

## 超低温作用对超高韧性水泥基复合材料抗弯性能的影响

苏骏 钱维民

## Effect of ultra-low temperature on flexural behavior of ultra-high toughness cementitious composites

SU Jun, QIAN Weimin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210823.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 单向碳纤维增强树脂基复合材料的超低温力学性能

Cryogenic mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy composite

复合材料学报. 2017, 34(11): 2437–2445 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170224.001>

#### 玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制

Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete

复合材料学报. 2019, 36(8): 1926–1934 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180929.001>

#### 超低温用紫外光快速固化丙烯酸酯树脂体系的制备及性能

Preparation and properties of rapid ultra violet-curable acrylate systems used at ultra-low temperature

复合材料学报. 2018, 35(11): 2935–2941 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180115.003>

#### 不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维增强工程水泥复合材料梁剪切韧性试验

Experimental study on shear toughness of polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composite beams with different fiber contents

复合材料学报. 2019, 36(8): 1968–1976 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181108.006>

#### 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响

Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2018, 35(3): 722–731 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170612.005>

#### 超低温介质对碳纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响

Influence of cryogenic mediums on mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin

复合材料学报. 2017, 34(9): 1944–1952 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161216.003>



DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210823.001

超低温作用对超高韧性水泥基复合材料  
抗弯性能的影响



苏骏<sup>1,2</sup>, 钱维民<sup>\*1</sup>

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068; 2. 湖北工业大学 工程技术学院, 武汉 430068)

**摘 要:** 超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)作为一种具有良好力学性能和耐久性能的新型复合材料, 弯曲韧性是评价其力学性能的重要指标。为探究 UHTCC 材料在超低温环境下的抗弯性能, 设计了 5 组不同纤维体积掺量的 UHTCC 新材料, 经过深冷处理后进行四点弯曲试验, 对其进行等效强度分析, 提出一种适用于超低温作用后的韧性评价方式, 为 UHTCC 在超低温领域的广泛应用提供理论基础和技术支持。研究结果表明: 超低温作用后 UHTCC 的弯拉强度显著提升, 当温度降低至-160℃, UHTCC 的弯拉强度最大可提升 67.67%, 但表现出明显的脆性; 超低温环境下 1.5vol%UHTCC 的强度及韧性性能提升效果最佳, 但超出最优掺量后, UHTCC 的性能反而略微降低。

**关键词:** 超高韧性水泥基复合材料; 超低温; 弯拉强度; 抗弯韧性; 纤维掺量

**中图分类号:** TB332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3851(2022)06-2844-11

Effect of ultra-low temperature on flexural behavior of  
ultra-high toughness cementitious composites

SU Jun<sup>1,2</sup>, QIAN Weimin<sup>\*1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei University of Technology Engineering and Technology College, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** As a new type of composite material with good mechanical properties and durability, the flexural toughness of ultra-high toughness cementitious composites (UHTCC) is an important indicator to evaluate its mechanical properties. To explore the bending performance of UHTCC materials under an ultra-low temperature environment, five groups of UHTCC materials with different fiber contents were designed. After cryogenic treatment, four-point bending tests were carried out, and the equivalent strength was analyzed. A toughness evaluation method suitable for ultra-low temperature was proposed, which provided the theoretical basis and technical support for the wide application of UHTCC in the field of ultra-low temperature. The results show that the flexural strength of UHTCC increases significantly after ultra-low temperatures. When the temperature decreases to -160℃, the flexural strength of UHTCC increases by 67.67%, but it shows obvious brittleness. In an ultra-low temperature environment, the strength and toughness of UHTCC with 1.5vol% volume fraction are the best, but the performance of UHTCC is slightly reduced after exceeding the optimal volume fraction.

**Keywords:** ultra-high toughness cementitious composites; ultra-low temperature; bending strength; toughness; fiber content

随着清洁能源的快速发展, 混凝土结构在低温环境下(-160℃ 以下)用于储存液化天然气越来越广泛<sup>[1]</sup>。液化天然气(Liquid nature gas, LNG)储罐的使用使混凝土容器每次被填充时都会进行

随着清洁能源的快速发展, 混凝土结构在低温环境下(-160℃ 以下)用于储存液化天然气越来越广泛<sup>[1]</sup>。液化天然气(Liquid nature gas, LNG)储罐的使用使混凝土容器每次被填充时都会进行

收稿日期: 2021-06-25; 修回日期: 2021-08-04; 录用日期: 2021-08-12; 网络首发时间: 2021-08-26 12:50:27

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210823.001>

基金项目: 湖北省自然科学基金(2020CFB860)

通信作者: 钱维民, 硕士, 研究方向为纤维混凝土基本性能 E-mail: 907415610@qq.com

引用格式: 苏骏, 钱维民. 超低温作用对超高韧性水泥基复合材料抗弯性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2844-2854.

SU Jun, QIAN Weimin. Effect of ultra-low temperature on flexural behavior of ultra-high toughness cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2844-2854(in Chinese).

一次冷却循环，如填充过程出现操作失误或泄露将会导致温度的突然变化，对储罐功能造成一定的危害<sup>[2]</sup>；1978年伦敦举行的FIP-会议<sup>[3]</sup>中首先提出将混凝土运用于此项工程，预应力混凝土首先运用于LNG液化气储罐<sup>[4]</sup>，除具有巨大的经济效益之外，更重要的是由于预应力混凝土优异的力学性能增加了储罐的安全性能，混凝土结构逐渐进入这一应用领域，开始运用于储蓄罐建设、运输船舶及浮动液化工厂；近年来，混凝土材料的服役环境逐渐向复杂性和超低温等方向发展，不仅材料的强度需要有明显的提升，对材料的耐久性、工作性能也需要更高的要求，以保证建筑物的实际使用年限能到达其设计年限，吴中伟<sup>[5]</sup>指出材料复合化是水泥基材料高性能化的主要途径，而其核心是采用纤维增强。

超高韧性水泥复合材料<sup>[6-7]</sup>(Ultra-high toughness cementitious composites, UHTCC)采用不超过2.5vol%聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)纤维的掺入，使用常规的搅拌工艺加工成型。其优化设计使其能够在开裂后仍能承受较高的荷载，体现出伪应变硬化特征和多缝开裂特性，克服了混凝土结构因韧性差、易开裂、开裂后裂缝宽度过大等系列工程问题。相较于普通混凝土材料，其宏观极限拉应变可以达到3%以上，是普通混凝土100倍，普通热轧钢筋的3倍；且更突出的是达到极限荷载时UHTCC的平均裂缝宽度仅为60 μm，具有多缝开裂和优异的裂缝分散能力<sup>[8]</sup>，鉴于UHTCC的优良性能，使其广泛应用于复杂工程环境下的工程结构及对裂缝要求严格的建筑结构。

