第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

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

**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200227

# 不同温度下超高性能混凝土的弯拉性能

方 志[1,2]，刘绍琨[1]，黄政宇[1]，陈俊廷[1]

(1. 湖南大学土木工程学院，长沙 410082；2. 湖南大学风工程与桥梁工程湖南省重点实验室，长沙 410082)

**摘 要**：为明确常温和低温环境下超高性能混凝土(UHPC)材料弯拉性能的不同特征，对–20 ℃和 20 ℃两种温度下 UHPC 的弯曲性能进行了研究。结果表明：随着温度的降低，UHPC 的强度和弹性模量均有所提高，且强度的提高幅度更为显著。与 20 ℃时的相应值相比，–20 ℃时 UHPC 的立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、劈裂抗拉强度、弯拉开裂强度、弯拉极限强度和轴压弹性模量分别提高了 7.3%、8.0%、10.8%、13.7%、9.0%和 4.1%；随着温度的降低，UHPC 材料的变形性能和延性性能总体上有所降低。与 20 ℃时的相应值相比，–20 ℃时虽然由于 UHPC 的开裂强度较其弹性模量提高的幅度更大使得弯拉试件的初裂应变提高了 6.3%，但其峰值应变、极限应变、残余应变以及延性系数则分别降低了 2.9%、8.2%、5.5%和 6.4%。

**关键词**：超高性能混凝土；低温；弯拉强度；变形；延性系数
**中图分类号**：TU528.572　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1732–08
**网络出版时间**：2020–09–18



## Flexural Properties of Ultra-high Performance Concrete Under Different Temperatures

*FANG Zhi*[1,2], *LIU Shaokun*[1], *HUANG Zhengyu*[1], *CHEN Junting*[1]
(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The bending properties of ultra-high performance concrete (UHPC) at ambient and low temperatures (*i.e.*, 20 ℃ and –20 ℃) were investigated. The results show that the strength and elastic modulus of UHPC increase with decreasing the temperature, and the strength increases more significantly than the elastic modulus. Compared to the corresponding results at 20 ℃, the cubic compressive strength, the prism compressive strength, the splitting tensile strength, the flexural cracking strength, the flexural limit strength and the elastic modulus of UHPC at –20 ℃ are increased by 7.3%, 8.0%, 10.8%, 13.7%, 9.0% and 4.1%, respectively. The flexural deformability and ductility of UHPC decrease with decreasing the temperature. Compared to the corresponding results at 20 ℃, even though the initial crack strain of UHPC at –20 ℃ is increased by 6.3%, resulting from that the flexural cracking strength of UHPC increases more significantly than its elastic modulus, and the peak strain, limit strain, residual strain and ductility index of UHPC at –20 ℃ are decreased by 2.9%, 8.2%, 5.5% and 6.4%, respectively.

**Keywords:** ultra-high performance concrete; low temperature; flexural strength; deformability; ductility index

基于最大密实度原理配制并在其内添加有离散短细钢纤维的超高性能混凝土 (UHPC)具有超高的抗压强度和较高的抗拉强度、良好的韧性、优异的耐久性，在土木工程中具有良好的应用前景[1–3]。

当 UHPC 应用于梁、板等受弯构件时，构件受拉区的 UHPC 均承受弯拉作用，使得 UHPC 的弯拉性能成为其基本的力学性能之一。此外，即使中部地区的工程结构，冬季期间结构的温度亦可能接近–20 ℃。处于低温环境下的 UHPC，其内孔隙率会因液态水结冰而有所减小，且对其抗拉性能起决定作用的微细钢纤维的性质亦会有所改变，并进而可能影响 UHPC 的力学性能[4]。因此，低温环境下 UHPC 的抗弯拉性能值得关注。

目前，国内外学者对低温环境下普通混凝土的力学性能进行了较广泛研究，结果表明：其抗压强度、抗拉强度、弹性模量、Poisson 比均随温度降低而

收稿日期：2020–03–30。　　修订日期：2020–04–22。
基金项目：国家重点研发计划课题(2017YFC0703008)；国家自然科学基金项目(51878262)。
第一作者：方 志(1963—)，男，博士，教授。

**Received date:** 2020–03–30.　**Revised date:** 2020–04–22.
**First author:** FANG Zhi (1963–), male, Ph.D., Professor.
**E-mail:** fangzhi@hnu.edu.cn

增加，热膨胀系数随温度降低而减小，塑性变形能力有所降低[5−10]。Hu 等[11]进行了不同温度下(–40 ℃~20 ℃)普通混凝土预缺口三点弯曲梁试验，结果表明：随着温度的降低，28 d 龄期混凝土的断裂韧性有所增大。Pigeon 等研究了–30 ℃~20 ℃环境下钢纤维混凝土四点弯曲性能[12]，结果表明其弯拉强度和韧性随温度降低而增加。Kim 等试验研究了超低温(–170 ℃)下及经过超低温(–170 ℃)处理后再在常温下试验的 UHPC 的拉压性能[13−14]，结果表明：与常温下试件相比，超低温下 UHPC 的拉压强度和开裂后刚度均有所提高，而经超低温处理后再在常温下试验的拉压强度亦无明显衰减。Kim 等还试验研究了 UHPC 预裂板的四点弯曲性能[15−16]，发现与未经低温处理的情形相比，经历超低温(–165 ℃)处理 1 h 后再恢复至室温条件下进行试验的板，具有更高的强度和韧性。

