

冲击荷载下钢渣细骨料混凝土力学特性及本构关系

薛刚,刘秋雨*,董伟,李京军

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:为研究钢渣细骨料混凝土(steel slag fine aggregate concrete, SSC)在冲击荷载下的力学性能,利用直径为100 mm的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对普通混凝土和钢渣细骨料混凝土(钢渣取代混凝土中河砂的体积分数分别为10%、20%和30%)进行轴向冲击压缩试验,研究钢渣体积分数及应变率对SSC的动态抗压强度、冲击韧性、动态增强因子(dynamic increase factor, DIF) F_{di} 及破坏形态的影响,在Z-W-T方程的基础上修正,得到适用于钢渣混凝土的动态损伤本构方程。结果表明:SSC具有明显的应变率效应,即钢渣体积分数相同时,随着应变率的提高,SSC动态抗压强度、 F_{di} 、冲击韧性和破坏程度均逐渐增加;钢渣的掺入对混凝土在冲击荷载下的力学行为产生一定影响,在应变率相似时,钢渣体积分数从0增加到30%时,SSC动态抗压强度和冲击韧性呈上升趋势,但上升幅度相对较小;掺入钢渣后, F_{di} 明显减小;通过对试验应力-应变曲线进行拟合可知,考虑损伤演化的Z-W-T方程可很好地描述SSC的动态应力-应变关系。

关键词:混凝土;钢渣混凝土;分离式霍普金森压杆;动态力学性能;本构关系

中图分类号:TU528

文献标志码:A

引用格式:薛刚,刘秋雨,董伟,等.冲击荷载下钢渣细骨料混凝土力学特性及本构关系[J].山东大学学报(工学版),2025,55(4):108-117.

XUE Gang, LIU Qiuyu, DONG Wei, et al. Mechanical properties and constitutive relationship of steel slag fine aggregate concrete under impact load[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(4):108-117.

Mechanical properties and constitutive relationship of steel slag fine aggregate concrete under impact load

XUE Gang, LIU Qiuyu*, DONG Wei, LI Jingjun

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of steel slag fine aggregate concrete (SSC) under impact loading, axial impact compression tests of ordinary concrete and steel slag fine aggregate concrete with 10%, 20%, and 30% volume replacement ratios were carried out by using the 100 mm split Hopkinson pressure bar (SHPB). The effects of steel slag replacement ratio and strain rate on the dynamic compressive strength, impact toughness, dynamic increase factor (DIF) F_{di} , and failure mode of SSC were investigated. Based on the Z-W-T equation, a modified dynamic damage constitutive equation suitable for steel slag concrete was obtained. The results showed that SSC had a significant strain rate effect, with the same amount of steel slag, the dynamic compressive strength, F_{di} , impact toughness, and failure severity of SSC gradually increased with the growth of strain rate. The mechanical behavior under impact loading was changed by the addition of steel slag. When the strain rate was similar, the dynamic compressive strength and impact toughness of SSC showed an upward trend when the steel slag content increased from 0 to 30%, but the increase was relatively small, while the F_{di} value significantly decreased after the addition of steel slag. By fitting the experimental stress-strain curve, it could be concluded that the Z-W-T equation considering damage evolution could effectively describe the dynamic stress-strain relationship of SSC.

Keywords: concrete; steel slag concrete; split Hopkinson compression bar; dynamic mechanical properties; constitutive model

0 引言

我国钢铁冶炼过程产生大量钢渣^[1],而钢渣利

用率偏低^[2]。废弃钢渣堆放不仅占用大量土地,而且造成一定的环境污染,将钢渣回收用于工程建设有望显著提高其利用率。研究表明,钢渣含有与水泥石相似的化学成分,而且相对于传统天然砂石,钢

收稿日期:2024-01-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168032);2023年度内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2023RCTD025)

第一作者简介:薛刚(1968—),男,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为新型建筑材料。E-mail: xuegang-2008@126.com

*通信作者简介:刘秋雨(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型建筑材料。E-mail: liuqiuyu251@126.com

渣骨料具有密度高、抗压强度高、耐磨性高等优点^[3-4]。

目前很多学者对钢渣混凝土的静态力学特性进行了研究,发现将钢渣适当取代细骨料配制混凝土可以有效提高力学性能^[5-6]。文献[7]发现天然细骨料中钢渣体积分数为20%、30%时,混凝土试样28 d抗压强度分别提高5.36%、5.71%;文献[8]发现混凝土天然骨料中转炉钢渣的体积分数分别为10%、20%、30%、80%和100%时,抗压强度分别提高7.15%、8.1%、2.83%、12.32%和12.32%;文献[9]发现在混凝土中掺入未加工的钢渣,钢渣细骨料对混凝土抗压和抗拉强度均有积极影响;文献[10]研究表明,在混凝土中掺入20%钢渣细骨料,28 d抗弯强度提高10%;文献[11]发现用最大粒径4.9 mm的钢渣细骨料取代天然砂后,28 d弹性模量提高40.67%。不同地区的钢渣成分多变,当钢渣中 $f\text{-CaO}$ 质量分数较高时,将导致混凝土体积膨胀甚至开裂,其力学性能表现出一定的差异性。这也是部分文献报道的用钢渣取代细骨料后,混凝土强度提高不大甚至出现下降的主要原因。

以往的研究大多集中在钢渣混凝土静态力学性能方面,研究成果为它在工程建设中的应用提供了科学依据。工程结构在使用中不仅承受静态荷载,它在冲击、爆炸等不可预料偶然荷载作用下的性能也不容忽视,研究钢渣混凝土在冲击荷载下的动态力学行为具有重要的现实意义。混凝土类材料是典型的应变率敏感性材料,在冲击荷载作用下的力学特性与静态条件下具有明显差异。分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验是当前高应变率($10\sim 10^3\text{ s}^{-1}$)下混凝土动态力学研究中常用方法之一。诸多学者利用 SHPB 装置对混凝土材料在冲击荷载作用下的力学行为进行研究,发现加载速度对强度、裂缝扩展、破坏形态和能量吸收能力均有一定影响^[12-15]。文献[16]利用 SHPB 装置对钢渣混凝土的动态压缩性能进行研究,结果表明钢渣细骨料的掺入对混凝土的动态抗压强

度具有积极影响。目前有关普通混凝土或纤维混凝土在高应变率下的冲击性能研究较多,对钢渣细骨料混凝土(steel slag fine aggregate concrete, SSC)在高应变率的冲击性能研究尚不够充分和全面,高应变率下 SSC 的本构关系还鲜有报道。