目前对于超低温环境下的混凝土性能研究较少，仅美国和日本等几个发达国家进行过相关的初步研究<sup>[9-10]</sup>，Xie等<sup>[11]</sup>对低温下混凝土轴心受压性能进行研究，研究结果表明：随着温度的降低，混凝土的强度、弹性模量增加，但其峰值应变降低，脆性增加；Danielle等<sup>[12]</sup>通过可拆卸应变仪(DEMEC)和数字图像相关技术(DIC)等措施来检测裂缝行为，以探索超低温下钢筋混凝土试件裂缝中剪切能力变化规律，试验结果表明在较低温

度下钢筋混凝土中的裂缝尺寸会减小，导致通过裂缝传递的剪力增加，在一定程度上增加了构件整体的抗剪性能；Yan等<sup>[13]</sup>通过对不同低温下的钢筋混凝土梁的极限强度进行研究，并建立分析模型来预测低温下钢筋混凝土的首次开裂、钢筋屈服和极限抗力，发现随着温度的降低，钢筋混凝土梁的屈服强度、极限强度及弹性模量均有显著的提升；Tognon等<sup>[14]</sup>试验研究表明：-120~0℃范围内，混凝土的强度仅取决于温度和含水率，当温度低于-120℃时，材料强度仅与初始含水率有关，与温度无关。

本文通过对UHTCC梁式试件超低温作用的四点弯曲试验，研究不同温度梯度和纤维体积掺量对UHTCC材料的抗弯性能，分析了超低温作用下UHTCC破坏形态及纤维增强机制，为UHTCC材料用于超低温环境提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料和试件制备

试验采用的胶凝材料为标号P.O.42.5的华新牌水泥，武汉阳逻电厂I级粉煤灰，采用细度模数为2.5的精细河砂，减水剂采用三聚氰胺F10聚羧酸高效减水剂，PVA纤维选用日本Kuraray公司生产的可乐纶K-II型，其性能指标见表1，试验分组见表2。设计了5组尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的UHTCC试件，纤维体积分数在0vol%~2.0vol%之间变化，每种类型的UHTCC试件制作并测试3个样本，通过计算平均值分析超低温损伤下不同影响因素对UHTCC弯曲性能的影响。

试件制备过程中，先将胶凝材料、河砂置于搅拌机中进行2 min的干拌，加水继续搅拌，同时在搅拌过程中需做好封闭处理，防止扬尘污染及物料损失，最后均匀投入PVA纤维，最后搅拌2 min得到最终拌合物，将混合物倒入模具中，放置1天后进行脱模，将试件放置于标准养护室中养护28天，取出后放入干燥箱中干燥2天，同时将热电偶预先埋置于试件中以监测试件目标温度。

表 1 聚乙烯醇(PVA)纤维性能指标  
Table 1 Polyvinyl alcohol (PVA) fiber performance index

Name	Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Diameter/mm	Length/mm	Elastic modulus/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%
REC15×12	1.3	0.04	12	120	526	6

表 2 试件分组

Table 2 Specimen grouping

Group	PVA content/vol%	Temperature/℃	Fly ash/(kg·m <sup>-3</sup> )	Cement/(kg·m <sup>-3</sup> )	Sand/(kg·m <sup>-3</sup> )	Silica fume/(kg·m <sup>-3</sup> )
0vol%PVA/C30	0	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120	133.3	13.3
0.5vol%PVA/C30	0.5	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120	133.3	13.3
1.0vol%PVA/C30	1.0	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120	133.3	13.3
1.5vol%PVA/C30	1.5	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120	133.3	13.3
2.0vol%PVA/C30	2.0	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120	133.3	13.3

1.2 试验流程

降温设备采用湖北工业大学自主研发的深冷低温箱，降温装置如图 1(a) 所示，设置 20℃、0℃、-40℃、-80℃、-120℃、-160℃ 的温度梯度，将热电偶预先埋入试件中以监测试件温度，采用通入液氮的降温方式，降温速率为 2℃/min，当试件达到目标温度设定值后恒温 100 min，保证试件整体达到目标温度，放入保温箱中等待进行下

一步试验。

依据 CECS 13—2009<sup>[15]</sup> 和 GB/T 50152—2012<sup>[16]</sup>，采用荷载控制进行加载，加载速率为 0.5 MPa/s，试验装置采用 MTS 微机控制抗折试验机，如图 1(b) 所示。对 5 组尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的 UHTCC 试件进行四点弯曲试验，以研究超低温作用和纤维体积掺量对 UHTCC 弯曲性能的影响。



图 1 试验设备及试件形态  
Fig. 1 Test equipment and specimen shape

2 试验结果

2.1 UHTCC 荷载-挠度曲线

通过四点弯曲试验测得不同掺量试件的荷载-挠度曲线如图 2 所示，通过计算荷载-挠度曲线下覆盖面积来计算材料的韧性指数。

经超低温作用后，试件保持良好的完整性，未出现外鼓、剥落或掉角，与常温状态下并无明显区别，与 UHTCC 相比普通混凝土表面出现细小裂缝，宽度小于 0.1 mm；随后试件表面开始出现一层“白霜”，加载过程中，超低温作用后的