综上，目前国内外学者已较深入研究了低温环境对混凝土力学性能的影响，但对低温环境下 UHPC 的弯拉性能研究较少。基于此，通过对 UHPC 棱柱体试件进行四点弯曲试验，分别测试其在–20 ℃和 20 ℃环境下的抗弯性能，以期明确不同温度下 UHPC 材料的弯拉性能变化特征。

# 1　实验

## 1.1　原材料及配合比

UHPC 为商品预混料，设计强度等级为 150 MPa，配合比(单方质量比)见表 1。其内所掺平直钢纤维的长度为 12 mm、直径为 0.22 mm，抗拉强度≥2 000 MPa，体积掺量为 2%。

**表 1　UHPC 配合比**

**Table 1　Mixture ratio of UHPC**

| Cement | Mass ratio | | | | Water/binder(W/B) ratio |
|---|---|---|---|---|---|
| | Fly ash | Silica fume | Mineral powder | Quartz sand | |
| 1.00 | 0.10 | 0.25 | 0.15 | 1.10 | 0.18 |

## 1.2　试件设计制作与养护

关于弯拉试件的尺寸，《纤维混凝土试验方法标准》[17]规定当纤维长度不大于 40 mm 时，采用 100 mm×100 mm×400 mm 的梁式试件，支座跨距取 300 mm，亦即试件截面边长不小于纤维长度的 2.5 倍；法国 UHPC 规范[18]规定采用截面边长为 $a$、长度为 $4a$、支座跨距为 $3a$ 的小梁，其中 $a$ 在 70 mm 至 200 mm 之间且不小于最大纤维长度的 5 倍。考虑到本次试验所用带低温箱加载设备的最大载荷为 30 kN，故参考上述两规范的规定，弯拉试件尺寸设计为 40 mm×40 mm×160 mm，试件截面边长取为纤维长度的 3.3 倍，测试跨径 120 mm。针对不同的试验温度，设计制作了 2 组共 6 个超高性能混凝土矩形截面棱柱体弯拉试件，试件分组见表 2。

试件制作采用钢模成型，浇筑时钢模平躺放置，浇筑时从钢模一端倒入并自动流向另一端直至充盈钢模且免振捣，浇筑前在距端部 20 mm 处支座附近截面中心预埋直径 2 mm、长度 5 mm 的 K 型热电偶，试验时用以监测试件内部的即时温度。试件浇筑完成后自然养护 48 h，然后拆模并在(90±2)℃的蒸汽中继续养护 48 h。自然冷却后，室温环境下保存 28 d 后试验。

依据《活性粉末混凝土》的规定[19]，同批制备边长 100 mm 的立方体试块及 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试块并与弯拉试件同条件养护，分别用以测量不同温度下 UHPC 的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度、轴心抗压强度和弹性模量。

## 1.3　试验方法

弯拉试验采用三分点加载，两支座中心线间的跨度 $l$=120 mm，测量标距位于中部纯弯段，长度为 40 mm。加载设备采用 UTM-30 多功能材料试验机，其最大负荷为 30 kN，所能恒定的温度范围为–25 ℃到 80 ℃。依据《纤维混凝土试验方法标准》[19]采用位移控制加载，加载速率为 0.04 mm/min。

试件底部均粘贴标距 40 mm 的电阻应变片，用于测定试件初裂前纯弯段内底面的纵向应变；跨中布置 1 个高精度位移传感器量测跨中挠度；试件两侧底部纵向各布置 1 个高精度位移传感器量测试件纯弯段底部的伸长量，借此获得受力全过程试件纯弯段内的纵向平均拉应变。应变片及高精度位移计数值采用 JM3812 多功能静态应变仪采集，试验载荷由 UTM-30 试验机自动记录。

试验前，先将试件置于低温试验箱中冷冻至目标温度，再移入 UTM-30 试验机中使用自带恒温箱恒定至要求的试验温度，待试件内部预埋温度传感器所测数值达到试验目标温度值后开始加载。试验

过程中，通过试件内的预埋温度传感器监控试件内部温度，发现试件内部温度稳定良好，波动范围小于±1 ℃。

参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》[20]，在 2 000 kN 压力试验机上进行 UHPC 抗压强度、劈拉强度和弹性模量测试。因抗压和劈拉强度测试可较快完成，为此直接将低温试验箱中冷冻至稍低于目标温度的立方体试件取出在旁边的试验机上进行测试。但因测试受压弹性模量的时长较长，故在试件温度升高过程中进行多次重复测试，并通过试件内的预埋温度传感器读取相应测试时刻的温度，从而得到 UHPC 弹性模量随温度的变化规律如图 1 所示。

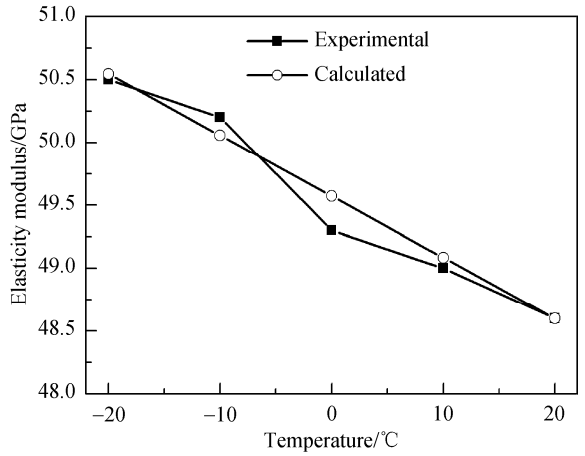



图 1 弹性模量随温度变化曲线

Fig. 1 Curves of elasticility modulus with different temperatures

## 2 结果与讨论

### 2.1 轴压、劈拉及弹性模量

实测不同温度下 UHPC 的抗压和劈拉强度及抗压弹性模量见表 2。

由表 2 和图 1 的结果可知：随着温度的降低，UHPC 的抗压强度和劈裂抗拉强度及受压弹性模量均有所提高。与 20 ℃的相应结果相比，–20 ℃时 UHPC 的立方体抗压强度、棱柱体抗压强度和劈裂抗拉强度分别提高了 7.3%、8.0%和 10.8%，弹性模量提高了 4.1%，强度的提高幅度更为显著。且从图 1 可以看到：弹性模量随温度降低近似呈线性增加。基于不同温度下 UHPC 弹性模量试验结果的回归分析，可得所试验的温度区间内不同温度下 UHPC 弹性模量 $E_{cT}$ 的变化规律如式(1)所示，其与实测值的比较亦列如图 1，可见二者较为吻合。

