

文章编号:1001-4888(2006)03-0339-06

负温钢纤维混凝土受压损伤过程的实验研究^{*}

刘永胜¹, 王肖钧¹, 马芹永²

(1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 合肥 230027; 2. 安徽理工大学 土木工程系, 淮南 232001)

摘要: 利用岩石力学试验系统(RMT)对负温下钢纤维混凝土进行了单轴压缩实验, 测得了-5℃、-10℃、-15℃、-20℃下钢纤维混凝土的应力—应变曲线、杨氏模量、极限应力、泊松比等。实验结果表明材料的强度、杨氏模量随温度的下降而上升, 尤其是当温度由-10℃下降至-15℃时, 这些物理量变化特别显著, 之后它们将逐渐趋于某一稳定值。本文对钢纤维混凝土力学性能的温度效应进行了分析并对实验结果进行了微观上的讨论。最后针对负温钢纤维混凝土应力—应变曲线的特点, 基于塑性力学和损伤力学理论, 建立了负温钢纤维混凝土的含损伤本构方程。该方程物理概念清晰, 形式简单, 具有一定的应用参考价值。

关键词: 负温; 钢纤维混凝土; 实验; 损伤; 本构模型

中图分类号: TU528.572 **文献标识码:** A

0 引言

负温环境下, 混凝土材料中的水冻结膨胀, 水化速度减慢, 影响其强度发展。钢纤维混凝土具有高强、高韧性、耐冻、耐疲劳、耐腐蚀的特点, 有效地抑制裂缝的引发和扩展, 克服素混凝土脆性大、拉压比小的缺点, 非常适用于负温地区。虽然钢纤维混凝土在负温条件下的使用日趋广泛, 但有关负温钢纤维混凝土的力学性能研究仍然偏少。M. Pigeon 等^[1]曾在温度为 20℃、-10℃ 和 -30℃ 下对钢纤维混凝土的抗弯性能进行了实验研究, 实验结果指出钢纤维混凝土的变形能和强度随着温度的降低而升高, 其变形能除与温度有关外, 还与水灰比及纤维的掺量有关, 与纤维几何形状关系不明显。

文献[1]对负温钢纤维混凝土力学性能进行了有益的探讨, 使人们初步了解到负温钢纤维混凝土强度与温度的关系, 但其实验负温点偏少, 温差幅度过大, 研究结果不便于工程应用。为此本文通过实验, 研究了-5℃, -10℃, -15℃, -20℃下钢纤维混凝土单轴受压过程的力学性能, 根据负温钢纤维混凝土应力—应变曲线的特点, 建立了负温钢纤维混凝土含损伤本构方程, 并对损伤变量及损伤演化行为给予了必要的讨论。

1 实验研究

1.1 实验材料及实验配合比

水泥: 安徽省淮南矿业集团生产的八公山牌 PO425 号普通硅酸盐水泥; 钢纤维: 上海哈瑞克斯金属制品有限公司生产的 AMI04-32-600 型铣销钢纤维, 长径比 30~40, 抗拉强度 $\geq 700 \text{ MPa}$; 外加剂: 山西省万荣县城南化工厂生产的 CN-3 早强防冻剂; 骨料: 5~10mm 碎石, 连续粒径且级配良好, 含泥量 0.5%, 10mm 以上粒径颗粒含量小于 1%, 实验用砂为Ⅱ区中砂, 细度模数 $\mu_f = 3.01$, 含泥量为 3%, 含水量为 1%。配合比为: 水泥 : 水 : 砂 : 石 = 1 : 0.42 : 2.06 : 2.68。水泥的用量为 390 kg/m^3 。钢纤

* 收稿日期: 2005-05-18; 修订日期: 2006-03-07

通讯作者: 刘永胜(1974—), 男, 博士研究生, 主要从事钢纤维混凝土动、静态力学性能机理研究。

维的掺量为体积比为1.2%。温度不同的试件采用同一配合比,只是防冻剂的掺量不同。防冻剂的掺量以水泥用量为基准: -5°C 掺3%; -10°C 掺4%; -15°C 掺6%; -20°C 掺9%。

1.2 实验结果及分析

实验在岩石力学试验系统(RMT-150B)(如图1)上进行。本系统可以对岩石和混凝土等材料进行单轴和三轴压缩实验,在设计上充分考虑了岩石及混凝土力学性质的特殊性,具有良好的动、静态特性和系统刚度,能跟踪脆性岩石和混凝土瞬间破坏,对多种岩石及混凝土都能测出应力—应变曲线。系统除了给出应力—应变曲线外,还能测出弹性极限、杨氏模量、极限应变、泊松比等参数。试件采用直径为 $50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱体标准试件,每组三个试件,试件在零摄氏度下成型,然后在相应的实验负温下养护7天后进行实验。试件的成型、养护和加载过程均按规范^[2]进行。

