文章编号：1000-5773(2012)04-0361-08

高温处理后活性粉末混凝土动力学行为及本构模型研究*

王立闻[1,2]，庞宝君[1]，陈　勇[1]，张　凯[1]

(1.哈尔滨工业大学航天学院，黑龙江哈尔滨　150080；
2.中国东方电气集团有限公司，四川成都　611731)

摘要：利用分离式霍普金森压杆系统，采用铅片作为整形器，分别对常温下及400、600、800 ℃高温处理后的活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete，RPC)试样进行单轴冲击压缩实验，研究高温后RPC材料的动态力学性能，建立高温处理后材料的率型本构模型。结果表明：经不同高温处理后的RPC材料的动态抗压强度和韧性指标均有较明显的应变率敏感性，而峰值应变、初始弹性模量受应变率影响不大；不同应变率下，400 ℃以上高温处理后RPC材料的单轴动态压缩力学性能有所降低。扫描电镜分析表明，高温处理后RPC材料微观结构的劣化是宏观力学性能降低的根本原因。对ZWT粘弹性本构模型进行了修正，修正后的模型适用于混凝土材料经高温处理后的率型本构关系的分析。

关键词：分离式霍普金森压杆；活性粉末混凝土；高温；动态力学性能；本构模型；扫描电镜

中图分类号：O347.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete，RPC)是一种新型超高性能混凝土[1]，因其性能优良，在现代桥梁结构、隧道、石油、核电及军事防护等工程领域具有广阔的应用前景，成为工程材料研究的新热点[2]。由于应用RPC材料的工程领域对抗冲击及抗火(高温)性能要求较高，因此需要了解温度及冲击加载对RPC材料动态力学行为的影响规律。

目前，国内外学者对混凝土材料高温处理后的单轴压缩力学行为的研究多集中在准静态范围内[3-4]，对RPC材料高温处理后抗压强度的实验研究较少。Felicetti等人[5]研究发现，在从20 ℃加热到600 ℃的过程中，RPC的抗压强度呈现先增大后减小的趋势。但是由于相关实验数据较少，目前还没有明确的结论。关于混凝土材料率型本构关系的研究开展较早。在粘弹性动态率型本构模型中，最典型的是由朱兆祥等人[6]提出的ZWT本构模型，并且该模型被推广用来描述混凝土材料单轴应力-应变曲线上升段小变形情况下的本构关系。

本研究利用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)系统，对高温处理后的RPC材料进行不同应变率下的冲击压缩实验，分析温度和应变率对RPC材料动态力学行为的影响规律。在ZWT本构模型基础上，考虑温度影响，将其推广应用在混凝土高温处理后率型本构关系分析中。本研究的相关结论可为RPC结构抗火设计、灾后评估和修复提供一定的数据支持。

* **收稿日期**：2010-12-27；**修回日期**：2011-01-12

基金项目：国家空间碎片专题研究基金项目(kjsp06211)

作者简介：王立闻(1983－)，男，博士，主要从事材料动态力学行为及本构关系研究. E-mail：wanglw83@yahoo.cn

通讯作者：庞宝君(1963－)，男，博士，教授，主要从事空间碎片超高速撞击、航天器防护及材料动力学行为研究. E-mail：pangbj@hit.edu.cn

2 实验方案

2.1 原材料与配合比

水泥:P.O42.5 型硅酸盐水泥。硅灰:挪威埃肯公司生产的中质硅灰,比表面积为 15 m^2/g。石英粉:粒径分布为 5～30 μm,其中 SiO_2 的质量分数大于 99.6%。石英砂:有 109～212 μm 和 212～380 μm 两种级配。减水剂:聚羧酸高效减水剂。RPC 的具体配合比见表 1,其中 W/B 为水胶比,减水剂的质量分数为 2.3%,其它均为质量比。

2.2 试件制备过程

将原材料按配合比混合,放入水泥砂浆搅拌机中,逐渐加水搅拌,直至均匀。搅拌完成后,将拌合物浇注于内径为 36.5 mm、长度为 600 mm 的模具中,在振动台上振动 5 min 成型。试件成型后移入养护室,24 h 后拆模,在 60 ℃蒸汽中养护 3 d。根据 SHPB 实验对试样尺寸的要求,采用切片机将试件制成 ∅36.5 mm×23 mm 的圆柱体,两端进行精磨,使不平行度小于或等于 0.02 mm。