$$E_{cT} = E_{c20}[1 - 0.001(T - 20)] \quad -20 \leqslant T \leqslant 20 \quad (1)$$

式中，$E_{c20}$ 为 20 ℃时 UHPC 的弹性模量。

**表 2 材料力学性能**

**Table 2 Mechanical properties of the UHPC**

| Specimen group | $f_{cu}$/MPa | $f_c$/MPa | $f_{ts}$/MPa | $E$/MPa |
|---|---|---|---|---|
| BT-F2-T(20) | 163.9 | 144.4 | 25.1 | 48.5 |
| BT-F2-T(-20) | 175.8 | 156.0 | 27.8 | 50.5 |

BT means bending test, F2 represents the steel fiber content in volume of 2%, T and the following number in bracket means the test temperature. $f_{cu}$, $f_c$, $f_{ts}$ and $E$ refer to the cubic compressive strength, prismatic compressive strength, splitting tensile strength and compressive elastic modulus of UHPC, respectively. The results of strength and elasticity modulus are the average values of 3 specimens in each group.

### 2.2 弯拉试验结果

2.2.1 受力破坏过程 所有弯拉试件均在纯弯段发生弯曲破坏并在纯弯段形成一条明显的主裂缝，不同温度下的破坏形态如图 2 所示。20 ℃试件主裂缝略呈锯齿状，–20 ℃试件主裂缝则比较平直，可能的原因是–20 ℃环境下，试件中的液态水变成冰体，降低了孔隙率，提高了混凝土密实度，使得试件的均匀性更好。

图 3 为–20 ℃和 20 ℃温度下弯拉试件荷载-跨中挠度曲线。可以看出所有试件的受力破坏过程均经历了以下 4 个阶段：

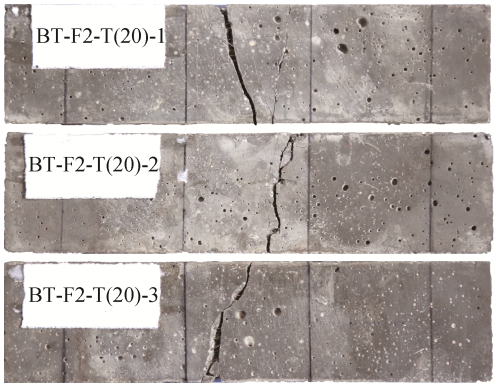
第 1 阶段为基体开裂前的弹性工作阶段。荷载-挠度曲线基本呈线性关系，表现出线弹性的受力特征。

第 2 阶段为基体开裂后至峰值点的弹塑性阶段。荷载-挠度曲线继续上升但斜率减小。基体开裂后，钢纤维的桥接作用使得未被完全拔出的钢纤维可以继续传递拉力，荷载挠度曲线继续上升。随着加载过程的继续，试件纯弯段裂缝数量逐渐增多并出现一条竖向主裂缝，主裂缝宽度不断增大，裂缝处伴有 UHPC 碎沫掉落并发出钢纤维被拔出的“呲呲”声。

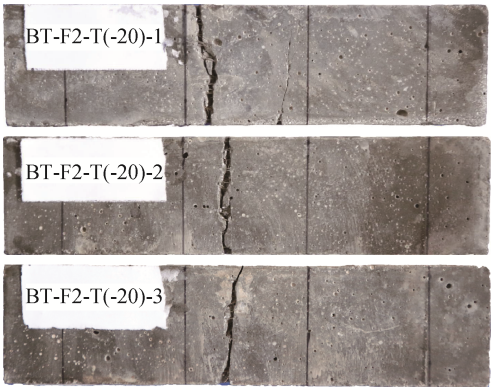
第 3 阶段为荷载超过峰值点后的破坏阶段。主裂缝往上较快延伸，宽度不断增大，裂缝处钢纤维不断被拔出而退出工作，使得荷载-挠度曲线进入下降段。

第 4 阶段为卸载阶段。当荷载下降至峰值荷载的 80%时，开始卸载直至荷载为 0。卸载曲线接近直线并与初试加载曲线斜率相近。

–20 ℃和 20 ℃试件的荷载-挠度均值曲线对比如图 3c 所示，不同温度下的荷载-挠度曲线变化规律相似。与 20 ℃的曲线相比，–20 ℃曲线的峰值荷载和峰值点处对应的挠度有所增加，80%峰值荷载处的极限变形有所减小，卸载后的残余变形相近。