实验测得了各负温下钢纤维混凝土应力—应变曲线如图2所示。表1为实验得到的钢纤维混凝土的各力学参数。从实验结果可以看出,随着温度的下降,负温钢纤维混凝土强度极限和杨氏模量上升,泊松比降低。这说明随着温度的下降,材料的强度提高,脆性加大。当温度由 -10°C 下降至 -15°C 时,强度极限和杨氏模量增加尤为明显,温度下降至 -20°C 左右时,这些物理量的增加逐渐缓慢,趋于一个稳定的值。



图1 RMT-150B 测试系统

Fig. 1 The RMT-150B testing system

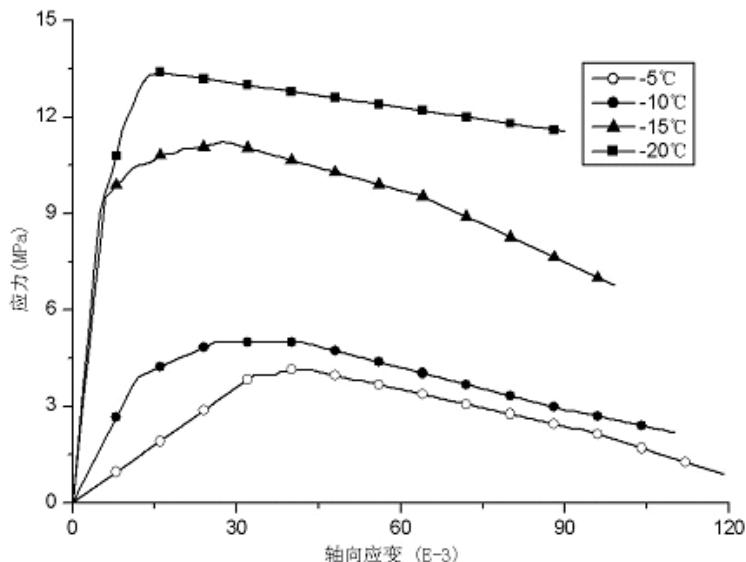


图2 负温钢纤维混凝土实验应力—应变曲线

Fig. 2 Stress-stain curves of minus centigrade SFRC

表1 负温钢纤维混凝土的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameter of minus centigrade SFRC

温度(°C)	-5	-10	-15	-20
极限应力(MPa)	4.16	5.00	11.23	13.39
弹性模量(GPa)	0.120	0.333	1.600	1.810
泊松比	0.204	0.014	0.035	0.026

根据上述特点,强度和初始杨氏模量与温度的关系均可拟合为如下表达式:

$$\sigma_y(T) \text{ 或 } E_0(T) = A_1 \arctan(|T| - T^*) + A_2 \quad (1)$$

其中 T^* 为参考温度, $T^* = 13^\circ\text{C}$ 。对于 $\sigma_y - T$ 关系, $A_1 = 3.00$, $A_2 = 8.56$; 对于 $E_0 - T$ 关系, $A_1 = 0.57$, $A_2 = 1.00$ 。它们的关系曲线如图 3、图 4 所示。