将制备好的试样放入加热炉中。加热温度分别设置为 400、600 及 800 ℃。为了防止试样在加热过程中产生爆裂,高温加热之前对所有试样进行高温烘干。采用如下升温方式:常温情况下将圆柱体试样放进电炉炉膛,关闭炉门并开始升温;初始阶段,电炉全功率输出,最高升温速率为 16 ℃/min;随着温度进一步升高,升温速率慢慢降低,快达到预定温度时(比预定温度低 100 ℃左右),电炉的升温速率自动调整为 1 ℃/min;达到预定温度后,保持该温度 1 h 后打开炉门,自然降温 3 h;取出试件并静置于常温下,24 h 后进行 SHPB 实验。制备好的试样外貌如图 1 所示。

表 1 RPC 基体配合比

Table 1 Mixture proportion of RPC matrix

W/B	Cement	Silica fume	Quartz powder	Quartz sand	
				109～212 μm	212～380 μm
0.22	1	0.24	0.36	0.60	0.60

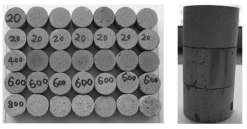


图 1 试样外貌

Fig. 1 Pictures of specimens

2.3 混凝土 SHPB 实验

冲击压缩实验是在哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心自制的∅40 mm SHPB 装置上进行的。压杆和子弹的材料均为高强度合金钢,入射杆、透射杆长度均为 1 800 mm,子弹长度为 300 mm。传统的 SHPB 技术是基于一维假设和应力、应变均匀性假设[7]。对于混凝土类材料,试样在达到峰值应变前,应满足应力、应变均匀分布要求,并且保持近似恒应变率加载,这也是保证实验有效性及结果可靠性的关键。为此,本实验中选用铅片作为波形整形器,对入射波形进行控制。铅片为 6 mm×6 mm×1 mm 的方形薄片,实验时放置在入射杆前端面。图 2 给出了应变率为 80 s^{-1}时典型的入射波、反射波及透射波波形。可见,反射波有一明显的平台段,约占整个有效加载段的 50%,说明在试样的整个加载过程中,大部分时间内实现了近似恒应变率加载。冲击压缩实验的平均应变率分为 4 个等级:S1(75～85 s^{-1})、S2(95～105 s^{-1})、S3(120～130 s^{-1})、S4(135～150 s^{-1})。

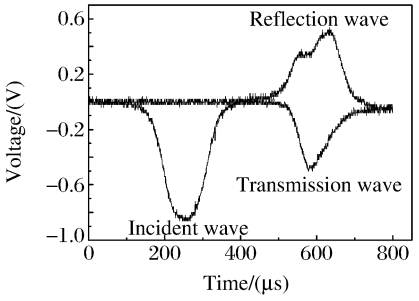


图 2 典型的 SHPB 实验波形

Fig. 2 Typical signal of the SHPB experiment

2.4 扫描电镜分析

为了建立 RPC 材料宏观力学性能与微观组织结构变化之间的联系,对常温及 400、600、800 ℃高温处理后的 RPC 基体结构进行扫描电镜分析。从制备好的试样上选取形状规则、表面平整、尺寸在 1 cm 左右的小样作为扫描电镜样品。喷金后进行扫描电镜观察,拍摄有特征的微区形貌。

3 动态压缩性能分析

3.1 应力-应变曲线分析

图 3 为 RPC 试样的冲击压缩应力-应变曲线。可见,温度和应变率对应力-应变曲线均有不同程度的影响。应力-应变曲线没有明显的弹性段,而是由非线性不显著段向非线性显著段逐渐过渡,即随着应力(应变)的增加其非线性程度逐渐加剧,因此可将其分为两个阶段考虑:非线性不显著段(弹性段)和非线性段,这与 RPC 试样内部的损伤演化进程有直接关系。因为 RPC 材料并非一般意义的均匀材料,在其成型养护过程中材料内部形成了大量的微裂纹,因此在冲击压缩载荷下 RPC 的破坏过程是应变硬化和损伤软化两种效应的综合结果。在加载的初始阶段,损伤较小,应变硬化起主导地位,此时应力-应变曲线近似为线性;随着压缩载荷的增大,损伤演化加剧,大量微裂纹成核、扩展,形成损伤过程区,能量耗散增加,裂纹的不稳定扩展被推迟,增加了 RPC 材料的韧性,在应变硬化和损伤软化两种效应的共同作用下,应力-应变曲线成为上凸形状的非线性曲线。为了便于分析,将应力-应变曲线计算得到的动态压缩性能指标汇总成表 2,其中 E 为初始弹性模量,T 为韧性,T_s 为相对韧性。