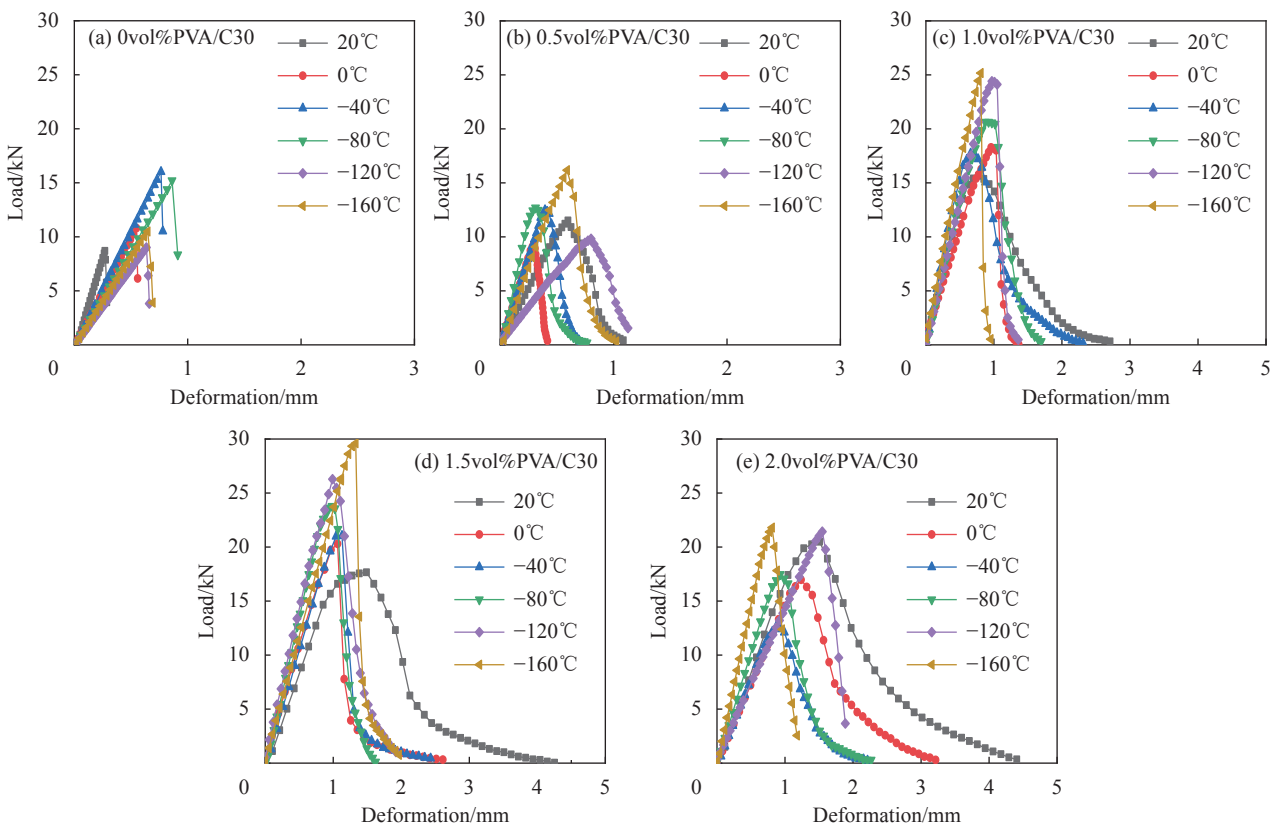


图2 不同温度下超高韧性水泥复合材料 (UHTCC) 受弯荷载-挠度曲线

Fig. 2 Bending load-deflection curves of ultra-high toughness cementitious composites (UHTCC) at different temperatures

试件强度会有显著提升，但其变形能力却显著下降，脆性明显增大，荷载-挠度曲线表现出“窄高”的趋势，且温度越低，其变化越明显。

0vol%PVA/C30 为普通混凝土，随着荷载增加，受弯过程中试件底部立刻出现明显垂直裂缝，并迅速向上扩展，伴随剧烈断裂声，试件丧失承载力退出工作，表现出明显的脆性和一裂即坏的特点；而掺加 PVA 纤维试件在试验过程中体现出良好的韧性，整个试验过程大致分为 3 个阶段：正常工作阶段、裂缝发展阶段和破坏阶段。

0.5vol%PVA/C30 为 0.5vol% 体积掺量 UHTCC 试验组，正常工作阶段时，此时截面应力较小，处于弹性阶段，截面上应力应变呈线性关系；随着荷载增大，试件底部逐渐出现一批微小裂缝，此时纤维开始发挥桥联作用，受拉区部分混凝土退出工作，裂缝尖端产生的应力集中现象开始缓解，纤维将应力传递给基体，出现一批新的细小裂缝；当荷载加载至峰值荷载的 80%-90% 时，裂缝将沿主裂缝进一步延伸，主裂缝宽度迅速变宽，试件挠度增加，伴随断裂声试件破坏，退出工作。1.0vol% 体积掺量 UHTCC 其试验现象与 0.5vol% 掺

量试验组类似，表现出 3 个阶段，但其力学性能有较大提升，其初裂变形、初裂荷载及峰值荷载相对 0.5vol% 体积掺量最多提升约 214.29%、123.18% 和 148.47%；继续增加体积掺量，其性能仍然有一定程度的提升，初裂挠度、初裂荷载及峰值强度至多可提升 60.56%、93.94% 和 18.79%，而 2.0vol% 体积掺量的 UHTCC 性能已发生一定的退化，其力学性能均有不同程度的降低。

2.2 UHTCC 弯拉强度

根据标准 CECS13: 2009<sup>[15]</sup>，对 5 组试件进行四点弯加载，得到各试验组弯拉强度见表 3。可以看出：纤维的掺入可以显著提升材料的强度，随着纤维的增加，UHTCC 的弯拉强度显著提升，2.0vol% 纤维体积掺量时的 UHTCC 的弯拉强度达到最大，常温状态下相对于普通混凝土提升 135.63%；材料的弯拉强度整体表现为随温度的降低而提升，这与 Lee 等<sup>[17]</sup> 和 Yamana 等<sup>[18]</sup> 发现的趋势一致，低温时的强化效果主要是由于材料中的物理吸附水和毛细管孔隙中的水向冰的状态过渡，造成体积一定程度膨胀，膨胀产生的应力会加速材料内部细微裂缝、缺陷裂缝闭合，同时水

表 3 UHTCC 试件平均弯拉强度试验值

Table 3 Test values of average flexural tensile strength of each group UHTCC specimens

Group	MPa					
	20℃	0℃	-40℃	-80℃	-120℃	-160℃
0vol%PVA/C30	2.61	3.24	4.81	4.56	2.70	3.15
0.5vol%PVA/C30	3.46	2.81	3.75	3.81	2.95	4.85
1.0vol%PVA/C30	4.70	5.48	5.32	6.19	7.32	7.55
1.5vol%PVA/C30	5.30	6.09	6.32	7.13	7.88	8.88
2.0vol%PVA/C30	6.15	5.09	3.80	5.24	6.43	6.54

成冰也会填充材料内部孔隙，提升了 UHTCC 的密实性，但温度回到常温后，冰转变为物理吸附水及毛细管孔隙水状态后，材料内部本身的初始裂缝或缺陷逐渐扩展，演变为更多孔隙、缺陷；试验结果表明部分试验组的弯拉强度会出现波动，Cai 等<sup>[19]</sup>认为随着温度降低，孔隙水成冰导致体积膨胀会引起一定的内应力，导致材料性能的离散性增加。

2.3 UHTCC 等效抗弯强度

由于 CECS13:2009<sup>[15]</sup> 给出的计算 UHTCC 等效弯曲强度  $f_e$  对挠度有一定要求，而超低温后诸多试验组其挠度大小并未达到计算方式中的挠度要求，为综合考虑超低温作用下 UHTCC 吸收能量及变形能力，参照规范提出一种等效抗弯强度计算表达式：

$$f_e = \frac{(A_{n\delta} - A_{\delta})L}{(n\delta_{peak} - \delta_{peak})bh^2} \tag{1}$$

式中： $A_{n\delta}$  为  $n$  倍特征挠度所对应的荷载-挠度曲线覆盖面积； $A_{\delta}$  为初裂挠度对应的荷载-挠度覆盖面积； $n$  为选取的特征挠度点，本文选用 3 作为特征挠度点； $\delta_{peak}$  为 UHTCC 峰值荷载对应挠度值； $L$  为试件跨度； $b$  为试件截面高度； $h$  为试件宽度。UHTCC 强度指标计算结果见表 4。

2.4 UHTCC 弯曲性能指标

韧性指标体现了材料吸收能量及发生大变形后残余的强度，CECS13:2009<sup>[15]</sup> 提出采用以初裂挠度  $\delta$  的 3.0、5.5 和 10.5 的倍数挠度点与荷载-挠度曲线围成的面积来计算弯曲韧性指数。

