

DOI: 10.11779/CJGE20230686

岩石-钢纤维混凝土复合层动态抗压强度计算模型

陈 猛, 田矣涵, 崔秀文, 张 通*

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了研究冲击荷载下岩石-钢纤维混凝土(R-SFRC)复合层的抗压强度模型, 利用分离式霍普金森压杆对花岗岩、混凝土和 R-SFRC 复合层进行动态冲击压缩试验, 并通过回归试验结果得到 R-SFRC 复合层的对数型、幂函数型和强度-应变率依赖机制型 3 种强度模型, 同时考虑 R-SFRC 复合层界面相互作用, 基于 Mohr-Coulomb 强度准则建立复合层动态抗压强度计算模型。结果表明, R-SFRC 复合层动态抗压强度随应变率及钢纤维掺量增大而增大; 3 种回归模型拟合复合层动态抗压强度试验结果的相关系数范围为 0.918~0.999, 其中依赖机制型模型与试验结果的相关性最大; 基于 Mohr-Coulomb 强度准则的 3 种模型得到的复合层抗压强度计算值相对试验值的误差范围为-9.23%~3.16%, 对数型模型的误差最大值较小。R-SFRC 复合层动态抗压强度计算模型可为混凝土支护隧道围岩设计提供理论基础。

关键词: 岩石; 钢纤维混凝土; 动态抗压强度; 应变率; Mohr-Coulomb 强度准则; 强度预测模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2229-08

作者简介: 陈 猛(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土及岩石动态力学性能方面的研究。E-mail: chenmeng@mail.neu.edu.cn。

Dynamic compressive strength model for rock-steel fiber-reinforced concrete composite layer

CHENG Meng, TIAN Yihan, CUI Xiuwen, ZHANG Tong

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to study the compressive strength model for rock-steel fiber-reinforced concrete (R-SFRC) composite layer under impact loading, the dynamic impact compression tests on the granite, concrete and R-SFRC composite layer are carried out by using the separated Hopkinson pressure bar to obtain the dynamic compressive strengths of different materials. With the regression fitting of the test results, three types of strength models for the R-SFRC composite layer called logarithmic, power function and strength-strain rate dependent mechanism are obtained, and the dynamic compressive strength models for the R-SFRC composite layer are established based on the Mohr-Coulomb strength criterion considering the interface interaction of the R-SFRC composite layer. The results show that the dynamic compressive strength of the R-SFRC composite layer increases with the increase of the strain rate and steel fiber content, and the range of the correlation coefficient of three regression models is 0.918~0.999, and the R^2 of the dependent mechanism model is the largest. The error range of the theoretical value of the dynamic compressive strength calculated based on the Mohr-Coulomb strength criterion relative to the test value is -9.23%~3.16%, and the maximum error value of the logarithmic model is the smallest. The computational model for the dynamic compressive strength of the R-SFRC composite layer can provide a theoretical basis for the design of the surrounding rock of concrete-supported tunnels.

Key words: rock; steel fiber-reinforced concrete; dynamic compressive strength; strain rate; Mohr-Coulomb strength criterion; strength prediction model

0 引 言

隧道及巷道的围岩因遭受岩爆、爆破以及地震等冲击荷载作用而产生破坏, 影响工程施工人员和设备的安全^[1]。钢纤维喷射混凝土能与围岩紧密结合, 形成柔性支护结构提供支护抗力, 因此, 岩石-钢纤维混

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178382, 52308395); 博士后创新人才支持计划项目(BX20230063); 中国博士后科学基金面上项目(2023M730526); 中央高校基本科研业务专项资金项目(N2201023, N2301023); 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2023-BS-058)

收稿日期: 2023-07-20

*通信作者 (E-mail: zhangtong@mail.neu.edu.cn)

凝土 (R-SFRC) 复合层的力学性能影响支护结构的稳定性。

国内外学者对岩石-混凝土复合试件的剪切、劈裂抗拉和抗压等性能进行了研究。Jiang 等^[2]研究发现当法向应力由 0.5 MPa 增至 4 MPa 时, 复合试件的抗剪强度提高了 3~5 倍, 同时, 混凝土强度为 75 MPa 复合试件的抗剪强度比 10 MPa 的增大 1.5 倍左右。Mouzannar 等^[3]认为界面处较大的粗糙度使复合试件界面黏结更加紧密, 增大界面的抗剪强度。Chang 等^[4]研究表明复合试件的劈裂抗拉强度随加载方向与界面之间夹角的增大而增大, 当加载方向与界面夹角呈 90° 时, 混凝土强度对复合试件劈裂抗拉强度的影响最大, 二者呈线性关系。Zhu 等^[5]发现较高强度混凝土内部的水化反应更加充分, 减少了界面处的缺陷, 增强了界面黏结性能。Zhao 等^[6]研究表明界面有黏结的复合试件静态抗压强度比无黏结的提高了 24%。陈猛等^[7]指出 R-SFRC 复合层的动态强度增长因子 (dynamic increase factor, DIF) 与应变率的对数呈线性关系; 当应变率从 35 s⁻¹ 增至 135 s⁻¹, 混凝土中掺入 80 kg/m³ 钢纤维的复合层抗压强度与未掺入钢纤维相比增长了 15.9%~30.1%。复合层的力学性能受单层及界面相互作用影响较大, 建立复合层强度的理论计算模型需要以单层和界面力学性能为基础。

