第 48 卷第 10 期
2020 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 10
October，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200251

早期养护方式对超高性能混凝土性能的影响

蒋 睿

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所，北京 100081；
2. 高速铁路轨道技术国家重点实验室，北京 100081)

摘 要：研究了 20、40、60、90 ℃湿热以及自热保温 5 种早期养护方式对超高性能混凝土(UHPC)力学性能与微结构的影响。结果表明：UHPC 的早期抗压强度与养护温度正相关，但这种差异随龄期的延长而缩小，早期采用自热保温或 90 ℃养护，所得到 UHPC 的 28 d 抗压强度差异不足 4%，且两者的抗拉强度均较高。各配比净浆样品的放热速率峰值随着环境温度的提高而增大且出现时间提前，累积放热量在较短时间内达到稳定；4 d 时自热保温养护 UHPC 基体中 $Ca(OH)_2$ 衍射峰强度已较 20 ℃养护方式明显降低，掺合料已较好地参与反应；自热保温养护方式下 UHPC 水化产物中 C–S–H 凝胶的 Si–O 链平均链长与 90 ℃养护试件相当，且基体密实度极高。

关键词：超高性能混凝土；早期养护；自热保温；力学性能；微结构
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)10–1659–10
网络出版时间：2020–07–27



Influence of Early Curing Methods on Properties of Ultrahigh-performance Concrete

JIANG Rui
(1. Institute of Railway Construction, China Academy of Railway Sciences Co.,Ltd. Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory of High Speed Railway Track Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The effect of curing methods on the mechanical and microscopic properties of ultrahigh-performance concrete (UHPC) was investigated at different curing temperatures (*i.e.*, 20, 40, 60, and 90 ℃) and with thermal insulation. The results show that the compressive strength of UHPC is positively correlated to the early curing temperature, but the difference decreases with the age. The 28 d compressive strength difference of UHPC is less than 4%, and the tensile strength is high after curing with thermal insulation or at 90 ℃ in early stage. The peak value of heat flow of each samples increases with the increase of the ambient temperature and occurs in advance, and the cumulative heat release becomes stable in a shorter time. At 4 d, the intensity of $Ca(OH)_2$ diffraction peak in UHPC matrix after curing with thermal insulation is reduced, compared to that after curing at 20 ℃, indicating that the admixture is well involved in the hydration. The mean chain length of Si–O chain in the C–S–H gel for UHPC after curing with thermal insulation in early age is similar to that for the samples after curing at 90 ℃, and the matrix density is extremely high.

Keywords: ultrahigh-performance concrete; early-age curing; thermal insulation; mechanical properties; microstructure

近年来，超高性能混凝土(UHPC)结构以其超高的力学与耐久性能受到结构设计师的青睐，在公路桥梁、海工结构、维修加固等项目中逐步得到应用[1–2]，并呈良好发展态势。但 UHPC 的制备过程要求颇高，原料选择、物料搅拌、浇筑成型以及构件养护等过程均需严格控制。UHPC 强度发展对养护条件较为敏感[3]，高温蒸养更有助于发挥矿物掺合料的活性[4–5]，使 UHPC 结构在较短

收稿日期：2020–04–09。　修订日期：2020–05–16。
基金项目：国家重点研发计划(2018YFC0705400)；国家自然科学基金重点项目(U1934206)；中国铁道科学研究院青年基金(2019YJ052)。
第一作者：蒋 睿(1986—)，女，博士，助理研究员。

Received date: 2020–04–09.　**Revised date:** 2020–05–16.
First author: JIANG Rui (1986–), female, Ph.D., Research Assistant.
E-mail: 376782753@qq.com

时间内获得良好的力学性能，而较高的早期强度对于模板周转、工期控制又有着重要意义。

目前对于 UHPC 养护方面的研究，主要聚焦在养护方式与养护时间对 UHPC 力学、微结构与耐久性能的影响，其中常用的养护方式包括 20 ℃水养、高温蒸养、空气中养护、干热养护、高压养护等[6–8]。Gu 等[9]比较了 20 ℃标准养护 90 d、85 ℃蒸养 3 d 以及 105 ℃烘烤 3 d 试件的强度与耐久性，发现标准养护试件的抗弯强度最高，蒸养试件的抗压强度最高，烘烤试件的抗压强度与抗弯强度均最低，且由于存在较多的微裂纹，烘烤试件的抗氯离子渗透性能较差。Prem 等[10]研究了在水、蒸汽和热养护条件下 UHPC 的抗压强度和微观结构，认为热养护试样的力学性能最佳。高小建等[11]采用微波养护方式对矿渣粉取代水泥的质量分数分别为 10%、25%、50%、70%、90%的 UHPC 试件进行养护，发现微波养护可加速试样的水化作用，并促进晶体产物的形成，但所生成的 C–S–H 凝胶直链较短，与标准养护时生成的 C–S–H 不同。随着研究的深入，学者们尝试基于有限元、人工神经网络方法，根据不同养护条件下的输入与输出参数之间的关系进行建模，以预测 UHPC 性能[12–13]。

鉴于养护制度对于 UHPC 的早期性能发展具有重要意义，较普遍的观点认为，UHPC 构件宜采用工厂预制蒸养的方式生产，但对于钢桥面铺装组合结构、已有结构修复修补等需求场景[14]，高温蒸养往往较难实现。对于现浇 UHPC 结构，选择怎样的养护方式，以获得 UHPC 性能发展与工程施工进度之间的平衡，是影响 UHPC 推广应用的重要因素之一[15]。单方 UHPC 中胶凝材料用量通常约为普通混凝土的 2~4 倍，利用材料水化产生的热量进行 UHPC 的早期养护，或可成为体系早期强度增长的重要动力，而这种方式与传统的标准养护、高温蒸汽养护相比，会对 UHPC 的早期性能发展带来怎样的影响，尚缺乏相关报道。为此，本工作采用 20、40、60、90 ℃湿热养护以及自热保温养护 5 种不同的养护方式对不同配比的 UHPC 进行早期养护，研究不同养护方式下 UHPC 的力学性能发展情况，并借助水化热、X 射线衍射(XRD)、核磁共振(NMR)、扫描电镜(SEM)等分析测试手段，从水化产物的组成、结构等方面分析，探讨 UHPC 因早期养护方式不同而呈现出的力学性能差异与其微结构特征之间的联系。