采用史占崇等<sup>[20]</sup> 提出的采用  $\delta_{0.02\%}$  偏移优化法来确定初裂点，表 4 列出了各试验组在不同温度下的初裂荷载、初裂挠度、峰值荷载、峰值挠度、等效弯曲强度及弯曲韧性指标，普通混凝土破坏形态表现出“一裂即坏”的现象，无法计算其韧性指数。

不同影响因素下的弯曲韧性指数如图 3 所示。结果表明，随着温度的降低，孔隙中的水向冰的

状态过渡导致体积增大，填充了材料中原有的孔隙，弯曲韧性指数会有一定程度的降低，另一方面会导致材料内部产生内应力，导致试验组的弯曲韧性系数离散性变大；从图 3(b) 发现，不同纤维掺量对 UHTCC 的韧性指数有显著影响，但各试验组均表现出相同的趋势，在一定范围内，随着温度的下降韧性指数会有一定程度的降低，但超出该温度范围，韧性指数反而会提升；其中 1.0vol% 掺量 UHTCC 表现出良好的抵抗温度损伤的能力，其韧性指数并未发生较显著的变化。

2.5 UHTCC 承载力变异系数

经超低温作用后的 UHTCC 的弯曲韧性也可以通过承载力变异系数来评价，承载力变异系数的值越接近 1，UHTCC 塑性性能越强，其弯曲韧性越好，承载力变异系数按下式进行计算：

$$\eta = \frac{I_{n\delta_0} - n}{n - 1} \tag{2}$$

式中： $I_{n\delta_0}$  为给定跨中挠度对应的抗弯韧性指数； $\delta_0$  为试件初裂挠度； $n$  为给定跨中挠度与初裂挠度的比值，本次试验取  $n=3$ 。

图 4 为不同影响因素下的 UHTCC 的承载力变异系数。可以看出：0.5vol% 和 2.0vol% 纤维体积掺量的承载力变异系数随着温度的变化而变化，且变化幅度较大，1.0vol% 掺量和 1.5vol% 掺量的 UHTCC 的承载力变异系数变化趋势较平缓，但 1.5vol% 掺量试验组其承载力变异系数趋近与 1，表明在超低温作用下 1.5vol% 掺量 UHTCC 的塑性性能和韧性性能达到最优。

3 参数分析

3.1 不同影响因素对 UHTCC 等效抗弯强度的影响

根据上节提出的等效抗弯强度表达式，对超低温作用后 UHTCC 的等效抗弯强度进行计算，计算结果见表 4。图 5 为不同影响因素下的 UHTCC 等效弯曲强度关系。试验结果表明，一定的纤维掺入对于基体性能具有明显的提升，当纤维掺量

表 4 UHTCC 强度及韧性指标  
Table 4 Strength and toughness index of UHTCC

Group	Temperature/ ℃	Initial crack load/kN	Initial crack deflection/ mm	Peak load/ kN	Equivalent bending strength/MPa	Equivalent bending strength $I_5$	Toughness coefficient $C_i$			
							$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
0vol%PVA/C30	20	8.70	0.27	8.70	—	—	—	—	—	—
	0	10.80	0.54	10.80	—	—	—	—	—	—
	-40	16.02	0.76	16.02	—	—	—	—	—	—
	-80	15.21	0.86	15.21	—	—	—	—	—	—
	-120	9.01	0.64	9.01	—	—	—	—	—	—
	-160	10.49	0.65	10.49	—	—	—	—	—	—
0.5vol%PVA/C30	20	6.31	0.30	11.52	1.27	6.31	3.41	4.41	5.29	5.55
	0	4.53	0.14	9.35	0.86	6.31	0.48	0.56	0.65	0.68
	-40	7.95	0.24	12.49	1.28	4.57	0.42	0.55	0.64	0.68
	-80	8.96	0.19	12.70	1.47	4.91	0.33	0.46	0.53	0.57
	-120	5.09	0.37	9.82	0.97	6.30	1.50	1.77	2.04	2.16
	-160	9.92	0.34	16.17	2.46	4.47	1.45	1.73	1.91	2.05
1.0vol%PVA/C30	20	10.06	0.39	15.65	2.11	6.31	6.84	11.31	13.70	16.15
	0	9.57	0.44	18.28	1.58	5.55	3.30	3.86	4.00	4.12
	-40	10.75	0.33	17.72	2.31	6.75	1.11	1.71	2.08	2.45
	-80	11.86	0.44	20.64	2.38	6.46	1.50	2.14	2.38	2.55
	-120	11.36	0.43	24.40	2.11	6.58	4.36	5.17	5.40	5.55
	-160	11.29	0.33	25.17	1.82	6.01	3.20	3.28	3.36	3.43
1.5vol%PVA/C30	20	12.72	0.74	17.66	2.13	5.80	15.28	18.81	22.50	25.54
	0	12.66	0.58	20.30	1.59	3.97	4.11	4.32	4.53	4.76
	-40	12.74	0.61	21.05	1.68	4.37	2.13	2.26	2.42	2.51
	-80	15.06	0.56	23.78	2.14	4.41	1.95	2.32	2.52	2.71
	-120	18.24	0.64	26.28	2.62	3.88	4.82	6.19	7.04	7.79
	-160	15.01	0.64	29.61	2.15	4.92	6.17	6.30	6.51	6.77
2.0vol%PVA/C30	20	13.96	0.81	20.50	2.49	5.61	15.13	18.58	23.50	28.26
	0	10.87	0.74	16.97	1.97	5.07	3.64	4.80	5.67	6.72
	-40	9.09	0.58	12.68	1.51	4.46	0.92	1.30	1.52	1.73
	-80	13.11	0.64	17.48	1.79	3.65	1.23	1.60	1.83	2.04
	-120	9.17	0.63	21.43	1.82	7.28	5.70	6.27	6.96	7.21
	-160	10.78	0.37	21.80	2.09	7.08	2.55	2.93	3.34	3.61

Notes: Since the performance of UHTCC changes after the action of ultra-low temperature, its initial crack deflection increases, and its failure deflection decreases, resulting in that the toughness calculation method in the specification cannot well evaluate its toughness, and its toughness index  $I_5$  can only be calculated, while  $I_{10}$  and  $I_{20}$  cannot be evaluated and analyzed because they cannot meet the deflection requirements.