(a) Failure mode of flexural specimens at 20 ℃




(b) Failure mode of flexural specimens at –20℃

图 2　弯拉试件破坏形态

Fig. 2　Failure modes of bending-tensile specimens

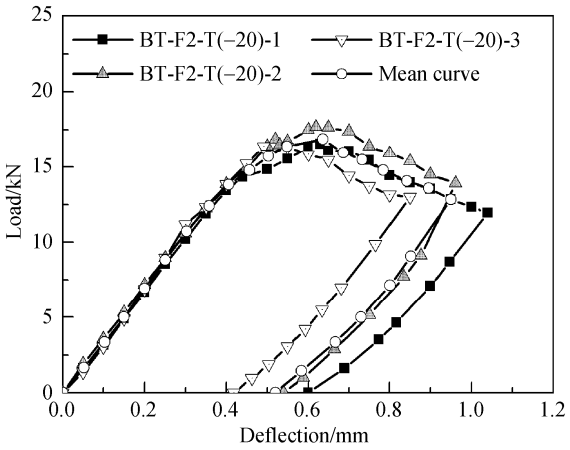
2.2.2 应力应变曲线　　定义应力应变曲线各特征点为：(1)初裂点。曲线初始线性上升段的偏离点，对应的应力和应变分别为初裂应力(初裂强度)和初裂应变，开裂前曲线的斜率为弯拉弹性模量；(2)峰值点。上升段与下降段的转折点，对应的应力和应变分别为峰值应力(弯拉强度)和峰值应变；(3)极限点。峰值点后应力降为 80%峰值应力的点，对应的应力和应变分别为极限应力(极限强度)和极限应变；(4)卸载点。从极限点卸载至零后的点，相应的应变为残余应变。

图 4 为不同温度下弯拉试件底部边缘处实测应力-应变曲线。其中应变为试件底面测量标距内的平均纵向拉应变，应力为根据式(2)确定的整体截面底缘的名义弹性弯拉应力。

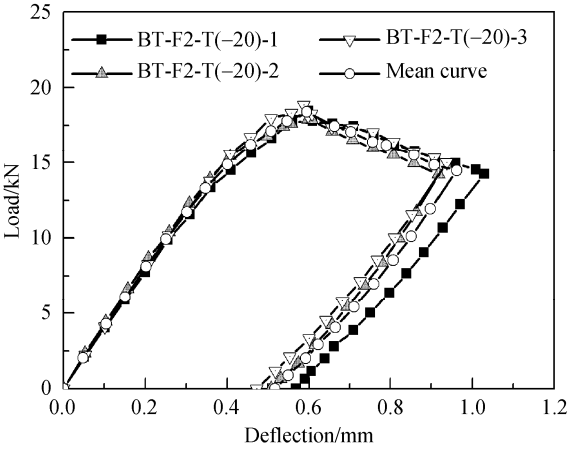
$$\sigma = Pl/bh^2 \tag{2}$$

式中：$\sigma$ 为名义弯拉应力；$P$ 为试件所承受的荷载；$l$ 为试件跨度；$b$、$h$ 为试件截面尺寸。

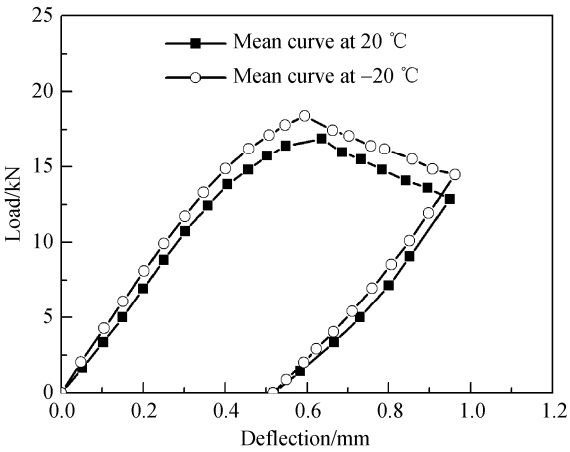
不同温度下的应力-应变均值曲线对比如图 4c 所示。可见：试件截面底缘受拉纤维的名义应力-应变曲线具有与前述荷载-挠度曲线相近的变化规律。