1 实验

1.1 原材料与配合比

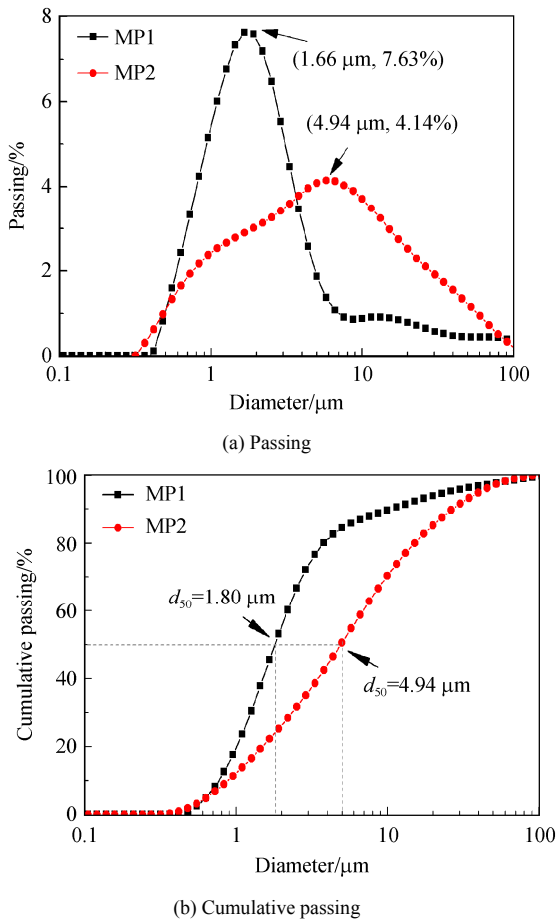
采用海螺 P·II 52.5 型水泥(C)；掺合料为原状硅灰(SF)、粉煤灰(MP1)、石灰石粉(MP2)，需水量比分别为 119%、86%、90% (质量分数)，粉体材料的化学组成见表 1，MP1 与 MP2 的粒度分布如图 1 所示。骨料由不同目数的分级河砂组成；外加剂为固含量 40%的高效聚羧酸减水剂(PCE)；钢纤维为

表 1 粉体材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of powder materials

Material	Mass fraction/%							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
C	19.25	3.82	3.37	63.53	2.76	3.45	0.12	0.75
SF	95.26	0.21	0.16	0.56	0.69	0.31	0.36	
MP1	53.83	19.10	11.06	8.33	0.74	1.04	1.61	1.87
MP2	1.87	0.52	0.28	52.90	0.43		0.03	0.06

C is cement; SF is silica fume; MP1 is fly ash; MP2 is limestone powder.



d_{50} is median particle diameter.

图 1 MP1 与 MP2 的粒度分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of MP1 and MP2

镀铜端钩型钢纤维，直径为 0.12 mm，长度为 13 mm。实验用 UHPC 配合比通过紧密堆积模型计算与实验验证相结合的方式得到，各原材料比例见表 2。在实验过程中同步成型 UHPC 基体(不含纤维)以及净浆(不含纤维与骨料)用于微观测试。

表 2　UHPC 配合比

Table 2　Mixing proportion of ultrahigh performance concrete (UHPC)

Type	Mixing proportion/(kg·m^{-3})							
	C	SF	MP1	MP2	PCE	Natural sand	Water	Steel fiber
A	924	176			19.8	1 100	186	158
B1	682	176	242		19.8	1 100	186	158
B2	682	176		242	19.8	1 100	186	158

PCE is polycarboxylate superplasticizer.

1.2　养护方式

对于自热保温养护方式，试件浇筑成型后立即移入自主设计的高效保温养护箱(图 2)中开始养护。养护箱内埋设有温度传感器，可实时监测箱内温度，待温度下降至与环境温度相当后，将试件从高效保温养护箱中取出拆模，后移入混凝土标准养护室[温度(20±2) ℃、湿度≥湿度标]继续养护至测试龄期，以 TB 指代此养护方式。

除采用自热保温养护方式外，其他试件在浇筑成型后，均置于混凝土标准养护室养护，24 h 拆模，接下来，将一部分试件继续放置在标准养护室中养护，以 T20 指代此养护方式；另一部分试件分别移入不同的水热养护箱中，以≤15 ℃/h 的速率升温至 40、60、90 ℃，恒温 48 h，再以≤15 ℃/h 的速率降至室温，取出置于混凝土标准养护室继续养护至测试龄期，分别以 T40、T60、T90 指代相应的养护方式。实验中各变量与编号的对应关系如图 3 所示。



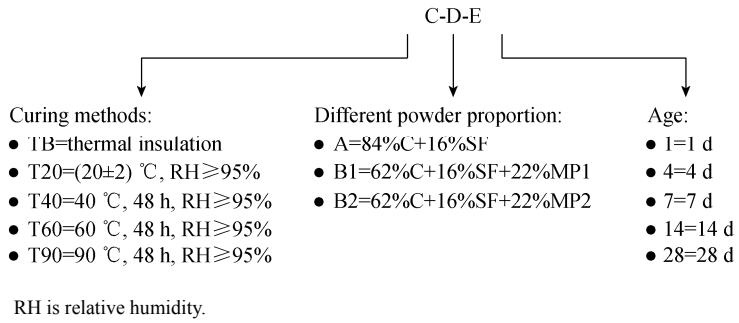
(a)



(b)

图 2　高效保温养护箱

Fig. 2　Thermal insulation container



RH is relative humidity.