本研究采用 SHPB 试验装置对 SSC 进行冲击压缩试验,研究钢渣体积分数及应变率对 SSC 动态力学特性的影响,并使用考虑损伤演化的 Z-W-T 方程与试验结果进行拟合,得到适用于动态荷载作用下的 SSC 模型参数,为 SSC 在高应变率条件下的应用提供试验和理论依据。

1 试验

1.1 试验材料及配合比

本研究选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。细骨料选用普通河砂,最大粒径为 4.75 mm,堆积密度为 $1\ 510\text{ kg/m}^3$,细度模数为 2.7,吸水率为 0.9%;取代细骨料的粒化钢渣由包钢集团产生的钢渣加工筛分制成,体积安定性满足 GB/T 24175—2009^[17] 要求,堆积密度为 $1\ 805\text{ kg/m}^3$,细度模数为 2.95,吸水率为 4.6%,化学成分见表 1。粗骨料使用天然碎石,连续级配为 5~20 mm,堆积密度为 $1\ 550\text{ kg/m}^3$ 。采用的聚羧酸高效减水剂减水率为 25%,粉煤灰掺合料密度为 40 kg/m^3 。细骨料和粗骨料的级配符合 GB14685—2022^[18] 和 GB 14684—2022^[19] 的规定。混凝土强度设计等级为 C40,水灰比为 0.45,砂率为 0.43。

表 1 钢渣化学成分表

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	其他
质量分数/%	42.3	15.2	5.3	22.9	7.1	7.2

粒化钢渣等体积取代天然砂配制钢渣混凝土,保持水、石子、水泥用量不变,分别配制普通混凝土与体积分数为 10%、20%、30% 的钢渣混凝土,分别编号为 NC、SSC10、SSC20 和 SSC30,混凝土配合比见表 2。

表 2 钢渣混凝土配合比

Table 2 Mixing ratio of SSC

编号	钢渣体积分数/%	每 m ³ 钢渣混凝土中各成分的质量/kg						
		钢渣	水泥	河砂	天然石	水	减水剂	粉煤灰
NC	0	0	323.0	795.0	1 054	171.0	1.0	57.0
SSC10	10	104.42	323.0	715.5	1 054	171.0	1.0	57.0
SSC20	20	208.84	323.0	636.0	1 054	171.0	1.0	57.0
SSC30	30	313.26	323.0	556.5	1 054	171.0	1.0	57.0

1.2 试样制备

冲击试验中,为了减少径向惯性、纵向惯量和端部摩擦引起的系统误差,长度与直径之比应保持在0.4~0.6^[18]。在直径100 mm、高200 mm的试模中浇筑试样,常温下养护24 h后脱模,在温度为20 ℃、相对湿度为95%的养护室内养护28 d。将试样切割成直径100 mm、长50 mm的圆柱体试样,将两端进行打磨保证平行,不平整度≤0.02 mm,用于动态压缩试验。

1.3 动态压缩试验

采用直径为100 mm的SHPB装置进行动态压缩试验,SHPB装置示意图如图1所示。SHPB装置主体部分由4部分组成:入射杆(长4 850 mm,直径100 mm)、透射杆(长3 000 mm,直径100 mm)、子弹(长400 mm,直径100 mm)

和试样。入射杆、透射杆和子弹均由60Si₂Mn制成,弹性模量 E_s 为 2.06×10^5 MPa,密度 ρ 为7 850 kg/m³,屈服强度 f_y 为400 MPa,弹性波传播速度 C_s 为5 100 m/s。

试验开始前,将试样夹在入射杆和透射杆之间,在试样与入射杆/透射杆的接触面均匀涂抹凡士林,以减小端部摩擦效应。将直径为20 mm、厚1 mm的黄铜质整形器置于入射杆中央,可减小波形弥散效应。调节气压,释放子弹,在加压气体作用下,子弹以预设速度 v 撞击入射杆,在入射杆中产生入射脉冲 $\varepsilon_i(t)$ 。杆体和试样的阻抗不同,入射杆中的应力波撞击试样后,一部分应力波以拉伸波的形式从试样中反射出来,产生反射脉冲 $\varepsilon_r(t)$;另一部分应力波以压缩波通过试样传递到透射杆中,产生透射脉冲 $\varepsilon_t(t)$ 。

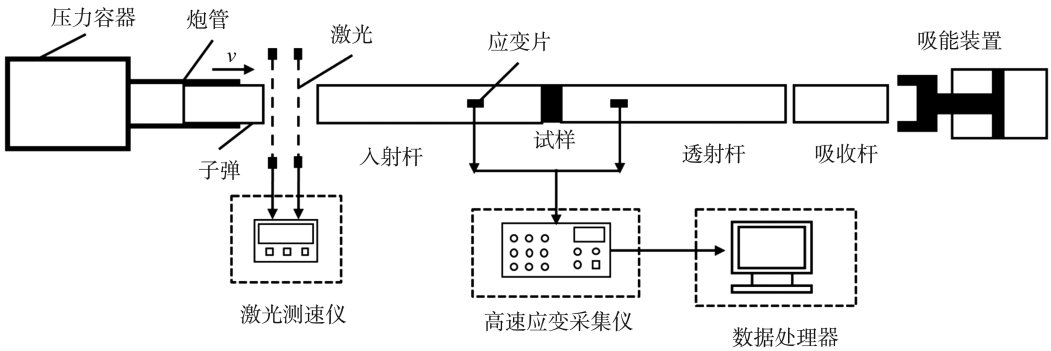


图1 SHPB装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of SHPB device

试验过程中,入射杆、透射杆始终处于弹性状态,将应变片粘贴在杆件上以记录入射波、透射波和反射波的应变-时间曲线,入射杆和透射杆上的应变片距杆端1 500 mm。

根据试验中的入射应变、透射应变和反射应变可确定试样的动态应力 $\sigma(t)$ 、动态应变 $\varepsilon(t)$ 和动态应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$,计算公式为^[20]

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{A_s E_s}{2A_c} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \\ \varepsilon(t) = \frac{C_s}{l_c} \int [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_s}{l_c} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_s 、 E_s 分别为杆件的横截面积和弹性模量, A_c 、 l_c 分别为混凝土试样的横截面积和试样长度, $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为采集到的入射应变、反射应变和透射应变, C_s 为杆件中波的传播速度。