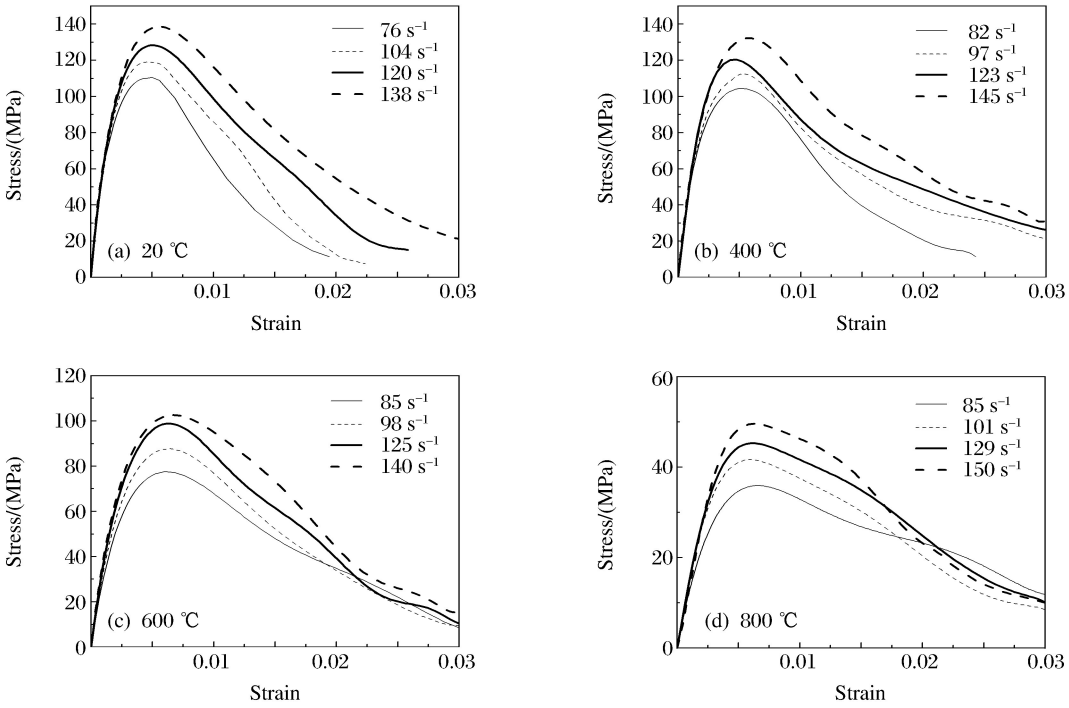


图 3 RPC 试样的动态压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curves for RPC specimens under compression

3.2 应变率效应和温度效应分析

本研究中动态抗压强度是指应力-应变曲线的峰值应力,与峰值应力对应的应变为峰值应变。表 2 中初始弹性模量 E 的计算值与选取的参考点有关,本研究选择非线性不显著段与非线性显著段的拐点为参考点,对应的应变值约为 0.001。根据表 2 中的统计数据,得到了 RPC 试样的动态抗压强度、峰值应变和初始弹性模量随应变率和加热温度的变化关系,如图 4~图 6 所示。

由图 4 可知,动态抗压强度的变化规律为:随着应变率增大,常温下及高温处理后的 RPC 材料的动态抗压强度均呈现增大趋势,表现出明显的应变率效应;不同应变率下,RPC 材料的动态抗压强度均随着加热温度的升高而下降;400 ℃高温处理后 RPC 材料动态抗压强度的下降幅度较小,当加热温度达到 600 ℃时,动态抗压强度下降迅速,800 ℃高温处理后动态抗压强度降低到常温下的 30%左右。

表 2 RPC 试样动态压缩性能指标计算结果

Table 2 Computational results of dynamic compressive properties for RPC specimens

