文章编号:1007-9629(2022)09-0901-09

超低温作用对超高韧性水泥基 复合材料断裂性能的影响

钱维民¹,苏 骏^{1,2,*},赵家玉¹,嵇 威¹
(1.湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北武汉 430068;
2.湖北工业大学工程技术学院,湖北武汉 430068)

摘要:为研究超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)在超低温环境下的断裂性能,设计了5组不同纤维 掺量的UHTCC预制裂缝切口梁,在经过超低温作用后进行三点弯曲加载试验,通过分析计算 UHTCC的荷载-挠度曲线,评价了超低温环境下UHTCC的断裂性能.结果表明:当纤维掺量为 1.5%时,UHTCC性能的提升效果最优,当纤维掺量超过1.5%时,UHTCC的性能略有降低;超低 温作用后UHTCC的强度显著提升,当处理温度由常温降至-160℃时,材料表现出明显的脆性,其 延性指数、特征长度及失稳断裂韧度均明显降低.

关键词:超高韧性水泥基复合材料;超低温;断裂韧度;断裂能;延性指数
 中图分类号:TB332
 文献标志码:A
 doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.003

Effect of Ultra-low Temperature on Fracture Behavior of Ultra-high Toughness Cementitious Composites

QIAN Weimin¹, SU Jun^{1,2,*}, ZHAO Jiayu¹, JI Wei¹

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

Abstract: In order to further study the fracture property of ultra-high toughness cementitious composite(UHTCC) under ultra-low temperature environment, five groups of UHTCC prefabricated crack notched beams with different fiber contents were designed. After ultra-low temperature and cryogenic treatment, three-point bending loading test was carried out. The fracture performance of UHTCC under ultra-low temperature environment was evaluated by analyzing and calculating the load-deflection curve of UHTCC. The results show that the performance improvement effect of UHTCC with the fiber content of 1.5% is the best. After the fiber content exceeding 1.5%, the performance of UHTCC increases significantly after ultra-low temperature. When the temperature reaches -160 °C, the material shows obvious brittleness, and its ductility index, characteristic length and unstable fracture toughness are significantly reduced.

Key words: ultra-high toughness cementitious composite; ultra-low temperature; fracture toughness; fracture energy; ductility index

清洁能源的快速发展,使得天然气行业迎来了 黄金发展期^[1].同时,液化天然气(LNG)的储蓄对储 罐设计和建造提出了更高的要求^[2].由于LNG储罐 复杂的建造技术和高昂的成本,研究人员提出采用

收稿日期:2021-08-04;修订日期:2021-11-17

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2020CFB860)

第一作者:钱维民(1997—),男,安徽池州人,湖北工业大学硕士生.E-mail: qwmcici@163.com

通讯作者:苏 骏(1971--),男,安徽六安人,湖北工业大学教授,硕士生导师,博士.E-mail: sujun930@163.com

预应力混凝土建造LNG储罐^[3].混凝土结构逐渐应 用于超低温工作环境,而超低温作用会降低混凝土 的性能,缩短工程结构的使用寿命^[4].超高韧性水泥 基复合材料^[5](UHTCC)具有类似金属材料的伪应 变硬化特征,其宏观极限拉应变可达到3%以上,极 限状态下其平均裂缝宽度仅有 60 μm^[6].鉴于 UHTCC优良的韧性及裂缝控制能力,可将其应用 于对力学性能和控裂能力要求严苛的LNG储罐 建设.

断裂性能是表征含裂纹体在应力作用下裂纹扩 展的重要参数.徐世烺等^[7-8]通过光弹性贴片法对大 型紧凑拉伸试件进行断裂试验,提出了双K断裂准 则;赵艳华等^[9]结合虚拟裂缝区的黏聚力分布,提出 了起裂断裂韧度和失稳断裂韧度的计算表达式;张 鹏等^[10]和高国华等^[11]研究发现纳米SiO₂能够有效 改善材料断裂性能及抗冻性能.但是,对于超低温 作用下的混凝土性能少有文献报道.Tognon^[12]和 Miura^[13]研究发现,0~120℃范围内,混凝土的强 度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; Browne 等^[14]进行低温下混凝土的轴拉试验,认为温 度降低至-70℃时混凝土的抗拉强度达到最大:Xie 等15一研究了低温下混凝土的轴心受压性能,发现随 着温度的降低,混凝土的强度和弹性模量增加,但其 峰值应变降低, 脆性增加. Kim 等^[16]研究了超低温下 超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)的力学性能, 认为掺加直形纤维可以显著提升UHPFRC的强度 和断裂能,而掺加波纹纤维的UHPFRC在低温下表 现出极差的能量吸收能力.尽管现有诸多学者已提