(a) Load-deflection curves at 20 ℃



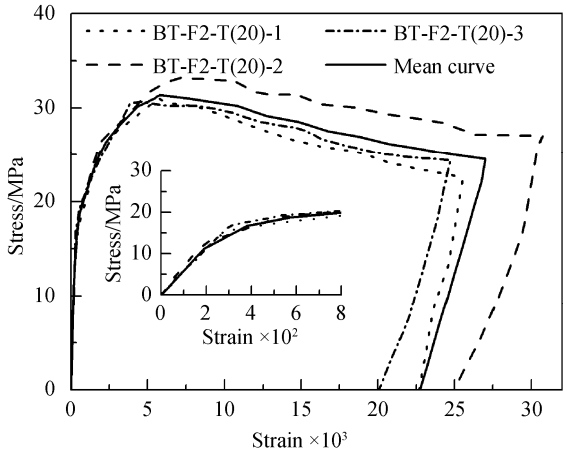

(b) Load-deflection curves at –20 ℃



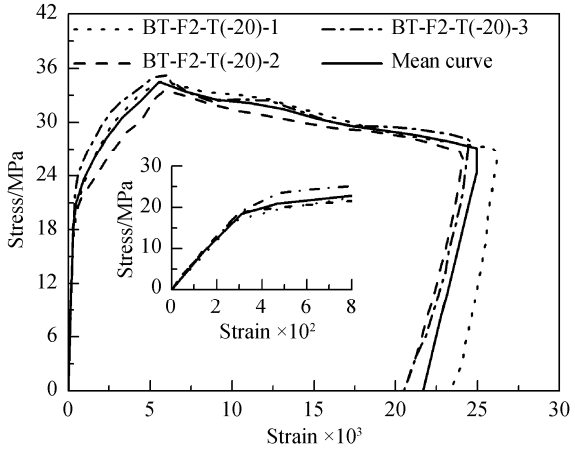

(c) Comparison of load-deflection curves at different temperatures

图 3　弯拉试件荷载-跨中挠度曲线

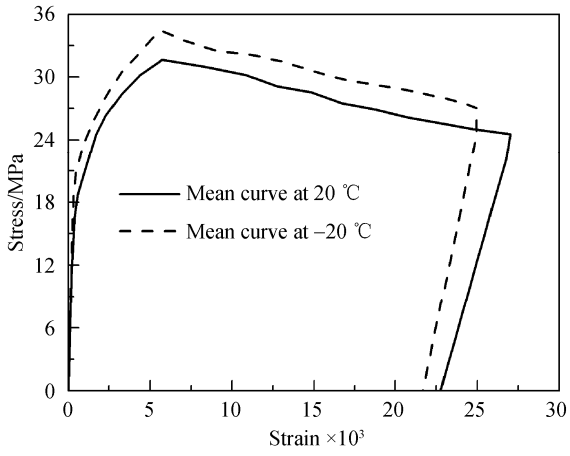
Fig. 3　Load-deflection curves at mid-span of specimens




(a) Stress-strain curves at 20 ℃




(b) Stress-strain curves at –20 ℃




(c) Comparison of stress-strain curves at different temperatures

图 4　弯拉试件底缘的应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves at bottom edge

### 2.3　温度对应力应变曲线各特征点的影响

基于实测应力-应变曲线得到弯拉试件各特征点的试验结果见表 3，表 3 中结果为每组 3 个试件相应值的平均值。基于试验结果可总结温度的相应影响规律，假定在试验的 20 ℃和–20 ℃温度环境内，温度对 UHPC 各力学性能的影响呈线性关系，由此可获得各特征变量的预测方程。

由于只进行了–20 ℃和 20 ℃两种温度下 UHPC 的弯曲性能试验，使得依据这 2 个温度下的试验结果确定的相应预测方程只能是线性关系，其一般性或许有所欠缺。但考虑到在所试验的–20~20 ℃温度范围内，试件受力变形性能的变化幅度尚较有限(如图 3、图 4 所示)，其间温度变化的影响程度应位于这两个温度边界之内，无论采用直线还是曲线去拟合所得结果应相近，因此假定在此温度范围内，温度对 UHPC 各力学性能的影响呈线性关系尚可接受。

2.3.1　温度对强度的影响　　从表 3 可见：20 ℃弯拉试件的初裂强度和峰值强度分别为 16.33 MPa 和 31.64 MPa；–20 ℃时的初裂强度和峰值强度分别为 18.56 MPa 和 34.48 MPa，后者较前者分别增大了 13.7%和 9.0%，表明随温度的降低，弯拉试件的各特征强度均有所增加。可能的原因是试件中的液态水随温度降低而成为固态的冰体，使基体间的粘结作用增强，孔隙率降低，导致 UHPC 的强度有所提高[4]。采用式(3)~式(5)可确定不同温度下 UHPC 的初裂强度、峰值强度和极限强度。

$$\sigma_{cT}=\sigma_{c20}[1-3.41\times10^{-3}\times(T-20)]\quad -20\leqslant T\leqslant 20 \tag{3}$$

$$\sigma_{pT}=\sigma_{p20}[1-2.24\times10^{-3}\times(T-20)]\quad -20\leqslant T\leqslant 20 \tag{4}$$

$$\sigma_{uT}=0.8\sigma_{pT}\quad -20\leqslant T\leqslant 20 \tag{5}$$

式中：$\sigma_{cT}$、$\sigma_{pT}$ 和 $\sigma_{c20}$、$\sigma_{p20}$ 分别为 $T$ 温度和 20 ℃ UHPC 弯拉试件的初裂强度和弯拉强度。

2.3.2　温度对应变的影响　　由表 3 可见：–20 ℃弯拉试件受拉边缘的平均初裂应变为 $336\times10^{-6}$，较 20 ℃的提高了 6.3%。这主要是由于随着温度的降低，弯拉试件开裂强度的提高幅度远较弹性模量显著所致。但–20 ℃的峰值拉应变、极限拉应变及卸载后的残余拉应变比 20 ℃依次降低了 2.9%、8.2%和 5.5%。亦即虽然低温下弯拉试件的初裂应变有所提高，但峰值应变、极限应变和卸载后的残余应变均有所降低。

可采用式(6)~式(9)确定不同温度下弯拉试件受拉边缘的初裂应变、峰值应变、极限拉应变和卸载后的残余拉应变。

$$\varepsilon_{cT}=\varepsilon_{c20}[1-1.58\times10^{-3}\times(T-20)]\quad -20\leqslant T\leqslant 20 \tag{6}$$

$$\varepsilon_{pT}=\varepsilon_{p20}[1+7.02\times10^{-4}\times(T-20)]\quad -20\leqslant T\leqslant 20 \tag{7}$$

$$\varepsilon_{uT}=\varepsilon_{u20}[1+1.90\times10^{-3}\times(T-20)]\quad -20\leqslant T\leqslant 20 \tag{8}$$

$$\varepsilon_{rT}=\varepsilon_{r20}[1+1.29\times10^{-3}\times(T-20)]\quad -20\leqslant T\leqslant 20 \tag{9}$$