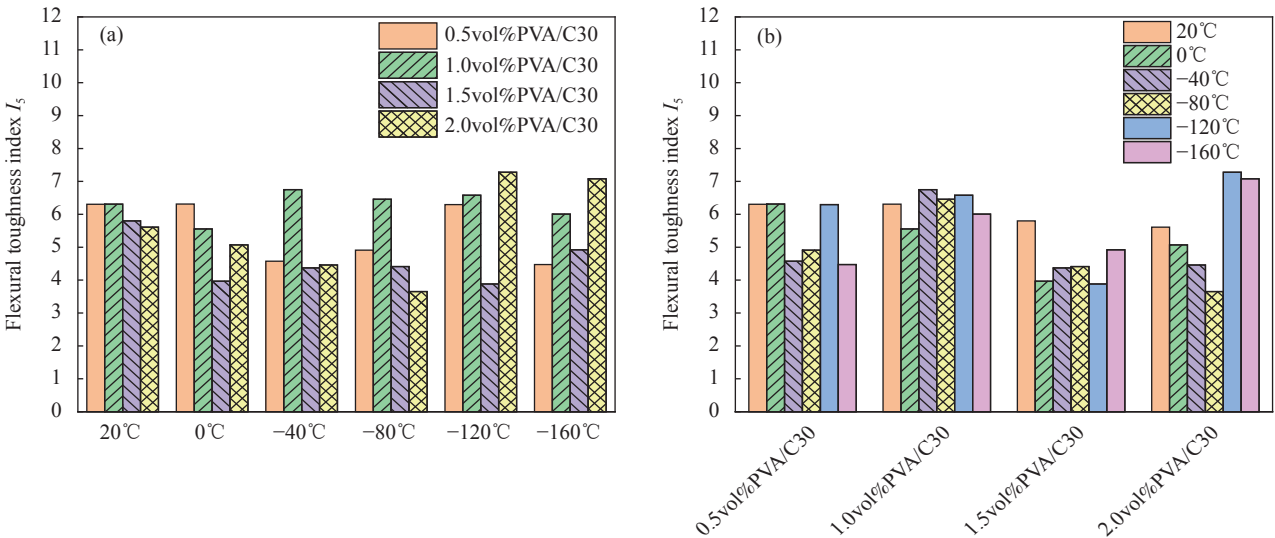


图 3 不同影响因素下的 UHTCC 弯曲韧性指数  $I_5$   
Fig. 3 Bending toughness index  $I_5$  of UHTCC under different influence factors

达到 1.5vol% 掺量时, 材料的等效弯曲强度最优, 相对于 0.5vol% 试验组, 材料的等效抗弯强度最多可提升 169.2%, 主要由于当基体退出工作时, 适量纤维的掺入能够有效发挥纤维桥联作用, 能够缓解裂缝尖端处应力集中现象, 将应力传递至周围基体, 从而达到增韧阻裂的作用; 当体积掺量达到 2.0vol%, UHTCC 并未表现出较好的等效弯曲强度, 反而其性能略微下降; 主要由于过多纤维的掺入改变了 UHTCC 内部的细观结构, 纤维掺入对于基体的性能具有正负效应, 一方面纤维的掺入可以弥补材料内部的微细裂缝和有害空

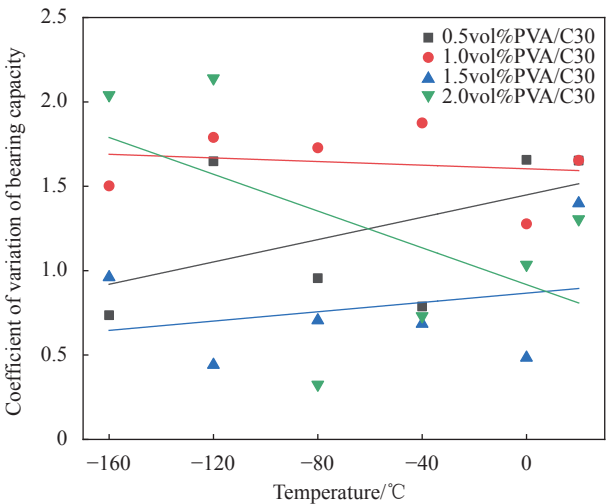


图4 不同 PVA 掺量 UHTCC 承载力变异与温度关系

Fig. 4 Relationship between variation of bearing capacity and temperature of UHTCC with different PVA contents

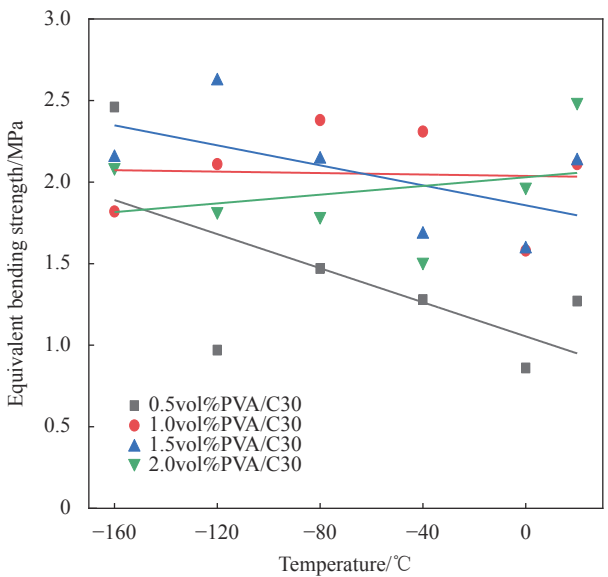


图5 温度对 UHTCC 等效弯曲强度影响

Fig. 5 Effect of temperature on equivalent bending strength of UHTCC

隙, 增强基体强度、改善基体性能, 而另一方面过量纤维的掺入会降低材料的均质性和密实性, 造成材料内部初始缺陷明显增多, 降低了纤维-基体界面间的粘结效应。

温度的变化对于 UHTCC 等效抗弯强度具有显著的变化, 除 2.0vol% 纤维掺量外所有试验组都表现出相同的趋势, 随着温度的降低, UHTCC 的等效弯曲强度不同程度的提升; 超低温作用下, 材料的化学成分、物理结构和含水量都会发生变化; 虽然温度降低后 UHTCC 的弯拉强度具有显著提升, 但部分试验组的等效弯曲强度却略微降低, 主要是由于 UHTCC 的细观结构发生了变化, 孔隙水向冰过渡, 虽然填充了孔隙, 但体积的膨胀形成了更大的孔径, 加速演变为系列毛细孔。

3.2 不同影响因素对 UHTCC 韧性的影响

目前对于材料韧性评价国内外学者通常选择荷载-挠度曲线的特征点方法或修正特征点方法进行评估, 采用峰值变形能与各特征点对应的变形能评价材料的韧性, 对于此类评价方式虽然可以评价材料的韧性性能, 但在计算过程中往往都选择当前材料的初裂点对应的变形能为基准, 缺乏与其他掺量试验组性能指标对比, 不能体现出纤维对材料性能改善程度。

鉴于传统韧性评价方式并不能有效合理评价超低温作用后材料的韧性性能, 本文参考标准 544.2R—89<sup>[21]</sup> 提出一种韧性评价方式。当 UHTCC 荷载降低至峰值荷载的 0.85、0.5、0.2 倍的特征点对应的峰后变形能来评价材料的弯曲性能, 计算方式如图 6 所示, 通过对荷载-挠度曲线进行积分计算得到相应特征点荷载所对应的面积, 记 OAB、