图 3　试验变量与编号的对应关系

Fig. 3　Corresponding relationship between test variables and sample numbers

1.3　测试方法

1.3.1　力学性能　　采用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件，参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081–2002)及《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37–2018)测定 UHPC 抗压强度，实验设备为美特斯工业系统(中国)有限公司生产的 YAW6206 型压力试验机，加载速率为 1.0~1.5 MPa/s。对 UHPC 抗拉强度的测定，

采用 100 mm×100 mm×400 mm 试件，通过植筋胶将试件与单轴拉伸实验夹具粘接在一起，进行抗拉强度测试(图 4)，实验设备为上海华龙测试仪器有限公司生产的 WAW-600 型万能试验机，加载速率为 0.1 MPa/s。通过监测保温养护箱内与试件芯部的温升曲线发现，在 1 d 龄期时，温度达到峰值(约 65 ℃)，后缓慢降低，至 4 d 时降低至室温。分别测试了 UHPC 试件在不同养护方式下 1、4、7、14、28 d 的抗压强度，以及 28 d 的抗拉强度。

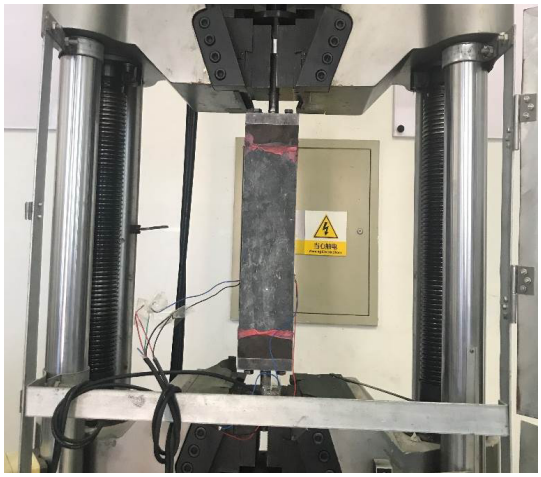


图 4 抗拉强度测试
Fig. 4 Tensile strength testing

1.3.2 水化热性能测试 采用美国 TA 公司生产的 TAM Air 型八通道水化微量热仪测试胶凝材料的水化热，仪器的可靠工作温度为 5~65 ℃，温度控制精度为±0.01 ℃，基线漂移偏差小于±20 μW，样品采用玻璃安瓿瓶盛放，以蒸馏水作为参比样。测试 UHPC 净浆样品在 20、40、60 ℃的水化热曲线。

1.3.3 微观性能测试 微观测试所用样品取自采用 T20、TB、T90 养护方式的 UHPC 试件。采用德国 Bruker 公司生产的 D8Advances 型 X 射线衍射仪进行物相分析，将龄期 4 d 的 UHPC 净浆样品，凿去试件中心并破碎，迅速浸泡于无水乙醇中终止水化，后将待测样品研磨至粉状，并置于北京陆希科技有限公司生产的 DZF-6020 型真空干燥箱中，在 50 ℃干燥直至质量恒定不变，测试过程中，2θ 为 5°~65°，扫描速率 2 (°)/min。采用德国 Bruker 公司生产的 Ascend 400MHz 型核磁共振仪，测试了龄期 28 d 的 UHPC 净浆样品的 ^{29}Si 固体核磁共振谱，样品制备方法与 XRD 测试相同，标准物为四甲基硅烷，核磁管为 7 mm ZrO_2。通过英国 ZEISS 公司生产的 Sigma 型场发射扫描电子显微镜进行微观形貌观测，测试样品取自龄期 28 d 的 UHPC 基体芯部，为 5~8 mm 见方的小块，采用无水乙醇中终止水化后，置于 50 ℃真空干燥箱中直至恒重。

2 结果与讨论

2.1 力学性能测试结果

UHPC 的抗压强度发展因早期养护方式的不同存在明显差异，整体而言，随着初始养护温度的提高，不同体系的早期抗压强度显著提升[16]，但随着龄期的延长，这种差异逐步缩小(图 5)。如采用 A 配比的 UHPC 试件，在经历不同养护方式后，TB-A、T20-A、T40-A、T60-A 与 T90-A 各组的 4 d 抗压强度分别为 158.7、103.1、126.4、144.7 以及 163.3 MPa，最高强度与最低强度差值高达 60.2 MPa，而至 28 d 时，这种差距缩小至 20.5 MPa。B1 与 B2 配比的 UHPC 试件，同样表现出类似的规律，不同早期养护方式下，各组 28 d 抗压强度差值均在 14%以内。

采用 TB 与 T60 养护方式的 UHPC，各测试龄期内抗压强度大致相同，以 TB 养护方式所得试件的抗压强度略高，这可能与高效养护箱内的温度峰值略高有关。TB-A 与 T90-A 的 4 d 抗压强度差异不足 7%，至 28 d 时进一步缩小至 4%以下。对于 B1 与 B2 两组配比，采用 TB 与 T90 两种不同养护方式后，28 d 的抗压强度差异分别为 2%与 3%。该现象表明，通过 TB 养护得到的 UHPC 具有较高的早期抗压强度，TB 或可取代高温蒸养成为 UHPC 制备的新方式。

UHPC 的强度增长主要集中在早期，随着龄期的延长，强度增长率逐渐减小，且当早期养护温度较高时，早期强度迅速发展，后续强度增长率进一步降低。如 T20-A 组 UHPC 在 1 d 拆模时强度仅为 71.6 MPa，但 1~4 d、4~7 d、7~14 d、14~28 d 的抗压强度增长率分别为 44%、23%、10%、11%；T40-A 组相应阶段的强度增长率则分别为 77%、10%、9%、7%；T90-A 组在 14~28 d 的强度增长率仅 3%。

掺入 MP1 与 MP2 后，UHPC 的抗压强度略低于单掺 SF 体系，但各配比 UHPC 早期抗压强度因养护方式而变化的规律相同。1 d 拆模时，采用 B1 配比的 UHPC 抗压强度略低于采用 B2 配比的 UHPC，经历不同早期养护方式后，T90-B1

组的 4 d 抗压强度高于 T90-B2 组，且至 14 d 时，采用 B1 配比的 UHPC 抗压强度均高于采用 B2 配比的 UHPC，这可能与 MP1、MP2 的水化活性不同有关。