**表 3 试件的力学性能**

**Table 3　Mechanical properties of the specimens**

| Temperature/℃ | $P_c$/kN | $\omega_c$/mm | $\sigma_c$/MPa | $\varepsilon_c\times10^6$ | $P_p$/kN | $\omega_p$/mm | $\sigma_p$/MPa | $\varepsilon_p\times10^6$ | $\omega_u$/mm | $\varepsilon_u\times10^6$ | $\varepsilon_r\times10^6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 8.71 | 0.248 | 16.33 | 316 | 16.88 | 0.637 | 31.64 | 5 701 | 1.003 | 27 019 | 22 577 |
| –20 | 9.90 | 0.250 | 18.56 | 336 | 18.39 | 0.595 | 34.48 | 5 541 | 0.962 | 24 968 | 21 408 |

$P_c$, $\omega_c$, $\sigma_c$ and $\varepsilon_c$ refer to the load, deflection, nominal stress and tensile strain at cracking initially, respectively. $P_p$, $\omega_p$, $\sigma_p$ and $\varepsilon_p$ to the load, deflection, nominal stress and tensile strain at the peak load. $\omega_u$ and $\varepsilon_u$ to the deflection and tensile strain at the ultimate. $\varepsilon_r$ to the residual strain after unloading at ultimate.

式中：$\varepsilon_{cT}$、$\varepsilon_{pT}$、$\varepsilon_{uT}$、$\varepsilon_{rT}$、$\varepsilon_{c20}$、$\varepsilon_{p20}$、$\varepsilon_{u20}$、$\varepsilon_{r20}$ 分别为 $T$ 温度和 20 ℃弯拉试件的初裂应变、峰值应变、极限应变和残余应变。

2.3.3　温度对挠度的影响　　20 ℃弯拉试件的峰值挠度、极限挠度和竖向残余挠度分别为 0.637、1.003 mm 和 0.571 mm；–20℃相应值分别为 0.595、0.962 mm 和 0.538 mm。与前者相比，–20 ℃弯拉试件的相应值分别降低了 7.1%、4.3%和 6.1%。原因是温度降低使得 UHPC 的弹性模量和构件的弯曲刚度增大所致。

## 2.4　温度对延性性能的影响

弯拉试件典型的荷载-挠度曲线如图 5 所示，图 5 中 $p_c$、$\delta_c$；$p_p$、$\delta_p$ 和 0.8 $p_p$、$\delta_u$ 分别为试件的初裂点、峰值点和极限点对应的荷载与挠度；$\delta_r$ 为试件卸载后的残余挠度；$E_e$ 表示弹性能，$E_p$ 表示塑性能。

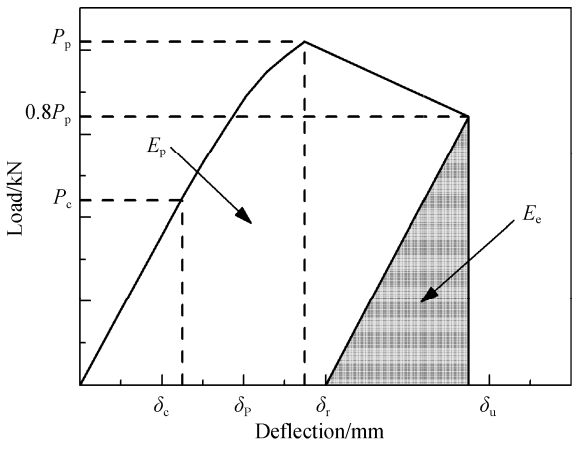



图 5　典型弯拉荷载-挠度曲线

Fig. 5　Typical flexural load-deflection curve

这里定义塑性能量 $E_p$ 为图 5 所示包括卸载曲线在内的荷载-挠度曲线与横坐标所包围的面积。依据实测荷载-挠度曲线计算得到–20 ℃和 20 ℃温度下试件的塑性能量见表 4。可知：–20 ℃和 20 ℃弯拉试件塑性能量的平均值分别为 15.36 J 和 13.49 J，前者比后者提高了 13.9%，即在–20 ℃环境下，试件的耗能能力有所增加。

这里采用能量的观点来定义 UHPC 弯拉试件的延性指标并采用式(10)确定试件的延性系数 $\mu$[21]。

$$\mu=\frac{1}{2}\left(\frac{E_t}{E_e}+1\right) \tag{10}$$

式中：$E_t$ 表示总能量且 $E_t=E_e+E_p$；$E_e$ 表示弹性能，$E_p$ 表示塑性能。

根据实测荷载-挠度曲线计算得到弯拉试件的延性系数见表 4。可知，–20 ℃和 20 ℃弯拉试件的延性系数分别为 3.59 和 3.82，前者比后者降低了 6.4%，即低温下 UHPC 弯拉试件的延性减弱。原因是低温环境下弯拉试件的强度提高，基体与纤维间的粘结作用增强，主要由纤维滑移提供的塑性能因此减小，而弹性阶段的变形能却有所增加，导致延性系数有所降低。

**表 4　弯拉试件的延性系数**

**Table 4　Ductility coefficient of the specimens**

| $T$/℃ | $E_p$/J | $E_e$/J | $\mu$ |
|---|---|---|---|
| 20 | 13.49 | 2.39 | 3.82 |
| –20 | 15.36 | 2.96 | 3.59 |

$T$: Temperature; $E_p$: Plastic energy; $E_e$: Elastic energy; $\mu$: Ductility coefficient.