Temperature/(℃)	Strain rate/(s^{-1})	Peak stress/(MPa)	Peak strain/(‰)	E/(GPa)	T/(J/cm^3)	T_s/(%)
20	76	110.0	4.912	58.9	1.18	1.07
	104	119.1	5.204	56.1	1.43	1.20
	120	128.6	5.483	58.4	1.71	1.33
	138	138.6	5.546	59.2	1.99	1.44
400	82	104.5	5.386	50.4	1.29	1.23
	97	112.4	5.413	52.8	1.49	1.33
	123	120.3	5.280	54.9	1.61	1.34
	145	132.3	5.758	53.6	1.88	1.42
600	85	77.6	7.217	29.7	1.12	1.44
	98	87.6	7.132	32.9	1.25	1.43
	125	98.8	7.011	36.3	1.41	1.43
	140	102.5	7.387	37.7	1.55	1.51
800	85	35.9	8.080	12.1	0.56	1.56
	101	41.6	7.879	14.8	0.64	1.54
	129	45.3	7.816	14.8	0.71	1.57
	150	49.6	8.030	13.6	0.75	1.51

从图 5 可以看出：常温下及高温处理后，不同应变率下的峰值应变相差不大，没有明显的应变率效应；不同应变率下，随着加热温度升高，峰值应变逐渐增大，说明高温使 RPC 试样的机械变形能力增强。

由图 6 可知：常温下及高温处理后，不同应变率下初始弹性模量 E 相差不大，没有明显的应变率效应；不同应变率下，随着加热温度升高，E 值逐渐下降，这与 RPC 试样在高温处理后动态抗压强度降低、峰值应变增大有直接关系；800 ℃时，E 值仅为常温下的 25%左右，下降幅度大于动态抗压强度。

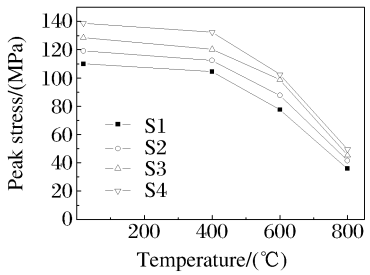


图 4 动态抗压强度变化规律

Fig. 4 Changing regularity of dynamic compressive strength

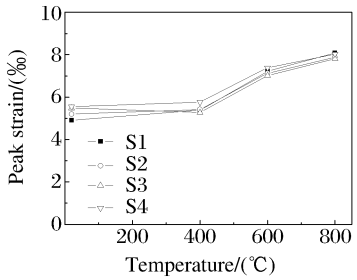


图 5 峰值应变变化规律

Fig. 5 Changing regularity of peak strain

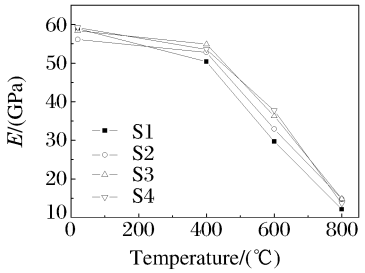


图 6 初始弹性模量变化规律

Fig. 6 Changing regularity of initial elastic modulus

仅用峰值应变来反映材料的韧性具有片面性。从宏观角度看，韧性是材料从加载到失效为止吸收能量的能力，是材料强度指标和延性指标的综合响应，反映了材料的完整力学特性。参考 Taerwe[8] 和 Nataraja 等人[9] 的方法，将韧性 T 定义为：在指定应变范围内应力-应变曲线下包围的面积，计算方法如图 7 所示。将试样韧性 T 与动态抗压强度的比值定义为相对韧性 T_s。T_s 可以反映应力-应变曲线峰值应力点过后塑性流动的变化趋势。T_s 值越大，

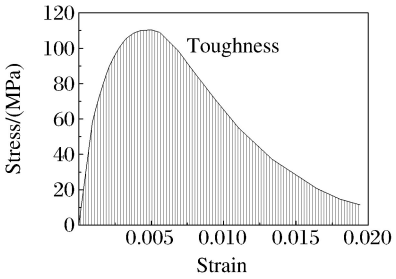


图 7 韧性 T 计算方法示意图

Fig. 7 Calculating sketch of toughness parameter T

说明曲线越平缓,塑性流动现象越明显。本研究中,计算韧性指标 T 时指定的应变值为 0.020。

图 8 给出了韧性 T 的变化规律。可见:与动态抗压强度类似,RPC 试样的韧性随着应变率的增大而升高,表现出明显的应变率效应;不同应变率下,随着加热温度升高,韧性 T 有下降趋势;400 ℃高温处理后,在 75～85 s^{-1}及 95～105 s^{-1}应变率下,韧性 T 有上升趋势,这是因为韧性由强度和延性两个指标共同决定,温度使强度降低的同时也使峰值应变增大,因此韧性 T 的下降幅度小于动态抗压强度。