出混凝土在低温下强度的预测模型,但含水率^[17]、湿度^[18]、孔隙大小以及分布^[19]、孔隙水冰点^[20-21]和低温 下冰的形态^[22-23]都将影响材料的性能以及模型预测 的准确性.

本文设计了一批 100 mm×100 mm×400 mm 的预制裂缝梁式试件,并对其进行三点弯曲性能试 验,研究纤维掺量、温度等因素对UHTCC断裂性能 的影响,可以为UHTCC在超低温环境下的推广应 用提供一定的理论支撑.

1 试验概况

1.1 材料和试件制备

胶凝材料采用华新牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水 泥、武汉阳逻电厂 I级粉煤灰;细骨料采用细度模 数 2.5 的精细河砂;减水剂采用三聚氰胺 F10 聚羟 酸高效减水剂,黏合剂采用日本 CC-33A 型胶水; 聚乙烯醇(PVA)纤维采用日本 Kuraray 公司生产 的可乐纶 K-Ⅱ型纤维,其性能如表 1 所示.试验采 用尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,预制裂缝高 度(a_0)为 40 mm 的梁式 UHTCC 试件,纤维掺量 φ (体积分数,下同)分别为 0%、0.5%、1.0%、1.5%、 2.0%,处理温度(t)分别为 20、0、-40、-80、-120、 -160 ℃.三点弯曲试验的考察因素及试件配合比 如表 2 所示.

表 1 PVA 纤维的性能 Table 1 Performance of PVA fiber

Density/ (g•cm ⁻³)	Diameter/ mm	Length/ mm	Elastic modulus/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %
1.3	0.04	12	1 200	526	6

Specimen	$arphi/\sqrt[0]{0}$	- /	t/°C ····	Mix proportion/(kg \cdot m ⁻³)			
		a_0/m		Fly ash	Cement	Sand	Silica fume
0%PVA/C30/40	0	0.04	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120.0	133.3	13.3
0.5%PVA/C30/40	0.5	0.04	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120.0	133.3	13.3
1.0%PVA/C30/40	1.0	0.04	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120.0	133.3	13.3
1.5%PVA/C30/40	1.5	0.04	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120.0	133.3	13.3
2.0%PVA/C30/40	2.0	0.04	20/0/-40/-80/-120/-160	533.3	120.0	133.3	13.3

表 2 三点弯曲试验的考察因素及试件配合比 Table 2 Three-point bending test factors and mix proportions of specimens

1.2 试验流程

将预制裂缝的梁式 UHTCC 试件放入湖北工 业大学研发的超低温深冷试验箱中进行降温.预先 将热电偶埋入试件内部以监测试件温度.采用通入 液氮的方式进行降温,降温速率为2℃/min,试件 达到设定温度后恒温 100 min,以确保 UHTCC 试 件整体达到目标温度.降温完成后,将 UHTCC 试 件取出放入保温箱中,等待下一步试验.试验流程 见图 1.

参考CECS13:2009《纤维混凝土试验方法标准》



和GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》, 加载装置采用MTS微机控制抗折试验机,通过位移 控制方式进行加载,加载速率为0.5 mm/min;将应变 片连接电阻箱,通过数据采集系统记录裂缝尖端应 变(见图2).



图 2 加载示意图 Fig. 2 Shematic diagram of loading

2 试验结果

2.1 荷载-挠度曲线

经过超低温作用后,UHTCC试件表面出现较少的细微裂缝,其宽度不超过0.1 mm,未出现鼓起、掉角等明显缺陷,形态与常温状态下并无较大区别.随后,试件表面出现1层"白霜".图3为不同温度下UHTCC试件的荷载-挠度曲线.由图3可见:

(1)随着荷载的增大,试件0%PVA/C30/40在 预制切口尖端部位迅速出现明显裂缝并延伸直至破 坏,整个破坏过程时间极短,同时伴随断裂声.