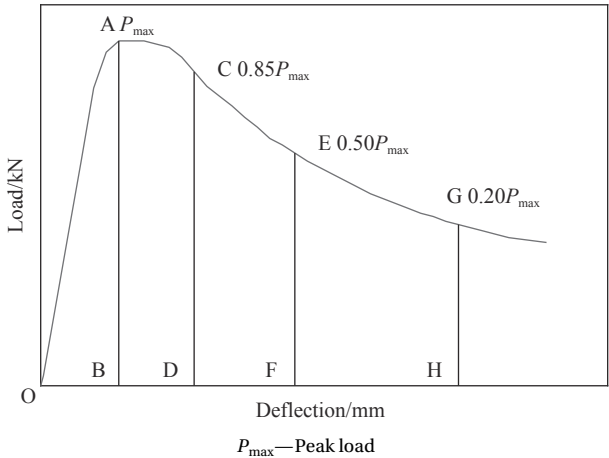


图6 能量吸收计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of energy absorption calculation



OCD、OEF 和 OGH 为  $R_{1P}$ 、 $R_{2P}$ 、 $R_{3P}$ 、 $R_{4P}$ ，记 0vol% 纤维掺量 UHTCC 峰值荷载点对应的变形能为  $B_P$ ，采用能量比值法来评价材料的弯曲韧性，根据下式计算其韧性系数  $C_i$  ( $i$  取 1、2、3、4)：

$$C_i = \frac{R_{iP}}{B_P}$$

(3)

UHTCC 弯曲韧性和韧性系数计算结果见表 4。  
图 7 为不同掺量 UHTCC 韧性系数与温度关系。可以看出，各掺量的试验组的韧性系数均表现出类似的变化趋势，当温度由 20℃ 降低至 0℃，材料的韧性表现出显著的降低，最多降低 87.75%；

当温度与 -40~80℃ 区间内，UHTCC 的韧性系数保持一定的平缓，并未发生明显的降低或提升；继续降低温度至 -120℃，UHTCC 的韧性系数又继续发生增长；进一步降低温度，材料的韧性系数随温度的降低而降低。

鉴于材料的韧性系数并未随温度的降低而表现出单调的趋势，而是体现出“降低—平缓—上升—降低”的趋势，这主要是由于温度的降低，材料内部细观结构和孔隙水形态发生变化；现有研究成果表明：随着温度的降低，材料中的冰的形态主要分为 3 种，当 -115~0℃ 范围内，为六方

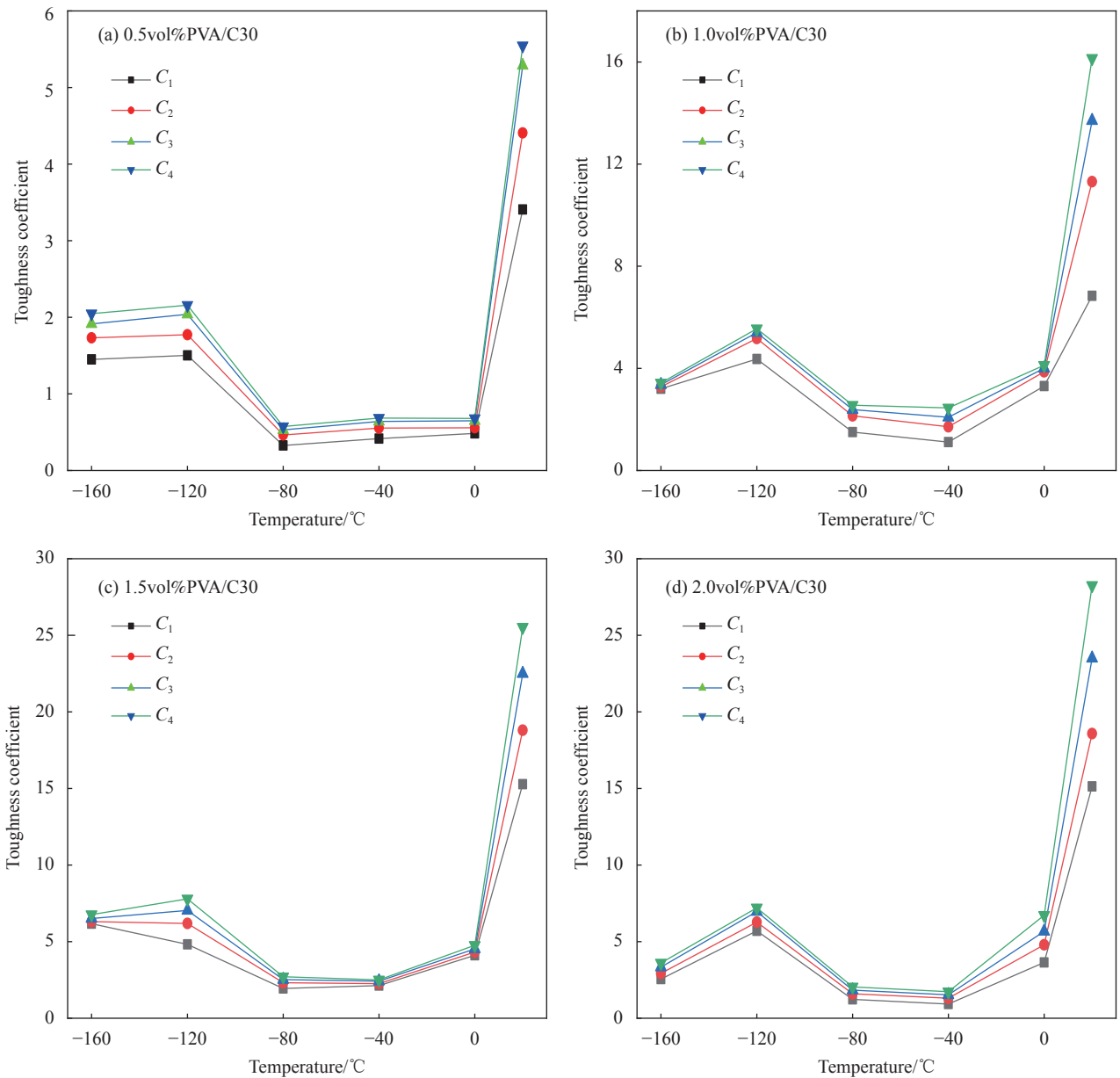


图 7 不同掺量 UHTCC 韧性系数与温度关系

Fig. 7 Relationship between toughness coefficient and temperature of UHTCC with different contents

