

文章编号:1007-9629(2021)03-0562-09

碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩性能

刘 婷¹, 麻海燕¹, 吴彰钰¹, 余红发¹, 张锦华²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:采用 $\phi 75$ mm 分离式霍普金森压杆测试了碱式硫酸镁水泥混凝土(BMSCC)的力学性能,并借助 Ls-Dyna 软件和 Holmquist-Johnson-Cook(HJC)模型,模拟了 BMSCC 的动态冲击力学响应。结果表明:BMSCC 是典型的率相关性材料,具有明显的应变率增强效应,其冲击压缩强度随着应变率的提高而增大,动态增强因子与应变率的对数呈线性关系。通过数值模拟确定了 HJC 模型的 21 个参数,其中冲击压缩强度和峰值应变的模拟相对误差分别为 $-3.9\% \sim 0.9\%$ 和 $-10.0\% \sim 3.2\%$,模拟效果较好。

关键词: 碱式硫酸镁水泥混凝土; 分离式霍普金森压杆; 应变率效应; 动态增强因子; 数值模拟

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.016

Impact Compressive Properties of Basic Magnesium Sulfate Cement Concrete

LIU Ting¹, MA Haiyan¹, WU Zhangyu¹, YU Hongfa¹, ZHANG Jinhua²

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The mechanical properties of basic magnesium sulfate cement concrete (BMSCC) was tested using the 75 mm diameter split Hopkinson pressure bar. The finite element software Ls-Dyna and Holmquist-Johnson-Cook (HJC) model were used to simulate the mechanical response of BMSCC under impact loading. The results show that BMSCC is a typical rate-dependent material with the pronounced strain rate hardening effect and its impact compressive strength increases with increasing strain rate. As a parameter characterizing the dynamic characteristics of brittle materials, dynamic increase factor is linearly related to the logarithm of strain rate. By using Ls-Dyna software to simulate the impact compression process, 21 parameters of the HJC model are determined. The relative errors of impact compressive strength and peak strain are $-3.9\% \sim 0.9\%$ and $-10.0\% \sim 3.2\%$, respectively. The simulation effect is quite satisfactory.

Key words: basic magnesium sulfate cement concrete (BMSCC); split Hopkinson pressure bar; strain rate effect; dynamic increase factor; simulation

混凝土是现代土木工程中广泛使用的结构材料,具有抗压强度高、耐久性好、护筋能力强等特点,但是其抗拉强度较低、抗裂性差。余红发等^[1]利用外加剂技术,研制出了一种具有较高抗拉强度的新型镁质胶凝材料——碱式硫酸镁水泥(BMSC),其主要水化产物为一种新发现的碱式硫酸镁晶须物相,

化学式为 $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。吴成友等^[2-3]研究发现碱式硫酸镁水泥具有快凝、早强、高强、抗水、抗腐蚀、高抗拉强度、高抗折强度和护筋能力强等优异性能。杨三强等^[4]发现在强度等级相同的条件下,C30、C40、C50 和 C60 碱式硫酸镁水泥混凝土(BMSCC)的劈裂抗拉强度分别比普通混凝土

收稿日期:2020-01-09; 修订日期:2020-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11832013,51878350,51678304,51508272)

第一作者:刘 婷(1994—),女,山西朔州人,南京航空航天大学硕士生。E-mail:ltting0814@163.com

通讯作者:麻海燕(1976—),女,湖南花垣人,南京航空航天大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail:mahaiyan@nuaa.edu.cn

提高了 32%、40%、53% 和 66%。

近年来,各类突发事件导致的爆炸和撞击等冲击荷载对工程结构的安全构成了巨大威胁,国内外学者开始关注混凝土材料的动态力学行为。Malvern 等^[5]、Ross 等^[6]和 Tang 等^[7]分别采用不同直径的分离式霍普金森压杆(SHPB)探索了混凝土在高应变率下的动态力学性能。岳承军^[8]研究了普通硅酸盐水泥制备的全珊瑚海水混凝土的 SHPB 冲击压缩性能,并建立了相应的动态本构关系,结果表明普通硅酸盐水泥混凝土材料是一种典型的应变率相关材料。章艳^[9]进行了碱式硫酸镁水泥全珊瑚海水混凝土的 SHPB 冲击压缩试验,研究了碱式硫酸镁水泥混凝土的动态力学行为,但是其立方体抗压强度等级仅为 C20~C45。

本文利用 $\phi 75$ mm 的 SHPB,对抗压强度等级为 C35~C55 的 3 种碱式硫酸镁水泥混凝土进行高速冲击压缩力学性能试验,并辅以 Ls-Dyna 有限元数值仿真分析,系统地研究碱式硫酸镁水泥混凝土

在高速冲击压缩荷载作用下的力学特征及其变化规律,以探讨其在防护工程应用中的动态力学响应。

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为沈阳金辉篮鼎建材科技有限公司生产的 52.5 型碱式硫酸镁水泥,主要原料是轻烧氧化镁(活性 MgO 含量(质量分数,文中涉及的含量、含泥量等除特别说明外均为质量分数或质量比)为 65%)、工业级七水硫酸镁、I 级粉煤灰和核心外加剂,其基本性能见表 1。细集料(FA)为江苏溧阳瀚江混凝土有限公司提供的赣江产河砂,表观密度为 $2\,650\text{ kg/m}^3$,含泥量为 1.4%,细度模数为 2.6,属于 II 区级配,中砂。粗集料(CA)为安徽兴源矿产有限公司提供的碎石,最大粒径为 16 mm,针片状颗粒含量为 4.8%,压碎性指标为 10.4%,表观密度为 $2\,610\text{ kg/m}^3$,堆积密度为 $1\,440\text{ kg/m}^3$,属于 5~16 mm 连续级配。水(W)为自来水,符合国家标准。

