第 44 卷第 2 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 44，No. 2
2016 年 2 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　February，2016

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.05

高温作用下牺牲混凝土的损伤演化

褚洪岩[1,2]，孙　伟[1,2]，蒋金洋[1,2]

(1. 东南大学材料科学与工程学院，南京 211189；2. 江苏省土木工程材料重点实验室，南京 211189)

摘　要：以掺加/不掺加聚丙烯纤维的核电牺牲混凝土为对象，研究了不同温度作用下牺牲混凝土的力学性能和损伤演化规律。采用超声波检测技术，得到不同温度作用下牺牲混凝土试件中的超声波波速。根据损伤定义和应力波理论，得到牺牲混凝土损伤与其超声波波速之间的关系，最终建立了不同温度作用下牺牲混凝土的损伤演化模型。结果表明：在 25~400 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土试件的残余抗压强度均高于掺加纤维的试件的残余抗压强度，600~1 000 ℃时则呈现相反趋势；高温作用下，聚丙烯纤维的掺加对在牺牲混凝土中传播的超声波波速具有双重效应——正效应和负效应，在 200~1 000 ℃时，负效应起主导作用；掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的损伤随温度演化结果一致，在高温作用下牺牲混凝土损伤随温度演化符合 Weibull 分布，该损伤演化模型可以用于高温作用下牺牲混凝土损伤分析以及核灾难后评估鉴定。

关键词：牺牲混凝土；高温；聚丙烯纤维；超声波；损伤演化

中图分类号：TU528.59　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2016)02–0211–07

网络出版时间：2016–01–25　12:07:49　　**网络出版地址**：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20160125.1207.009.html

Damage Evolution of Sacrificial Concrete Subjected to Elevated Temperatures

CHU Hongyan[1,2], *SUN Wei*[1,2], *JIANG Jinyang*[1,2]

(1. School of Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Nanjing 211189, China)

Abstract: The mechanical properties and damage evolution of sacrificial concrete with and without polypropylene (PP) fibers after heating at various elevated temperatures were investigated. The variations of ultrasonic wave velocity for sacrificial concrete subjected to different elevated temperatures were obtained by ultrasonic testing technique. According to the definition of the damage and stress wave theory, the relationship between the damage evolution in sacrificial concrete and variation of ultrasonic wave velocity was obtained, eventually establishing the damage evolution model of sacrificial concrete. The results indicate that the residual compressive strengths of sacrificial concrete without fibers are greater than those of sacrificial concrete with fibers at 25–400 ℃，and the contrary tendency appears at 600−1 000 ℃. The addition of PP fibers has both positive and negative effects on the velocity of ultrasonic wave propagation in sacrificial concrete. Furthermore, the negative effect played a leading role in the range of 200–1 000 ℃. There are consistent results of damage evolution of sacrificial concrete with and without PP fibers subjected to high temperatures. In addition, the Weibull distribution model was proposed to analyze the damage of sacrificial concrete and nuclear disaster assessment.

Keywords: sacrificial concrete; elevated temperature; polypropylene fiber; ultrasonic wave; damage evolution

牺牲混凝土是欧洲压水反应堆(EPR)的重要组成部分，该种反应堆是世界上第三代核电技术的代表。该技术的一个重大革新之处在于通过牺牲混凝土的作用，使核电站在严重核事故中对公共与环境安全性更高。当严重核事故发生时，牺牲混凝土和堆芯熔融物相互作用，可以氧化堆芯熔融物的高放射性成分，降低堆芯熔融物的温度及减少安全壳内部压力的增加，防止反应堆堆芯熔融物穿透底板而

收稿日期：2015–06–09。　修订日期：2015–11–02。
基金项目：国家自然科学基金项目(51378114)；江苏省重点科技成果转化专项项目(85120000220)。
第一作者：褚洪岩(1987—)，男，博士研究生。
通信作者：孙　伟(1935—)，女，教授，中国工程院院士。