结构 ice I 结构，当温度降低至-155~-115℃ 范围内，为正交 ice II 结构，低于-155℃ 后，为四方晶化 ice III 结构。同时材料内部毛细孔隙中水的冰点同时受到孔隙大小及孔隙中盐溶液的浓度的影响，UHTCC 韧性系数并未与相应的温度区间所对应，Skapski 等<sup>[22]</sup> 提出了孔隙水冰点的一个方程，该方程将假定冰晶半径接近真实孔隙半径，同时与水结冰时的温度相互关联，认为当温度降低至-2℃ 时，直径 50 nm 的毛细管孔隙水将会冻结，当温度降低至-7℃ 时，直径 10 nm 的毛细孔隙水才会冻结；图 8 为孔隙水的冰点与孔径函数。

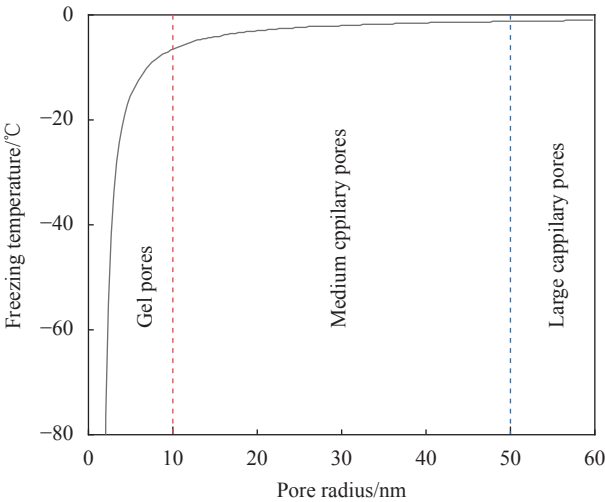


图 8 UHTCC 孔隙水冰点与孔径关系

Fig. 8 Relationship between pore water freezing point and pore size of UHTCC

图 8 显示不同孔隙大小导致孔隙水冰点发生改变，且孔隙尺寸越小，材料的冰点将会随之降低；当温度降低至 0℃ 时，各试验组 UHTCC 韧性系数发生了显著的降低，主要是由于 0℃ 时，材料内部大孔径内的孔隙水开始冻结，体积开始发生膨胀，同时部分水向附近孔隙迁移，膨胀造成的应力导致孔壁出现微裂缝，降低材料性能；继续降低温度至-80℃，此时 UHTCC 内的中等毛细孔和胶凝孔内的水达到冰点，由于冰的热膨胀系数相对于混凝土材料较大，因此当温度低于冰点后，冰的收缩程度大于混凝土，因此此阶段内冰体并未对材料内部孔壁产生应力，其韧性系数也并未发生明显降低，而是趋于一段平缓；当温度达到-120~-80℃ 区间内，此时达到冰形态改变的溫度点，由原来的六方结构 iceI 转变为正交 iceII 结构，同时大部分孔隙已被填充，孔隙中的冰体承担部分荷载，UHTCC 的韧性系数出现一段明显

上升段；继续降低温度至-160℃，此时冰的形态发生了进一步的变化，由正交 iceII 结构转变为四方晶化 iceIII 结构，UHTCC 内有效孔隙率降低，材料变形减小，并表现出脆性行为，此时 UHTCC 的韧性系数又出现进一步的降低。

3.3 纤维对 UHTCC 的增强效应

试验数据表明 PVA 纤维的掺入能够有效提升基体性能，材料变形能显著提升，变形能是材料在外荷载下吸收能量的能力，可以同时表征材料强度以及变形能力；为研究纤维对 UHTCC 的增强增韧效果，采用不同纤维掺量 UHTCC 的变形能与基准变形能的比值来评价纤维对材料的增强效应。将未掺入纤维的普通混凝土对照组变形能作为评价方法的基准变形能，记为  $A_{jz}$ ；将 UHTCC 荷载-挠度曲线下面积记为  $A_{UHTCC}$ ，定义纤维增强效应系数  $T$ ，计算公式如下：

$$T = \frac{A_{UHTCC}}{A_{jz}} \tag{4}$$

根据式 (4) 计算了超低温作用下不同掺量 UHTCC 纤维增强效应系数，计算结果见表 5，纤维增强效应与纤维掺量及温度变化的拟合曲线如图 9 所示。

表 5 不同温度下各 UHTCC 试验组纤维增强效应系数

Table 5 Fiber reinforcement effect coefficients of each UHTCC test group at different temperatures

Group	Temperature/℃	Fiber reinforcement effect coefficient
0.5vol%PVA/C30	20	5.20
	0	0.67
	-40	0.68
	-80	0.56
	-120	2.05
	-160	1.94
1.0vol%PVA/C30	20	15.54
	0	4.07
	-40	2.57
	-80	2.43
	-120	5.35
	-160	3.16
1.5vol%PVA/C30	20	24.55
	0	5.21
	-40	2.69
	-80	2.56
	-120	7.71
	-160	6.47
2.0vol%PVA/C30	20	30.85
	0	7.24
	-40	1.85
	-80	2.18
	-120	7.23
	-160	3.67

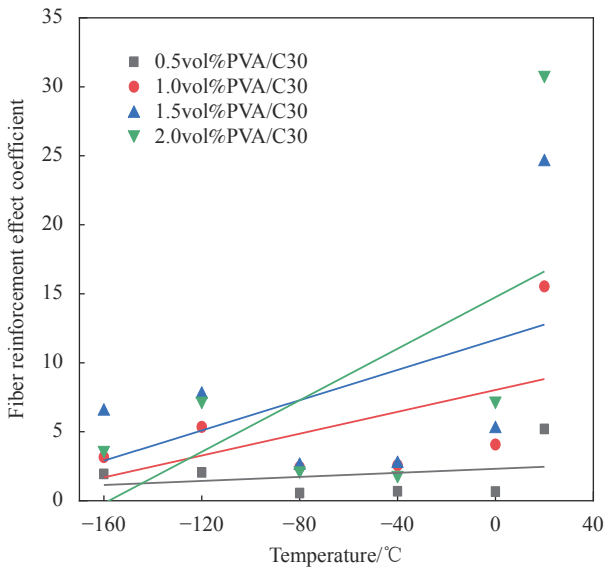


图9 UHTCC 纤维增强效应系数与温度关系

Fig. 9 Relationship between fiber reinforcement coefficient of UHTCC and temperature

从图9可以看出，常温状态下2.0vol%纤维体积掺量试验组纤维增强最为明显，相对于0.5vol%纤维试验组，其纤维增强效应系数增加了83.14%；超低温作用下，各试验组的纤维增强效应系数都表现出同一趋势，随着温度的降低，不同掺量UHTCC的纤维增强效应系数都表现出不同程度的降低；综合评价纤维对基体的增强程度，认为纤维的掺入可以有效改善基体性能，但超出最优掺量后UHTCC的性能反而有所降低，数据显示，虽然2.0vol%掺量UHTCC的常温状态下表现出较好性能，但随着温度的降低，其性能会发生剧烈劣化效应，纤维增强效应系数甚至低于0.5vol%掺量和1.0vol%掺量。