表 1 碱式硫酸镁水泥的基本性能
Table 1 Basic properties of BMSC

Standard consistency/%	Setting time/min		Stability	Compressive strength/MPa			Flexural strength/MPa		
	Initial	Final		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
19.2	117	278	Qualified	44.2	52.0	56.5	7.5	11.9	13.7

1.2 混凝土配合比

参照碱式硫酸镁水泥混凝土配合比设计方法^[10],通过调整水灰比(m_w/m_c),设计了 3 种抗压强度等级的碱式硫酸镁水泥混凝土,其配合比和 28 d 立方体抗压强度(f_{cu})见表 2。

表 2 碱式硫酸镁水泥混凝土配合比和 28 d 立方体抗压强度
Table 2 Mix proportions and f_{cu} at 28 d of BMSCC

Strength grade	Mix proportion/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				Sand ratio(by mass)/%	m_w/m_c	f_{cu}/MPa
	C	CA	FA	W			
C35	530.0	1 078.3	718.6	185.5	40	0.35	35.5
C45	530.0	1 078.3	718.6	143.1	40	0.27	49.9
C55	530.0	1 078.3	718.6	121.9	40	0.23	59.4

1.3 试件制备

1.3.1 制备过程

将混凝土各原材料准确称量后,先将砂子和碱式硫酸镁水泥投入搅拌机搅拌均匀,然后投入石子进行充分搅拌,最后加水搅拌 5 min,之后即可出料,测定浆体坍落度。试件均采用浇筑振捣法成型,其中圆柱体试件使用圆柱体聚氯乙烯试模。试件成型 24 h 后脱模,置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(60 \pm 5)\%$ 的室内环境中自

然养护,养护时间分别为 28、90 d。其中 28 d 试件用于测定立方体抗压强度,90 d 试件分别用于测定立方体与圆柱体的静态抗压强度和冲击压缩力学性能。

1.3.2 试件尺寸

采用边长 100 mm 的立方体试件和 $\phi 70 \times 70$ mm 的圆柱体试件测定静态抗压强度;采用边长 100 mm 的立方体试件测定 28 d 抗压强度,以确定碱式硫酸镁水泥混凝土的抗压强度等级。采用 $\phi 70 \times 35$ mm 的圆柱体试件进行冲击压缩试验,并计算动态增强因子(DIF)。为了确保冲击压缩试验时试件的表面平整度与垂直度,将试件上下 2 个端面采用磨床打磨平整,控制 2 个端面的不平行度在 0.02 mm 内^[11]。考虑到高速冲击试验的离散性,每组冲击压缩试件至少 10 个。

1.4 力学性能测试方法

1.4.1 静态力学性能测试方法

按照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,采用 2 000 kN 伺服式万能试验机测试碱式硫酸镁水泥混凝土的静态力学性能。边长 100 mm 的非标准立方体试件抗压强度值需乘以 0.95 的尺寸效应系数。

1.4.2 动态力学性能测试方法

动态冲击试验采用合肥姜水动态力学实验技术有限公司生产的 $\phi 75\text{ mm}$ SHPB 装置. 该装置由杆系、测试系统和动力驱动系统组成, 其中杆系包括子

弹、入射杆、透射杆和吸收杆, 测试系统包括粘贴在入射杆和透射杆上的应变片、动态应变仪、示波器和测速仪, 动力驱动系统包括高压氮气瓶和子弹发射装置, 如图 1 所示.

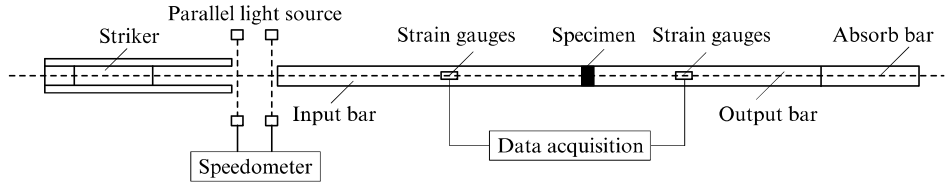


图 1 SHPB 装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of SHPB

为了降低端部摩擦效应, 应在试件及压杆的端面均涂抹润滑剂. 如果润滑不当, 会使试件的应力、应变极不均匀并导致对应变率效应的严重高估, 从而使试验结果产生误差^[11].

SHPB 的基本思路是将波的传播效应和材料的应变率效应解耦, 分离得到材料的应变率效应, 其原理建立在压杆的一维弹性波假定和试件轴向应力均匀性假定基础之上^[12].

采集并储存试验得到的数据, 图 2 为试验所得的入射波(ϵ_i)、反射波(ϵ_r)和透射波(ϵ_t)的三波图, 其中比较波为入射波+反射波. 由图 2 可见, 透射波与比较波吻合度良好, 基本满足 $\epsilon_t(t) = \epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)$, 证明此试验数据有效, 可供分析时使用.