(2) 掺加 PVA 纤维的 UHTCC 试件与普通混凝 土试件的破坏形态有明显差异,其破坏过程表现出 明显的 3个阶段:正常工作阶段、裂缝扩展阶段和破 坏阶段.在正常工作阶段中,UHTCC 试件承受的荷 载较小,处于弹性阶段,此时应力、应变呈线性关系; 随着荷载的增大,在预制切口尖端处出现裂缝,此时 试件处于裂缝扩展阶段,基体退出工作,纤维开始发 挥其桥联作用,在裂缝扩展延伸过程中可以听到纤 维拉断的声音;继续加大荷载,裂缝沿着主裂缝的方 向继续扩展,试件变形增大,此时试件处于破坏阶 段,当应力达到峰值荷载时,裂缝延伸至顶部,试件 破坏,退出工作.

图 4 为不同影响因素下 UHTCC 试件的破坏 形态.由图 4 可见:对于普通混凝土试件,其裂缝形 态表现出沿着垂直于试件顶面方向扩展,基本为整 体贯穿的垂直裂缝;对于 UHTCC 试件,其裂缝倾 斜角度值在 16°~62°之间,裂缝延伸的长度在 37.1~49.8 mm之间;随着温度的降低,各试件的裂 缝扩展高度均有所降低.

2.2 起裂荷载与失稳荷载

通过三点抗折加载试验,得到不同纤维掺量下 UHTCC试件的抗折强度以及荷载-位移曲线.本文 采用史占崇等^[24]提出的δ_{0.02%}偏移优化法来确定起裂 荷载,其中由于普通混凝土试件破坏形态为"一裂即 坏",破坏为突然的脆性破坏,认为初裂荷载即为失 稳荷载.

图 5 为不同影响因素下 UHTCC 试件的临界张 开口位移(CMOD。)与荷载.由图5可见:随着纤维掺 量的增加,UHTCC试件的抗折强度显著提升,常温 状态下当纤维掺量达到1.5%时,UHTCC试件的强 度达到最大,相比于0.5%纤维掺量的UHTCC试 件,其起裂荷载提升了80.54%,失稳荷载提升了 66.92%;当纤维掺量继续增加至2.0%时,UHTCC 试件的抗折强度略微下降,相对于1.5%纤维掺量的 UHTCC 试件,其起裂荷载与失稳荷载分别降低 34.66%、27.60%.这主要是由于纤维的掺入有效减 少了材料内部的细微缺陷和有害孔隙,提升了基体 强度,改善了UHTCC内部细观结构,从而显著提升 了材料的基体性能.随着过量纤维的掺入,纤维在材 料非浆体相的比表面积下降,降低了纤维外部浆体 包裹层的均匀程度,导致纤维发生结团,削弱了纤 维-基体界面效应.

随着温度的降低,普通混凝土的起裂荷载以及 失稳荷载增大,这与Lee等^[25]以及Yamana等^[26]的研 究结论一致.一方面是由于降温过程中UHTCC中 的物理吸附水和孔隙水变成冰,填充了材料中的有 害孔隙,一定程度上提升了材料的密实性;另一方面 由于温度降低,基质分子间的化学键收缩,使基体强 度明显提升.但纤维的掺入改变了材料内部的孔隙 结构,导致UHTCC在超低温作用下的性能更为复杂.随着温度的降低,UHTCC的起裂荷载与失稳荷

载存在一定的波动,在部分区段内强度略有降低,但 整体表现为上升趋势.





C->0	CI-0 ## #*	C1-40 532-
C 2-20 1 14-	C2-0 uss-255	C2-40 43.00
C3-30 art Japan	C3-0 463mm]	C3-40 447-1 17
C4-20	C4-0 3-7]	C4-40 47- 23
0-20 . 55m 35	Ct-0 405) 34"	C5-20 - 413- 13.
C1	Oha 贯宇	CI-160. BR
(2	C2130 4520-	C2160 433] 61"
C380 4941mm 32	(3-120 57.1mm]	C3-460 - 4x6m]
C4-90 497- 16	-C9-190 465-m]	C4-160 414mm]
C580 487-	C5-720 440mm]	Cr.160 424-m]

图 4 不同影响因素下UHTCC试件的破坏形态 Fig. 4 Failure modes of UHTCC specimens under different influencing factors