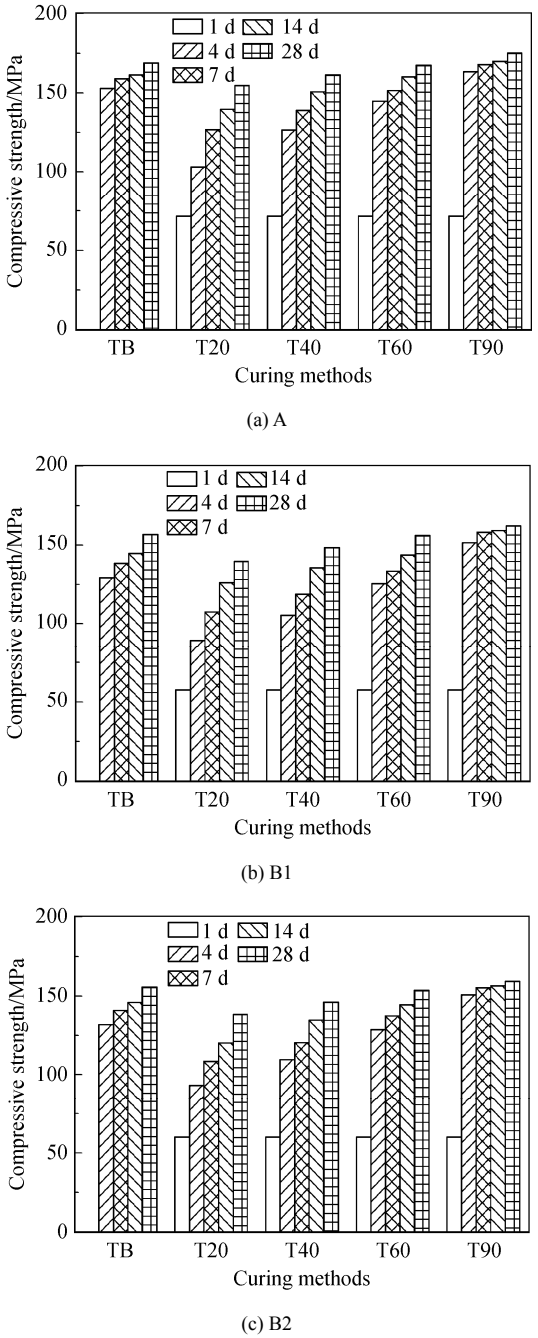


图 5　不同养护条件下具有不同配比的 UHPC 的抗压强度
Fig. 5　Compressive strength of UHPC with different curing methods

T20 养护方式下，各实验组抗拉强度最低(图 6)，这可能与该养护方式下，水泥的水化程度相对较低，且硅灰等活性矿物掺合料的二次水化程度不足有关。随着早期养护温度提高，UHPC 的 28 d 抗拉强度提升，但当早期养护温度由 60 ℃进一步提高至 90 ℃时，UHPC 试件 28 d 抗拉强度增长幅度较小。采用 TB 养护方式的 UHPC，表现出较好的抗拉性能，这可能是由于采用自热保温养护方式，有助于改善 UHPC 的微结构。

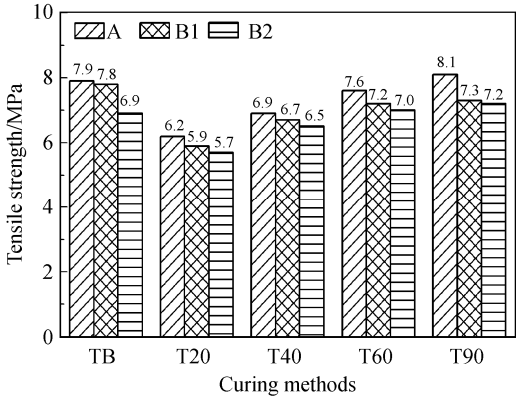
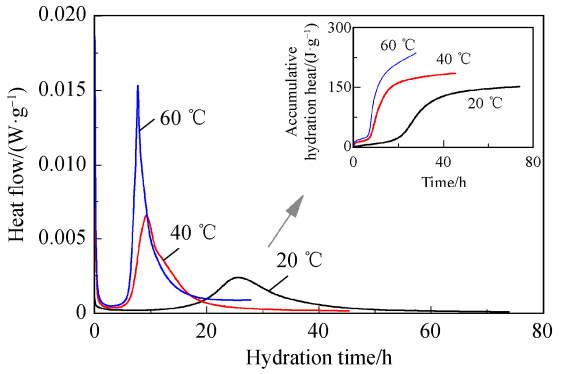


图 6　不同养护条件下 A,B1,B2 配比的 UHPC 的抗拉强度
Fig. 6　Tensile strength of UHPC with different curing methods

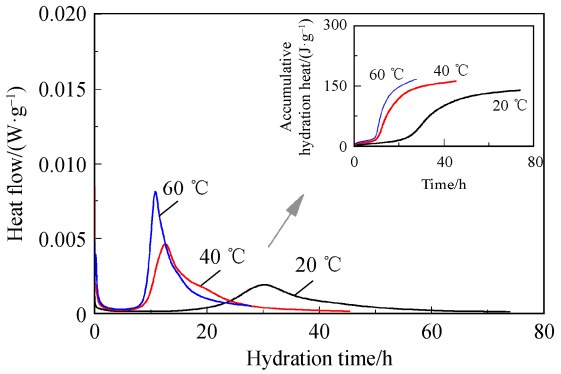
2.2　微观机理分析

净浆样品在 20、40、60 ℃的水化热曲线如图 7 所示。随着环境温度的升高，胶凝材料的水化速率加快，各体系放热速率曲线变得越来越尖锐，累积放热量在较短的时间内趋于稳定，故对于 20 ℃环境，水化热采集时长为 72 h，而对于 40 和 60 ℃环境，水化热采集时长分别缩短至 45 h 和 27 h。图 8 为根据各样品的水化热曲线提取的特征参数。在不同的环境温度下，B1 与 B2 配比净浆样品的放热峰值均明显低于 A 配比净浆样品。在 20 ℃环境中，B2 组水化放热速率峰值出现时间最早，这主要有 2 方面的原因：1) B2 配比中所采用的是 MP2，属于惰性材料，增大了体系中水泥的有效水灰比，导致水泥水化过程中各阶段的反应动力学参数减小[17]，故整体的水化放热速率有所提前；2) 由于 MP2 颗粒是水泥水化反应良好的成核位点，从而进一步促进了水泥的水化。但随着环境温度的提高，水化反应速率加剧，MP2 的上述作用被削弱。在不同的环境温度下，B1 实验组的水化放热速率峰值出现时间及其大小均低于另外 2 个体系，这是因为在水泥水化的过程中，Ca^{2+}化学吸附在粉煤灰颗粒表面，使 $Ca(OH)_2$ 和 C–S–H 的成核和再结晶化被延迟[18]。水化热曲线的特征较好地解释了 B1 系列的早期强度较低现象。就测试龄期的累积放热量而言，仍随着环境温度的提高而增大，