在岩石、混凝土和岩石-混凝土复合试件的强度计算模型研究方面, 赵坚等^[8]、宫凤强等^[9]发现当应变率范围为 10⁻⁴~10⁰ s⁻¹ 时, Mohr-Coulomb 强度准则适用于计算围压小于 100 MPa 的岩石强度; Hoek-Brown 强度准则能合理预测 0~170 MPa 围压的岩石强度。宫凤强等^[10]研究表明, 在 0~30 MPa 围压条件下, Mohr-Coulomb 强度准则能有效预测应变率范围为 10⁻⁶~10² s⁻¹ 的岩石强度; Hoek-Brown 强度准则能合理评估应变率范围为 10⁻⁶~10⁻¹ s⁻¹ 的岩石强度; Griffith 强度准则仅能用于判别应变率范围为 10¹~10² s⁻¹ 的岩石单轴抗压与抗拉强度之间的关系。钱七虎等^[11]提出热活化与黏性机制并存竞争的材料强度-应变率依赖模型, 能计算全应变率范围内的岩石强度。Gong 等^[12]、Si 等^[13]研究表明在 0~15 MPa 围压条件下, 应变率范围为 40~160 s⁻¹ 时砂岩的动态抗压强度与应变率对数之间存在明显的线性关系, 基于 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度准则建立的计算模型可有效预测岩石动态抗压强度。Fu 等^[14]发现当应变率范围为 30~150 s⁻¹ 时, Hoek-Brown 比 Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 强度准则更适用于计算围压低于 12 MPa 的混凝土强度。Lu 等^[15]根据强度-应变率关系建立了混凝土非线性动态强度准则, 能利用低应变率下的混凝土强度计算出高应变率下的混凝土强度。Zhao 等^[16]发现与 Coulomb 和两参数 Hoek-Brown 强度准则

相比, 三参数广义 Hoek-Brown 强度准则更适用于计算岩石-混凝土复合试件的静态抗压强度。陈猛等^[17]基于 Mohr-Coulomb 强度准则建立了 R-SFRC 复合层的静态抗压强度预测模型。目前, 缺少针对 R-SFRC 复合层动态抗压强度计算模型的研究。

为探究 R-SFRC 复合层中岩石与混凝土的相互作用及 R-SFRC 复合层整体力学性能, 本文对花岗岩、混凝土和 R-SFRC 复合层进行了动态抗压试验, 分别通过试验结果回归和 Mohr-Coulomb 强度准则建立冲击荷载作用下 R-SFRC 复合层的抗压强度预测模型, 可为冲击荷载作用下钢纤维喷射混凝土支护围岩设计提供理论依据。

1 试验概况

1.1 原材料

花岗岩的物理和力学性能见表 1, 岩石经钻芯、切割和磨平等工序后加工成直径 100 mm, 高度 50 mm 的圆柱体试件。保证试件两端面不平行度小于直径的 0.1%, 两端面与轴线垂直且偏差不大于 0.25°。

表 1 花岗岩的物理及力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of granite				
密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	单轴抗压 强度/MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)
3000	67.41	187.1	0.207	53

混凝土的胶凝材料采用 P·O 42.5 硅酸盐水泥; 细骨料为细度模数 2.56 的河砂; 粗骨料采用粒径为 5~10 mm 级配良好的碎石; 采用 38% 减水率的聚羧酸减水剂; 钢纤维为贝卡尔特端钩型钢纤维, 物理及力学性能参数见表 2, 不同类型混凝土配合比见表 3。

表 2 钢纤维的物理及力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of steel fiber				
长度/ mm	直径/ mm	密度/ (kg·m ⁻³)	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
35	0.3	7850	1150	220

表 3 混凝土配合比

Table 3 Mixture proportions of concrete						单位: kg/m ³
材料类型	水泥	水	细骨料	粗骨料	减水剂	钢纤维
FC0	418	182	611	1239	4.18	0
FC4	418	182	611	1239	4.18	40
FC6	418	182	611	1239	4.18	60
FC8	418	182	611	1239	4.18	80

注: FC4, FC6 和 FC8 分别表示钢纤维掺量为 40, 60, 80 kg/m³ 的钢纤维混凝土。

1.2 试件制备

制备混凝土试件时, 先将水泥和骨料置于搅拌机中干拌, 再加入水和减水剂进行湿拌, 搅拌时间不小于 2 min, 最后放入钢纤维, 搅拌至纤维分散均匀。将拌合物筑入直径 100 mm, 高度 50 mm 的圆柱体模

具中, 振捣密实后盖上保鲜膜, 24 h 后脱模并放入标准养护室 (温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不低于 95%) 中养护至 28 d。