Received date: 2015–06–09.　**Revised date:** 2015–11–02.
First author: CHU Hongyan (1987–), male, Doctoral candidate.
E-mail: chuhongyan87@126.com
Correspondent author: SUN Wei (1935–), female, Professor.
E-mail: sunwei@seu.edu.cn

造成严重的核污染[1]。此外，牺牲混凝土需在高温作用下保持自身结构完整性，不能发生爆裂。目前，我国已经研制出具有自主知识产权的核电牺牲混凝土，该牺牲混凝土将被应用于国内核电站建设。为方便施工，牺牲混凝土具有较高流动性，属于自密实混凝土。从其力学性能上来讲，它的抗压强度在 65 MPa 以上，可以认为是高强混凝土。由于其工况特殊，尤其需要研究它在高温作用下材料性质变化、损伤演化情况。此外，由于其粗、细集料与传统的混凝土有较大区别，导致在高温作用下的材料性质变化以及损伤演化也与传统的混凝土存在不同之处。

通常，混凝土材料经过高温作用后，会导致其性能劣化。混凝土在劣化过程中，发生了极其复杂的物理和化学变化。从宏观角度上看，混凝土力学性能的劣化形式通常有膨胀、开裂、强度和刚度下降，在特殊情况下还会发生爆裂[2]。目前关于普通混凝土、高性能混凝土在高温作用下的材料性能劣化有大量的文献报道[3–6]。王海龙等[3]研究发现，随着温度的升高，普通混凝土的抗压强度呈现先升高后降低的规律，在其中传播的超声波波速则是单调降低。Poon 等[4]研究表明：在高温作用下，掺入聚丙烯纤维的高强混凝土比没有掺入该纤维的混凝土的抗压强度下降得更快。Peng 等[5]指出，在高温作用下，掺入纤维的高强混凝土比没有掺入纤维的高强混凝土的断裂能更高。Behnood 等[6]研究了高性能混凝土在高温作用后的抗压强度、劈拉强度，该研究表明：在 300~600 ℃时，与普通混凝土相比，高强混凝土的抗压强度下降得更快。此外，温度对高性能混凝土的劈裂抗拉性能的影响比其抗压性能大。高强混凝土具有很好的耐久性，在工程界被大量使用，但是在高温作用下，此类混凝土致密的微观结构，有可能导致严重的爆裂[7]，从而对建筑结构造成严重损坏。大量研究表明，向高强混凝土中掺入聚丙烯纤维，能够改善混凝土的耐高温性能，有效减少或者消除该种混凝土的高温爆裂行为[8–11]。高丹盈等[8]研究发现，聚丙烯纤维可以有效防止纤维增强混凝土的高温爆裂，当掺量为 0.9 kg/m³时，能够明显改善高温中的纤维增强混凝土的劈拉性能。牛旭婧等[9]探讨了聚丙烯粗纤维对高强混凝土高温后性能的影响，结果表明：聚丙烯粗纤维对高强混凝土高温后的抗折强度产生不利影响，但是聚丙烯的掺入能够有效缓解混凝土中的高温损伤。Kodur 等[10]研究表明，掺入聚丙烯纤维不仅能使高强混凝土的抗火性能得到改善，而且还能提高其抗压强度、抗折强度和劈拉强度。Xiao 等[11]对比研究了掺加/不掺加聚丙烯纤维高强混凝土的高温性能，发现掺入聚丙烯纤维的高强混凝土均未发生爆裂，没有掺入该纤维的则发生了爆裂。

虽然目前关于掺加/不掺加纤维的高强混凝土在高温作用下的材料性能劣化有大量的文献报道，但是，关于掺加/不掺加纤维的高强混凝土在高温作用下的材料的损伤演化规律的文献报告很少看到，尤其是关于既具有高强特性又具有自密实特性的牺牲混凝土在高温作用下的材料性能劣化情况和其损伤演化规律的研究。牺牲混凝土的服役寿命与其损伤演化规律密切相关。尽管有研究者曾提出过关于普通混凝土、高强混凝土损伤演化的经验公式，但是对牺牲混凝土的损伤直接进行测量仍然是一个具有挑战性的课题。为此，以掺加/不掺加聚丙烯纤维的核电牺牲混凝土为对象，研究了不同温度作用下牺牲混凝土的力学性能和其损伤演化规律。

