验组的含水率与饱和度均为 6 个试件的平均值。

表 1 试验分组及配合比

组号	强度等级	最大骨料 粒径/mm	水灰比	试件尺寸/mm			配合比/(kg · m ⁻³)				
				长	宽	高	水	水泥	砂	小石(5 ~ 20 mm)	中石(20 ~ 40 mm)
1	C15	20	0.65	100	100	100	175	269	1 260	745	
2	C15	20	0.65	150	150	150	175	269	1 260	745	
3	C15	40	0.65	150	150	150	158	243	729	709	709
4	C20	20	0.55	100	100	100	175	318	1 254	737	
5	C20	20	0.55	150	150	150	175	318	1 254	737	
6	C20	40	0.55	150	150	150	150	273	685	685	615
7	C30	20	0.42	100	100	100	194	462	1 133	665	
8	C30	20	0.42	150	150	150	194	462	1 133	665	
9	C30	40	0.42	150	150	150	165	391	581	646	646

$$\rho_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

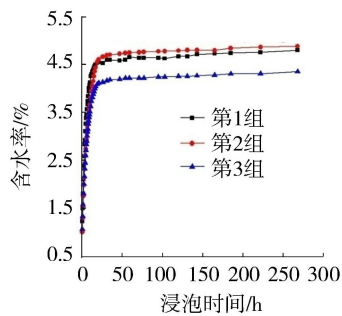
$$S_t = \frac{m_t - m_0}{m_w - m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ρ_t 为浸泡时间 t 时的含水率,%; S_t 为浸泡时间 t 时的饱和度,%; m_t 为浸泡时间 t 时的试件质量,kg; m_w 为饱和试件的质量,kg; m_0 为干燥试件的质量,kg。

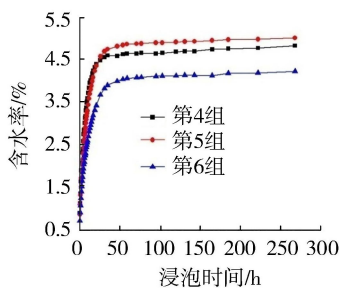
2 试验成果及分析

2.1 不同浸泡时间下的湿度

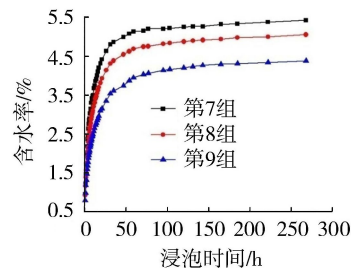
通过间歇记录不同浸泡时间下的试件吸水质量,共获取 54 个试件的吸水质量数据,得到不同强度等级、最大骨料粒径、试件尺寸的混凝土含水率随浸泡时间的变化规律(图 1)。由图 1 可知,各组试件的含水率随浸泡时间的变化规律基本相似,在浸泡前期的 5 h 内,含水率呈近似线性快速增长,随浸泡时间的延续,含水率呈非线性增长,待浸泡后期试件达到近似饱和状态时,含水率变化极为缓慢,基本保持恒定。值得注意的是,由于混凝土吸水过程是复杂而缓慢的过程,短时间内并不能达到绝对饱和



(a) C15混凝土



(b) C20混凝土



(c) C30混凝土

图 1 不同混凝土的含水率变化曲线

状态,因而本文定义的饱和状态为近似饱和状态。

由图 1 可以得出:

a. 最大骨料粒径和试件尺寸相同时,相同浸泡时间条件下,强度等级越低,吸水速率越快,含水率越高。譬如,最大骨料粒径为 40 mm,试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的 3 种强度等级混凝土试件中,浸泡时间为 32 h 时,C15 混凝土试件的含水率分别为 C20、C30 混凝土的 1.09 倍、1.18 倍。达到相同含水率,低强度等级混凝土所需时间较短,譬如最大骨料粒径为 40 mm,试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的 3 种强度等级混凝土试件中,当含水率达到 3.75% 时,C15 混凝土所需浸泡时间仅为 C20、C30 混凝土的 42.68%、25.92%。