Fig. 5 Critical opening displacement and load of UHTCC specimens under different influencing factors

3 超低温对UHTCC断裂性能的影响

3.1 断裂能

第9期

仅通过强度分析并不能完全描述UHTCC的带裂缝工作能力以及吸收能量能力.断裂性能对评价 材料的安全性具有重大意义,能有效描述材料对于

$$G_{\rm F} = \frac{1}{b(h-a_0)} \left[\int_0^{\delta_{\rm max}} P(\delta) d\delta + mg \delta_{\rm max} \right]$$
(1)

为跨 式中γ通过下式计算:

及断裂能 G_F.

$$\gamma = \frac{\text{CMOD}_{c} \cdot hE}{6P_{\text{max}}} \tag{5}$$

同时有:

$$\begin{cases} m_1(\beta) = \beta(0.25 - 0.050 \ 5\beta^{1/2} + 0.003 \ 3\beta) \\ m_2(\beta) = \beta^{1/2}(1.155 + 0.215\beta^{1/2} - 0.027 \ 8\beta) \\ m_3(\beta) = -1.38 + 1.75\beta \\ m_4(\beta) = 0.506 - 1.057\beta + 0.888\beta^2 \end{cases}$$
(6)

裂缝的控制能力大小.基于双K断裂模型,通过三点

弯曲切口梁断裂试验测定 UHTCC 的断裂韧度 K以

所消耗的能量.通过对预制切口梁式构件三点弯曲测

试中采集数据的荷载-挠度曲线进行计算(见式(1)).

断裂能表征材料在外界荷载作用下其裂缝扩散

其中 $\alpha = a_c/b$; $\beta = S/b$, 根据试验测试 P_{max} 以及 CMOD。值,可求得各试件的 Δa 或 a_c 值.

3.3 UHTCC断裂参数

参考双K断裂模型,采用起裂断裂韧度 K_{lc}^{ini} 和失 稳断裂韧度 K_{lc}^{ini} 来描述UHTCC在超低温作用下的 裂缝扩展过程,认为:当 $K = K_{lc}^{ini}$ 时,裂缝开始扩展; 当 $K_{lc}^{ini} < K < K_{lc}^{ini}$ 时,裂缝稳定扩展;当 $K > K_{lc}^{ini}$ 时, 裂缝失稳扩展.

对于任意的 α 和 β≥2.5 的一般三点弯曲梁, 参考双 K 断裂模型,将起裂荷载 P_{ini} 以及破坏荷 载 P_{max}代入公式计算起裂断裂韧度以及失稳断裂 韧度,其计算参考 Guinea 推荐的裂缝尖端应力强 度因子计算表达式(7),由此可得到超低温作用 下的 UHTCC 断裂韧度,以此来评价材料的阻裂 能力.

式中:b为试件截面高度,m;h为试件宽度,m; δ_{max} 为跨 中最大挠度值,m;g为重力加速度,取值 9.8 m/s²;S为 加载试件跨度,m;m为试件跨度范围内的质量,kg.

同时可采用特征长度*L*_{ch}来评价材料经超低温作 用后的脆性程度,特征长度的值越小,材料的脆性越 明显.其计算式为:

$$L_{\rm ch} = \frac{EG_{\rm F}}{f_{\rm t}^2} \tag{2}$$

式中:E为弹性模量,GPa;ft为抗拉强度,MPa.

3.2 等效裂缝长度

混凝土材料为一种准脆性材料,在断裂过程中 存在断裂过程区以及一定大小的亚临界扩展长度. 当荷载达到失稳荷载 P_{max}时,结构发生失稳破坏,此 时裂缝长度达到混凝土不可恢复变形后的临界有效 裂缝长度 a_c.依据弹性等效原理,失稳破坏时对应临 界等效裂缝长度 a_c可以看作初始裂缝长度 a₀与非线 性断裂过程区等效裂缝长度 Δa 之和,则有:

$$a_{\rm c} = a_0 + \Delta a \tag{3}$$

Guinea等^[27]提出一般三点弯曲梁的应力强度因 子、柔度以及裂缝张开口的规律并提供计算方法,等 效裂缝长度α计算公式如下:

$$\alpha = \frac{\gamma^{3/2} + m_1(\beta)\gamma}{\left[\gamma^2 + m_2(\beta)\gamma^{3/2} + m_3(\beta)\gamma + m_4(\beta)\right]^{3/4}}(4)$$

$$K_{\rm lc}^{\rm ini} = \frac{3P_{\rm ini}S\sqrt{a_0}}{2hb^2} f(\alpha,\beta)$$

$$f(\alpha,\beta) = \frac{\alpha^{1/2}}{(1+3\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \left\{ p_3(\alpha) + \frac{4}{\beta} \left[p_4(\alpha) - p_3(\alpha) \right] \right\}$$
(7)