1　实验

1.1　材料

所用水泥为南京小野田 P·Ⅱ52.5 水泥，粉煤灰为珠海明惠生产的Ⅰ级粉煤灰。硅灰为埃肯公司生产的微硅粉，粗、细骨料为中核科技有限公司生产的 0~8 mm 连续级配的硅石、赤铁矿石(硅石：0~5 mm 占 56.0%，5~8 mm 占 44.0%；赤铁矿石：0~4 mm 占 78.0%，4~8 mm 占 22.0%)。减水剂采用江苏博特新材料有限公司生产的减水率为 33.9%的聚羧酸类高效减水剂。实验用水为普通自来水。纤维采用江苏博特新材料有限公司生产的束状单丝聚丙烯纤维，纤维的物理性能指标如表 1 所示。

1.2　混凝土配合比

所用牺牲混凝土的配合比如表 2 所示。

表 1　聚丙烯纤维物理性能表

Table 1　Physical properties of polypropylene (pp) fiber

Length/mm	Diameter/μm	Density/(g·cm^{-3})	Melting temperature/℃	Burning temperature/℃	Elastic modulus/MPa
12±1	18	0.91	160	590	>3 500

表 2　牺牲混凝土配合比

Table 2　Mix proportion of sacrificial concrete

Mixture	Mix proportion/ (kg·m^{-3})							
	Cement	Fly ash	Silica fume	Silica stone	Iron ore	Water	Superplasticizer	Polypropylene fiber
C1	388	135	20	1 060	980	181	7.6	0
C2	388	135	20	1 060	980	181	7.6	1.2

C1—Without PP fiber; C2—With PP fiber.

根据上述牺牲混凝土配合比，制作尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土试件，在室内自然养护 24 h 拆模，然后将试件放入到混凝土标准养护室进行养护，设置养护温度为 21 ℃，湿度为 97%，养护 28 d。每种配合比各成型 60 个试件，共 120 个牺牲混凝土试样。

1.3　方法

1.3.1　高温实验　　牺牲混凝土试件养护完成后，将试件在室内放置 3 d 后进行高温实验。高温实验仪器为箱式电阻炉，升温速率为 5 ℃/min，目标温度分别为 200、400、600、800、1 000 ℃，达到目标温度后恒温 2 h，以确保牺牲混凝土试件内部温度均匀，然后随炉冷却至室温，对比实验在室温 25 ℃进行。每个目标温度放入两种配合比各 9 个试件。这些试件用于牺牲混凝土在不同温度作用下的力学性能和超声波波速的检测。

1.3.2　力学性能测试　　采用 WAW-2000 万能试验机对牺牲混凝土试件进行抗压强度实验，采用载荷控制模式，设置加载速率为 0.8 MPa/s。在不同温度目标下的抗压强度实验，分别取 3 个牺牲混凝土试件进行重复实验，测量结果为 3 个试件的平均值。

1.3.3　牺牲混凝土损伤测量　　超声波作为一种无损检测技术，在混凝土领域应用广泛，该技术可以表征混凝土内部的损伤。通常，超声波通过 3 种形式在混凝土介质中传播，即纵波、横波和表面波。而纵波的传播速度是最快的，故主要研究混凝土中的纵波的传播规律。假定牺牲混凝土为均匀介质，根据应力波理论，它的动态弹性模量 E_d 与在其中传播的纵波波速 C_l 的关系可以表示为[12]

$$C_l=\sqrt{\frac{E_d(1-\upsilon)}{\rho(1-2\upsilon)(1+\upsilon)}} \tag{1}$$

式中：ρ 为牺牲混凝土的密度；υ 为牺牲混凝土的 Poisson 比。

如果得到在牺牲混凝土中传播的初始波速 C_0，则

$$C_0=\sqrt{\frac{E_0(1-\upsilon_0)}{\rho_0(1-2\upsilon_0)(1+\upsilon_0)}} \tag{2}$$