制备 R-SFRC 复合层试件时, 先将混凝土拌合物筑入直径 100 mm, 高度 50 mm 的圆柱体模具中, 再将表面浸湿的岩石试件置于振捣密实后的混凝土上部, 混凝土上部砂浆与岩石表面贴合使二者黏结密实, 24 h 后脱去混凝土模具并放入标准养护室中养护至 28 d。花岗岩与不同类型混凝土黏结形成复合层试件, 分别为 R-FC0, R-FC4, R-FC6, R-FC8。R-FC0 表示由花岗岩与 FC0 组成的复合层试件。

1.3 试验方法

动态冲击压缩试验采用直径 100 mm 的分离式霍普金森压杆。撞击杆、入射杆、透射杆和吸收杆均为高强合金钢, 长度分别为 600, 5000, 3500, 1200 mm, 试验装置示意图如图 1 所示。采用直径 50 mm, 厚度 2 mm 的橡胶片作为波形整形片贴于入射杆端部中央, 入射波、反射波和透射波曲线如图 2 所示。

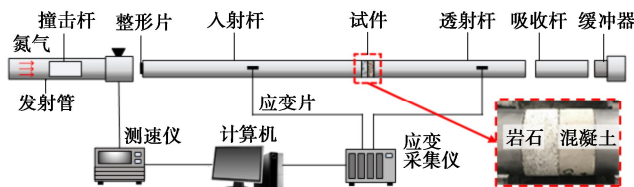


图 1 SHPB 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SHPB testing apparatus

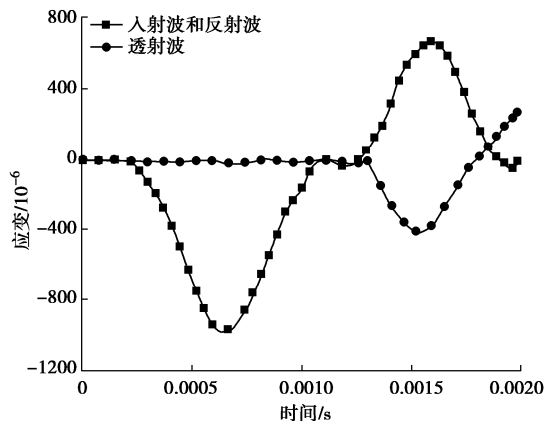


图 2 SHPB 试验波形图

Fig. 2 Strain waves of SHPB tests

试验时, 将复合层试件的两端面均匀涂抹凡士林 (避免摩擦效应) 夹在入射杆和透射杆之间, 岩石层置于入射杆一侧。对 R-SFRC 复合层试件 SHPB 试验进行应力平衡检验, 见图 3, 表明入射波与反射波之和约等于透射波, 满足应力平衡要求^[12]。试验设置 5 个目标应变率, 分别为 35, 55, 75, 95, 115 s^{-1} 。根据一维弹性应力波理论, 通过“三波法”计算出应力、应变和应变率。针对每组应变率均重复 3 次测试,

对试验结果取平均值。

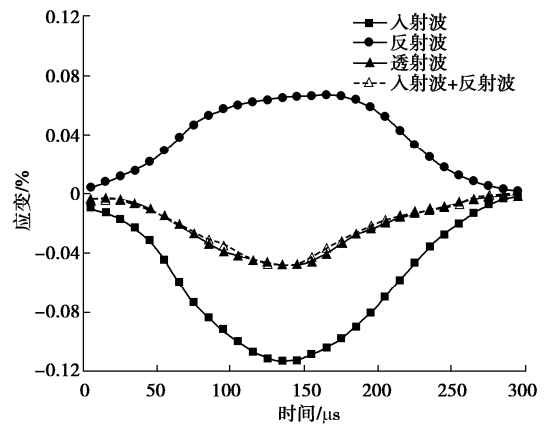


图 3 SHPB 试验应力平衡波形图

Fig. 3 Validation of stress equilibrium during the SHPB test

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

R-SFRC 复合层试件在不同应变率下的破坏形态如图 4 所示, 在不同应变率下, 岩石-钢纤维混凝土复合层试件比岩石-素混凝土复合层试件破坏程度小。由于混凝土弹性模量小于岩石弹性模量且二者泊松比值比较接近, 导致轴向冲击作用下混凝土层的径向变形大于岩石层, 在相互约束作用下, 混凝土层和岩石层在界面分别受到径向压缩和拉伸作用。当应变率约为 35 s^{-1} 时, 混凝土层仅在外侧出现张应变破坏, 岩石层不发生破坏, 见图 4 (a), (d)。当应变率增至 75 s^{-1} 附近, 混凝土层中的裂纹沿冲击方向扩展至黏结界面, 混凝土层对岩石层界面的张拉作用增强, 出现贯通岩石层和混凝土层的轴向裂缝, 岩石层表现为劈裂拉伸破坏, 混凝土层则表现为留芯破坏, 见图 4 (b), (e)。当应变率增至 115 s^{-1} 附近, 岩石层和混凝土层碎块尺寸减小、数量增多, 岩石层仍呈现劈裂拉伸破坏模式, 混凝土层则表现为压碎破坏, 见图 4 (c), (f)。



(a)R-FC0(38.3 s^{-1}) (b)R-FC0(72.1 s^{-1}) (c)R-FC0(111.5 s^{-1})