根据一维应力波假定和应力均匀性假定可知^[21],入射波与反射波叠加后与透射波重合时,试

样两端应力相等,内部应力呈均匀状态。加载气压为0.22 MPa时的典型波形如图2所示。由图2可知,入射波和反射波叠加后与透射波基本重合,满足应力均匀假设,SHPB动态压缩试验中入射应变、透射应变和反射应变满足公式

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad (2)$$

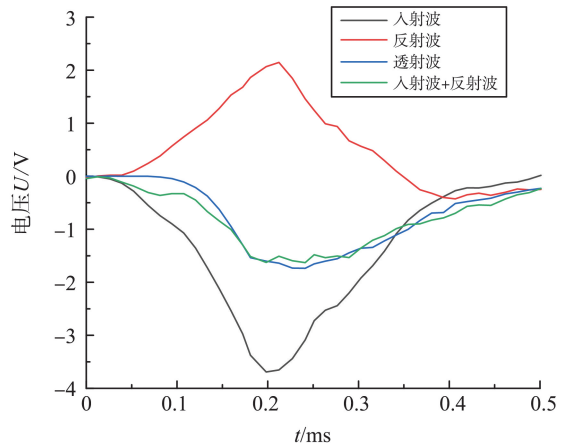


图2 SHPB试样波形
Fig.2 The SHPB test waveform

将式(2)代入式(1)得到的简化公式为

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{A_s E_s}{A_c} \varepsilon_i(t) \\ \varepsilon(t) = \frac{2C_s}{l_c} \int_0^t \varepsilon_i(t) dt \\ \dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_s}{l_c} \dot{\varepsilon}_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 准静态抗压试验结果

对不同钢渣体积分数的混凝土进行准静态压缩试验,取每组3个试样的平均应力作为该组试样的静态抗压强度 f_s ,试验结果如表3所示。由表3可知,随着钢渣体积分数的增加,SSC的抗压强度呈上升趋势,SSC30抗压强度相比于NC提高约15.6%。其原因为,普通混凝土界面过渡区相对薄弱,骨料强度无法充分发挥,而钢渣骨料中含有 C_{2S} 和 C_{3S} ,生成大量水化产物使钢渣-水泥过渡区较致密,可以很好地将骨料强度传递至混凝土^[22]。另外,钢渣骨料的吸水率较高,降低了混凝土试块的水灰比,使其抗压强度得到提高。

表3 SSC静态抗压强度

Table 3 Static compressive strength of SSC

编号	NC	SSC10	SSC20	SSC30
静态抗压强度 f_s /MPa	41.7	44.3	47.5	48.2

2.2 动态压缩试验结果

2.2.1 动态抗压强度

不同钢渣体积分数的SSC试样动态抗压强度随应变率的变化规律如图3所示。由图3可知,在相似应变率下,SSC动态抗压强度随钢渣体积分数的变化规律与准静态抗压强度类似,随钢渣体积分数提高呈上升趋势,但提高幅度相对较小。随着应变率增大,SSC动态抗压强度随之提高,表现出明显的应变率效应。冲击速度从5.5 m/s提高至8.5 m/s时,钢渣体积分数为0%、10%、20%和30%的混凝土试样动态抗压强度分别提高36.9%、34.9%、39.3%和40.4%。原因在于,在准静态荷载作用下,SSC中的裂缝沿薄弱面发展经历一定时程;在冲击荷载作用下,裂缝发展时间短,无法通过薄弱面扩展耗散能量,由此产生了更多的裂缝^[23]。根据断裂力学理论,裂缝产生所消耗的能量远大于裂缝扩展所需的能量,混凝土动态抗压强度因此得到提高。

为描述SSC的应变率效应,将动态抗压强度与准静态抗压强度的比值定义为动态增强因子 F_{di} ,其

表达式为

$$F_{di} = \frac{f_d}{f_s} \quad (4)$$

式中: f_d 为动态抗压强度; f_s 为静态抗压强度,采用2.1节中准静态抗压测试结果。

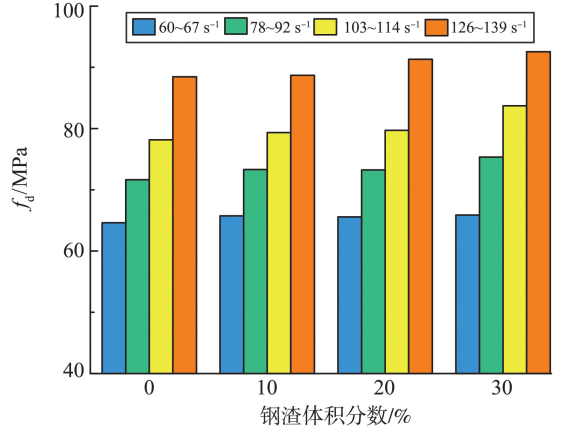


图3 不同应变率下SSC动态抗压强度
Fig.3 Dynamic compressive strength of SSC under different strain rates

F_{di} 随应变率的变化关系如图4所示。由图4可知,钢渣体积分数相同时,SSC的 F_{di} 随应变率增大而增大。应变率相同时,掺入钢渣后 F_{di} 明显降低,表明SSC具有较低的应变率敏感性。从微观上看,压缩过程中混凝土的主要破坏形式是孔隙/孔洞坍塌^[24-25]。准静态荷载作用下,SSC中产生大量的水化产物增强了界面过渡区,填补混凝土内部干缩裂缝,其抗压强度得到有效提高。在冲击荷载作用下,损伤来不及在整个材料中的薄弱面扩展,弱面效应愈加不明显,钢渣对混凝土强度的增强效果减弱,削弱了应变率对SSC的增强效果,降低了SSC的 F_{di} 。