式中：E_0 为牺牲混凝土的初始动态弹性模量；ρ_0 为牺牲混凝土的初始密度；υ_0 为其初始 Possoin 比。

在高温作用下，假定牺牲混凝土的密度不变，并且 Possoin 比效应对牺牲混凝土损伤的影响不大[13]，那么牺牲混凝土在高温作用下的损伤演化就表现为其动弹性模量的演化，设在高温作用下，对牺牲混凝土造成的损伤为 D，则可以得出，

$$C=\sqrt{\frac{E_0(1-D)(1-\upsilon_0)}{\rho_0(1-2\upsilon_0)(1+\upsilon_0)}} \tag{3}$$

把式(2)代入式(3)，可以得出牺牲混凝土的损伤 D 的表达式：

$$D=1-\left(\frac{C}{C_0}\right)^2 \tag{4}$$

式中，C 为混牺牲凝土在不同温度作用下，在其中传播的纵波波速。

通过上述推导可以得出：只要用超声波检测仪测得超声波在牺牲混凝土中传播的初始纵波波速 C_0，以及在不同温度作用下，在其中超声波传播的纵波波速 C，就能求出牺牲混凝土在高温作用下的损伤 D，进而可以得出高温作用下牺牲混凝土损伤演化规律。牺牲混凝土纵波波速的检测方法参照文献[14]。

2　结果与讨论

2.1　牺牲混凝土是否发生爆裂

在高温实验过程中，所有掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土试件中，有 1 个不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土试件在大约 900 ℃时发生了爆裂，而所有掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土试件，在整个高温实验过程中均未发生爆裂。该现象表明掺加聚丙烯纤维可以避免牺牲混凝土发生爆裂，提高它的高温稳定性。这与高丹盈等[8]关于掺加聚丙烯纤维可以避免纤维增强混凝土的高温爆裂的研究结果一致。

2.2　牺牲混凝土残余抗压强度

图 1 为牺牲混凝土的残余抗压强度随温度变化情况。图 2 为其相对残余抗压强度随温度变化情况。

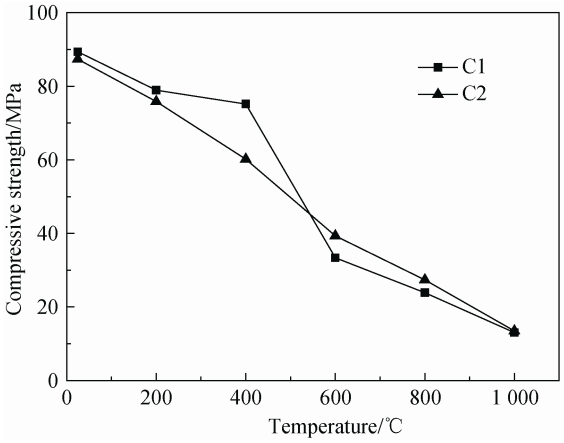

图 1　不同温度作用下牺牲混凝土残余抗压强度

Fig. 1　Residual compressive strength of sacrificial concretes at different temperatures

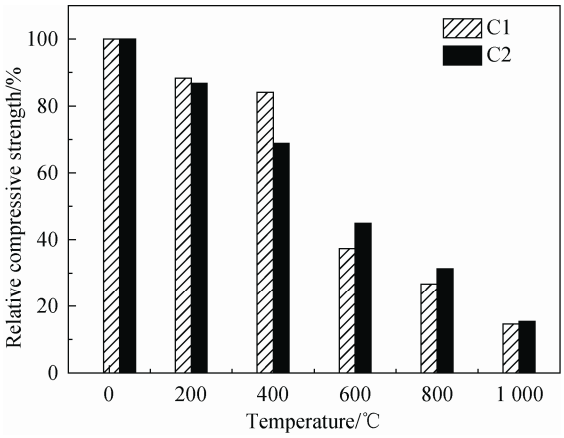

图 2　不同温度作用下牺牲混凝土相对残余抗压强度(相对于室温强度)