图 9 给出了相对韧性 T_s 的变化规律。可见:应变率对 T_s 的影响不明显,说明不同应变率下应力-应变曲线峰值应力点后的塑性流动段变化趋势相近,这是因为在本研究的应变率范围内,试样在达到峰值应力后均发生崩碎性破坏,在塑性流动段试样内部裂纹的损伤演化都比较充分,因此下降段具有一定的相似性;不同应变率下,T_s 随着加热温度的升高而增大,说明高温使 RPC 材料的塑性变形能力增强,导致应力-应变曲线的下降段更加平缓。

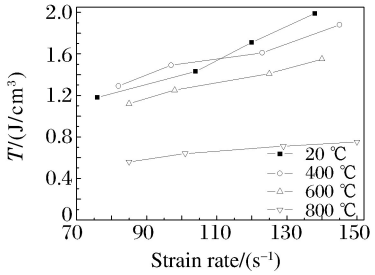


图 8　韧性 T 的变化规律

Fig. 8　Variation of toughness T

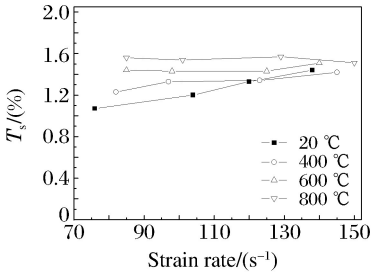
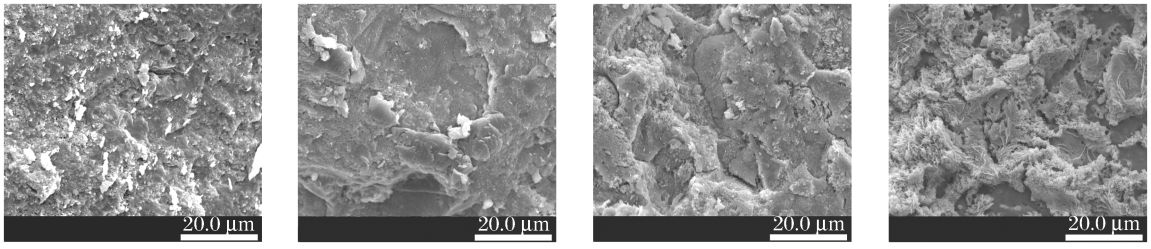


图 9　相对韧性 T_s 的变化规律

Fig. 9　Variation of relative toughness T_s

4　微观结构分析

高温处理后,混凝土材料会发生一系列物理变化和化学变化,其成分和结构均发生一定改变。高温处理后 RPC 中的水泥水化,产物主要以 C-S-H 凝胶为主,其它物相很少,因此 C-S-H 凝胶体的结构特征和空隙对 RPC 的力学性能起着重要作用。图 10 为 C-S-H 凝胶体在常温下及高温处理后的微观结构形貌。常温下,水泥石中各水化产物相互胶结,形成连续相,整体结构非常完整、均匀、密实,见图 10(a)。400 ℃高温处理后,C-S-H 结构已开始有所变化,除毛细水、凝胶水蒸发外,还伴随有结晶水的失去,与常温下 C-S-H 凝胶体相比有些松散,但整体结构仍保持较完整,见图 10(b)。因此,400 ℃高温处理后 RPC 试样的动态抗压强度、峰值应变、初始弹性模量与常温下相比变化不明显。600 ℃高温处理后,C-S-H 的结构水脱水严重,水泥水化物一般在 550 ℃左右分解,原来相互胶结在一起的连续相因结构水的失去而变成独立的大块分散相,见图 10(c)。由于水泥水化物的脱水,水化与未水化的颗粒之间的结合力松弛,组织受到破坏,RPC 试样内部孔隙增多。C-S-H 凝胶的网状结构开始破坏,出现了裂缝,导致RPC材料的宏观力学性能在 600 ℃高温后出现了较为明显的下降。800 ℃高温后,C-S-H