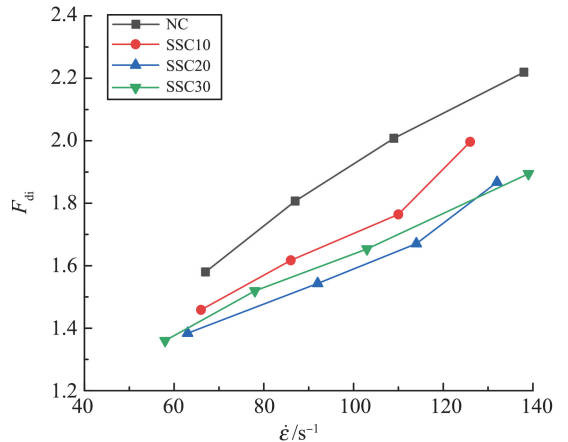


图4 不同应变率下SSC的 F_{di}
Fig.4 F_{di} of SSC under different strain rates

2.2.2 破坏形态

NC和SSC试样在不同冲击速度下的破坏形态如图5所示。由图5可知,在不同的钢渣体积分数

下,试样在冲击荷载下的破坏形态整体类似。随着冲击速度的增加,破坏程度逐渐加剧。冲击速度为 5.5 m/s 时,应变率较低,试样整体保持完好,出现少量裂缝或部分骨料脱落;冲击速度为 6.5 m/s 时,出现一条或几条贯穿试样的主裂缝,试样破碎为若干大块,并伴有骨料剥落;冲击速度为 7.5 m/s 时,试

样出现更多更加细密的裂缝,破裂成较小的碎块,伴有大量剥落;冲击速度为 8.5 m/s 时,试样被完全压成细小碎片并向四周飞溅。在高应变率荷载作用下,裂缝没有足够时间通过砂浆中的薄弱面扩展,而是产生大量裂缝耗散冲击能量,造成试样破坏程度加剧。

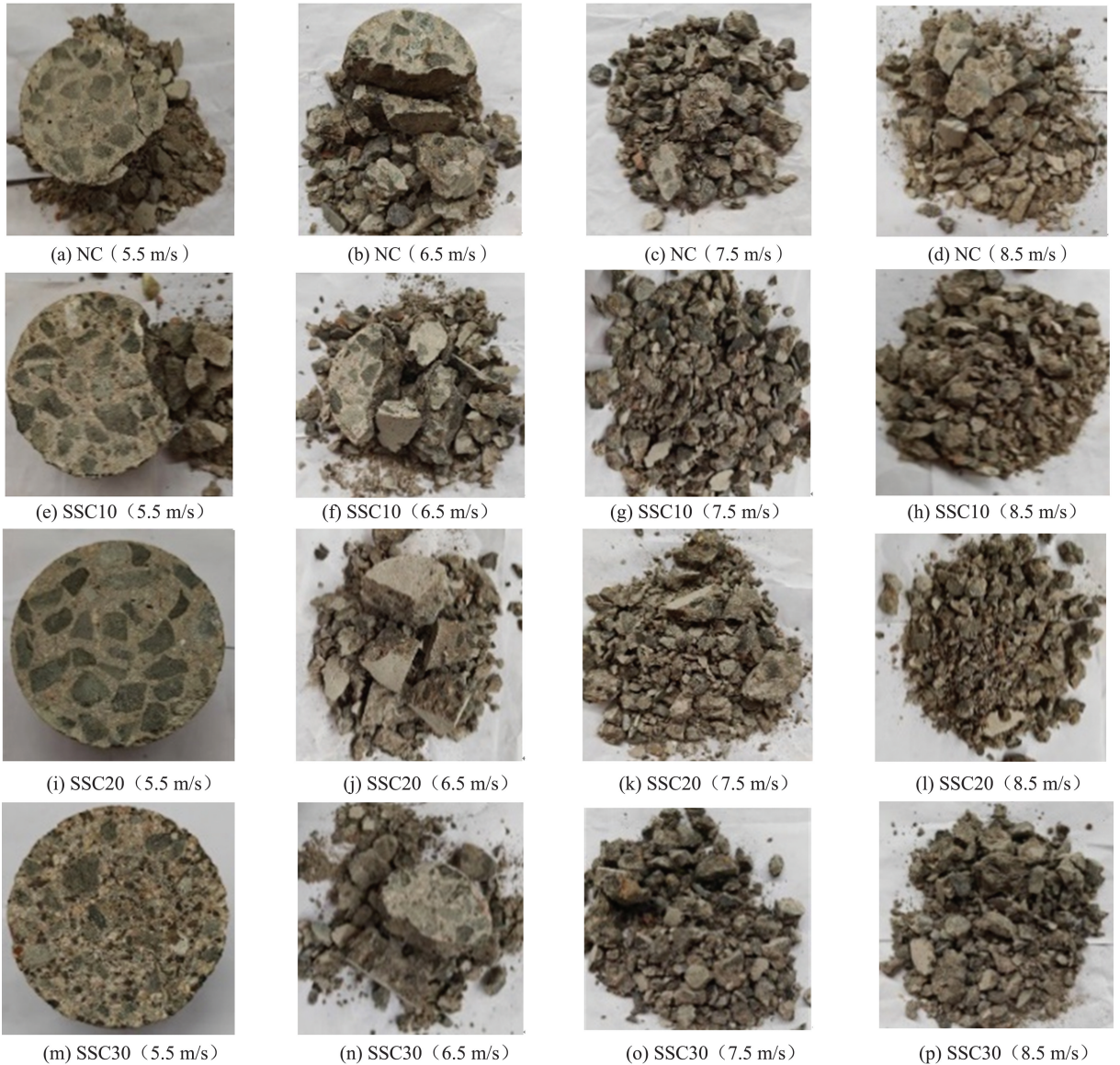


图5 不同冲击速度下 SSC 破坏形态

Fig.5 The failure modes of SSC under different impact velocities

2.2.3 应力-应变曲线

不同钢渣体积分数的混凝土试样在不同应变率下的应力-应变曲线测试结果如图6所示,图6中 σ 为动态应力, ε 为动态应变。由图6可知,加载过程中不同钢渣体积分数的混凝土试样应力-应变曲线的形状相似,大体可以分为3个阶段:加载初期为弹性阶段,在此阶段加载应力较小,变形主要来源于砂浆和骨料的弹性变形,应力随应变近似呈线性增长,混凝土内部损伤较小;继续加载,试样进入屈

服阶段,此阶段应力-应变曲线斜率减小,试件中微裂缝不断扩展,损伤区域增大,混凝土产生塑性变形;到达峰值应力后,裂缝加速扩展,损伤区域逐渐贯通,曲线进入下降段。钢渣体积分数相同时,随着应变率增加,峰值应力与动弹性模量增大,曲线形状更加陡峭,试样表现出明显的应变率效应,而峰值应变无明显变化。应变率相似时,曲线形状整体类似,峰值应力随钢渣体积分数提高呈上升趋势,但提高幅度相对较小。