Fig. 2　Relative residual compressive strength of sacrificial concretes at different temperatures (compared to strength at 25 ℃)

由图 1 可以看出，随着温度的升高，两种类型的牺牲混凝土的残余抗压强度均呈现降低趋势，这与文献[15]所述的混杂纤维高性能混凝土的结论一致。在 25~400 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度均高于掺加纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度；而在 600~1 000 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度均低于掺加纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度，这一结果与文献[3,5–6,11]类似，尽管文献中的最高实验温度是 900 ℃。

由图 1 还可以看出，在 25~1 000 ℃时，掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度下降的速度(图 1 中曲线斜率)比较稳定，基本上为定值；在 400~600 ℃时，不掺加纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度出现快速下降现象。这是因为在 400 ℃左右时，混凝土中的 $Ca(OH)_2$ 分解成水蒸汽和石灰[16]；在 600 ℃时，混凝土中结晶水几乎完全丧失，导致基体和骨料的变形更加不协调，产生更多的裂纹[6]，从而导致混凝土的强度急剧下降。由于聚丙烯纤维的掺加，导致在该温度范围内在牺牲混凝土内部形成相互交错的纤维熔化孔道，这些孔道可以有效的降低基体和骨料的变形不协调，从而在该温度范围内掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的强度并未急剧下降。Chase[17]研究表明，在 573 ℃时，石英会发生由 β 晶型向 α 晶型转变，并伴随着微量(0.82%)的体积膨胀。而 Heap 等[18]的研究表明，当硅石的粒径为 0~8 mm，质量分数为 64.8%时，石英晶型转变对混凝土的力学性能的影响很小，可以忽略不计。本研究所用的硅石粒径也是 0~8 mm，而不掺加纤维的牺牲混凝土中硅石的质量分数仅为 38.2%，因此在高温作用后牺牲混凝土强度变化与硅石中石英晶型转变无关。

由图 2 可以看出，随着温度的升高，两种类型的牺牲混凝土的相对残余抗压强度变化趋势与其残余抗压强度一致。在 200 ℃时，两种牺牲混凝土的残余抗压强度下降幅度不大，200 ℃时相对残余抗压强度分别为初始值的 88.3%(C1)、86.8%(C2)；在 400~600 ℃时，两种牺牲混凝土的残余抗压强度下降幅度较大，600 ℃时相对残余抗压强度分别为初始值的 37.4%(C1)、45.0%(C2)；在 800~1 000 ℃时，两种牺牲混凝土的残余抗压强度下降幅度又比较小，1 000 ℃时相对残余抗压强度仅为初始值的 14.6%(C1)、15.4%(C2)。

在室温(25 ℃)时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的抗压强度高于掺加纤维的牺牲混凝土的强度，这是由于掺加的聚丙烯纤维在牺牲混凝土内部不能充分分散，在其内部团聚，从而导致牺牲混凝土局部的孔隙率增大，抗压强度降低，这与普通纤维增强混凝土研究结果一致[19]。在 200~400 ℃时，聚丙烯纤维成熔融状态，但是仍保持聚丙烯纤维的形貌[20]，因此掺加的聚丙烯纤维并不能显著减少高温对其造成的热损伤，二者抗压强度的损失是一致的。即在 200~400 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的抗压强度高于掺加纤维的牺牲混凝土的强

度；在 600~1 000 ℃时，聚丙烯纤维熔化，在牺牲混凝土中留下相互交错的纤维熔化孔道，该孔道可以有效降低高温对牺牲混凝土造成的热损伤，从而在 600~1 000 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度均低于掺加纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度。在 600 ℃时掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土试件中纤维熔化留下的孔道的 SEM 照片如图 3 所示。