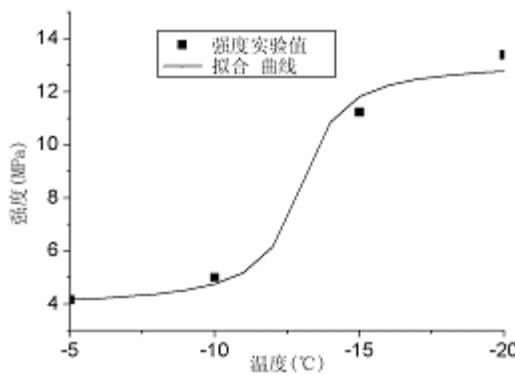


图 3 $\sigma_y - T$ 关系曲线

Fig. 3 The relational curve of $\sigma_y - T$

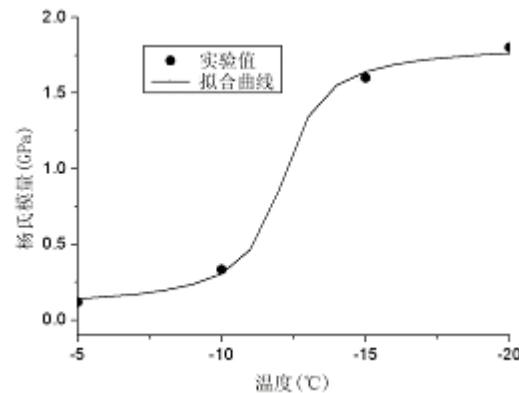


图 4 $E_0 - T$ 关系曲线

Fig. 4 The relational curve of $E_0 - T$

物理上我们可以把钢纤维混凝土简化为以混凝土为基体的混凝土和钢纤维的二相复合材料,其力学行为与纤维和基体之间的粘结强度关系密切。在负温情况下,由于在钢纤维混凝土中掺入了防冻剂,降低了微孔洞中水的冰点,使得混凝土在负温下仍能正常地进行水化反应。水化反应后,冰的冻结作用在负温钢纤维混凝土的力学性能中发挥了重要的作用。当温度在 $-10^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$ 时,混凝土基体和钢纤维之间的水能迅速结成冰,冰的数量和强度增加,从而增加基体与钢纤维之间的粘结面积和粘结强度,使得负温钢纤维混凝土的强度明显提高。温度继续下降,冰的数量和强度会逐渐趋于某一饱和值,钢纤维—混凝土的粘结强度提高也随之变缓,最终将趋于稳定值。实验指出当温度下降到 -20°C 左右时,钢纤维混凝土的强度和杨氏模量便接近这一稳定值。

图 2 是不同负温下钢纤维混凝土实测的单轴应力—应变曲线。分析这些曲线可以发现:(1) 应力—应变初始阶段,负温钢纤维混凝土呈现出良好的线弹性,其弹性极限应力和弹性模量均随负温的增加而增加;(2) 当荷载超过材料的线弹性极限后,材料有明显的非线性行为,这种非线性行为完全可以归咎于材料内部微损伤的生成和发展,对于脆性材料而言,表现为微裂纹的生成和扩展。但当荷载超过线弹性极限之初,虽然微裂纹的生成和扩展将引起材料强度的降低,但是应变硬化现象使得材料的总体强度仍随变形的发展有所提高,不过实验曲线表明,这一过程十分短暂;(3) 当载荷超过材料的强度极限后,材料的应力—应变曲线呈明显的应变软化现象,细观上反映了微裂纹的大量生成和非稳定扩展,最终导致材料的破坏。

2 含损伤本构方程的建立

钢纤维混凝土是一种含有原始微裂纹和微孔洞的复合材料,在外载荷作用下,这些微缺陷被激活并发展,导致材料的损伤和完全破坏。但细观地研究钢纤维混凝土微损伤的生成和发展有一定的难度,在此基础上建立的本构方程往往也不便于工程应用。为此我们在连续介质力学框架内,通过引入宏观损伤变量的方法,描述材料的应力—应变行为。董毓利、鞠杨^[3-6]等人对混凝土试件所作的单轴循环加载实验指出,混凝土可以看成为弹塑性耦合材料,其卸载模量与卸载点的应力—应变状态有关。为此他们提出了一种理想弹塑性损伤本构模型,如图 5 所示,即

$$\sigma = (1 - D) E_0 (\epsilon - \epsilon_p) \quad (2)$$

其中 E_0 为初始弹性模量; ϵ_p 为不可逆应变, D 为损伤变量。其基本思想是:受损混凝土的不可逆应变 ϵ_p 可以通过假定材料为理想塑性体来获得,而其卸载模量 E' 则由实验应力—应变曲线确定,于是有

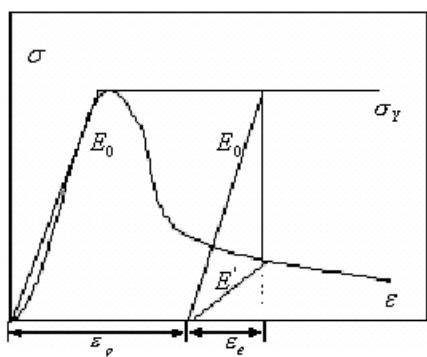
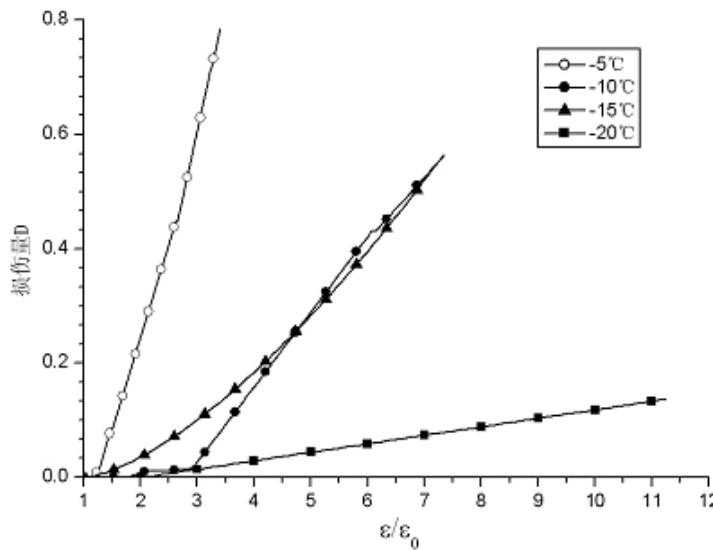