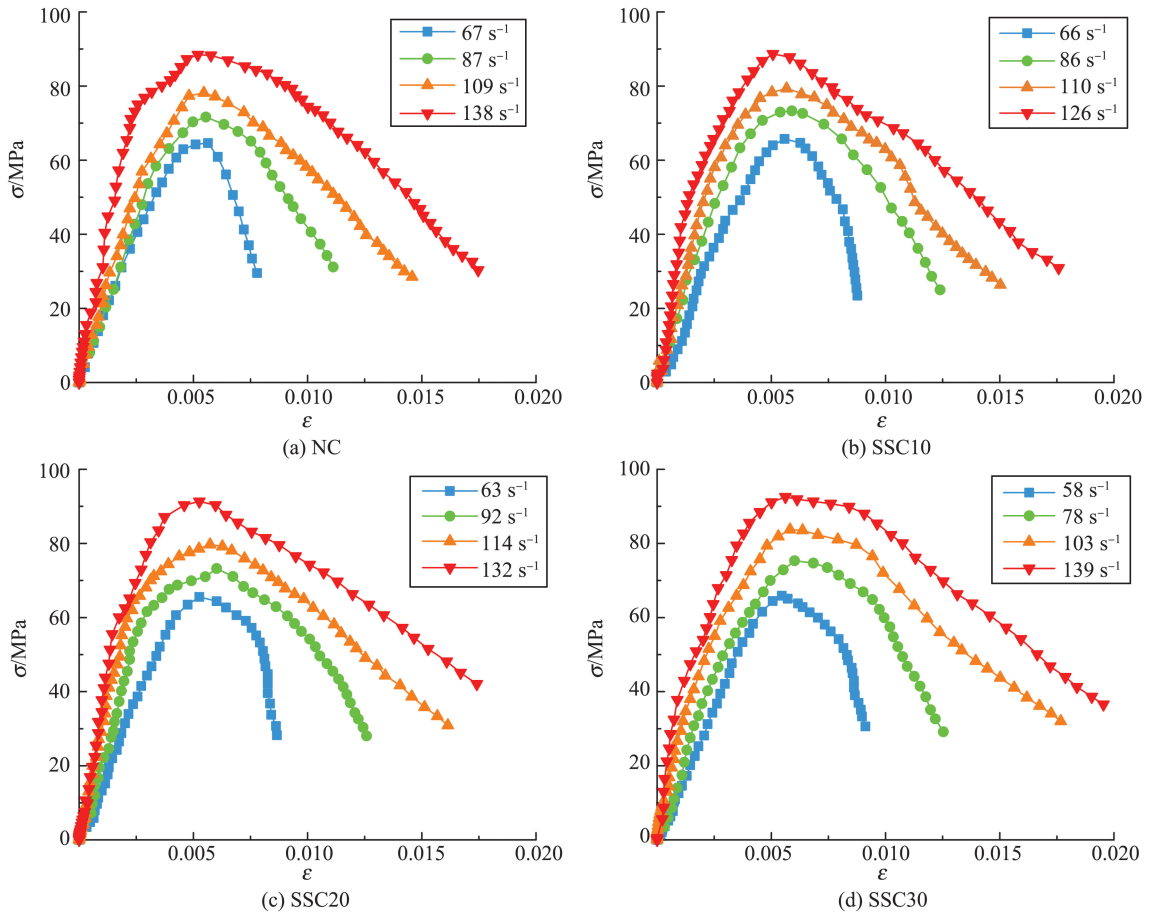


图 6 4 种 SSC 试样不同应变率下的应力-应变曲线
 Fig.6 Stress-strain curves at different strain rates for four SSC specimens

2.2.4 冲击韧性

利用冲击荷载作用时混凝土试样吸收的能量 W 评价其冲击韧性。 W 为达到峰值应力前,应力-应变曲线所包围的区域,如图 7 所示。图 7 中, σ_c 为峰值应力。 W 的计算公式为^[26]

$$W = \int_0^{\epsilon_c} \sigma d\sigma, \quad (5)$$

式中 ϵ_c 为峰值应变。

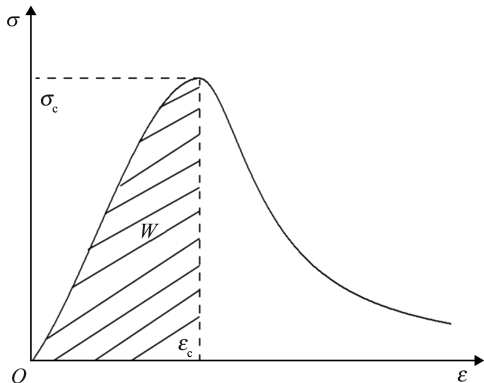


图 7 冲击韧性计算图示
 Fig.7 Graphical representation of impact toughness calculation

示。由图 8 可知,随着应变率的增加,冲击韧性随之增加,冲击速度从 5.5 m/s 提高至 8.5 m/s 时,钢渣体积分数为 0、10%、20% 和 30% 的混凝土试样动态抗压强度分别提高 47.4%、56.2%、63.3% 和 68.1%。原因在于,随着应变率的增加,混凝土中自由水引起的内聚力也随之增加,延缓了裂缝发展。应变率相似时,SSC 的冲击韧性随着钢渣体积分数的提高总体上呈增加趋势,提高幅度不明显。

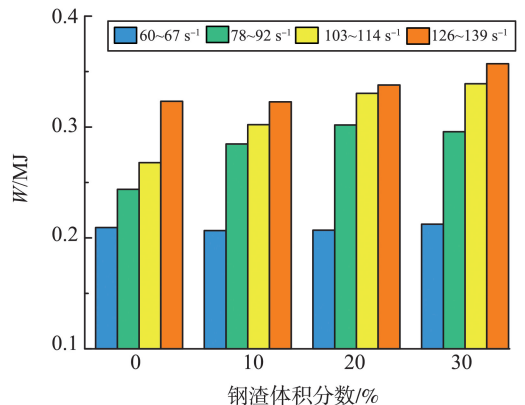


图 8 不同应变率下 SSC 的冲击韧性
 Fig.8 Impact toughness of SSC under different strain rates

不同应变率下 SSC 冲击韧性的变化如图 8 所

3 动态本构模型

3.1 动态本构模型基本原理

文献[27]将 Z-W-T 方程推广应用于混凝土材料,提出的本构方程可较好地拟合试验结果,Z-W-T 本构模型方程为

$$\sigma = E_0 \varepsilon + a \varepsilon^2 + b \varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \\ \theta_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中, E_0 、 a 和 b 为描述非线性瞬时响应的弹性常数, θ_1 、 η_1 和 E_1 为低应变率条件下的黏弹性响应的松弛时间、黏性常数和弹性常数, θ_2 、 η_2 和 E_2 为高应变率条件下的黏弹性响应的松弛时间、黏性常数和弹性常数, t 为总冲击时间, τ 表示从冲击开始到某状态经过的时间。