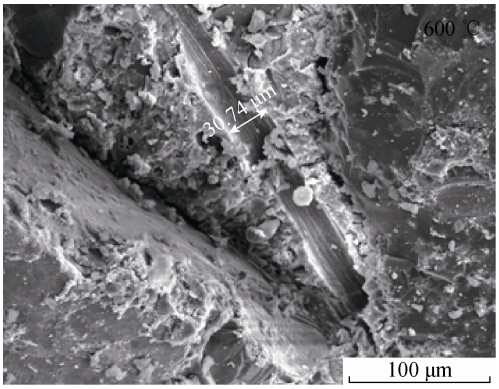

图 3　牺牲混凝土中聚丙烯纤维熔化所留下的孔道

Fig. 3　Channel left by molten PP fibers in sacrificial concrete

2.3　牺牲混凝土超声波波速

掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土，在常温下以及经过高温作用后的超声波波速变化情况如图 4 所示。

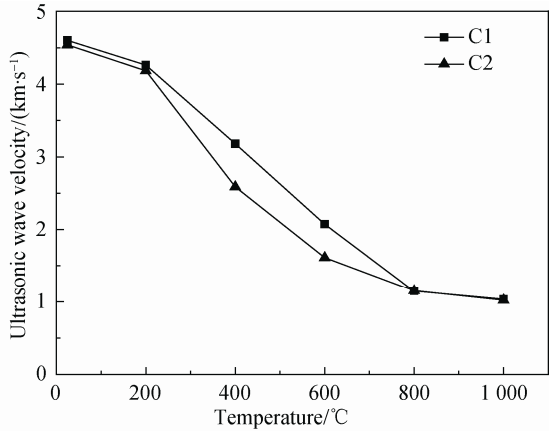

图 4　不同温度作用下牺牲混凝土中的超声波波速

Fig. 4　Ultrasonic wave velocity in sacrificial concretes at different temperatures

由图 4 可以看出：随着温度的升高，在两种类型的牺牲混凝土中传播的超声波波速持续下降；在 200 ℃时，超声波波速下降的幅度较小，在两种类型的牺牲混凝土中传播的超声波波速分别为初始值的 92.6%(C1)、92.1%(C2)；在 200~800 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的超声波波速下降速度(图 4 中曲线斜率)比较稳定，基本为一定值。而掺加纤维的牺牲混凝土，在 200~400 ℃时出现加速下降趋势，在 400~800 ℃时下降速度又变得缓慢。尽管在两种类型的牺牲混凝土中传播的超声波波速变化路径不同，但在 800 ℃时二者超声波波速基本相同，分别为 1.147 km/s(C1)、1.152 km/s (C2)；在 800~1 000 ℃时，超声波波速下降的速度又趋于平缓，但此时的超声波波速已经很小，1 000 ℃时在两种类型的牺牲混凝土中传播的超声波波速分别为 1.035 km/s(C1)、1.020 km/s(C2)。

在室温(25 ℃)时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的超声波波速略高于掺加纤维的牺牲混凝土的波速，这是由于掺加的聚丙烯纤维在牺牲混凝土内部不能充分分散，在其内部团聚[16]，导致牺牲混凝土局部的孔隙率增大，从而导致其超声波波降低。在 200~1 000 ℃时，聚丙烯纤维对超声波波速的影响具有双重效应：正效应，由于聚丙烯纤维的熔点较低，其熔化之后在牺牲混凝土内部形成的孔道，有助于降低牺牲混凝土的热损伤，使超声波波速增大；负效应，聚丙烯熔化所形成的孔道，本身也是高温作用所形成的材料缺陷(损伤)，会导致超声波波速减小。在 200~1 000 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的超声波波速略高于掺加纤维的牺牲混凝土的波速，原因是聚丙烯纤维对牺牲混凝土超声波波速影响的负效应大于其正效应。