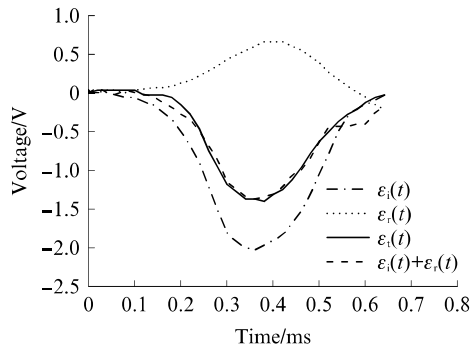


图 2 三波图
Fig. 2 Three waves graph

2 结果及分析

2.1 碱式硫酸镁水泥混凝土的静态力学性能

碱式硫酸镁水泥混凝土的 90 d 立方体抗压强度、劈拉强度($f_{st, cu}$)、棱柱体轴心抗压强度(f_{cp})、圆柱体抗压强度(f_{cy})和圆柱体劈拉强度($f_{st, cy}$)见表 3. 其中, 棱柱体轴心抗压强度用于冲击压缩的 Ls-Dyna 数值模拟时的参数设定, 圆柱体抗压强度用于

计算冲击压缩的动态增强因子.

表 3 碱式硫酸镁水泥混凝土的 90 d 抗压强度与劈裂抗拉强度
Table 3 Compressive strength and split tensile strength of BMSCC at 90 d

Strength grade	m_w/m_c	f_{cu}/MPa	f_{cy}/MPa	f_{cp}/MPa	$f_{st, cu}/\text{MPa}$	$f_{st, cy}/\text{MPa}$
C35	0.35	35.6	53.1	50.1	3.84	6.42
C45	0.27	53.7	62.3	58.7	4.86	8.41
C55	0.23	64.7	68.1	64.2	4.95	9.07

由表 3 可见, 3 组碱式硫酸镁水泥混凝土的 90 d 立方体抗压强度分别为 35.6、53.7、64.7 MPa, 相应的劈裂抗拉强度分别为 3.84、4.86、4.95 MPa, 分别比相同强度等级普通混凝土的计算劈裂抗拉强度^[13-14]提高了 74.5%、93.6% 和 80.7%, 这表明碱式硫酸镁水泥混凝土确实是一种具有较高抗拉强度的新型混凝土材料.

2.2 碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩力学性能

2.2.1 冲击压缩应力-应变(σ - ϵ)曲线

图 3 为不同强度等级碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩应力-应变曲线, 应变率($\dot{\epsilon}$)在 $21 \sim 94\text{ s}^{-1}$ 之间, 曲线和坐标轴所围成的面积表示试件在冲击荷载作用下的韧性指数^[15]. 由图 3 可见, 不同强度等级混凝土的曲线走势基本一致, 初始应力-应变近似呈线性关系, 试件在应力达到峰值后迅速破坏, 曲线出现急速下降段. 因动态试验本身的复杂性以及试验过程中存在的弥散效应、摩擦效应和试件本身存在的离散性等, 试验数据具有一定的波动, 但峰值应力仍随应变率的提高呈上升趋势.

2.2.2 韧性指数

从狭义角度定义, 韧性为材料或结构在荷载作用下到失效为止吸收能量的能力, 其不仅取决于承载能力, 也取决于变形能力^[15]. 确定韧性指标的方法有能量法、强度法和特征点法等, 本文采用能量法, 利用应力-应变曲线下包围的面积表示韧性.

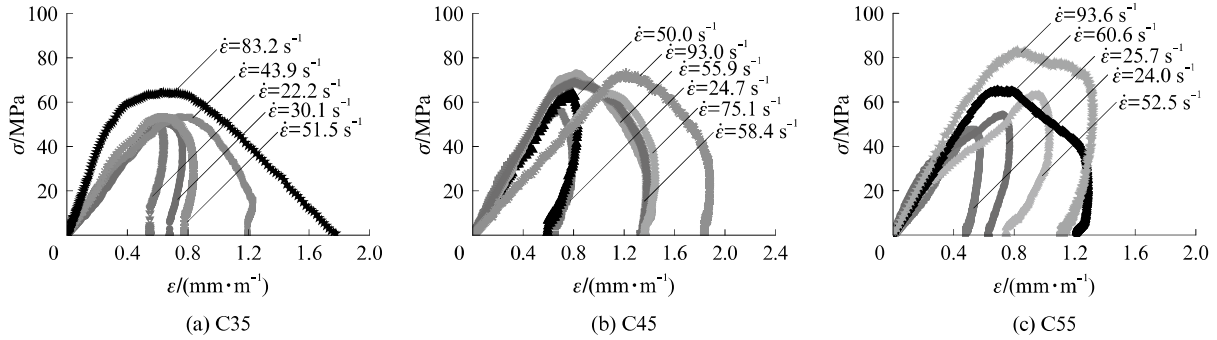


图3 不同强度等级碱式硫酸镁水泥混凝土冲击压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of impact compression of BMSCC with different strength grade

图4为碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩韧性指数(η)与应变率的关系.由图4可见,碱式硫酸镁水泥混凝土的吸能能力随着应变率的增大而增大,其冲击压缩韧性指数随应变率的提高而增大.