b. 相同水灰比和试件尺寸条件下,试件的最大骨料粒径越大,试件达到饱和状态时含水率越低。譬如第 5、6 试验组的水灰比均为 0.55,试件尺寸均为 150 mm×150 mm×150 mm,当浸泡时间为 125 h 时,最大骨料粒径为 20 mm 的第 5 组混凝土试件含水率是最大骨料粒径为 40 mm 的第 6 组含水率的 1.19 倍。

c. 相同水灰比和最大骨料粒径条件下,试件表面积与体积之比(比表面积)越大,试件达到饱和状态时,其含水率越高。譬如,第 4、5 试验组具有相同骨料粒径和水灰比,第 5 组试件的比表面积为 0.04 mm²/mm³,第 4 组试件的比表面积为 0.06 mm²/mm³。浸泡时间均为 100 h 时,第 5 组试件含水率为第 4 组的 1.05 倍。

目前我国工程项目与室内混凝土试验主要采用尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试件,且骨料级配为两级配。因而对本试验中第 3、6、9 组数据,采用 Gauss 函数拟合得到强度等级为 C15、C20、C30,最大骨料粒径为 40 mm 的混凝土标准立方体试件含水率、饱和度关于浸泡时间的函数关系式,见式(3)(4)。图 2 为 C15、C20、C30 混凝土含水率试验值与预测值的对比,图 3 为 C15、C20、C30 混凝土饱和度试验值与预测值的对比。由

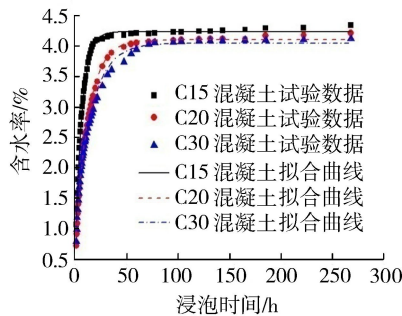


图 2 含水率的试验值与预测值对比

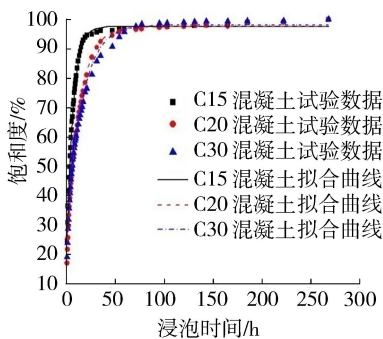


图3 饱和度的试验值与预测值对比

图2、3可知,试验值与公式预测值吻合较好,有良好的相关性,表明该拟合公式可用于混凝土含水率与饱和度的估算,同时为后续不同湿度下的混凝土力学性能研究的湿度控制提供依据。

$$\rho_t = A_0 + A_1 e^{-t/A_2} \tag{3}$$

$$S_t = A'_0 + A'_1 e^{-t/A'_2} \tag{4}$$

式中: A_0 、 A_1 、 A_2 、 A'_0 、 A'_1 、 A'_2 为拟合函数常数,详见表2。

表2 公式(3)(4)参数

强度等级	$\rho_t = A_0 + A_1 e^{-t/A_2}$				$S_t = A'_0 + A'_1 e^{-t/A'_2}$			
	A_0	A_1	A_2	R^2	A'_0	A'_1	A'_2	R^2
C15	4.23	-3.36	6.42	0.99	97.58	-77.39	6.42	0.99
C20	4.11	-3.34	12.55	0.99	97.48	-79.14	12.55	0.99
C30	4.04	-3.05	15.34	0.99	98.08	-73.88	15.34	0.99