(a) 20 ℃　(b) 400 ℃　(c) 600 ℃　(d) 800 ℃

图 10　C-S-H 凝胶体的微观结构形貌

Fig. 10　Microstructure morphology of C-S-H gels

凝胶网状结构变得很破碎，结构极不完整，只剩下 C-S-H 凝胶体脱水后剩下的残架，呈破损不连续状态，见图 10(d)。表面裂纹清晰可见，结构密实性急剧下降，从而使 RPC 材料的宏观力学性能严重劣化。通过上述分析可知，高温处理后 RPC 材料微观结构的变化是其宏观力学性能降低的根本原因。

5 本构模型

对 RPC 材料的应变率敏感性进行分析可知：在高应变率范围($10^2 \sim 10^3\ s^{-1}$)内，高温处理前后材料均呈现出较明显的应变率效应，且材料在高应变率下的应力-应变曲线表现出较为明显的迟滞粘弹性行为。朱兆祥等人[6]提出的 ZWT 非线性粘弹性本构方程较适合描述 RPC 材料单轴冲击压缩率型本构关系，因此本研究采用该模型进行分析。

5.1 ZWT 本构模型

ZWT 本构模型[6]的基本表达形式为

$$\sigma = E_0\varepsilon + E_1\theta_1\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\theta_1}\right)\right] + E_2\theta_2\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\theta_2}\right)\right] \tag{1}$$

式中：σ 为应力，ε 为应变，$\dot{\varepsilon}$ 为应变率，E_0、E_1、E_2 为相应的弹性常数，θ_1、θ_2 为相应的特征时间。

损伤是研究混凝土类材料力学性能时必须考虑的因素。本研究针对峰值应力(应变)之前的曲线阶段(包含非线性段)进行拟合。参考胡时胜等人[10]由损伤“冻结”实验确定的损伤因子 D

$$D = D_0\varepsilon^a(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^b \tag{2}$$

式中：D_0、a、b 为待定系数，可依据损伤“冻结”实验确定。由于本研究未进行损伤实验，因此将(2)式中的参数 D_0、a、b 作为待定常数进行拟合。考虑损伤项的 ZWT 模型可表示为

$$\sigma = (1-D)\left\{E_0\varepsilon + E_1\theta_1\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\theta_1}\right)\right] + E_2\theta_2\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\theta_2}\right)\right]\right\} \tag{3}$$

利用高温处理后 RPC 材料冲击压缩应力-应变曲线结果，对 ZWT 模型进行温度项修正。分析高温处理后 RPC 材料的冲击压缩性能可以发现：在加热温度达到某一特定值 T_c 之前，动态抗压强度下降较为缓慢；当超过该温度阀值后，动态抗压强度下降加快。因此，可采用如下温度软化函数对 ZWT 模型进行修正，即

$$g(T_h) = 1/[1+(T_h/T_c)^m] \tag{4}$$

式中：T_h 为加热温度值；T_c 为临界转变温度，可由实验确定；m 为温度软化指数，为待定系数。图 11 给出了温度软化函数 $g(T_h)$ 的曲线形式。可见，该函数具有较平缓的初始段、迅速下降段和平缓的末段，较为符合 RPC 材料随温度变化的规律。

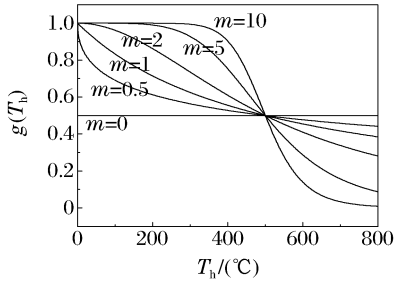


图 11 温度软化函数 $g(T_h)$

Fig. 11 Function of temperature softening $g(T_h)$

经过上述分析，修正后的 ZWT 本构模型形式可最终表示为

$$\sigma = \frac{1}{1+(T_h/T_c)^m}\left[1-D_0\varepsilon^a\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^b\right]\left\{E_0\varepsilon + E_1\theta_1\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\theta_1}\right)\right] + E_2\theta_2\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\theta_2}\right)\right]\right\} \tag{5}$$