其中 $p_3(\alpha)$ 、 $p_4(\alpha)$ 计算公式如下:

$$\begin{cases} p_3(\alpha) = 1.9 + 0.41\alpha + 0.51\alpha^2 - 0.17\alpha^3 \\ p_4(\alpha) = 1.99 + 0.83\alpha - 0.31\alpha^2 + 0.14\alpha^3 \end{cases}$$
(8)

当裂缝达到临界等效裂缝长度 a。时,材料处于 弹塑性受力状态,此时失稳断裂韧度计算公式 如下:

$$K_{\rm lc}^{\rm un} = \frac{3P_{\rm max}S\sqrt{a_{\rm c}}}{2hb^2} f(\alpha,\beta)$$

$$f(\alpha,\beta) = \frac{\alpha^{1/2}}{(1+3\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \left\{ p_3(\alpha) + \frac{4}{\beta} \left[p_4(\alpha) - p_3(\alpha) \right] \right\}$$
(9)

4 参数分析

4.1 不同影响因素对特征长度的影响

由于材料断裂能不能完全体现材料抵抗变形的 能力,进行数据分析时采用延性指数(D_u)来衡量材



料抵抗变形的能力,D_u越大,表示材料抵抗变形的能力,D_u越大,表示材料抵抗变形的能力,边强,韧性越优.其计算式如下:

$$D_{\rm u} = G_{\rm F} / P_{\rm max} \tag{10}$$

图 6 为不同温度下 UHTCC 试件的延性指数与 特征长度.由图 6 可见:



图 6 不同温度下 UHTCC 试件的延性指数与特征长度 Fig. 6 Ductility index and characteristic length of UHTCC specimens at different temperatures

(1)在一定范围内增加纤维掺量,UHTCC的延 性指数有显著提升,常温状态下,当纤维掺量为1.5% 时,UHTCC延性指数达到最大,其延性指数相对 0.5%纤维掺量UHTCC提升182.45%,继续增大纤 维掺量至2.0%,其延性指数降低20.14%;当纤维掺 量低于2.0%,温度由常温降低至0℃时,UHTCC的 延性指数显著降低,主要是由于低温作用下,材料内 部水发生变化,同时材料内部孔隙水的冰点与孔隙大 小及孔隙中盐溶液浓度密切相关,现有研究成果表明: 随着孔隙尺寸的减小,孔隙内水的冰点降低,当温度降 低至-2℃左右时,直径50 nm的孔隙水将冻结,当温 度降低至-7℃左右时,直径10 nm的孔隙水将冻结, 孔径小于3 nm内的孔隙水在-160℃下不会冻结;当 温度降低至0℃左右时,UHTCC内大部分大孔径孔 隙已被冰体填充,UHTCC的延性显著下降,继续降 低温度,UHTCC较小孔隙内的孔隙水开始冻结,但 并未对其延性指数产生较大的影响.

(2)除了纤维掺量为2.0%的UHTCC试件,其 余试件的延性指数整体趋势都表现出随温度的降低 而降低.这主要是由于随温度降低,毛细孔以及胶凝 孔内水向冰的状态过渡,一方面提升了UHTCC的 密实性,材料的强度有显著提升,另一方面,水变成 冰后的体积膨胀会引起一定的膨胀力,材料内部发 生应力重分布,在一些细微裂缝的尖端产生应力集 中现象,加速细微裂缝形成系列缺陷,导致材料脆性 增大.同时,随着温度的降低,孔隙中冰的填充造成 的膨胀力以及低温引起的基体收缩在材料内引起一 定的内应力,对于纤维掺量为2.0%的UHTCC试 件,由于基体内掺入过多纤维,纤维的抱团现象使 UHTCC基体内部的初始缺陷明显增多,纤维-基体 界面效应削弱,导致部分温度下延性系数、特征长度 离散性增大.