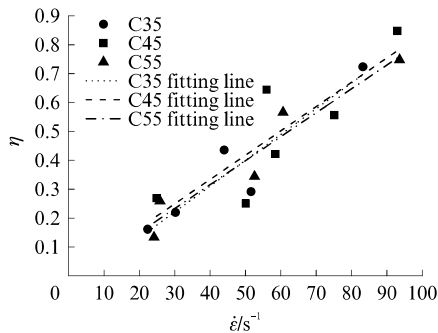


图4 碱式硫酸镁水泥混凝土冲击压缩韧性指数与应变率的关系

Fig. 4 Relationship between impact compression toughness index and strain rate of BMSCC

2.2.3 冲击压缩破坏形态

图5为碱式硫酸镁水泥混凝土在不同应变率下的冲击压缩破坏形态.由图5可见:破坏趋势沿着加载方向发展,且应变率越高,破坏程度越严重;在应变率较低时,试件内部引起微裂纹损伤的拉伸应力小于微裂纹成长的阈值应力,此时试件都能够保持完整的形态,表面未出现明显裂纹;随着应变率的增大,混凝土表面产生明显的裂纹且沿轴向贯穿试件表面,表层与边缘位置均有一定程度的剥落;应变率继续增大,破坏形态向粉碎发展,出现留芯,芯部逐渐减小,直至完全粉碎,且靠近入射杆端的粉碎程度高于透射杆端^[16].在本试验所设应变率范围内,C35、C45强度等级的试件均出现了粉碎性破坏,而C55强度等级的试件充分发挥了较高抗拉强度的优势,即使在93.6 s⁻¹的高应变率下也未发生粉碎性破坏,仅呈现出多碎块破坏形态.

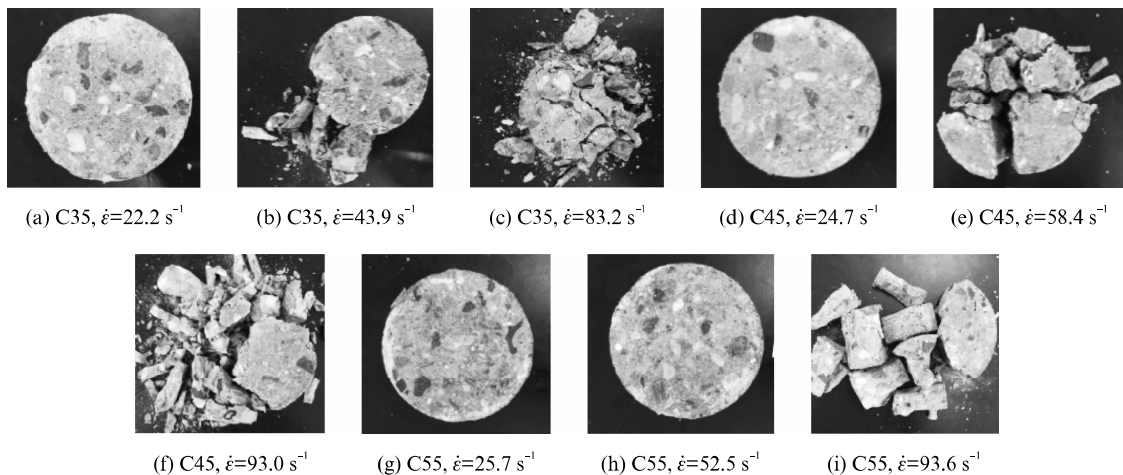


图5 碱式硫酸镁水泥混凝土冲击压缩破坏形态图

Fig. 5 Impact compression damage pattern of BMSCC

2.3 冲击力学性能的 DIF 规律

DIF 是峰值应力与每组试件对应的圆柱体抗压强度的比值,用来表征脆性材料的动态特性,在冲击

作用下会呈现增长的变化趋势,是加载速率(即应变率)的函数^[17].图6汇总了本文与国内外学者采用不同试验方法对混凝土冲击压缩 DIF 的研究数据,

冲击压缩所覆盖的应变率范围为 $10^{-7} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$. 由图 6 可见, 碱式硫酸镁水泥混凝土的抗压强度具有明显的应变率效应, DIF 随着应变率的增大而增大, 且增长趋势可大致分为 2 段: 第 1 阶段的应变率小于临界应变率, DIF 平缓增长; 第 2 阶段的应变率大于临界应变率, DIF 急剧增长.

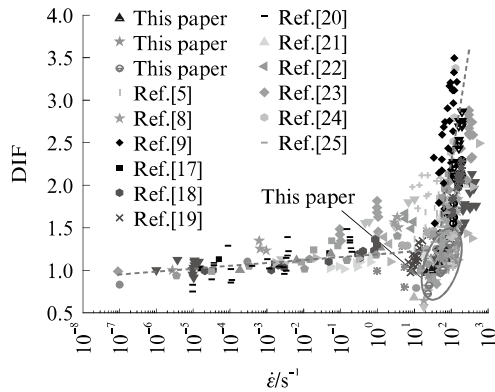


图 6 冲击压缩 DIF 与应变率关系汇总图

Fig. 6 Summary of the relationship between impact compression DIF and strain rate

采用欧洲混凝土委员会(CEB)推荐的一维应力状态下混凝土的 DIF 拟合模型(式(1))对本文试验结果进行拟合.

$$\text{DIF} = \frac{f_c}{f_{c0}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\alpha_c}, & \dot{\epsilon} \leq k \\ \beta_c \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\gamma_c}, & \dot{\epsilon} > k \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_c 为应变率为 $\dot{\epsilon}$ 时的抗压强度, MPa; f_{c0} 为静态抗压强度, MPa; $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变率, 取 $\dot{\epsilon}_s = 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; α_c 、 β_c 、 γ_c 为拟合参数; k 为临界应变率. 碱式硫酸镁水泥混凝土冲击压缩 DIF 计算公式的拟合参数见表 4.