Z-W-T 方程描述的力学模型由非线性弹性体、高频 Maxwell 体和低频 Maxwell 体 3 部分并联组成^[28],如图 9 所示。

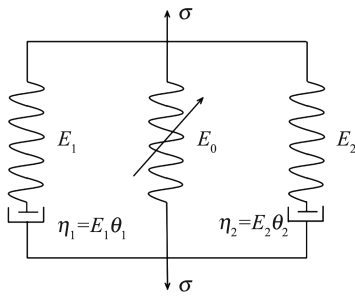


图9 Z-W-T 方程力学模型

Fig.9 Mechanical model of Z-W-T equation

SSC 试样在动态荷载作用下的变形相比于准静态荷载作用下的变形增加较少,且在准静态加载时弹性阶段应力随应变线性增长,将与时间无关的非线性瞬态响应部分视为线性,为简化计算,非线性瞬态响应部分只考虑第一项,将式(6)简化为

$$\sigma = E_0 \varepsilon + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau. \quad (8)$$

本试验近似为恒应变率加载,因此有 $t = \varepsilon / \dot{\varepsilon}$,代入式(8)积分可得

$$\sigma = E_0 \varepsilon + E_1 \theta_1 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon} \theta_1}\right) \right] + E_2 \theta_2 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon} \theta_2}\right) \right]. \quad (9)$$

SSC 在冲击荷载作用下,破坏过程伴随着试样内部损伤的演化,水泥复合材料内部损伤引起的弱化效应对力学行为影响较大,在考虑其本构行为时,引入随应变演化的损伤因子 D 进行修正,计算公式为

$$D = 1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_r}, \quad (10)$$

式中, σ_a 为含损伤材料的应力, σ_r 为无损伤材料的应力。

考虑材料损伤演化的本构关系为

$$\sigma_a = (1 - D) \sigma_r. \quad (11)$$

胶凝材料的损伤因子 D 可定义为^[28]

$$D = K_d \dot{\varepsilon}^{\delta-1} (\varepsilon - \varepsilon_{th}), \quad (12)$$

式中: ε_{th} 为应变阈值,取 0.7 倍峰值应变; δ 为材料参数; K_d 为损伤演化因子。

将式(9)和式(12)代入式(11),即可得到考虑材料损伤演化的 Z-W-T 本构模型表达式,即

$$\sigma = \left[1 - K_d \dot{\varepsilon}^{\delta-1} (\varepsilon - \varepsilon_{th}) \right] \cdot \left[E_0 \varepsilon + E_1 \theta_1 \dot{\varepsilon} \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon} \theta_1}\right) \right) + E_2 \theta_2 \dot{\varepsilon} \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon} \theta_2}\right) \right) \right]. \quad (13)$$

3.2 本构模型参数拟合

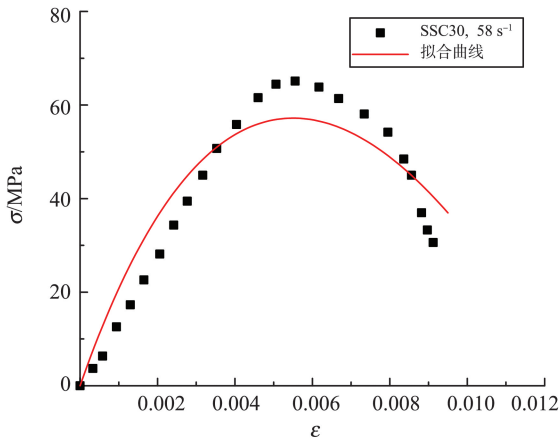
由式(13)可知,考虑损伤演化的 Z-W-T 方程中包含多个未知参数,且参数之间互相影响。在进行非线性曲线多参数拟合时,先确定合理的参数取值范围,之后使用 MATLAB R2023a 中的 GA 遗传算法工具箱对试验曲线进行拟合,得到方程中的本构模型参数。

篇幅所限,本研究仅展示典型试样拟合结果,钢渣体积分数为 30% 的试样在不同应变率下的实测应力-应变曲线与拟合曲线对比见图 10,拟合参数见表 4。由表 4 可知, R^2 均在 0.90 以上,说明考虑损伤演化的 Z-W-T 方程可以较好地描述不同应变率下 SSC 的应力-应变行为。

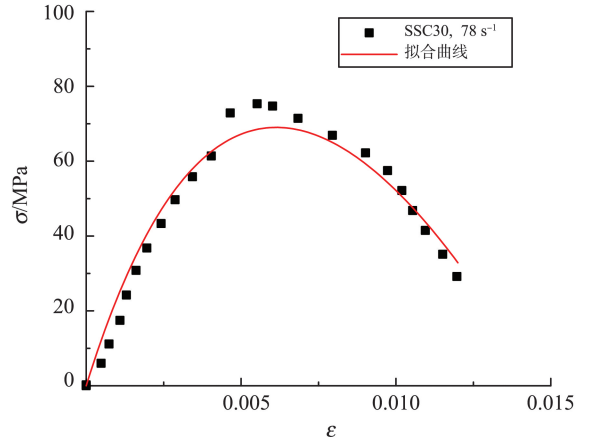
钢渣体积分数相同时,随着应变率的增大,高应变率弹性模量 E_2 呈明显增长趋势,材料参数 δ 、高应变率松弛时间 θ_2 呈减小趋势,高应变率下 SSC 的动态弹性模量与应变率呈正相关,而静态弹性模量 E_0 、低应变率弹性模量 E_1 、低应变率松弛时间 θ_1 和损伤演化因子 K_d 均未表现出明显变化趋势。

表4 不同应变率下 SSC 的本构模型参数
Table 4 The constitutive model parameters of SSC under different strain rates