(3)随着纤维掺量的增大,UHTCC的特征长度 有显著提升.在常温状态下,当纤维掺量达到1.5% 时,其特征长度达到普通混凝土的50倍左右,而继续 增大纤维掺量到2.0%,UHTCC的特征长度并没有 进一步的提升,相对于1.5%掺量UHTCC反而降低 了约8.33%;随着温度的降低,除了纤维掺量为2.0% 的UHTCC试件,其余试件的特征长度整体出现降 低趋势,原因是纤维的掺入会引入纤维-基体界面过 渡区,而界面区相对于基体具有高水灰比、高孔隙 率、氢氧化钙(CH)定向排列等特点,纤维-基体界面 区作为复合材料的薄弱层,过多的纤维掺入对于 UHTCC的纤维-基体界面具有明显削弱效果,随着 温度的降低,内部膨胀力以及基体、纤维收缩导致材 料内应力分布不均匀,其特征长度表现出一定的离 散性.

4.2 不同影响因素对等效裂缝长度的影响

图 7 为不同因素下 UHTCC 试件的等效裂缝长度.由图 7 可见,经超低温作用后,各试件的等效裂缝





图 7 不同影响因素下UHTCC试件的等效裂缝长度 Fig. 7 Equivalent crack length of UHTCC specimens under different influencing factors

4.3 不同影响因素对断裂韧度的影响

图 8 为 UHTCC 试件起裂断裂韧度、失稳断裂韧度与温度的关系.由图 8 可见:





(1)由于普通混凝土试件加载过程中表现出明显脆性,因此仅计算其失稳断裂韧度;试验数据显示随着温度的降低,各试验组起裂断裂韧度均随着温度的降低而提升,由于经超低温作用后,UHTCC试件的抗折强度明显提升,此时裂缝并未开始扩展,对于起裂断裂韧度计算只将初始裂缝代入计算,因此超低温作用下UHTCC试件的起裂断裂韧度主要由起裂荷载显著增加,UHTCC试件的起裂断裂韧度随着温度的降低有显著提升,当温度由常温降低

至-160℃时,起裂断裂韧度最大可提升136.82%.

(2)随着纤维掺量的增加,UHTCC试件的失稳 断裂韧度明显提升,常温状态下1.5%纤维掺量试验 组其失稳断裂韧度相对普通混凝土提升了62.78%, 增大纤维掺量至2.0%,其失稳断裂韧度并未进一步 提升,反而有所下降,其失稳断裂韧度相对于1.5% 纤维掺量降低了20.34%.经超低温作用,纤维掺量低 于2.0%的UHTCC试件失稳断裂韧度均表现出随 着温度的降低而略微降低,其中1.5%纤维掺量 UHTCC试件的失稳断裂韧度下降最为显著,当

温度由常温降低至-160℃时,其失稳断裂韧度降 低 13.21%, 而 2.0% 纤维掺量 UHTCC 试件的失稳 断裂韧度在温度降低至-120℃时略微增加.当荷载 作用于UHTCC试件时,荷载首先作用于弹性模量 较低的基体材料,再通过纤维-基体界面将应力传递 给弹性模量较高的纤维,通过纤维桥联效应对基体 变形进行约束.对于短纤维复合材料,由于短纤维的 不连续性,在短纤维端部处的应力分布对复合材料 的力学性能起到至关重要的影响;纤维的掺入对基 体具有正负效应,一方面可以改善基体性能,另一方 面也会在基体中引入部分缺陷,尤其是在纤维端部, 当纤维掺量超出最优掺量后纤维外部浆体包裹层的 均匀程度降低,同时PVA纤维表面亲水性降低,导致 UHTCC 拌和时的稠度降低,材料内部初始缺陷增 大,加剧材料内应力分布不均匀.经超低温作用后, UHTCC试件的起裂断裂韧度提升显著,而失稳断裂 韧度虽表现出一定下降趋势,但变化较小,导致 UHTCC 试件的裂缝稳定扩展区间($K_{le}^{im} < K < K_{le}^{um}$) 减小,裂缝扩展稳定性减弱,加速进入裂缝失稳扩展 阶段.