表 4 碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩 DIF 拟合结果
Table 4 Fitting results of impact compression DIF of BMSCC

Strength grade	β_c	γ_c	R^2
C35	0.082 2	0.181 5	0.895
C45	0.095 8	0.169 3	0.600
C55	0.006 1	0.354 3	0.943

由表 4 可见, 当应变率较小时, 冲击压缩 DIF 值存在小于 1 的情况, 即峰值应力小于其对应的静态抗压强度, 主要原因是: 冲击试验与静态力学性能试验的加载方式不同, 静态试验为持续加荷直至试件破坏, 而冲击试验加载时间极短, 当打击气压较小时, 所产生的冲击荷载不足以将试件打坏(见图 5), 此时所测得冲击强度值并非试件在此荷载下的极限

强度值. 因此, DIF 小于 1 的试验数据不作为讨论混凝土冲击压缩强度的依据. 可利用式(1)与表 4 的拟合参数, 将 $\text{DIF}=1$ 时所得的应变率作为临界应变率, 计算可得 3 个强度等级碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩临界应变率 k 分别为 28.6、31.2、52.5 s^{-1} .

图 7 比较了碱式硫酸镁水泥混凝土、普通水泥混凝土(OPCC)和普通水泥钢纤维混凝土(SFOPCC)的冲击压缩临界应变率与立方体抗压强度之间的关系^[17-23]. 其中, 普通水泥混凝土和钢纤维混凝土的立方体抗压强度分别为 26.7~82.5 MPa 和 50.0~222.9 MPa, 立方体劈裂抗拉强度分别为 1.8~3.2 MPa^[13-14] 和 10.0~30.4 MPa^[20]. 由图 7 可见, 在高速冲击压缩荷载作用下, 混凝土的临界应变率随着静态抗压强度的提高而增大, 两者具有较密切的线性相关关系. 此外, 普通水泥混凝土的临界应变率明显低于具有较高劈裂抗拉强度的钢纤维混凝土, 而碱式硫酸镁水泥混凝土的临界应变率明显高于普通水泥混凝土, 且与钢纤维混凝土的临界应变率接近, 这充分说明了碱式硫酸镁水泥混凝土在高速冲击下的力学性能优势.

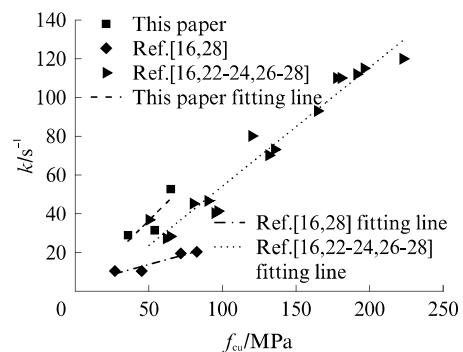


图 7 混凝土冲击压缩的临界应变率与立方体抗压强度之间的关系

Fig. 7 Relationship between impact compression critical strain rate and compressive strength of concrete

3 数值模拟

针对承受大变形、高应变率及高压荷载的混凝土材料, Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 模型是一种综合考虑其应变率效应、损伤演化效应、围压效应和压碎、压实效应影响的本构模型^[16]. 本文采用 Ls-Dyna 软件对 SHPB 冲击试验进行模拟.

3.1 模型建立

采用 Ls-Prepost 前处理软件建立简化模型, 包括试件、入射杆和透射杆 3 个 Part. 其中入射杆和透射杆长度均为 1.5 m, 直径为 70 mm, 试件尺寸为 $\phi 70 \times 35 \text{ mm}$, 采用 Solid 164 三维实体单元. 为

尽可能与试验条件相同,通过将试验采集的入射波数据函数 $\epsilon(t)$ 作为荷载文件导入,从而形成入射杆端部载荷.为了保证模拟结果的精确度,在应力波脉冲持续时间内,其传播的路径上应有足够数量(n)的单元网格^[24].文献^[25]建议使用 $n \geq 10$.本文将入射杆和透射杆在杆长方向均分为100份,沿周长均分为80份.试件在长度方向20等分,周长80等分,模型共639 731个节点,422 400个单元.杆件及子弹为同种类型的钢材,采用理想的弹性材料本构模型 Mat_Elastic ,弹性模量为210 GPa,密度为7 840 kg/m³.杆件与试件的接触类型选择面面接触进行定义,关键字为 $\text{* Contact_Automatic_Surface_To_Surface}$.采用对称罚参数法,罚参数因子取2.0,不计摩擦.

3.2 模型参数及模拟结果

根据张国等^[26]提出的方法,混凝土最关键的属性是静态抗压强度,可以利用有限的试验数据得到复杂模型的计算参数.HJC模型参数主要由材料的基本参数(ρ, f_c, G),强度参数(A, B, C, N, T 和 $S_{\max}$),损伤参数($D_1, D_2, \epsilon_{f, \min}$)和压力参数($K_1, K_2, K_3, P_{\text{crush}}, U_{\text{crush}}, P_{\text{lock}}, U_{\text{lock}}$)以及参考应变率 ϵ_0 和失效类型参数FS组成.其中, ρ, f_c, G, T 均可由较为简单的静态试验获得;损伤参数 $D_1, D_2, \epsilon_{f, \min}$ 由于缺少已有试验数据,且Holmquist等^[16]假定损伤参数与混凝土强度无关,仍取原始文献值 $D_1 = 0.04, D_2 = 1.0, \epsilon_{f, \min} = 0.01$; $P_{\text{crush}} = f'_c/3, U_{\text{crush}} = P_{\text{crush}}/K_{\text{elastic}}, \mu_{\text{lock}} = \rho_{\text{grain}}/\rho_0 - 1, \rho_{\text{grain}}$ 为碱式硫酸镁水泥混凝土压实密度, ρ_0 为表观密度; P_{lock} 可根据插值法确定,已知 $f'_c = 48$ MPa时 $P_{\text{lock}} = 0.8$ GPa, $f'_c = 140$ MPa时 $P_{\text{lock}} = 1$ GPa,则 $P_{\text{lock}} = 0.8 + (1 - 0.8)(f'_c - 48)/(140 - 48)$, GPa; K_1, K_2, K_3 均取原始文献值,分别

为 $K_1 = 85$ GPa, $K_2 = 135$ GPa, $K_3 = 698$ GPa.