(d)R-FC8(38.5 s^{-1}) (e)R-FC8(76.5 s^{-1}) (f)R-FC8(114.4 s^{-1})

图 4 不同应变率下复合层试件的破坏形态

Fig. 4 Failure modes of composite layer specimens at different strain rates

2.2 动态抗压强度

图 5 为花岗岩、混凝土和 R-SFRC 复合层的动态抗压强度随应变率变化曲线图。不同类型试件的动态抗压强度随应变率增大而增大, 均具有显著的应变率效应。当应变率从 34.3 s^{-1} 增大到 114.5 s^{-1} 时, 岩石的动态抗压强度提高了 107.9%; 当应变率从 34.2 s^{-1} 增大到 119.3 s^{-1} 时, FC0, FC4, FC6, FC8 的动态抗压强度分别提高了 44.2%, 45.5%, 45.6%, 43.7%。原因是在冲击荷载作用下, 惯性效应和泊松效应使试件处于被动围压状态, 裂缝的萌生和扩展受到限制, 增大了试件破坏时达到的极限强度^[18-19]。同时, 随着应变率增大, 试件内部裂纹增多, 需要更多能量来驱动裂纹扩展, 但能量在冲击荷载下没有足够时间累积, 只能通过增大应力来抵消外部能量^[20]。此外, 应力波在试件内部快速传播, 裂纹没有足够时间在试件中薄弱部分形成和发展, 因此裂纹产生和扩展需要更大的荷载^[18-19]。

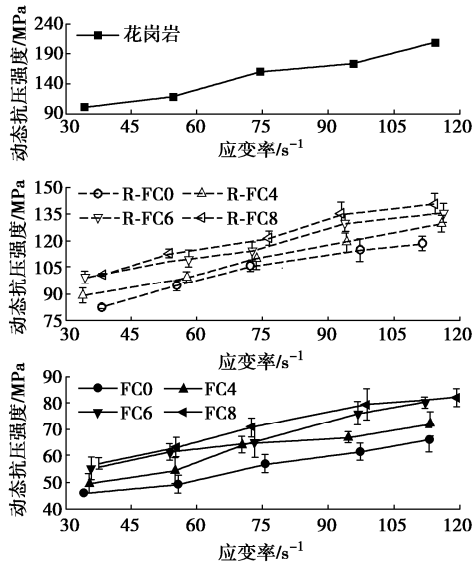


图 5 动态抗压强度随应变率变化曲线

Fig. 5 Variation of dynamic compressive strength with strain rate

当应变率从 33.9 s^{-1} 增大到 116.3 s^{-1} 时, R-FC0, R-FC4, R-FC6, R-FC8 的动态抗压强度分别提高了 43.5%, 46.0%, 36.7%, 39.7%。由 2.1 节分析可知, 黏结面处混凝土层和岩石层在径向分别产生受压和受拉作用, 随着应变率增大, 黏结面的环箍约束作用及惯性效应增强, 混凝土层受到的围压作用增强^[7,17]。R-SFRC 复合层的动态抗压强度介于岩石和混凝土之间, 强度随应变率的变化规律更接近混凝土。

混凝土和 R-SFRC 复合层的动态抗压强度均随钢纤维掺量增多而增大。当应变率从 34.2 s^{-1} 增大到 119.3 s^{-1} 时, 与 FC0 相比, FC8 的动态抗压强度分别提高了 24.6%, 28.7%, 24.2%, 29.4%, 24.2%; 当应变率从 33.9 s^{-1} 增大到 116.3 s^{-1} 时, 与 R-FC0 相比, R-FC8 的动态抗压强度分别提高了 22.1%, 19.6%,

15.1%, 18.0%, 18.8%。钢纤维在混凝土基体产生裂缝时发挥桥接作用, 能有效抑制混凝土横向变形, 使复合层黏结界面充分发挥对混凝土的约束作用, 同时纤维的桥接作用消耗冲击荷载的能量^[7, 17], 降低混凝土破坏程度, 增大其动态抗压强度。综上, 混凝土层达到极限强度时导致复合层发生整体破坏。

3 R-SFRC 复合层动态抗压强度模型

3.1 R-SFRC 复合层试验结果回归模型

(1) 对数型模型

DIF 定义为动态抗压强度 (f_d) 与静态抗压强度 (f_s) 的比值。Zhang 等^[18]研究表明, DIF 与应变率的对数存在线性关系:

$$\text{DIF} = k_1 \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_1, \quad (1)$$

即

$$f_d = f_s \cdot (k_1 \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_1). \quad (2)$$

式中: k_1 , b_1 为待定参数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率 (s^{-1})。

利用式(2)对 R-SFRC 复合层试验结果进行拟合, 式中复合层静态抗压强度由文献^[17]得到, 拟合曲线如图 6 所示, 拟合结果见表 4。在 R-SFRC 复合层的动态抗压强度对数型模型中, 参数 k_1 反映复合层动态抗压强度增长因子对应变率对数的敏感程度。不同类型复合层的 k_1 平均值为 1.06, 表明当应变率范围为 $35 \sim 115 \text{ s}^{-1}$ 时, 在复合层的动态抗压强度与应变率对数的线性关系曲线中, 斜率接近于静态抗压强度值。