2.4　牺牲混凝土损伤演化规律

掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土，在高温作用下损伤随温度变化情况如图 5 所示。

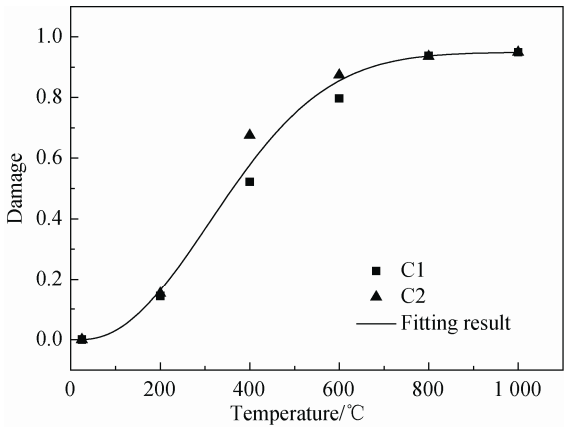

图 5　不同温度作用下牺牲混凝土损伤演化及其 Weibull 分布拟合曲线

Fig. 5　Damage evolution of sacrificial concretes at different temperatures and fitting of Weibull distribution

由图 5 可以看出，在高温作用下，掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的损伤随温度演化结果一致。根据两种牺牲混凝土损伤随温度演化情况，拟合得出牺牲混凝土损伤—温度关系曲线如图 5 中实线所示。在高温作用下，牺牲混凝土损伤符合 Weibull 分布，如下式所示。相关系数 *R*-Square 为 0.988 0。

$$D = 0.949 \times \left\{1 - \exp\left[-0.002 \times (T - 25)\right]^{2.109}\right\} \quad (5)$$

由图 5 还可以看出，在 200~400 ℃时，牺牲混凝土中损伤快速增加，这与在该温度区间内它们的超声波波速(图 4)变化趋势基本一致，而与它们的抗压强度(图 1)的变化趋势并不一致。造成二者变化趋势不一致的原因是：在 200~400 ℃时，牺牲混凝土凝胶体逐渐失水，组织硬化，当达到 300 ℃时脱水也开始增加[18]，导致牺牲混凝土内部出现微裂纹。在牺牲混凝土中传播的超声波波速对微裂纹的出现比较敏感，从而导致超声波波速下降幅度较大。由于牺牲混凝土的损伤是由在其中传播的超声波波速换算过来的，进而导致牺牲混凝土的损伤快速增加。然而，此时出现的微裂纹的数量较少、尺度较小并且未搭接形成宏观裂纹，对牺牲混凝土的强度影响不太明显，导致其抗压强度变化不大。

由曲线拟合的相关系数可以看出，实验数据与拟合曲线之间吻合度很高，式(5)能够较好地描述在高温作用下的牺牲混凝土损伤演化规律。在实际核灾难或者高温作用下的牺牲混凝土工程中，可以首先利用超声波检测仪测得超声波在牺牲混凝土中传播的初始纵波波速 C_0，以及在高温作用下在其中超声波传播的纵波波速 C，求出牺牲混凝土在高温作用下的损伤 D，然后根据式(5)可以反推出牺牲混凝土所承受的温度，可以对其进行损伤分析以及核灾难后鉴定评估提供依据。

3 结论

1) 随着温度的升高，掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度呈持续降低趋势，在 25~400 ℃时，不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度均高于掺加纤维的牺牲混凝土的残余抗压强度，在 600~1 000 ℃时，则呈现相反趋势。

2) 随着温度的升高，在掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土中传播的超声波波速持续下降。在高温作用下，聚丙烯纤维的掺加对在牺牲混凝土中传播的超声波波速有双重效应——正效应和负效应，并且在 200~1 000 ℃时，负效应起主导作用。

3) 在 200~400 ℃时，牺牲混凝土中损伤快速增加，这与在该温度区间内它们的超声波波速变化趋势基本一致，而与它们的抗压强度的变化趋势并不一致。导致二者变化不一致的原因是：在此温度范围内牺牲混凝土内部出现微裂纹，超声波波速对其比较敏感，而此时出现的微裂纹的数量和尺度并不能明显影响牺牲混凝土的强度。

4) 掺加/不掺加聚丙烯纤维的牺牲混凝土的损伤随温度演化结果一致，在高温作用下牺牲混凝土损伤随温度演化符合 Weibull 分布，该损伤演化模型可以用于高温作用下牺牲混凝土损伤分析以及核灾难后评估鉴定。

参考文献:

[1] KONINGS R J M, ALLEN T R, STOLLER R E, et al. Comprehensive Nuclear Materials [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2012: 8–20.