本文模拟了强度等级为C35、C45、C55的碱式硫酸镁水泥混凝土分别在应变率为83.2、58.4、93.6 s⁻¹下的冲击压缩过程,根据吴赛等^[27]提出的方法对参数 A, B, C 和 N 进行调试,最终确定碱式硫酸镁水泥混凝土HJC模型的21个参数,详见表5.采用Ls-Dyna软件和HJC模型拟合得到碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩应力-应变曲线,如图8所示.由图8可见,应力-应变曲线的上升段模拟值与试验值吻合较好,下降段有一定的偏差.其主要原因是:初始阶段,试件应力并不平衡,当应力波在试件内部来回反射4次^[28]后可保证应力均衡;在峰值点过后,试件出现不同程度的损伤,应力已不平衡.因此,模拟与试验应力波的下降段吻合效果不一定完美,仅可作为参考.

为了能够模拟试件在冲击过程中的破坏形态,在定义混凝土材料参数时添加关键字 * Mat_Add_Erosion 来计算混凝土的侵蚀失效单元.图9为3种强度等级的碱式硫酸镁水泥混凝土在不同应变率下试件的模拟破坏形态图,与试验破坏形态图(图5(c)、(e)、(i))对比可见,模拟的破坏形态与试验的实际破坏形态较为相似.

3.3 冲击压缩模拟结果与试验结果对比

表6为碱式硫酸镁水泥混凝土冲击压缩力学性能的部分Ls-Dyna软件数值模拟结果与试验结果比较.由表6可见,在不同应变率下,3种强度等级碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击抗压强度模拟值与试验值的相对误差分别为0.9%、3.9%和1.5%,冲击峰值应变模拟值与试验值之间的相对误差分别为3.2%、10.0%和5.7%.由此可见,采用Ls-Dyna软件和HJC模型具有良好的模拟效果.

表5 碱式硫酸镁水泥混凝土冲击压缩数值模拟的HJC模型参数
Table 5 Impact compression numerical simulation HJC model parameters of BMSCC

Strength grade	ρ	G	A	B	C	N	f_c	T
C35	2 300	1.20×10^{10}	0.16	1.85	0.006	0.65	5.01×10^7	3.84×10^6
C45	2 300	1.38×10^{10}	0.16	1.85	0.006	0.65	5.87×10^7	4.86×10^6
C55	2 300	1.42×10^{10}	0.16	1.85	0.006	0.65	6.42×10^7	4.95×10^6
Strength grade	ϵ_0	$\epsilon_{f, \min}$	$S_{\max}$	P_{crush}	U_{clock}	P_{lock}	U_{lock}	
C35	1.0	0.01	7.0	1.67×10^7	0.001 1	8.05×10^8	0.1	
C45	1.0	0.01	7.0	1.96×10^7	0.001 1	8.23×10^8	0.1	
C55	1.0	0.01	7.0	2.14×10^7	0.001 0	8.35×10^8	0.1	
Strength grade	D_1	D_2	K_1	K_2	K_3	FS		
C35	0.04	1.0	1.20×10^{10}	1.35×10^{11}	6.98×10^{11}	0		
C45	0.04	1.0	1.20×10^{10}	1.35×10^{11}	6.98×10^{11}	0		
C55	0.04	1.0	1.20×10^{10}	1.35×10^{11}	6.98×10^{11}	0		