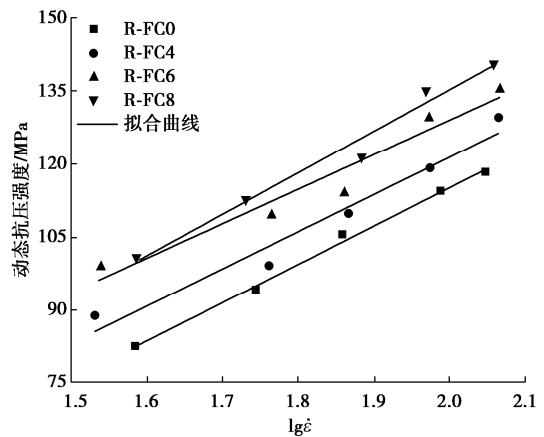


图 6 R-SFRC 复合层的对数型模型拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of logarithmic model for R-SFRC composite layer

(2) 幂函数型模型

郭东明等^[1]研究发现材料的动态抗压强度与应变率之间存在幂函数关系, 即 $f_d \propto \dot{\varepsilon}^n$ 。宫凤强等^[10]提出材料动态抗压强度与应变率的 $1/3$ 次方成正比。对 R-SFRC 复合层试验结果进行幂函数拟合, 发现拟合参数 n 值集中于 $1/3$ 附近。考虑静态抗压强度的影响, 对 R-SFRC 复合层动态抗压强度与应变率的幂函数关

表 4 回归模型中 R-SFRC 复合层的参数拟合值

Table 4 Fitting values of parameters of R-SFRC composite layer using regression models

复合层类型	对数型			幂函数型		依赖机制型			
	k_1	b_1	R^2	k_2	R^2	k_4	$\dot{\epsilon}_s$	n	R^2
R-FC0	1.132	-0.608	0.996	0.356	0.991	0.833	61.348	2.731	0.999
R-FC4	0.998	-0.207	0.963	0.362	0.980	3.873	364.699	1.198	0.998
R-FC6	1.001	-0.172	0.942	0.382	0.918	3.623	298.722	1.196	0.971
R-FC8	1.100	-0.456	0.979	0.378	0.977	1.584	108.280	1.392	0.993

系式进行无量纲化处理, 假设 R-SFRC 复合层动态抗压强度与应变率存在以下关系:

$$f_d = f_s \cdot k_2 \cdot \dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

式中: k_2 为待定参数。

利用式 (3) 拟合 R-SFRC 复合层试验结果, 式中复合层静态抗压强度由文献[17]得到, 拟合曲线见图 7, 拟合结果见表 4。在 R-SFRC 复合层的动态抗压强度幂函数型模型中, 参数 k_2 反映动态抗压强度增长因子随应变率变化的快慢程度。钢纤维混凝土制备的复合层的 k_2 均比素混凝土的大, 表明当应变率范围为 $35 \sim 115 \text{ s}^{-1}$ 时, 钢纤维混凝土制备的复合层动态抗压强度的应变率效应比素混凝土的强, 原因是动态压缩过程中钢纤维拔出或桥连混凝土基体, 可以耗散冲击能量, 提高复合层的动态抗压强度。

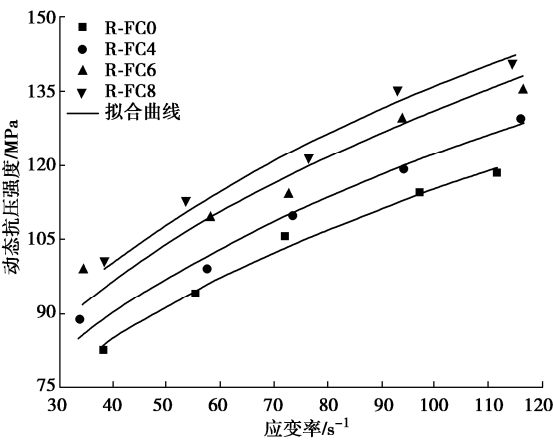


图 7 R-SFRC 复合层的幂函数型模型拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of power functional model for R-SFRC composite layer

(3) 强度-应变率依赖机制型模型

钱七虎等^[11]提出了热活化与黏性机制并存竞争的材料强度模型, 即不同机制在各应变率范围内分别占据主导地位, 如图 8 所示。在较高应变率范围内, 材料强度-应变率依赖模型公式为^[11, 21]

$$f_d = f_s + \frac{k_3(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n}{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n + 1} \quad (4)$$