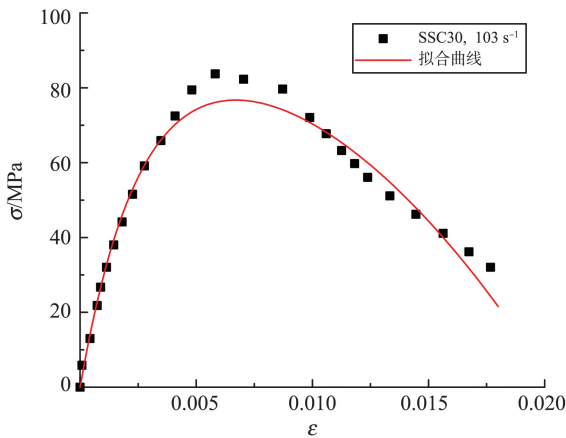
应变率/s ⁻¹	K_d	δ	E_0 /MPa	E_1 /MPa	E_2 /MPa	θ_1 /s	θ_2 /ms	ε_{th}	R^2
58	1.781	2.025	2 171	2 291	12 086	4.236	124	0.003 8	0.91
78	2.049	1.884	2 156	2 266	14 562	4.923	83	0.004 0	0.97
103	1.931	1.744	2 273	2 286	24 455	4.197	27	0.003 9	0.98
139	1.725	1.698	2 330	2 253	27 465	4.608	22	0.003 9	0.98



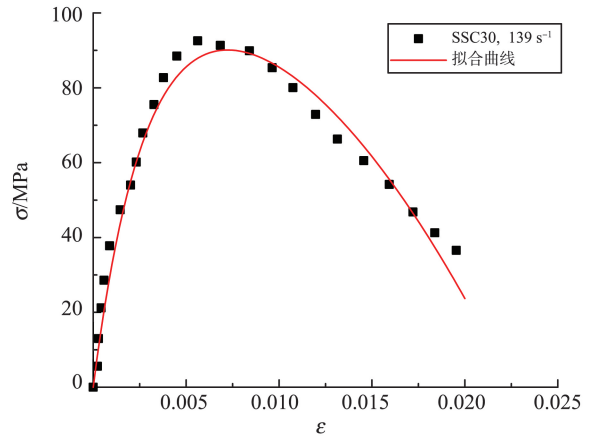
(a) 应变率为58 s⁻¹



(b) 应变率为78 s⁻¹



(c) 应变率为103 s⁻¹



(d) 应变率为139 s⁻¹

图10 不同应变率下 SSC 本构模型拟合结果

Fig.10 Fitting results of SSC constitutive models under different strain rates

以冲击速度为 8.5 m/s 的试样为例,拟合不同钢渣体积分数的 SSC 应力-应变关系,拟合参数见表 5。试验结果与拟合曲线对比见图 11。由表 5 可知, R^2 均在 0.95 以上,吻合程度较高,说明考虑损伤演化的 Z-W-T 方程可描述不同钢渣体积分数 SSC 在冲击荷载下的应力应变行为。随着钢渣体

积分数的增加,材料参数 δ 逐渐减小,而其他参数并未发现显著变化规律。在应变率相似的情况下,材料参数 δ 对损伤因子 D 具有显著影响, D 随 δ 减小而减小。这说明掺入钢渣后 SSC 内部的损伤演化速度减慢,钢渣的水化作用可起到填补裂缝及抑制裂缝开展的作用。

表5 不同钢渣体积分数下 SSC 的本构模型参数

Table 5 The constitutive model parameters of SSC under different steel slag content

钢渣体积分数/%	应变率/s ⁻¹	K_d	δ	E_0 /MPa	E_1 /MPa	E_2 /MPa	θ_1 /s	θ_2 /ms	ε_{th}	R^2
0	138	1.701	1.755	2 216	2 336	28 490	4.010	24	0.003 6	0.98
10	126	1.754	1.737	2 268	2 355	29 601	4.893	21	0.003 6	0.97
20	132	1.718	1.721	2 276	2 471	28 964	4.265	22	0.003 7	0.96
30	139	1.725	1.698	2 330	2 253	27 465	4.608	22	0.003 9	0.98