从上面的试验结果分析可见，与既有文献报道的普通混凝土强度和弹性模量随温度降低而提高的规律一致[5–12]，–20 ℃低温下 UHPC 材料的强度和弹性模量相比 20 ℃亦均有所提高，这主要是低温环境下水泥基材料内部孔隙水结冰后导致材料的孔隙率降低，初始缺陷的影响减弱所致。

UHPC 的开裂强度即为基体材料的开裂强度，受其内纤维掺量和类型的影响较小，且实测开裂前的应力-应变关系基本呈线弹性，因此开裂应变可较好地基于其开裂强度和弹性模量按 Hooke 定律予以确定。试验结果亦表明：虽然–20 ℃UHPC 材料的强度和弹性模量均较 20 ℃的相应值有所提高，但开裂强度提高了 13.7%，而弹性模量仅提高了 4.1%，因此，开裂应变会有所增大。

UHPC 开裂后，裂缝处基体的抗拉作用丧失而

仅剩下纤维的桥接作用，开裂后弯拉试件的弯曲变形增量将主要是由裂缝宽度和高度的进一步发展所提供，裂缝的开展则是由裂缝处纤维两端从基体中的拔出滑移和纤维本身的弹性伸长所决定，且更多地取决于纤维两端的拔出滑移，因为试件破坏后可观测到：断裂面上的纤维更多的是拔出而非拉断。

–20 ℃低温环境下，UHPC 材料内部孔隙水结冰后导致材料的孔隙率降低，初始缺陷的影响减弱，材料强度和弹性模量提高，加之孔隙水结冰后的体积膨胀，使得基体对纤维的握裹力增大，这些均导致纤维与基体间的粘结作用增强，使得纤维两端实际上不可恢复的拔出滑移减小，进而使得材料的峰值应变、极限应变和残余变形减小，延性系数亦相应降低。

### 2.5 应力-应变曲线

根据弯拉试件底部受拉边缘处实测的名义应力–应变曲线，可拟合得到式(11)所示弯拉受力状态时试件底缘纤维的名义应力–应变方程。

$$\sigma_T(\varepsilon)=\begin{cases}\sigma_{\mathrm{p}T}\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_{\mathrm{p}T}}\right)^{0.21} & 0\leqslant\varepsilon\leqslant\varepsilon_{\mathrm{p}T}\\ \sigma_{\mathrm{p}T}\left(1-0.20\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_{\mathrm{p}T}}{\varepsilon_{\mathrm{u}T}-\varepsilon_{\mathrm{p}T}}\right) & \varepsilon_{\mathrm{p}T}\leqslant\varepsilon\leqslant\varepsilon_{\mathrm{u}T}\end{cases} \tag{11}$$

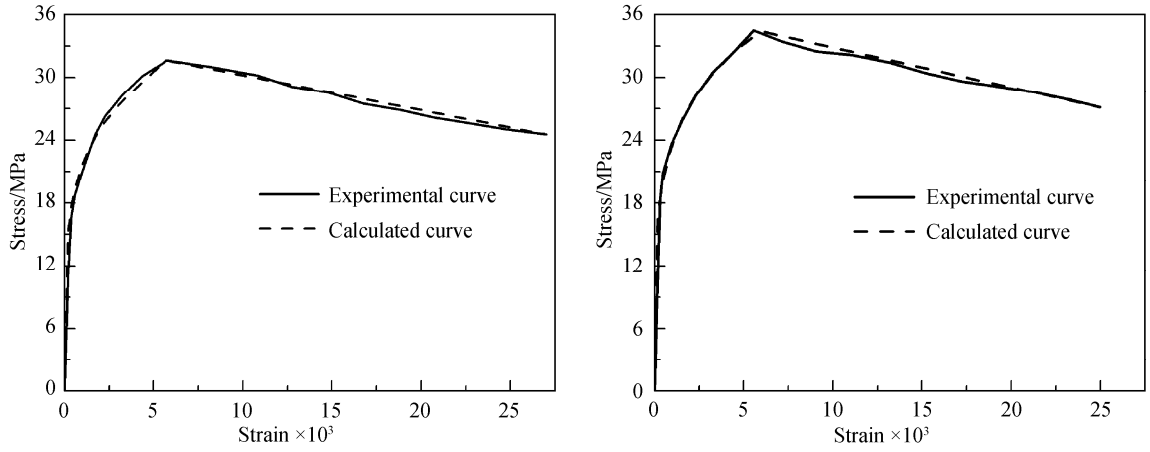
其中：$\sigma_{\mathrm{p}T}$、$\varepsilon_{\mathrm{p}T}$、$\varepsilon_{\mathrm{u}T}$ 由式(4)、(7)、(8)确定；$\sigma_T(\varepsilon)$为 $T$ 温度下试件应力；$\varepsilon$ 为试件底部拉应变。

图 6 为拟合应力–应变曲线与实测曲线对比，可知拟合曲线与实测曲线吻合较好。

### 2.6 弯拉、劈拉、轴压结果比较

材料的弯拉和劈拉强度及受压弹性模量和弯拉弹性模量试验结果的比较见表 5。这里的弯拉弹性模量是指前述弯拉试件开裂前底缘实测名义应力–应变曲线的斜率。

由表 5 可知：随着温度的降低，材料的强度和模量均有所提高，但温度对弯拉与劈拉强度比及受压与弯拉弹性模量比的影响并不显著，且材料的弯拉弹性模量稍高于受压弹性模量。




(a) Stress-strain curves at 20 ℃ (b) Stress-strain curves at –20 ℃

图 6 拟合曲线与实测曲线对比

Fig. 6 Comparison between fitting curves and test curves

表 5 不同温度下强度与弹模对比

**Table 5 Comparison of strength and elastic modulus at different temperatures**

| $T$/℃ | $f_{\mathrm{b}}$/MPa | $f_{\mathrm{ts}}$/MPa | $f_{\mathrm{b}}/f_{\mathrm{ts}}$ | $E$/GPa | $E_{\mathrm{f}}$/GPa | $E/E_{\mathrm{f}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 31.64 | 25.1 | 1.26 | 48.5 | 51.8 | 0.94 |
| –20 | 34.48 | 27.8 | 1.24 | 50.5 | 55.3 | 0.91 |

Note: $T$ means temperature. $f_{\mathrm{b}}$, $f_{\mathrm{ts}}$, $E$ and $E_{\mathrm{f}}$ refer to the bending tensile strength, splitting tensile strength, elastic modulus under compression, and elastic modulus under bending, respectively. The results of strength and elastic modulus are the average values of 3 specimens in each group.