UHTCC在低温环境下强度显著增加,主要由于 毛细孔隙中的水转化成冰,对外部荷载作用产生一 定的额外阻力;然而,材料性能同时会发生一定的劣 化,当孔隙水冻结时,会在材料中引起临界应力、裂 纹和残余应变,导致材料表现出明显的脆性;而复合 材料在低温下的性能不同于常温下的性能,包括其 力学性能以及失效行为,随着环境温度的降低,聚合 物基体将变得更加致密且易碎,UHTCC的整体刚度 和强度会发生显著变化;同时在常温环境下,纤维起 到连接基体和传递应力作用,材料失效一般发生在 纤维、纤维-基体界面上,纤维断裂、纤维拔出以及界 面脱粘是材料主要失效模式;在超低温作用下,由于 材料韧性降低及基体脆化,此时复合材料的主要失 效模式转变为基体断裂.

4.4 超低温与断裂韧度损失率的关系

经超低温作用后,UHTCC的抗拉强度虽有一定 的提升,但材料的脆性明显,失稳断裂韧度显著降低. 现有研究成果表明:随着温度的降低,材料内部的水 向冰过渡,填补了材料内部的一些较大孔隙,提升了 材料的密实性;但随着温度的继续降低,材料内的毛 细孔隙水开始向冰的状态过渡,因体积膨胀引起一 定的内应力,导致材料内的缺陷加速演变为系列细 微有害孔洞.说明随着环境温度的降低,UHTCC受 到的损伤逐渐严重.因此随着温度的降低,材料内部 出现较多的细微缺陷,降低了基体与纤维间的黏结效应,导致UHTCC更易开裂且脆性增大,表现为宏观数值如延性指数、特征长度以及失稳断裂韧度的显著降低.

为分析 UHTCC 内部的劣化程度,采用材料的 基本力学性能来表征其损伤劣化规律.定义超低温 作用下 UHTCC 的损伤因子(*R*(*t*))为:

$$R(t) = 1 - \frac{f(t)}{f_0}$$
(11)

式中:f(t)是温度t下UHTCC的力学性能参数;f₀ 是20℃下UHTCC的力学性能参数.本次计算采用 UHTCC的失稳断裂韧度作为其力学性能参数.

通过式(11)计算了 UHTCC 的损伤因子 .经过 超低温作用,2.0% 纤维掺量 UHTCC 的试验结果有 一定的离散性,计算损伤因子中舍去结果小于0的数 据点 .图 9为 UHTCC 损伤因子与温度的关系 .由图 9可见,UHTCC 试件的损伤因子均随着温度的降低 而增大 .采用失稳断裂韧度来近似预测 UHTCC 断 裂韧度的损失程度与温度的关系,结果具有良好的 相关性.



图 9 UHTCC 损伤因子与温度的关系

Fig. 9 Relationship between damage factor of UHTCC and temperature

5 结论

(1)随着纤维的掺入,常温下超高韧性水泥基复 合材料(UHTCC)的抗折强度显著提升,在纤维掺量 为1.5%时达到最大,当纤维掺量超过1.5%后略有 降低.随着温度的降低,UHTCC的抗折强度均表现 出升高趋势,其中1.5%纤维掺量UHTCC抗折强度 的提升最为显著;当温度由常温降低至-160℃时, UHTCC的起裂荷载提升了125.15%,失稳荷载提升 了64.46%.

(2)随着温度的降低,不同纤维掺量UHTCC的

裂缝张开口位移以及等效裂缝长度均有不同程度的 降低.

(3)随着纤维掺量的增加,UHTCC的延性指数 具有显著提升,在常温状态下1.5%纤维掺量 UHTCC的延性指数最大,相对于普通混凝土提升了 约20倍;随着温度的降低,UHTCC的延性指数和特 征长度均降低.

(4)UHTCC的起裂断裂韧度随着纤维掺量的增加而增大.当纤维掺量达到1.5%时,UHTCC的起裂断裂韧度最大;随着温度的降低,UHTCC的起裂断裂韧度有增大趋势,失稳断裂韧度表现出相反的趋势.当纤维掺量为1.5%时,UHTCC的断裂性能达到最佳.

(5)随着温度的降低,UHTCC的损伤因子均随 着温度的降低而增大,随着纤维掺量的增加而减小, 其中普通混凝土的性能劣化现象最为明显.