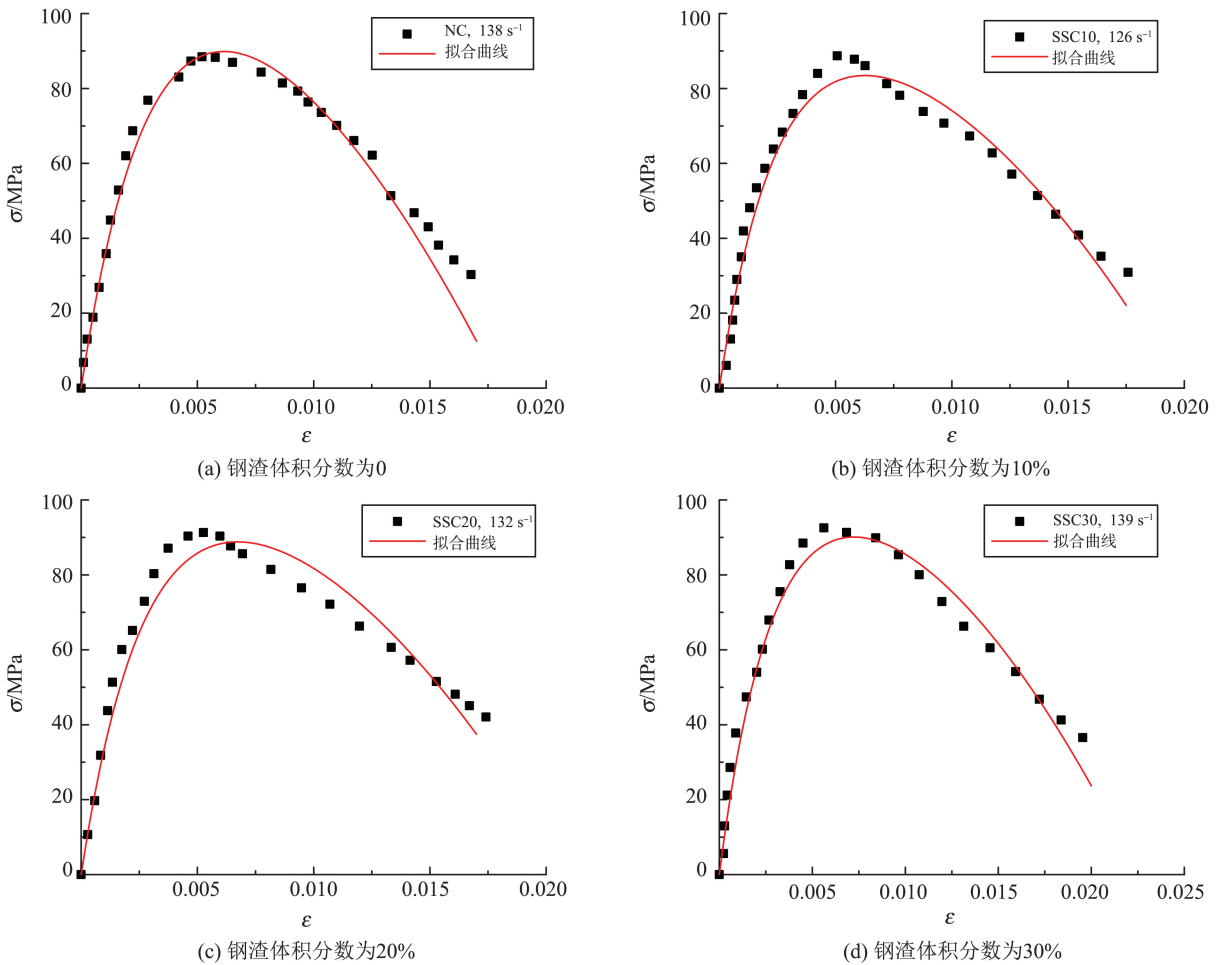


图 11 不同钢渣体积分数下 SSC 本构模型拟合结果

Fig.11 Fitting results of SSC constitutive model under different steel slag content

4 结论

(1) 钢渣细骨料混凝土试样在冲击荷载作用下表现出明显的应变率效应,即钢渣体积分数相同时,动态抗压强度、冲击韧性和 F_{di} 随应变率增大而增大。

(2) 相似应变率下,动态抗压强度和冲击韧性随钢渣体积分数增大呈上升趋势,但提高幅度较小。相比于普通混凝土,钢渣细骨料混凝土 F_{di} 明显降低,表明其具有更低的应变率敏感性。峰值应变与钢渣细骨料体积分数没有表现出明显的相关性。

(3) 考虑损伤演化的 Z-W-T 方程曲线与实测曲线吻合良好,可以较好地描述钢渣细骨料混凝土在高应变率下的应力应变行为。

参考文献:

[1] 何亮, 詹程阳, 吕松涛, 等. 钢渣沥青混合料应用现状 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 15-33.
HE Liang, ZHAN Chengyang, LÜ Songtao, et al. The

current application status of steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20(2): 15-33.

- [2] LIU G, TANG Y J, WANG J Y. Effects of carbonation degree of semi-dry carbonated converter steel slag on the performance of blended cement mortar: reactivity, hydration, and strength [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63: 105529.
- [3] REHMAN S, IQBAL S, ALI A. Combined influence of glass powder and granular steel slag on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 153-160.
- [4] DONG Q, WANG G T, CHEN X Q, et al. Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: an overview [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 124447.
- [5] RASHAD ALAA M. Behavior of steel slag aggregate in mortar and concrete: a comprehensive overview [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 53: 104536.
- [6] ANASTASIOUS E, FIKIKAS K G, STEFANIDOU M. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly

- ash and steel slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 154-161.
- [7] LAI M H, ZOU J J, YAO B Y, et al. Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 277: 22269.
- [8] GOU Y C, XIE J H, ZHAO J B, et al. Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal and high-strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 41-49.
- [9] QASRAWI H, SHALABI F, ASI I, Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (2): 1118-1125.
- [10] RAHMAWATI A, SAPUTRO I. The effects of substitution of the natural sand by steel slag in the properties of eco-friendly concrete with the 1:2:3 ratio mixing method [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Surakarta, Indonesia: IOP Publishing, 2018: 012097.
- [11] YU X, TAO Z, SONG T Y, et al. Performance of concrete made with steel slag and waste glass [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 737-746.
- [12] WANG Z H, BAI E, LUO X, et al. Comparative study on toughness evaluation indicators of nano-concrete under impact load [J]. *Structures*, 2023, 54: 1803-1814.
- [13] XIE H Z, YANG L Y, ZHU H N, et al. Energy dissipation and fractal characteristics of basalt fiber reinforced concrete under impact loading [J]. *Structures*, 2022, 46: 654-663.
- [14] WANG Z L, LIU Y S, SHEN R F. Stress-strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 811-819.
- [15] ZHANG H, WANG B, XIE A, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 154-167.
- [16] GUO Y C, XIE J H, ZHENG W Y, et al. Effects of steel slag as fine aggregate on static and impact behaviours of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 194-201.
- [17] 全国钢标准化技术委员会. 钢渣稳定性试验方法; GB/T 24175—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [18] 中国建筑材料联合会. 建设用卵石、碎石; GB/T 14685—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [19] 中国建筑材料联合会. 建设用砂; GB/T 14684—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [20] 卢芳云, 陈荣. 霍普金森杆实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [21] WELLS A. Impact strength of materials [J]. *International Metallurgical Reviews*, 1972, 17(1): 264-265.
- [22] XUE G, FU Q, XUE S, et al. Macroscopic mechanical properties and microstructure characteristics of steel slag fine aggregate concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 56: 104742.
- [23] BAI Y L, YAN Z W, JIA J F, et al. Dynamic compressive behavior of concrete confined with unidirectional natural flax FRP based on SHPB tests [J]. *Composite Structures*, 2021, 259: 113233.
- [24] 高光发. 混凝土材料动态压缩强度的应变率强化规律 [J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 261-270.
- GAO Guangfa. Strain rate strengthening law of dynamic compressive strength of concrete materials [J]. *Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 261-270.
- [25] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(6): 461-468.
- [26] XIAO S H. Dynamic properties of PVA short fiber reinforced low-calcium fly ash-slag geopolymer under an SHPB impact load [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 103220.
- [27] 陈江瑛, 王礼立. 水泥砂浆的率型本构方程 [J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2000(2): 1-5.
- CHEN Jiangying, WANG Lili. The rate type constitutive equation of cement mortar [J]. *Journal of Ningbo University (Science and Engineering Edition)*, 2000(2): 1-5.
- [28] 王礼立, 董新龙, 孙紫建. 高应变率下计及损伤演化的材料动态本构行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2006(3): 193-198.
- WANG Lili, DONG Xinlong, SUN Zijian. Dynamic constitutive behavior of materials considering damage evolution under high strain rates [J]. *Explosion and Impact*, 2006(3): 193-198.

(编辑:郭少华)