(5)式中：待定常数为 m、T_c、D_0、a、b、E_0、E_1、θ_1、E_2、θ_2，共 10 个，其中 T_c 和 E_0 可通过实验确定。

5.2 模型参数的确定

由 3.2 节可知，600 ℃处理后 RPC 动态抗压强度降低到原来的 70%左右，而 800 ℃处理后，其动态抗压强度仅为原来的 30%左右。因此，可以确定临界转变温度 T_c 在 600～800 ℃之间。由于无法将各种温度处理过的试样都进行 SHPB 实验，因此这里取 T_c=680 ℃。只要 T_c 在一个合理的范围内，它对整个本构关系的影响不大。准静态下 RPC 的弹性模量 E_0 可由实验方法获得，经测定，E_0=40.1 GPa。

其它模型参数的确定步骤如下：首先不考虑温度的影响，即在 T=20 ℃时(此时温度项近似为 1)，

对 4 组不同应变率下的应力-应变曲线的非线性不显著段($\varepsilon \leqslant 0.001$)数据(此时试样并无明显损伤,因此损伤项也不予以考虑)进行初步拟合,确定 E_1、θ_1、E_2、θ_2 的范围;然后,利用常温下 4 组不同应变率下应力-应变曲线在峰值应变以前的曲线部分对含损伤项(不含温度项)的本构关系进行拟合,确定 D_0、a、b 的取值范围;最后,通过不同温度下的应力-应变曲线确定温度软化指数 m。拟合得到的含温度项修正的 ZWT 本构模型参数列于表 3。需要指出的是,由于拟合时并没有使用准静态下的应力-应变曲线结果,因此该模型参数不适用于描述准静态下 RPC 材料高温处理后的本构关系。

表 3　修正后的 ZWT 本构模型参数

Table 3　Parameters of modified ZWT constitutive model

m	T_c/(℃)	D_0	a	b	E_0/(GPa)	E_1/(GPa)	θ_1/(μs)	E_2/(GPa)	θ_2/(ms)
5.08	680	0.44	0.38	0.14	40.1	80.5	22.1	−28.7	37.9

由修正的 ZWT 本构模型得到的理论应力-应变曲线与实验应力-应变曲线的对比如图 12 所示。可见,不同温度作用后,RPC 材料的应力-应变实验曲线与 ZWT 本构模型理论曲线吻合较好,说明修正的 ZWT 本构模型适合描述高温处理后 RPC 材料的率型本构关系。

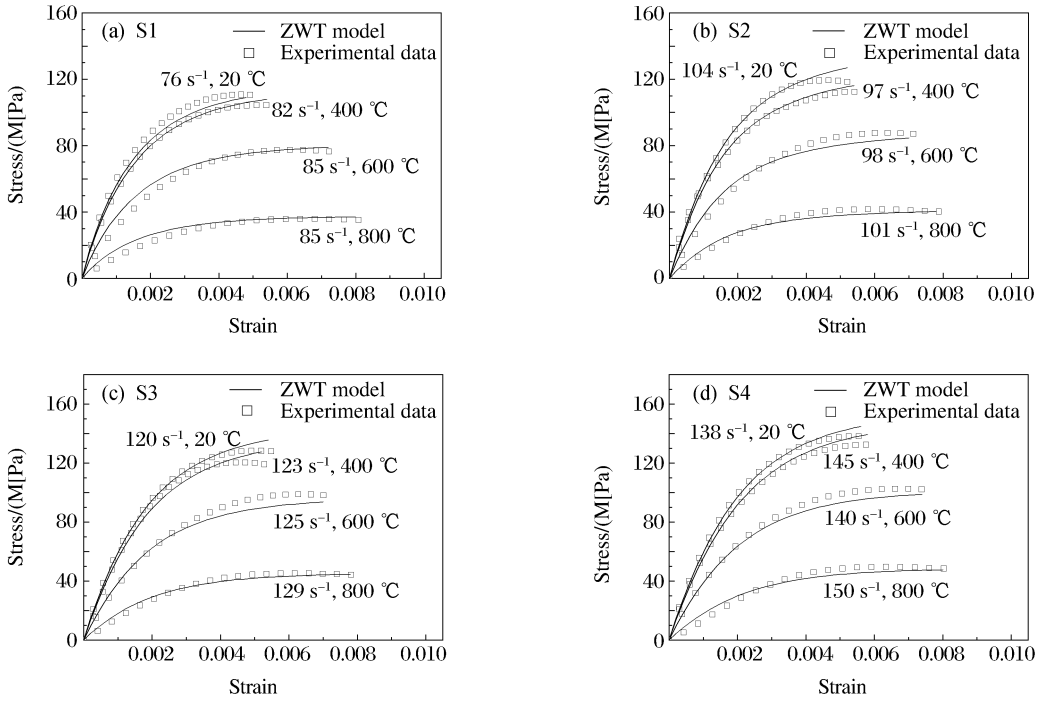


图 12　修正的 ZWT 本构模型与实验应力-应变曲线对比

Fig. 12　Comparison between modified ZWT constitutive model and experimental stress-strain curves