## 3 结论

1) 随着温度的降低，UHPC 的抗压强度、劈拉强度及弹性模量均有所提高，但强度的提高幅度更为显著。与 20 ℃下的相应值相比，–20 ℃下 UHPC 的立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、劈拉强度和弹性模量分别提高了 7.3%、8.0%、10.8%和 4.1%。

2) 随着温度的降低，UHPC 弯拉试件的强度均有所提高。与 20 ℃的相应值相比，–20 ℃弯拉试件的初裂强度和峰值强度分别提高了 13.7%和 9.0%。

3) 与 20 ℃的相应值相比，虽然–20 ℃弯拉试件的初裂应变由于开裂强度的提高幅度较弹性模量显著而提高了 6.3%，但其峰值应变、极限应变和残余应变则分别降低了 2.9%、8.2%和 5.5%；延性系数则下降了 6.4%，表明随着温度的降低，试件的变

形性能和延性性能总体上有所退化。

**参考文献**:


[1] LARRARD D F, SEDRAN T. Optimization of ultra high- performance concrete by the use of a packing model[J]. Cem Concr Res, 1994, 24(6): 997–1009.

[2] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength[J]. ACI Special Publication, 1994, 144(24): 507–51 8.

[3] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1–24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. J Arch Civ Eng (in Chinese), 2014, 31(3): 1–24.

[4] 赵中强. 低温环境下自密实混凝土力学及弯曲性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(5): 116–121.
ZHAO Zhongqiang. Sichuan Build Sci (in Chinese), 2018, 44(5): 116–121.

[5] 张楠, 廖娟, 戢文占, 等. 混凝土低温力学性能及试验方法[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(11): 1404–1408.
ZHANG Nan, LIAO Juan, JI Wenzhan, et al. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(11): 1404–1408.

[6] LEE G C, SHIH T S, CHANG K C. Mechanical properties of concrete at low temperature[J]. J Cold Regions Eng, 1988, 2(1): 13–24.

[7] 王春, 金罕, 施玉平. 低温环境下混凝土力学性能试验研究[J]. 上海煤气, 2019(2): 18–21.
WANG Chun, JIN Han, SHI Yuping. Shanghai Gas (in Chinese), 2019(2): 18–21.

[8] 时旭东, 居易, 郑建华, 等. 混凝土低温受压强度试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(5): 29–33.
SHI Xudong, JU Yi, ZHENG Jianhua, et al. Build Struct (in Chinese), 2014, 44(5): 29–33.

[9] 刘超. 混凝土低温受力性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
LIU Chao. Experimental investigation on mechanical property of concrete exposed to low temperatures (in Chinese, dissertation). Beijing: Tsinghua University, 2011.

[10] 王传星, 谢剑, 李会杰. 低温环境下混凝土性能的试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(S2): 182–186.
WANG Chuanxing, XIE Jian, LI Huijie. Eng Mech (in Chinese), 2011, 28(S2): 182–186.

[11] HU Shaowei, FAN Bing. Study on the bilinear softening mode and fracture parameters of concrete in low temperature environments[J]. Eng Fracture Mech, 2019, 211: 1–16.

[12] PIGEON M, CANTIN R. Flexural properties of steel fiber- reinforced concretes at low temperatures[J]. Cem Concr Compos, 1998, 20(5): 365–375.

[13] KIM M J, KIM S, LEE S K, et al. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at cryogenic temperatures[J]. Constr Build Mater, 2017, 157: 498–508.

[14] KIM M J, YOO D Y, KIM S, et al. Effects of fiber geometry and cryogenic condition on mechanical properties of ultra-high-performance fiber reinforced concrete[J]. Cem Concr Res, 2018, 107: 30–40.

[15] KIM S, KIM M-J, YOON J, et al. Effect of cryogenic temperature on the flexural and cracking behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Cryogenics, 2018, 93: 75–85.

[16] KIM S, YOO D Y, KIM M-J, et al. Self-healing capability of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete after exposure to cryogenic temperature[J]. Cem Concr Compos, 2019, 104.

[17] CECS 13:2009 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
CECS 13:2009, Standard test methods for fiber reinforced concrete[S]. Beijing, China, 2010 (in Chinese).

[18] NF P 18-470 Concrete—Ultra-high performance fibre-reinforced concrete — Specifications, performance, production and conformity[S]. French Standard, AFNOR — French standard institute, 2016.

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
GB/T 31387–2015, Chinese National Standard, Reactive Powder Concrete[S]. Beijing, China, 2015 (in Chinese) .

[20] GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
GB/T 50081-2002, Chinese National Standard, Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S]. Beijing, China, 2003 (in Chinese).

[21] 杨剑, 方志. CFRP 配筋活性粉末混凝土梁延性和变形性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(3): 14–22.
YANG Jian, FANG Zhi. J Hunan Univ: Nat Sci (in Chinese), 2015, 42(3): 14–22.