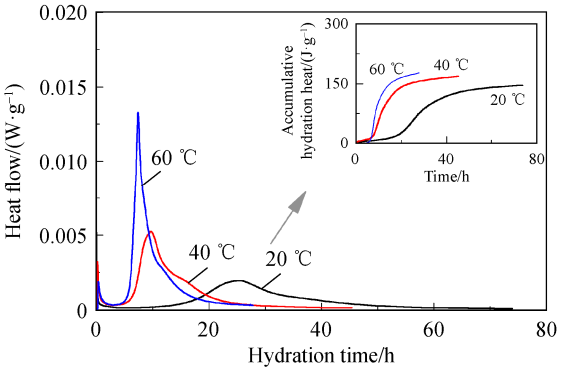
表明尽管不同细度的其他粉体的掺入有利于促进早期水化，水泥用量是影响早期水化放热量的关键因素，决定着水化产物的生成量，从而带来早期强度差异。



(a) A



(b) B1

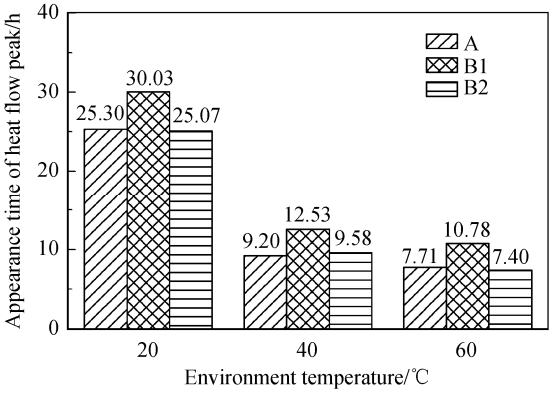


(c) B2

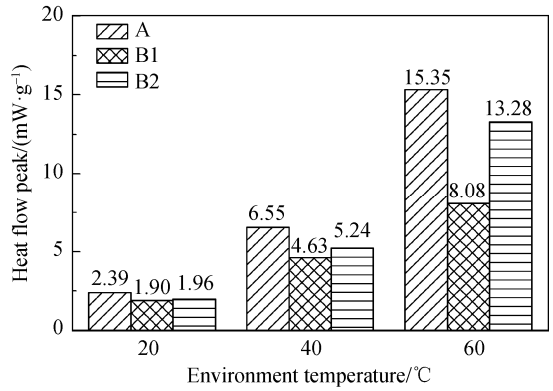
图 7 不同温度下 A，B1，B2 配比的净浆的水化热曲线

Fig. 7 Hydration heat curves of paste samples at various environment temperatures

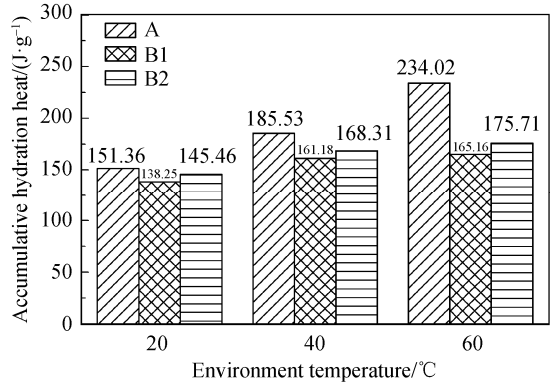
结合强度发展规律与水化热曲线特征可见，各实验组性能随龄期的演变规律类似，且早期差异性最为明显，故主要比较了 T20、TB 以及 T90 三种养护方式下各净浆样品 4 d 时的水化产物 XRD 谱，结果见图 9。各净浆样品的 XRD 衍射峰位置基本相同，表明早期养护方式的变化并不会改变水化产



(a) Appearance time of heat flow peak



(b) Heat flow peak



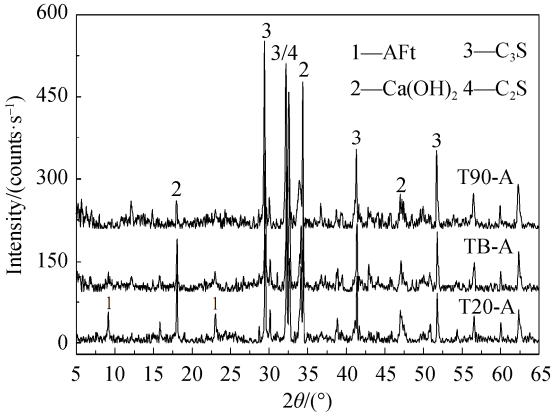
(c) Accumulative hydration heat

图 8 不同环境温度下净浆水化热特征参数

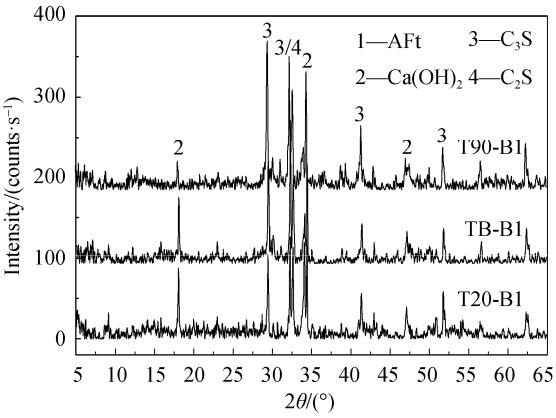
Fig. 8 Characteristic hydration heat parameters of paste at various environment temperatures