[2] BAZANT Z P, KAPLAN M F. Concrete at High Temperatures: Materials Properties and Mathematical Models [M]. London: Longman Group Limited, 1996: 307–354.

[3] 王海龙, 俞秋佳, 孙晓燕, 等. 高温作用后混凝土损伤与耐久性能评价[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2014, 35(2): 238–242.
WANG Hailong, YU Qiujia, SUN Xiaoyan, et al. J Jiangsu Univ: Nat Sci Ed (in Chinese), 2014, 35(2): 238–242.

[4] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures [J]. Cem Concr Res, 2004, 34: 2215–2222.

[5] PENG Gaifei, YANG Wenwu, ZHAO Jie, et al. Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures [J]. Cem Concr Res, 2006, 36: 723–727.

[6] BEHNOOD A, GHANDEHARI M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures [J]. Fire Saf J, 2009, 44: 1015–1022.

[7] 董香军. 纤维高性能混凝土高温、明火力学与爆裂性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
DONG Xiangjun. Research on mechanical properties and spalling behaviours of FRHPC subjected to high temperature and fire (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

[8] 高丹盈, 赵亮平, 杨淑慧. 纤维矿渣微粉混凝土高温中的劈拉性能[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(5): 677–684.
GAO Danying, ZHAO Liangping, YANG Shuhui. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(5): 677–684.

[9] 牛旭婧, 赵庆新, 陈天红. 聚丙烯粗纤维对高强混凝土高温后性能影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 32(12): 2583–2588.
NIU Xuqing, ZHAO Qingxin, CHEN Tianhong. J Chin Ceram Soc, 2013, 32(12): 2583–2588.

[10] KODUR V K R, CHENG F P, WANG T C, et al. Effect of strength and

fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns[J]. J Struct Eng-ASCE, 2003, 129(2): 253–259.

[11] XIAO J, FALKNER H. On residual strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers at elevated temperatures [J]. Fire Saf J, 2006, 41(2): 115–121.

[12] MEYERS M A. Dynamic Behavior of Materials [M]. New York: Wiley-Interscience, 1994: 152–176.

[13] SONG Hui, CHEN Jiankang. Effect of damage evolution on Poisson's ratio of concrete under sulfate attack [J]. Acta Mech Solida Sin, 2011, 24: 209–215.

[14] 中国工程建设标准化协会. CECS02-88 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Association for Engineering Construction Standardization. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese), 2005.

[15] JU Liyuan, ZHANG Xiong. Effects of hybrid fiber on high performance concrete properties under high temperature [J]. J Tongji Univ: Nat Sci Ed, 2006, 34: 89–92.

[16] 高超, 杨鼎宜, 俞君宝, 等. 纤维混凝土高温后力学性能的研究 [J]. 混凝土, 2013(1): 33–36.
GAO Chao, YANG Dingyi, YU Junbao, et al. Concrete (in Chinese), 2013(1): 33–36.

[17] CHASE M W. NIST-JANAF Thermochemical Tables [M]. The United States of America: American Institute of Physics, 1998: 49–61.

[18] HEAP M J, LAVALLEE Y, LAUMANN A, et al. The influence of thermal-stressing (up to 1 000 ℃) on the physical, mechanical, and chemical properties of siliceous-aggregate, high-strength concrete [J]. Construct Build Mater 2013, 42: 248–265.

[19] PELED A, GUTTMAN H, BENTUR A. Treatments of polypropylene fibres to optimize their reinforcing efficiency in cement composites [J]. Cem Concr Compos, 1992, 14(4): 277–285.

[20] 燕兰, 邢永明, 郝贞洪.混杂纤维增强高性能混凝土(HFHPC)高温力学性能及微观分析[J]. 混凝土, 2012(1): 24–28.
YAN Lan, XING Yongming, HAO Yuanhong. Concrete (in Chinese), 2012(1): 24–28.