图 5 理想弹塑性损伤模型

Fig. 5 Perfect elastic-plastic damage model

由于损伤是当应变超过某一阈值后才逐渐萌发、发展,于是我们引入一无量纲量 ϵ/ϵ_0 ,其中 ϵ_0 为弹性极限应力 σ_e 所对应的应变。对于负温钢纤维混凝土,由于材料的应变硬化过程非常短暂,弹性极限应力 σ_e 非常接近于强度应力 σ_Y ,于是可以认为 ϵ_0 即为极限应力 σ_Y 对应的应变。负温钢纤维混凝土的极限应力 σ_Y 见表 1,它是温度的函数,与温度关系满足(1)式。

根据(3b)式和(5)式,我们可以通过实验曲线求出各负温应力—应变曲线中损伤量 D 与 ϵ/ϵ_0 的关系,如图 6 所示。

图 6 损伤量 D 与 ϵ/ϵ_0 曲线Fig. 6 The relation of damage value D and ϵ/ϵ_0

从图 6 可以看出,损伤量 D 随着 ϵ/ϵ_0 的增加而增加,且基本呈一种幂函数的关系,对于各种不同温度,曲线的斜率不一样。为此我们可以采用下列函数来描述 D 与 ϵ/ϵ_0 的关系

$$D = M \left(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0} \right)^n \quad (6)$$

其中 n 是材料参数,M 是为了描述温度对损伤量 D 的影响而引进的参数。经拟合得 $n=1.5$,M 的值如表 2 所示。

表 2 参数 M 的值

Tab. 2 The value of M

温度(℃)	-5	-10	-15	-20
M	0.22	0.035	0.0095	0.0045

参数 M 与温度的关系满足下列 Boltzmann 函数

$$M = \frac{B_1 - B_2}{1 + \exp((T - T^*)/B_3)} + B_2 \quad (8)$$

其中 $B_1 = 0.0044$, $B_2 = 239.90$, $B_3 = 2.57$, $T^* = 13$ 。

根据以上分析,得到负温钢纤维混凝土的含损伤本构方程为

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \epsilon & \epsilon < \epsilon_0 \\ (1 - D) E_0 (\epsilon - \epsilon_p) & \epsilon \geq \epsilon_0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $D = M(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0})^n$, $\epsilon_p = \epsilon - \frac{\sigma_y}{E_0}$ 。本文所建负温钢纤维混凝土含损伤本构方程与实验曲线比较如图 7 所示。