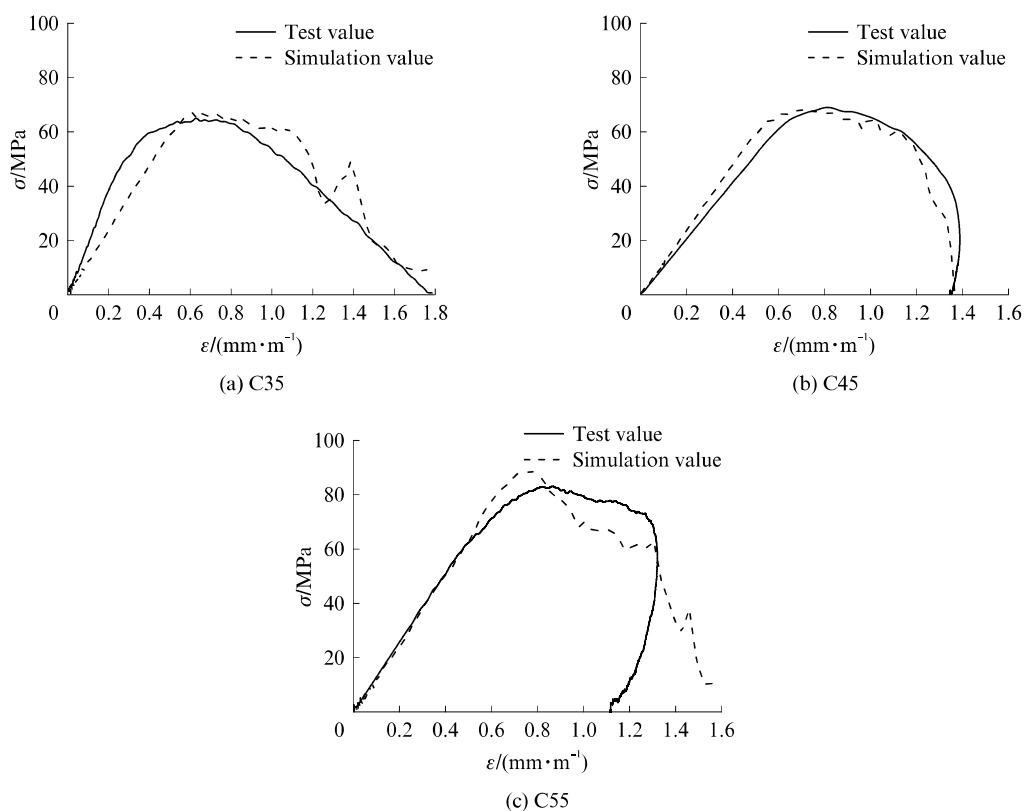


图8 应力-应变曲线对比图
Fig.8 Comparison of σ - ϵ curves

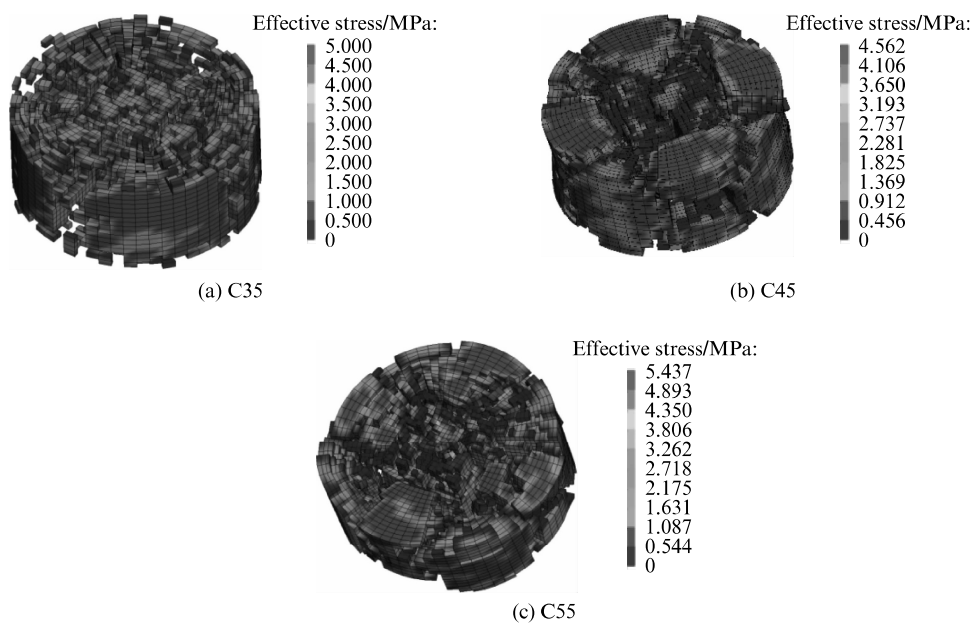


图9 试件模拟破坏形态
Fig.9 Simulation damage pattern

表 6 碱式硫酸镁水泥混凝土冲击压缩力学性能试验结果与模拟结果对比
Table 6 Comparison of test results and simulation results of Impact compressive property of BMSCC

Strength grade	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	f_{cy}/MPa	Impact compressive stress/MPa			Impact peak strain/($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)		
			Test	Simulation	Error/%	Test	Simulation	Error/%
C35	83.2	53.1	66.8	67.4	+0.9	6.22	6.42	+3.2
C45	58.4	62.3	70.9	68.1	-3.9	8.07	7.26	-10.0
C55	93.6	68.1	87.3	88.6	+1.5	8.20	7.73	-5.7

4 结论

(1)碱式硫酸镁水泥混凝土具有明显的应变率效应,其 SHPB 冲击压缩强度随着应变率的提高而增大.在相同应变率的条件下,碱式硫酸镁水泥混凝土的 SHPB 冲击压缩强度随着其静态抗压强度的提高而增大.

(2)碱式硫酸镁水泥混凝土的 SHPB 冲击韧性指数与应变率呈线性增长关系,其吸能能力随着应变率的增大而增大.

(3)碱式硫酸镁水泥混凝土的 DIF 与应变率的对数呈线性关系,应变率越高,DIF 越大.

(4)采用 Ls-Dyna 软件进行数值模拟,确定了 HJC 模型的 21 个参数.碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩强度模拟值的相对误差为-3.9%~0.9%,峰值应变模拟值的相对误差为-10.0%~3.2%.

参考文献:

[1] 余红发,吴成友,王常清.碱式硫酸镁水泥的理论创新及其发泡混凝土的应用前景[C]//2013/2014 中国泡沫混凝土年会暨第四届全国泡沫混凝土技术交流会.太原:[s. n.],2014:80-100.

YU Hongfa, WU Chengyou, WANG Changqing. Theoretical innovation of basic magnesium sulfate cement and application prospect of its foamed concrete[C]//2013/2014 China Foam Concrete Annual Meeting and Fourth National Foam Concrete Technology Fair. Taiyuan:[s. n.],2014:80-100. (in Chinese)

[2] 吴成友.碱式硫酸镁水泥的基本理论及其在土木工程中的应用技术研究[D].西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2014.