式中: k_3 为宏观黏性对参数提高的最大幅值; $\dot{\epsilon}_s$ 为材料应变率曲线的拐点值, 温度升高的贡献被隐性地包

含在这一项中; n 为控制应变率曲线陡峭程度的常数。

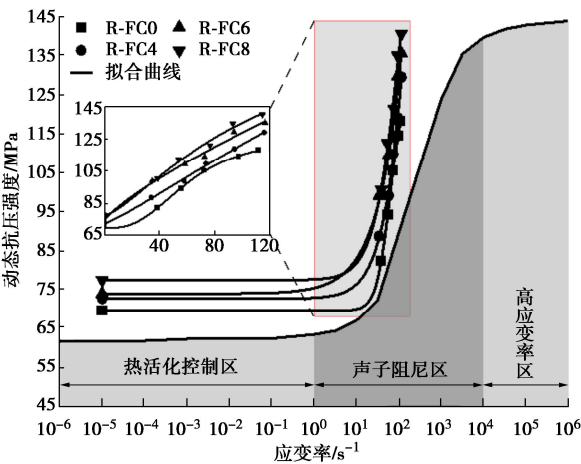


图 8 R-SFRC 复合层的强度-应变率依赖机制型模型拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of strength-strain rate dependent mechanism model for R-SFRC composite layer

对式 (4) 进行无量纲化处理, 得到

$$f_d = f_s \cdot \left(1 + \frac{k_4(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n}{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^n + 1} \right) \quad (5)$$

式中: k_4 为 k_3 与材料静态抗压强度的比值。

用式 (5) 对 R-SFRC 复合层试验结果进行拟合, 式中复合层静态抗压强度由文献[17]得到, 拟合曲线见图 8, 拟合结果见表 4。

对数型、幂函数型和强度-应变率依赖机制型模型拟合 R-SFRC 复合层试验数据的相关系数 (R^2) 分别为 $0.942 \sim 0.996$, $0.918 \sim 0.991$ 和 $0.971 \sim 0.999$, 对比 3 种强度模型的 R^2 可知, 依赖机制型模型与复合层动态抗压强度试验结果的相关性最大。3 种模型均可对素混凝土和钢纤维混凝土制备的复合层动态抗压强度进行有效预测。

3.2 基于 Mohr-Coulomb 强度准则的计算模型

在脆性材料动态强度计算方面, Mohr-Coulomb 强度准则应用较为广泛^[11]。由第 2 节可知, 复合层破坏是混凝土层先达到破坏强度导致的, 因此, 复合层中混凝土的动态抗压强度近似等于复合层动态抗压强度。文献[17]讨论了 R-SFRC 复合层中岩石层和混凝土层的界面相互作用, 基于 Mohr-Coulomb 强度准则推导了复合层静态抗压强度计算公式。此外, 当应变率范围为 $33.9 \sim 119.3 \text{ s}^{-1}$ 时, 岩石和混凝土的弹性模

量、泊松比和内摩擦角随加载速率变化较小^[22-23]，可认为此应变率范围内岩石和混凝土的动态弹性模量、泊松比和内摩擦角值近似等于静态值。综上，R-SFRC 复合层静态抗压强度计算公式适用于应变率范围为 33.9~119.3 s⁻¹ 时的动态抗压强度计算，公式如下：

$$\sigma_{2C} = -\sigma_{2R} = \sigma_{3C} = -\sigma_{3R} = a \cdot \sigma_1 \quad , \quad (6)$$

$$a = \frac{(E_R \mu_C - E_C \mu_R)}{[E_C(1 - \mu_R) + E_R(1 - \mu_C)]} \quad , \quad (7)$$

$$\sigma_1 = f_{RC} = f_{RC-C} = \frac{f_{Cd}}{1 - A \cdot a} \quad , \quad (8)$$

$$A = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad . \quad (9)$$

式中： σ_{2R} ， σ_{2C} ， σ_{3R} ， σ_{3C} 分别为岩石和混凝土在 2，3 方向上的应力（MPa），见图 9； σ_1 为复合层的压缩应力（MPa）； E_R ， E_C 分别为岩石和混凝土的弹性模量（GPa）； μ_R ， μ_C 分别为岩石和混凝土的泊松比； f_{RC} ， f_{RC-C} 分别为复合层和复合层中混凝土的动态抗压强度（MPa）； f_{Cd} 为混凝土的动态抗压强度（MPa）； φ 为混凝土的内摩擦角（°）。

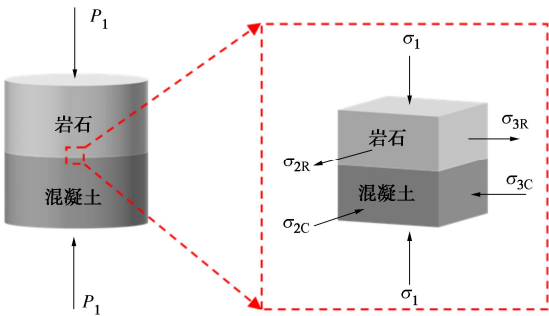


图 9 R-SFRC 复合层界面处单元体应力分析图

Fig. 9 Stress analysis of element at interface of R-SFRC composite layer

将对数型、幂函数型和强度-应变率依赖机制型模型分别代入式（8），得到 3 种基于 Mohr-Coulomb 强度准则的复合层动态抗压强度计算模型：

$$f_{RC} = \frac{f_{Cs}}{1 - A \cdot a} \cdot (k_{1C} \cdot \lg \dot{\epsilon} + b_{1C}) \quad , \quad (10)$$

$$f_{RC} = \frac{f_{Cs}}{1 - A \cdot a} \cdot k_{2C} \cdot \dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} \quad , \quad (11)$$

$$f_{RC} = \frac{f_{Cs}}{1 - A \cdot a} \cdot \left(1 + \frac{k_{4C} (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{sC})^{n_C}}{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{sC})^{n_C} + 1} \right) \quad . \quad (12)$$