6　结　论

(1) RPC 材料高温处理后单轴动态压缩性能的应变率相关性分析表明:RPC 材料的动态抗压强度和韧性指标均有较明显的应变率效应,峰值应变、初始弹性模量及相对韧性指标受应变率影响不大。

(2) 扫描电镜分析表明,高温改变了 RPC 材料的微观组织结构。因此在不同应变率下,400 ℃以上的高温处理后,RPC 材料的动态抗压强度、韧性和初始弹性模量均有所下降,但 RPC 材料的机械变形及塑性流动能力增强。

(3) 对 ZWT 粘弹性本构模型进行温度项修正,结果表明,修正后的 ZWT 模型适用于描述混凝土材料的高温处理后率型本构关系。

References:

[1] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cem Concr Res, 1995, 25(7): 1501-1511.

[2] Ju Y, Liu H B, Sheng G H, et al. Experimental study of dynamic mechanical properties of reactive powder concrete under high-strain-rate impacts [J]. Sci China Technol Sc, 2010, 53(9): 2435-2449.

[3] 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(12): 2215-2222.

[4] Lau A, Anson M. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete [J]. Cem Concr Res, 2006, 36(9): 1698-1707.

[5] Felicetti R, Gambarova P G, Natali Sora M P. Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling [A]//Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete [C]. Lyon, France, 2000: 749-758.

[6] Tang Z P, Tian L Q, Zhu Z X, et al. Research on mechanical properties of epoxy resin at high strain rates [A]// Proceedings of the 2nd National Conference on Blast and Impact Mechanics [C]. Yangzhou, 1981. (in Chinese)
唐志平, 田兰桥, 朱兆祥, 等. 高应变率下环氧树脂的力学性能 [A]//第二届全国爆炸力学学术会议论文集 [C]. 扬州, 1981.

[7] Wang L L. Foundation of Stress Waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 52-60. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 52-60.

[8] Taerwe L R. Influence of steel fibers on strain-softening of high-strength concrete [J]. ACI Mater J, 1993, 89(1): 54-60.

[9] Nataraja M C, Dhang N, Gupta A P. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression [J]. Cem Concr Compos, 1999, 21: 383-390.

[10] Hu S S, Wang D R. Dynamic constitutive relation of concrete under impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 242-246. (in Chinese)
胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 242-246.

Study on Dynamic Mechanical Behavior and Constitutive Model of Reactive Powder Concrete after Exposure in High Temperature

WANG Li-Wen[1,2], PANG Bao-Jun[1], CHEN Yong[1], ZHANG Kai[1]

(1. *School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*;
2. *Dongfang Electric Corporation, Chengdu* 611731, *China*)

Abstract: The dynamic mechanical behavior and rate constitutive model of reactive powder concrete (RPC) after exposure in high temperature are studied experimentally by means of split Hopkinson pressure bar system. Both the untreated specimens and those after exposure in high temperature (400, 600 and 800 ℃) are tested with lead flakes as pulse shapers. The experimental results show that both dynamic compressive strength and toughness of RPC after different high temperature treatments exhibit remarkable strain rate sensitivity while the peak strain and initial Young modulus do not. Furthermore, the dynamic uniaxial compressive mechanical properties of RPC at different strain rate debased after exposure at high temperature over 400 ℃. The scanning electron microscope (SEM) technology is also used to investigate the microstructure change of the RPC material; it proves that the deterioration of microstructure is the essential reason for the reduction of the RPC's macroscopic mechanical performance. In addition, ZWT viscoelastic constitutive model is utilized and modified, thus it can be used to analysis the rate constitutive relations of concrete after exposure in high temperature.

Key words: split Hopkinson pressure bar; reactive powder concrete; high temperature; dynamic mechanical properties; constitutive model; scanning electron microscope