物的组成，但各物相峰强存在差异，表明养护方式对水化程度带来较显著的影响。由于 UHPC 净浆样品中未水化水泥颗粒较多，不同养护方式下均能明显观察到 C_3S、C_2S 矿物相，且峰强颇高，在一定程度上削弱了钙矾石(AFt)、$Ca(OH)_2$ 等水化产物的衍射峰强。当采用 T20 养护方式时，净浆样品中尚能观察到较弱的 AFt 衍射峰，采用 T90 或 TB 养护方式后，各体系样品基本无法观察到 AFt 衍射峰，

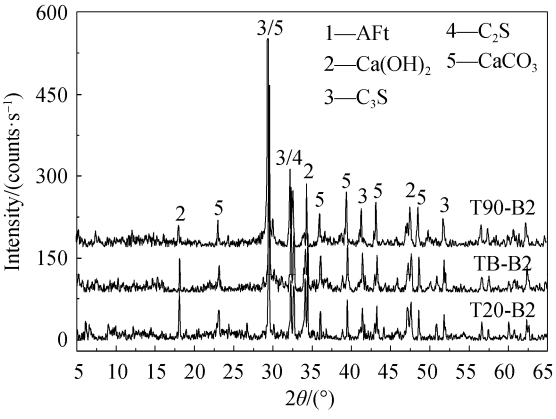
这与 T90 与 TB 体系的养护温度较高，AFt 难以稳定存在有关。各组样品的 $Ca(OH)_2$ 衍射峰强度由低到高依次为 T90、TB、T20 系列，表明 T90 养护方式下矿物掺合料参与水化的程度最高。由于 TB 养护方式下各样品的 $Ca(OH)_2$ 衍射峰强度在已较 T20 养护方式有着明显降低，表明硅灰等活性矿物掺合料已较好地参与了“二次水化反应”。



(a) A



(b) B1



(c) B2

AFt is ettringite.

图 9　经历不同养护方式后 A,B1,B2 配比的净浆的 XRD 谱

Fig. 9　XRD patterns of paste samples with different curing methods

水化热曲线以及 XRD 谱表明，各 UHPC 力学性能的差异源于其水化程度的不同，但却难以解释 TB 养护方式下，UHPC 的 28 d 抗拉强度较高的现象。由于 B1 与 B2 配比 UHPC 的强度发展规律类似，主要对 A、B1 配比的净浆样品进行了 NMR 测试，结果见图 10。Si 所处的 5 类化学环境用 Q^n 表示，其中 n 取 0~4，n=0 表示[SiO_4^{2-}]处于孤岛状态；n=1 表示[SiO_4^{2-}]处于二聚体或长链的链端；n=2 表示[SiO_4^{2-}]处于链中或形成了闭合的环；n=3 表示[SiO_4^{2-}]处于平面内网状结构；n=4 表示[SiO_4^{2-}]处于空间内的网状结构。根据各样品的 ^{29}Si NMR 谱，计算出 C–S–H 凝胶中 Si–O 链的平均链长(MCL)等诸多信息，统计结果见表 3。

通常情况下，水泥熟料矿物相 C_2S 和 C_3S 中的 Si 以 Q^0 的形式存在，而水化产物相 C–S–H 凝胶中的 Si 主要以 Q^1 和 Q^2 的形式存在。结合图 10 与表 3 可以看见，T20、TB、T90 三种养护方式下，各实验组水化产物相中的 MCL 存在较明显差异，整体而言，较高的早期养护温度，有利于提高熟料中硅相的水化程度以及 Si 元素化学环境的对称性。对于同一配比的净浆样品，采用 TB 养护方式后 Q^0 相对比例较采用 T20 养护方式有所降低，Q^1、Q^2(1Al)和 Q^2(0Al)信号峰的强度增加，峰形较为尖锐，表明熟料中硅相水化程度提高，C–S–H 凝胶的含量增多。随着养护温度的提高，C–S–H 凝胶硅氧四面体的聚合程度显著增加，但在养护温度达到 50 ℃以上时，C–S–H 凝胶的 MCL 值随着温度的升高变化不大[19]。故比较 TB 与 T90 两种养护方式下得到的 UHPC 净浆样品发现，其 MCL 较为接近，尤其是对于掺有 MP1 的 TB-B1 实验组，其 MCL 甚至略高于样品 T90-B1，这在一定程度上揭示了 TB 养护方式下 UHPC 抗拉强度较高的微观原因。

观察样品 T20-B1、样品 TB-B1 以及样品 T90-B1 组 28 d 龄期的 UHPC 基体 (图 11a~图 11c)可见，不同养护方式所得到的 UHPC 基体密实度均较高，界面过渡区界限模糊，浆体与骨料黏接良好，由于基体极为密实，未能在界面过渡区与孔隙边界观察到 $Ca(OH)_2$ 晶体生成(图 11d)。在样品 T20-B1 视野范围内，存在较明显的球状粉煤灰颗粒，水化产物形成的基体中微孔与微裂缝较多，相对而言，T90 组与 TB 组更为密实，视野范围内无明显的微缺陷。文献[20]指出，混凝土的抗拉强度对裂纹和孔隙十分敏感，故而在 T20 养护方式下，UHPC 的抗拉强度较低。