表 5 回归模型中混凝土的参数拟合值

Table 5 Fitting values of parameters of concrete using regression models

材料类型	对数型			幂函数型		依赖机制型			
	k_{1C}	b_{1C}	R^2	k_{2C}	R^2	k_{4C}	$\dot{\epsilon}_{sC}$	n_C	R^2
FC0	0.842	-0.357	0.941	0.287	0.961	0.476	81.603	4.923	0.988
FC4	0.940	-0.448	0.957	0.309	0.961	0.494	64.627	5.211	0.980
FC6	1.031	-0.516	0.947	0.334	0.966	0.725	68.548	3.012	0.972
FC8	1.038	-0.530	0.987	0.333	0.989	0.784	71.679	2.734	0.998

式中： f_{Cs} 为混凝土的静态抗压强度（MPa）。 k_{1C} ， b_{1C} ， k_{2C} ， k_{4C} ， $\dot{\epsilon}_{sC}$ 和 n_C 为混凝土动态试验结果的待定参数。

利用对数型、幂函数型和依赖机制型模型对混凝土试验结果进行拟合，式中混凝土静态抗压强度由文献[17]得到，拟合结果见表 5；将拟合结果代入公式（10）~（12）进行计算，式中岩石和混凝土的弹性模量、泊松比和内摩擦角值由文献[17]得到，复合层强度理论计算值见表 6。

采用对数型、幂函数型和依赖机制型模型计算的复合层动态抗压强度值相对试验值的误差范围分别为 -8.93%~3.16%，-9.09%~2.31%，-9.23%~2.51%，对数型模型的误差绝对值最大不超过 8.93%。结合文献[7]中 C30 混凝土及其制备的复合层动态抗压强度试验数据，采用对数型、幂函数型和依赖机制型模型计算得到的复合层动态抗压强度值相对试验值的误差范围分别为 -9.55%~5.89%，-8.18%~5.48%，-8.99%~7.03%，表明计算模型可用于不同强度混凝土制备的复合层动态抗压强度计算。与试验结果回归模型相比，基于 Mohr-Coulomb 强度准则的计算模型的优势在于，计算 R-SFRC 复合层的动态抗压强度只需要单层的力学性能参数。

4 结 论

本文对花岗岩、混凝土和 R-SFRC 复合层进行了应变率范围为 33.9~119.3 s⁻¹ 的动态抗压试验，并建立了 R-SFRC 复合层动态抗压强度计算模型，主要得到以下 3 点结论。

（1）岩石、混凝土和 R-SFRC 复合层的动态抗压强度均具有显著的应变率效应。混凝土和 R-SFRC 复合层的动态抗压强度均随钢纤维掺量增多而增大，纤维桥接作用可以有效提高混凝土动态抗压强度。复合层中混凝土层达到极限强度时导致复合层发生破坏。

（2）对数型、幂函数型和强度-应变率依赖机制型回归模型拟合 R-SFRC 复合层试验结果的 R^2 范围为 0.918~0.999，3 种回归模型与复合层试验结果的相关性均较大，其中依赖机制型模型的 R^2 最大。

（3）基于 Mohr-Coulomb 强度准则建立的 3 种强度计算模型通过单层力学性能参数计算 R-SFRC 复合层动态抗压强度，3 种模型强度计算值相对试验值的

表 6 R-SFRC 复合层的动态抗压强度计算值与试验值对比

Table 6 Comparison of calculated and tested values of dynamic compressive strength of R-SFRC composite layer

复合层类型	应变率/s ⁻¹	f_c /MPa	f_{RC1} /MPa	f_{RC2} /MPa	f_{RC3} /MPa	x_1 /%	x_2 /%	x_3 /%
R-FC0	38.3	82.5±1.1	75.1	75.0	81.0	-8.93	-9.09	-1.87
	55.4	94.2±3.0	89.5	88.2	85.5	-5.02	-6.33	-9.23
	72.1	105.6±2.5	98.5	97.7	96.0	-6.77	-7.48	-9.08
	97.2	114.6±6.4	105.9	106.3	107.4	-7.62	-7.27	-6.31
	111.5	118.4±4.0	110.3	111.7	112.3	-6.87	-5.65	-5.17
R-FC4	33.9	88.8±4.3	82.8	83.4	83.9	-6.76	-6.03	-5.50
	57.6	99.2±3.0	97.6	96.7	94.4	-1.59	-2.54	-4.83
	73.5	109.9±5.8	105.9	104.9	106.9	-3.66	-4.52	-2.76
	94.1	119.3±5.9	115.9	115.9	118.0	-2.86	-2.85	-1.13
	115.9	129.6±4.6	121.9	123.1	120.8	-5.91	-5.03	-6.80
R-FC6	34.5	99.2±3.5	91.0	92.1	91.3	-8.28	-7.20	-8.01
	58.1	109.7±4.9	106.3	105.4	103.5	-3.13	-3.88	-5.67
	72.6	114.2±4.9	117.8	116.8	117.1	3.16	2.31	2.51
	93.8	129.8±5.3	128.3	128.2	128.6	-1.16	-1.19	-0.95
	116.3	135.6±5.4	133.8	134.7	133.2	-1.33	-0.68	-1.78
R-FC8	38.5	100.7±0.6	94.4	95.3	95.2	-6.26	-5.38	-5.51
	53.7	112.7±2.7	109.2	108.3	113.3	-3.12	-3.92	0.56
	76.5	121.5±4.0	119.7	118.6	119.3	-1.50	-2.40	-1.78
	93.0	135.2±6.4	131.6	131.5	132.6	-2.67	-2.75	-1.91
	114.4	140.7±5.7	138.9	140.0	139.0	-1.31	-0.49	-1.24