参考文献:

- [1] 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 Xudong, ZHU Xingji. Thermal stress analysis and prestressed reinforcement design of external wall of LNG storage tank[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3):499-505. (in Chinese)
- [2] 韩广忠.中国新建LNG接收站的经营困境及其对策[J].天然 气工业,2014,34(5):168-173.
 HAN Guangzhong. China's new LNG terminal business difficulties and countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5):168-173. (in Chinese)
- [3] BERNER D, GERWICK B, POLIVKA M. Prestressed lightweight concrete in the transport of cryogenic liquids[C]// OCEANS'83, Proceedings. [S.l.]:IEEE, 1983.
- [4] 山根昭,赵克志.超低温混凝土[J].低温建筑技术,1980,4(1): 57-60.
 SHAN Genzhao, ZHAO Kezhi. Ultra-low temperature concrete
 [J]. Low Temperature Architecture Technology, 1980, 4(1):

57-60. (in Chinese)

- [5] 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,2008,41(6):45-60.
 XU Shilang, LI Hedong. Research progress and engineering application of ultra-high toughness cementitious composites[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6):45-60. (in Chinese)
- [6] 李庆华,徐世烺.超高韧性水泥基复合材料基本性能和结构应用研究进展[J].工程力学,2009,26(增刊2):23-67.
 LI Qinghua, XU Shilang. Research progress on basic properties and structural applications of ultra-high toughness cement-based composites[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(Suppl 2): 23-67. (in Chinese)
- [7] 徐世烺,赵国藩.混凝土结构裂缝扩展的双K断裂准则[J].土 木工程学报,1992,4(2):32-38.

XU Shilang, ZHAO Guofan. Double K fracture criterion for crack propagation of concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 4(2):32-38. (in Chinese)

- [8] XU S L, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2):151-177.
- [9] 赵艳华,徐世烺,吴智敏. 混凝土结构裂缝扩展的双G准则[J]. 土木工程学报,2004,37(10):13-18.
 ZHAO Yanhua, XU Shilang, WU Zhimin. Double G criterion for crack propagation of concrete structures [J]. Journal of Civil Engineering, 2004, 37(10):13-18. (in Chinese)
- [10] 张鹏, 亢洛宜, 魏华,等. PVA 纤维和纳米 SiO₂对地聚合物砂浆断裂性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6):986-992.
 ZHANG Peng, KANG Luoyi, WEI Hua, et al. Effect of PVA fiber and nano-SiO₂ on fracture properties of geopolymer mortar [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6):986-992. (in Chinese)
- [11] 高国华,黄卫东,李传海.纳米SiO₂增强骨料裹浆对混凝土抗 冻性能的改善[J].建筑材料学报,2021,24(1):45-53.
 GAO Guohua, HUANG Weidong, LI Chuanhai. The improvement of frost resistance of concrete by nano-SiO₂ reinforced aggregate wrapping[J]. Journal of Building Materials, 2021,24(1):45-53. (in Chinese)
- [12] TOGNON G. Behaviour of mortars and concretes in the temperature range from +20 °C to 196 °C[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement. Tokyo: Mendeley, 1968.
- [13] MIURA T. The properties of concrete at very low temperatures[J]. Materials and Structures, 1989, 22(4):243-254.
- BROWNE R D, BAMFORTH P B. The use of concrete for cryogenic storage-A summary of research, past and present[C]// First International Conference on Cryogenic Concrete. Newcastle: Concrete Society, 1981.
- [15] 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.
- [16] KIM M J, YOO D Y, KIM S, et al. Effects of fiber geometry and cryogenic condition on mechanical properties of ultra-highperformance fiber-reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 107:30-40.
- [17] BERNER D, GERWICK B C, POLIVKA M. Static and cyclic behavior of structural lightweight concrete at cryogenic temperatures[C]//Temperature Effects on Concrete. Tokyo: ASTM International, 1985.
- [18] MARSHALL A L. Cryogenic concrete[J]. Cryogenics, 1982, 22(11):555-565.
- [19] DAHMANI L, KHENANE A, KACI S. Behavior of the reinforced concrete at cryogenic temperatures [J]. Cryogenics, 2007, 47(9/10):517-525.