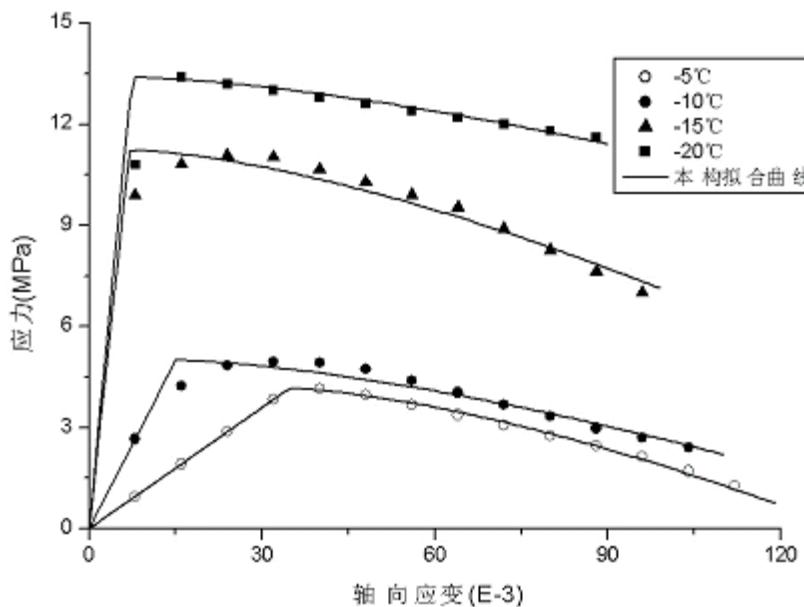


图 7 本构曲线与实验值比较

Fig. 7 The comparison of the constitutive curves and the experimental values

所建含损伤本构方程较好地描述了材料强度极限后的应变软化效应,解决了损伤应用中塑性材料存在的不可逆变形的难题。该模型虽然考虑了初始损伤,但认为在 $\epsilon < \epsilon_0$ 区域,初始损伤不发展,得到了线性的应力—应变关系,这与负温钢纤维混凝土的实验曲线比较吻合,却避开复杂的初始损伤的定量描述,使模型简单化;而在 $\epsilon \geq \epsilon_0$ 区域,采用理想塑性模型与损伤力学理论的结合,较好地分析了负温钢纤维混凝土应变软化现象。通过选择不同的温度参数 M 可以模拟不同温度的负温钢纤维混凝土的损伤发展以至材料破坏的过程。对于复杂应力状态,只需将其中的应力、应变代之以等效应力、应变即可。

3 结论

(1) 实验指出,负温钢纤维混凝土强度和刚度随着温度的降低而升高,尤其是当温度在 $-10^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$ 范围变化时,强度和刚度增加明显,温度进一步降低,强度和刚度趋于一个稳定的值。

(2) 从物理上讲,随着温度的降低,混凝土基体与钢纤维之间的粘结强度增加,从而使得负温钢纤维混凝土强度和刚度上升。

(3) 本文所建立的含损伤本构模型物理概念清晰,形式简单,能较好地描述负温钢纤维混凝土受压的实际过程,具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Pigwon M, Cantin R. Flexural Properties of Steel Fiber-reinforced Concretes at Low Temperatures [J]. Cement and Concretes Composites, 1998, 20(5):365~375.
- [2] 中国工程建设标准化协会. 钢纤维混凝土试验方法 CECS 13:89[M]. 北京:中国计划出版社, 1996:26~43 (The Association of Engineering Standardization of China. Testing Way for Steel Fiber Reinforced Concrete CECS13:89. Beijing: China planning Press, 1996:26~43 (in Chinese))
- [3] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 受压混凝土理想弹塑性损伤本构模型[J]. 力学与实践, 1996, 18(6):14~17 (Dong Yuli, Xie Heping, Zhao Peng. Perfect Elastic-Plastic Constitutive Model of Concrete Under Compression. Mechanics in Engineering, 1996, 18(6): 14~17 (in Chinese))
- [4] 董毓利, 谢和平, 李世平. 砼受压损伤力学本构模型的研究[J]. 工程力学, 1996, 13(1): 44~53 (Dong Yuli, Xie Heping, Li Shiping. Continuum Damage Mechanics Constitutive Model of Concrete Under Compression. Engineering Mechanics, 1996, 13(1):44~53 (in Chinese))
- [5] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 砼受压全过程损伤的实验研究[J]. 实验力学, 1995, 10(2):95~102 (Dong Yuli, Xie Heping, Zhao Peng. Experimental Study on Complete Damage Process of Concrete Under Compression. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(2):95~102 (in Chinese))
- [6] 鞠杨, 樊承谋, 潘景龙等. 变幅疲劳载荷下钢纤维混凝土的损伤演化行为研究[J]. 实验力学, 1997, 12(1):110~118 (Ju Yang, Fan Chengmou, Pan Jinglong. A Study on Fatigue Damage Evolution of SFRC Material under Variable Amplitude Loads. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(1):110~118 (in Chinese))

Experimental Study on Steel Fiber Reinforced Concrete Under uniaxial compression at minus centigrade

LIU Yong-sheng¹, WANG Xiao-jun¹, MA Qin-Yong²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The axial compression experiments of the Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) at minus centigrade were conducted by RMT system, and the Stress-Strain curves, Yang's modulus, the elastic limit stresses, the elastic limit strains and Poission's ratios were determined at -5°C , -10°C , -15°C , -20°C respectively. The experimental results show that the strengths and the Yang's modulus of SFRC at minus centigrade were increasing with the temperature decreasing, especially in the range of $-10^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$, the physical quantities increase greatly, and then they become stabilization gradually and reach some steady value. The minus centigrade effects on SFRC' mechanical behaviors were analyzed and the results of experiments were discussed in micro point of view. Finally according to the characteristics of the Stress-Strain curves of the SFRC at minus centigrade, on the foundation of Plastic Mechanics and Damage Mechanics, the constitutive equation considering damage was established. The constitutive equation is clear in physical conception and simple in expression form, thus it is available in practical applications.

Key words: minus centigrade; steel fiber reinforced concrete; experiment; damage; constitutive model