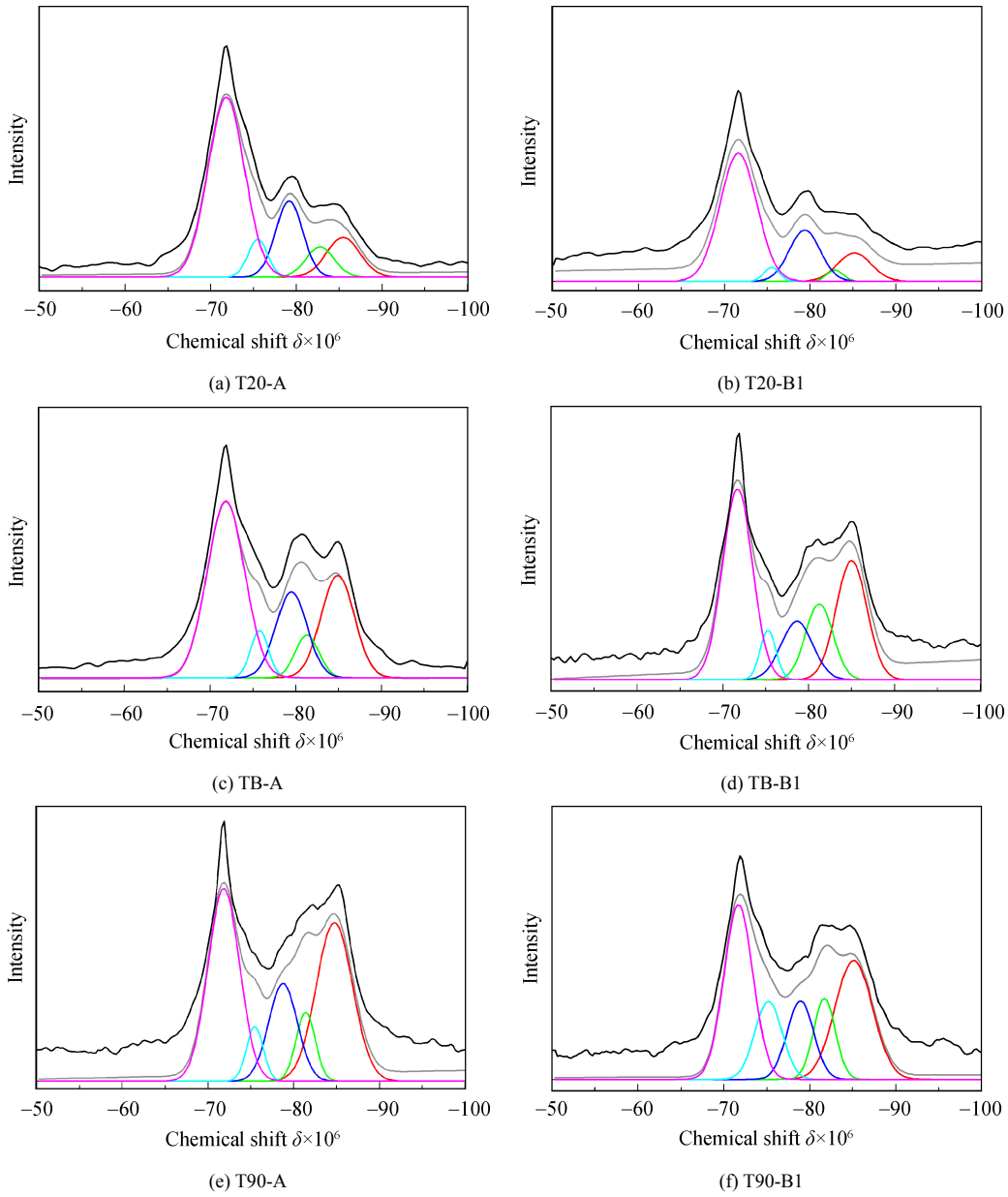


图 10 采用不同养护方式后净浆的 ^{29}Si NMR 谱

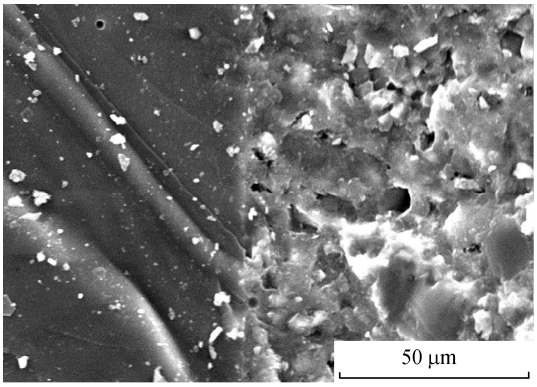
Fig. 10 ^{29}Si nuclear magnetic resonance spectra of paste samples with different curing methods

表 3 采用不同养护方式后净浆中 C–S–H 的组成相分布

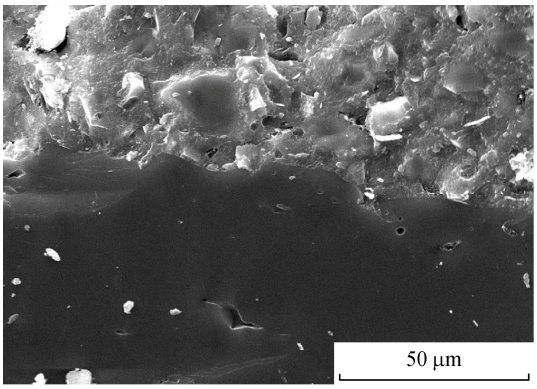
Table 3 C–S–H gel compositions in paste samples with different curing methods

Sample No.	Intensity of Q^n distribution of C–S–H gel/%					MCL
	Q^0	Q^{0H}	Q^1	Q^2(0Al)	Q^2(1Al)	
T20-A	56.13	6.21	16.85	7.33	12.48	5.09
TB-A	41.23	6.49	17.39	8.49	26.40	7.53
T90-A	35.91	6.59	17.61	8.78	31.11	8.30
T20-B1	60.51	2.65	12.42	12.26	12.16	6.91
TB-B1	40.99	5.75	12.87	14.39	26.00	10.30
T90-B1	32.90	13.62	13.43	11.30	28.75	10.10

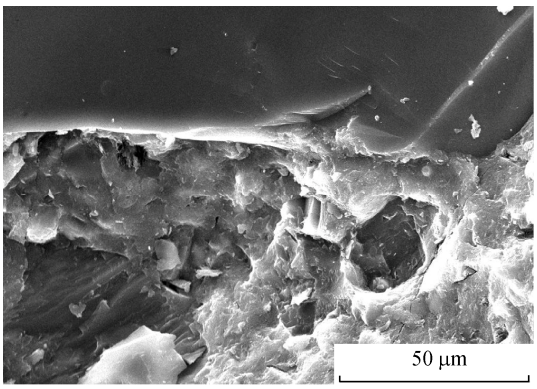
MCL is mean chain length.