PVA纤维的掺入对材料性能具有正负效应，一方面纤维的掺入可以有效改善基体性能，缓解UHTCC内部应力，另一方面纤维的掺入同时也会在纤维-基体界面引入一定缺陷，随着纤维掺量的增加，纤维在浆体中比表面积将会急剧降低，削弱了纤维-基体界面效应，进而导致纤维并未达到预期的桥联效应及增韧阻裂效果；当UHTCC掺量达到2.0vol%时，材料内部发生了明显的纤维结团，经超低温作用后，其内部缺陷将会加速演变为系列有害孔洞，降低了材料性能，宏观上表现为纤维增强效应系数低于0.5vol%和1.0vol%掺量试验组；相比其他试验组，1.5vol%掺量的UHTCC则表现出最优的增强效应。

4 结论

通过对超低温作用下的5组不同体积掺量的超高韧性水泥复合材料(UHTCC)进行四点弯曲加载试验，得到了弯拉强度及荷载-挠度曲线，通过计算得到UHTCC的等效抗弯强度、弯曲韧性指数及承载力变异系数；并提出一种评价超低温作用下的材料韧性评价方式，分析了纤维体积掺量和温度变化对UHTCC抗弯性能的影响，主要结论如下：

(1)随着聚乙烯醇(PVA)纤维的掺入，UHTCC的弯拉强度得到了显著提升，常温状态下，当掺量达到2.0vol%时，弯拉强度达到最大，相较于普通混凝土提升约135.63%，但随着温度的降低，2.0vol%掺量试验组材料强度有所波动，而1.5vol%掺量UHTCC的弯拉强度表现为随温度降低而提升，当温度降低至-160℃时，弯拉强度提升约67.67%；

(2)承载力变异系数计算结果表明，随着温度的降低0.5vol%和2.0vol%掺量的承载力变异系数变化幅度较大，1.0vol%掺量和1.5vol%掺量的UHTCC的承载力变异系数变化趋势较平缓，1.5vol%掺量试验组其承载力变异系数趋近于1，体现出良好的塑性性能及弯曲韧性；

(3)超低温作用后，适量纤维掺入可以提升材料等效抗弯强度，超出最优掺量后材料性能反而有所下降，2.0vol%掺量UHTCC的等效抗弯强度随着温度的降低而降低；

(4)超低温作用下，UHTCC的韧性系数与超低温下孔隙水的形态及冰的形态有关，不同掺量UHTCC均表现出“降低—平缓—上升—降低”的趋势；

(5)超低温作用下，在一定范围内随着纤维掺量的增加可以有效提升UHTCC性能，当掺量达到1.5vol%时，表现出最优的增强效应；而2.0vol%掺量随在常温状态有较好的增强效应，但经过超低温作用后，性能急剧劣化，其增强效应弱于0.5vol%和1.0vol%掺量试验组。

参考文献：

[1] LIU X M, ZHANG M H, CHIA K S, et al. Mechanical properties of ultra-lightweight cement composite at low temperatures of 0 to -60℃ [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 73: 289-298.

[2] DAHMANI L, KHENANE A, KACI S. The behavior of the re-

- inforced concrete at cryogenic temperatures[J]. *Cryogenics*, 2007, 47(9): 517-525.
- [3] GERWICK B. Eighth international congress of the FIP[J]. *Engineering Structures*, 1978, 1(1): 55.
- [4] 程旭东, 朱兴吉. LNG储罐外墙温度应力分析及预应力筋设计[J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 499-505.
- CHENG X D, ZHU X J. Thermal stress analysis and prestressed reinforcement design of external wall of LNG storage tank[J]. *Petroleum Journal*, 2012, 33(3): 499-505(in Chinese).
- [5] 吴中伟. 纤维增强——水泥基材料的未来[J]. *混凝土与水泥制品*, 1999, 1: 3-4.
- WU Z W. Fiber reinforcement-future of cement based materials[J]. *Concrete and Cement Products*, 1999, 1: 3-4(in Chinese).
- [6] 李贺东, 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料弯曲性能及韧性评价方法[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(3): 32-39.
- LI H D, XU S L. The evaluation method of flexural properties and toughness of ultra-high toughness cementitious composites[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2010, 43(3): 32-39(in Chinese).
- [7] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008(6): 45-60.
- XU S L, LI H D. Research progress and engineering application of ultra-high toughness cementitious composites[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2008(6): 45-60(in Chinese).
- [8] 张秀芳, 徐世烺, 侯利军. 采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(II): 试验研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(10): 53-66.
- ZHANG X F, XU S L, HOU L J. Using ultra-high toughness cementitious composites to improve the flexural crack resistance of reinforced concrete beams (II): Experimental study[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2009, 42(10): 53-66(in Chinese).
- [9] MIURA T. The properties of concrete at very low temperatures[J]. *Materials and Structures*, 1989, 22(4): 243-254.
- [10] ELHACHA R, GREEN M F, WIGHT R G. Flexural behaviour of concrete beams strengthened with prestressed carbon fibre reinforced polymer sheets subjected to sustained loading and low temperature[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, 31(2): 239-252.
- [11] XIE J, LI X M, WU H H. Experimental study on the axial-compression performance of concrete at cryogenic temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 72: 380-388.
- [12] DANILLE D, HOULT N A, GREEN M F. Effects of varying temperature on the performance of reinforced concrete[J]. *Springer Netherlands*, 2015, 48(4): 1109-1123.
- [13] YAN J B, XIE J. Behaviours of reinforced concrete beams under low temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 141: 410-425.
- [14] TOGNON G. Behavior of mortars and concretes in the temperature range from 20°C to -196°C[R]. 5th International Congress on the Chemistry of Cement, 1969: 229-249.
- [15] 中国工程建设协会标准. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13—2010[S]. 北京: 计划出版社, 2010.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Fiber reinforced concrete test method standard: CECS 13—2010[S]. Beijing: Planning Press, 2010(in Chinese).
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Concrete structure test method standard: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012(in Chinese)
- [17] LEE G C, SHIH T S, CHANG K C. Mechanical properties of concrete at low temperature[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 1988, 2(1): 13-24.
- [18] YAMANA S, KASAMI H, OKUNO T. Properties of concrete at very low temperatures[J]. *ACI Special Publication*, 1978, 55: 1-12.
- [19] CAI X P, YANG W C, YUAN J, et al. Mechanics properties of concrete at low temperature[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1278: 389-393.
- [20] 史占崇, 苏庆田, 邵长宇, 等. 粗骨料UHPC的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(12): 86-97.
- SHI Z C, SU Q T, SHAO C Y, et al. The basic mechanical properties and flexural toughness evaluation method of coarse aggregate UHPC[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2020, 53(12): 86-97(in Chinese).
- [21] American Concrete Institute Committee. Measurement of properties of fiber reinforced concrete: 544.2R—89[S]. Dtroit: American Concrete Institute, 2002.
- [22] SKAPSKI A, BILLUPS R, ROONEY A. Capillary cone method for determination of surface tension of solids[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1957, 26(5): 1350-1351.