WU Chengyou. Fundamental theory and civil engineering application of basic magnesium sulfate cement[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[3] WU C Y, YU H F, DONG J M, et al. Effects of phosphoric acid and phosphates on magnesium oxysulfate cement[J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 907-917.

[4] 杨三强,麻海燕,余红发,等.碱式硫酸镁水泥混凝土力学性能试验研究[J].硅酸盐通报,2016,35(8):2548-2555.

YANG Sanqiang, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. Mechanical property of the basic magnesium sulfate cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(8): 2548-

2555. (in Chinese)

[5] TANG T X, MALVERN L E, JENKINS D A. Dynamic compressive testing of concrete[C]//Proceedings of 20 d Symposium on the International of Non-unclear Munitions with Structures. Florida: Us Department of Defense, 1985: 194-199.

[6] ROSS C A, TEDESCO J W, KUENNEN S T. Effects of strain rate on concrete strength[J]. Materials Journal, 1995, 92(1): 37-47.

[7] TANG T, MALVERN L E, JENKINS D A. Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(1): 108-124.

[8] 岳承军.珊瑚混凝土高速冲击力学性能的实验研究与数值模拟[D].南京:南京航空航天大学,2019.

YUE Chengjun. Research on experiment and numerical simulation of high-speed impact mechanical properties of coral aggregate seawater concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)

[9] 章艳.全珊瑚海水混凝土的静、动态力学性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.

ZHANG Yan. Research on dynamic and static mechanical properties of coral aggregate concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)

[10] 何梁.碱式硫酸镁水泥混凝土的配合比设计方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.

HE Liang. Research on mix proportion design of basic magnesium sulfate cement concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)

[11] MENG H, LI Q M. Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 537-555.

[12] DAVIES E D H, HUNTER S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11(3): 155-179.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010: 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50010—2010: Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

[14] 国家建委建筑科学研究院.钢筋混凝土结构研究报告选集[M].北京:中国建筑工业出版社,1977:32-34.

- National Academy of Building Sciences. Selected research reports on reinforced concrete structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1977: 32-34. (in Chinese)
- [15] 江伏. 应用 SHPB 试验对橡胶粉混凝土动力性能的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
JIANG Fu. The research on the dynamic behavior of rubberized concrete by using split Hopkinson pressure bar [D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese)
- [16] 帅晓蕾. 冲击荷载作用下混凝土动力性能试验研究及有限元分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
SHUAI Xiaolei. Mechanical properties experimental study and finite element analysis of concrete under the impact load [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [17] 王勇. 混凝土类材料在霍普金森杆实验中的受力状态研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WANG Yong. Study the stress state of concrete-like materials in SHPB experiment test [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] BISCHOFF P H, PERRY S H. Impact behavior of plain concrete loading in uniaxial compression [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(5): 685-693.
- [19] 季斌, 余红发, 麻海燕, 等. 三维编织钢纤维增强混凝土的冲击压缩性能 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 644-651.
JI Bin, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Dynamic compressive behavior of 3D braid steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 644-651. (in Chinese)
- [20] 季斌. 钢纤维三维编织增强混凝土 (3D-BSFC) 的静动态力学性能的试验研究与数值模拟 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
JI Bin. Experimental study and numerical simulation on static and dynamic compressive behavior of 3-D braid steel fiber reinforced concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [21] 严少华, 李志成, 王明洋, 等. 高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 237-241.
YAN Shaohua, LI Zhicheng, WANG Mingyang, et al. Experimental study on impact compression characteristics of high-strength steel fiber reinforced concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 237-241. (in Chinese)
- [22] 巫绪涛, 胡时胜, 陈德兴, 等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 125-131.
WU Xutao, HU Shisheng, CHEN Dexing, et al. Experimental study on impact compression of steel fiber high-strength concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 125-131. (in Chinese)
- [23] 张育宁, 方秦, 刘小斌, 等. 高强高掺量钢纤维混凝土动力性能的 SHPB 试验研究 [J]. 混凝土, 2006(7): 32-35.
ZHANG Yuning, FANG Qin, LIU Xiaobin, et al. The SHPB test research of dynamic mechanical properties of high strength steel fiber reinforced concrete with high fiber volume [J]. Concrete, 2006(7): 32-35. (in Chinese)
- [24] RAMM E. Finite element procedures in engineering analysis [J]. Engineering Structures, 1984, 6(2): 154.
- [25] 庄茁. ABAQUS 非线性有限元分析与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 548.
ZHUANG Zhuo. Abaqus nonlinear finite element analysis and examples [M]. Beijing: Science Press, 2005: 548. (in Chinese)
- [26] 张凤国, 李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法 [J]. 弹道学报, 2001(4): 12-16, 23.
ZHANG Fengguo, LI Enzheng. Method for determining parameters of concrete impact damage model [J]. Journal of Ballistics, 2001(4): 12-16, 23. (in Chinese)
- [27] 吴赛, 赵均海, 王娟, 等. 基于 HJC 试验数值分析的 HJC 模型参数研究 [J]. 计算力学学报, 2015, 32(6): 789-795.
WU Sai, ZHAO Junhai, WANG Juan, et al. Research on HJC model parameters based on concrete SHPB test numerical analysis [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(6): 789-795. (in Chinese)
- [28] SONG B, CHEN W. Dynamic stress equilibration in split Hopkinson pressure bar tests on soft materials [J]. Experimental Mechanics, 2004, 44: 300-312.