2.2 混凝土吸水机理及过程分析

以C15混凝土含水率和吸水速率随浸泡时间的变化规律为例(图4),进一步分析混凝土的吸水特性。由图4可见,混凝土吸水过程近似可划分为3个阶段,即AB、BC、CD段。AB段为近似线性吸水阶段,时间段为0~3h,含水率呈线性快速增长,平均吸水速率达到0.42 kg/(m²·h),浸泡3h后试件含水率已达近似饱和含水率的49.81%。该阶段水分主要通过吸附和表面扩散进入干燥混凝土孔隙中,水在孔壁上形成吸附层,水分通过扩散进入试件内部,表现为表面吸水,水分分布于混凝土表层。将浸泡3h的试件劈裂成两半(图5(a)),此时水分仅

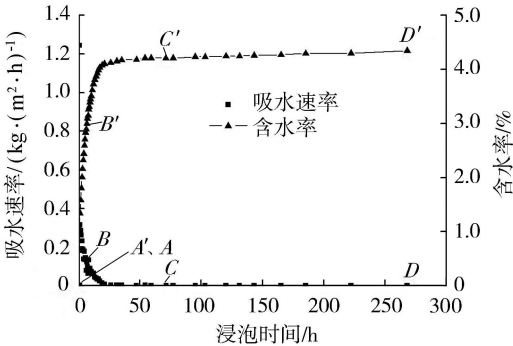


图4 C15混凝土含水率曲线与吸水速率曲线

分布于试件表层部分,试件中心部位完全干燥,水分浸入深度约为2~3cm。

BC段为非线性吸水阶段,时间段为3~72h,含水率呈非线性递增,吸水速率逐渐降低。随着内部湿度的继续增加,水分持续以水膜形式向试件内部传输,出现局部水饱和,形成液体渗流,但水分并未均匀分布于整个试件,试件中心位置仍存在部分干燥区。浸泡72h后试件含水率已达饱和含水率的96.88%。此时将浸泡试件劈裂分开(图5(b)),水分基本已浸入试件内部,达到局部饱和状态,但试件中心部分仍存在部分干燥区。

CD段为近似饱和阶段,时间段为72~270h,该阶段吸水速率极为缓慢,含水率仅增加了3.12%。少量水分继续以水膜形式向试件内部传输,形成液体渗流,同时在湿度梯度作用下,水分由外层向内层逐渐扩散,水分逐渐均匀分布于整个混凝土试件,该阶段试件总体饱和度已基本恒定,主要为水分分布状态的变化。浸泡270h时试件内部水分分布如图5(c)所示,水分基本已均匀分布于整个试件内部。



(a) $t = 3\text{ h}$



(b) $t = 72\text{ h}$



(c) $t = 270\text{ h}$

图5 不同浸泡时间下C15混凝土水分分布

3 结 论

a. C15、C20、C30两级配混凝土标准立方体试件在前3h内含水率随浸泡时间呈线性快速增长,浸泡3h时其含水率分别已达近似饱和含水率的49.81%、36.25%、38.50%,浸泡270h时各类型混凝土试件已到达近似饱和状态。

b. 强度等级越高,水灰比越小,混凝土的吸水能力越低,其吸收和容水能力越弱。混凝土最大骨

料粒径越小,试件达到饱和状态时含水率越高。混凝土试件比表面积越大,试件达到饱和状态时的含水率越高。

c. 混凝土三维吸水过程近似可划分为3个阶段:近似线性吸水阶段、非线性吸水阶段、近似饱和阶段。C15混凝土在近似线性吸水阶段的饱和度可达49.81%,而近似饱和阶段吸水速率极为缓慢,饱和度增长仅为3.12%。

参考文献:

- [1] 郑丹,李鑫鑫. 孔隙水对混凝土静力特性的影响研究综述[J]. 水利水电科技进展,2011,31(1):90-94. (ZHENG Dan, LI Xinxin. Review of researches of pore water on static properties of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(1): 90-94. (in Chinese))
- [2] 李庆斌,王海龙. 水环境对混凝土力学性能的影响研究述评[J]. 中国科技论文在线,2006,1(2):83-94. (LI Qingbin, WANG Hailong. Influence of ambient water on properties of concrete [J]. Science Paper Online, 2006, 1(2): 83-94. (in Chinese))
- [3] 邓友生,闫卫玲,杨敏,等. 环境水对混凝土静力强度影响的研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):99-104. (DENG Yousheng, YAN Weiling, YANG Min, et al. Research progress on influence of environmental waters on static strength of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4):99-104. (in Chinese))
- [4] WITTMANN F H, SUN Z, ZHAO T. Strength and fracture energy of concrete in seawater [C]//The 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London: Taylor & Francis, 2007: 213-217.
- [5] ROSSI P, BOULAY C. Influence of free water in concrete on the cracking process [J]. Magazine of Concrete Research, 1990,42(152):143-146.
- [6] ROSSI P, van MIER J G M, BOULAY C. Effect of loading rate on the strength of concrete subject to uniaxial tension[J]. Material and Structures, 1994, 27(5):260-264.
- [7] LI G. The effect of moisture content on the tensile strength properties of concrete [D]. Gainesville: University of Florida, 2004.
- [8] 王海龙,李庆斌. 孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J]. 工程力学,2006,23(10):141-144. (WANG Hailong, LI Qingbin. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete [J]. Engineering Mechanics, 2006,23(10): 141-144. (in Chinese))
- [9] 李春秋,李克非. 干湿交替下表层混凝土中水分传输: 理论、试验和模拟[J]. 硅酸盐学报,2010,38(7):1151-1159. (LI Chunqiu, LI Kefei. Moisture transport in concrete cover under drying-wetting and cycles: theory, experiment and modeling [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7): 1151-1159. (in Chinese))
- [10] 王新友,蒋正武,高相东,等. 混凝土中水分迁移机理与模型研究评述[J]. 建筑材料学报,2002,5(1):66-71. (WANG Xinyou, JIANG Zhengwu, GAO Xiangdong, et al. Review on the mechanism and model of moisture transfer in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(1): 66-71. (in Chinese))
- [11] 黄耀英,蔡忍,刘钰,等. 不同水灰比混凝土自干燥试验[J]. 水利水电科技进展,2018,38(5):65-70. (HUANG Yaoying, CAI Ren, LIU Yu, et al. Discussion on self-drying test of concrete with different water-cement ratios [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(5):65-70. (in Chinese))
- [12] 李春秋. 干湿交替下表层混凝土中水分与离子传输过程研究[D]. 北京:清华大学,2009.
- [13] 孙金阳. 混凝土湿润与干燥过程中水分传输规律研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [14] 沈春华,水中和,周紫晨. 水泥基材料水分传输及动力学研究. 武汉理工大学学报,2007,29(9):84-87. (SHEN Chunhua, SHUI Zhonghe, ZHOU Zichen. Research on water transport and kinetics in cement-based materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007,29(9):84-87. (in Chinese))
- [15] 李洪马,潘志华,陈阳义,等. 水泥基材料水分传输的影响因素研究[J]. 混凝土,2012(9):97-100. (LI Hongma, PAN Zhihua, CHEN Yangyi, et al. Research on the factors influencing water transport in cement-based materials [J]. Concrete, 2012(9): 97-100. (in Chinese))
- [16] HALL C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review[J]. Magazine of Concrete Research, 1989, 41(147):51-61.
- [17] SABIR B B, WILD S, O'FARRELL M. A water sorptivity test for martar and concrete[J]. Materials & Structures, 1998, 31(8):568-574.
- [18] ZHANG G H, LI Z L, ZHANG L F, et al. Experimental research on drying control condition with minimal effect on concrete strength [J]. Construction and Building Materials, 2017,135:194-202.
- [19] 张国辉,李宗利,张林飞,等. 干燥条件对混凝土强度影响试验研究[J]. 建筑材料学报,2015,18(5):840-846. (ZHANG Guohui, LI Zongli, ZHANG Linfei, et al. Experimental study on concrete strength for different drying conditions [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 840-846. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-28 编辑:雷燕)