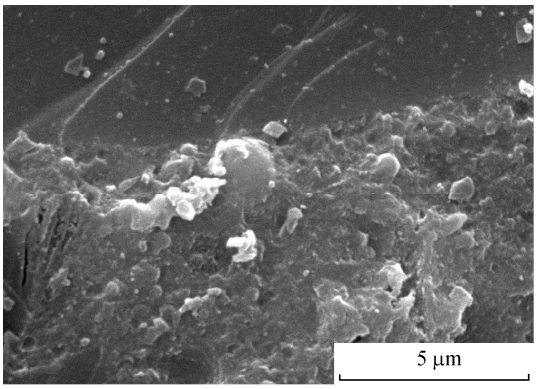
(a) T20-B1



(b) TB-B1



(c) T90-B1



(d) High magnification of Fig.11(b)

图 11　采用不同养护方式后 B1 配比样品的 SEM 照片

Fig. 11　SEM images of samples with mixing proportion of B1 curing with different methods

3　结论

1) UHPC 的强度在早期发展迅速，当早期养护温度提高时，各测试龄期内 UHPC 的抗压强度提高，但随着龄期的延长，该差异逐步缩小，至 28 d 时采用不同早期养护方式的 UHPC 强度差异均不超过 14%，其中早期采用自热保温养护方式或 90 ℃养护，所得到 UHPC 的 28 d 的抗压强度差异不足 4%，且两者的抗拉强度均较高。

2) 随着环境温度的提高，各体系放热速率曲线愈发尖锐，放热速率峰值增大且出现时间提前，累积放热量在较短时间内达到稳定；自热保温养护方式下，4 d 时 UHPC 基体中 $Ca(OH)_2$ 衍射峰强度已较 20 ℃养护方式明显降低，表明掺合料已较好地参与了“二次水化反应”。

3) 早期采用自热保温养护或 90 ℃养护的 UHPC，其 28 d 水化产物中 C–S–H 凝胶的平均 Si–O 链长相当，且基体均高度致密，故两者抗拉强度相当，早期凭借胶凝材料的水化热进行 UHPC 养护，或可取代高温蒸养，成为 UHPC 养护的新方式。

参考文献:

[1] WANG Z, WANG J Q, ZHU J Z, et al. Energy dissipation and self–centering capacities of posttensioning precast segmental ultra-high performance concrete bridge columns[J]. Struct Concr, 2020, 2(21): 517–532.

[2] 石磊. RPC130活性粉末混凝土在石武客专铁路工程盖板生产中的应用研究[J]. 铁道建筑, 2011(5): 139–140.
SHI Lei. Railw Eng (in Chinese), 2011(5): 139–140.

[3] PARK J S, KIM Y, CHO J R, et al. Early-age strength of ultra-high performance concrete in various curing conditions[J]. Materials, 2015, 8(8): 5537–5553.

[4] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWIL S, et al. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing[J]. Mater Struct, 2012, 45(3): 309–324.

[5] 史才军, 肖江帆, 曹张, 等. 材料组成对UHPC性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(6): 1005–1011.
SHI Caijun, XIAO Jiangfan, CAO Zhang, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2013, 32(6): 1005–1011.

[6] HAKEEM I, AZAD A K, AHMAD S. Effect of curing, fiber content and exposures on compressive strength and elasticity of UHPC[J]. Adv Cem Res, 2015, 27(4): 233–239.

[7] DOBIAS D, KOURIL M, NOVAKOVA R, et al. Measurement of chloride permeability in UHPC by accelerated method[J]. Solid State Phenom, 2017, 259: 80–84.

[8] WASHER G, FUCHS P, REZAI A, et al. Ultrasonic measurement of the elastic properties of ultra-high performance concrete (UHPC)[C]// Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure IV. San Diego, United

States, 2005: 5767–5774.

[9] GU C, SUN W, GUO L, et al. Effect of curing conditions on the durability of ultra–high performance concrete under flexural load[J]. J Wuhan Univ Technology–Mater Sci Ed, 2016, 31(2): 278–285.

[10] PREM P R, MURTHY A R, BHARATKUMAR B H. Influence of curing regime and steel fibers on the mechanical properties of UHPC[J]. Mag Concr Res, 2015, 67(17–18): 988–1002.

[11] 高小建, 李双欣. 微波养护对掺矿渣超高性能混凝土力学性能的影响及机理[J]. 材料导报, 2019, 33(1): 271–276.
GAO Xiaojian, LI Shuangxin. Mater Rev (in Chinese), 2019, 33(1): 271–276.

[12] GHAFARI E, BANDARABADI M, COSTA H, et al. Design of UHPC using artificial neural networks[J]. Brittle Matrix Compos, 2012, 5(4): 61–69.

[13] KODUR V K R, BHATT P P , SOROUSHIAN P, et al. Temperature and stress development in ultra–high performance concrete during curing[J]. Constr Build Mater, 2016, 122(30): 63–71.

[14] 魏林. 超高性能混凝土在沪通长江大桥上的应用[J]. 铁道工程学报, 2019(5): 85–89.
WEI Lin. J Railw Eng Soc (in Chinese), 2019(5): 85–89.

[15] KANG S H, LEE J H, HONG S G, et al. Microstructural investigation of heat-treated ultra-high performance concrete for optimum production[J]. Materials, 2017, 10(9): 1106–1118.

[16] ELKHADIRI I, PALACIOS M, PUERTAS F. Effect of curing temperature on cement hydration[J]. Ceramics, 2009, 53(2): 65–75.

[17] ZHOU H, LIU J, LIU J, et al. Hydration kinetics process of low alkalinity sulphoaluminate cement and its thermodynamical properties[J]. Procedia Eng, 2012, 27: 323–331.

[18] 王倩楠, 顾春平, 孙伟. 水泥-粉煤灰-硅灰基超高性能混凝土水化过程微观结构的演变规律[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 85–89.
WANG Qiannan, GU Chunping, SUN Wei. Mater Rev (in Chinese), 2017, 31(23): 85–89.

[19] 于文金, 罗永传, 弓子成,等. 温度对大掺量粉煤灰水泥水化C-S-H聚合度的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2011(11): 34–38,44.
YU Wenjin, LUO Yongchuan, GONG Zicheng, et al. J Wuhan Univ Technol (in Chinese), 2011(11): 34–38,44.

[20] 牛旭婧, 朋改非, 尚亚杰,等. 热水-干热组合养护对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1141–1148.
NIU Xujing, PENG Gaifei, SHANG Yajie, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1141–1148.