注： f_c 为 R-SFRC 复合层的动态抗压强度试验值； f_{RC1} ， f_{RC2} 和 f_{RC3} 分别为基于 Mohr-Coulomb 强度准则建立的对数型、幂函数型和强度-应变率依赖机制型模型的 R-SFRC 复合层动态抗压强度计算值。 x_i 为 f_{RCi} 的误差， $x_i = (f_{RCi} - f_c) \times 100\% / f_c$ ， $i = 1, 2, 3$ 。误差范围为-9.23%~3.16%，其中对数型模型的误差最大值相对于其他两种模型最小。

参考文献：

[1] 郭东明, 闫鹏洋, 凡龙飞, 等. 喷层混凝土-围岩组合体波动特性及动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24): 85-91, 136. (GUO Dongming, YAN Pengyang, FAN Longfei, et al. A study on the stress wave characteristics and dynamic mechanical property of the sprayed concrete-surrounding rock combined body[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 85-91, 136. (in Chinese))

[2] JIANG Q, YANG Y, YAN F, et al. Deformation and failure behaviours of rock-concrete interfaces with natural morphology under shear testing[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123468.

[3] MOUZANNAR H, BOST M, LEROUX M, et al. Experimental study of the shear strength of bonded concrete-rock interfaces: surface morphology and scale effect[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(10): 2601-2625.

[4] CHANG X, LU J Y, WANG S Y, et al. Mechanical performances of rock-concrete bi-material disks under diametrical compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 71-77.

[5] ZHU J B, BAO W Y, PENG Q, et al. Influence of substrate properties and interfacial roughness on static and dynamic tensile behaviour of rock-shotcrete interface from macro and micro views[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104350.

[6] ZHAO B Y, LIU Y, LIU D Y, et al. Research on the influence of contact surface constraint on mechanical properties of rock-concrete composite specimens under compressive loads[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(2): 322-330.

[7] 陈 猛, 王 浩, 齐 迈, 等. 岩石-钢纤维混凝土复合层动态压缩性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1222-1230. (CHEN Meng, WANG Hao, QI Mai, et al. Experimental study on dynamic compressive properties of composite layers of rock and steel fiber reinforced concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(06): 1222-1230. (in Chinese))

[8] 赵 坚, 李海波. 莫尔-库仑和霍克-布朗强度准则用于评估脆性岩石动态强度的适用性[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 171-176. (ZHAO Jian, LI Haibo. Estimating the dynamic strength of rock using Mohr-coulomb and hoek-brown criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 171-176. (in Chinese))

[9] 宫凤强, 司雪峰, 李夕兵, 等. 基于应变率效应的岩石动态 Mohr-Coulomb 准则和 Hoek-Brown 准则研究[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1763-1773. (GONG Fengqiang, SI

- Xuefeng, LI Xibing, et al. Rock dynamic Mohr-Coulomb and Hock-Brown criteria based on strain rate effect[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, **26**(8): 1763-1773. (in Chinese))
- [10] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2433-2441. (GONG Fengqiang, LU Daohui, LI Xibing, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2433-2441. (in Chinese))
- [11] 钱七虎, 戚承志. 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, **36**(12): 1599-1605. (QIAN Qihu, QI Chengzhi. Dynamic strength and dynamic fracture criteria of rock and rock mass[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, **36**(12): 1599-1605. (in Chinese))
- [12] GONG F Q, SI X F, LI X B, et al. Dynamic triaxial compression tests on sandstone at high strain rates and low confining pressures with split Hopkinson pressure bar[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, **113**: 211-219.
- [13] SI X F, GONG F Q, LI X B, et al. Dynamic Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria of sandstone at high strain rates[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, **115**: 48-59.
- [14] FU Q, XU W R, HE J Q, et al. Dynamic strength criteria for basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete[J]. Composites Communications, 2021, **28**: 100983.
- [15] LU D C, WANG G S, DU X L, et al. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, **103**: 124-137.
- [16] ZHAO B Y, LIU Y, HUANG T Z, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of rock-concrete composite specimens under compressive condition[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, **37**(4): 2693-2706.
- [17] 陈 猛, 崔秀文, 颜 鑫, 等. 岩石-钢纤维混凝土复合层抗压强度预测模型[J]. 岩土力学, 2021, **42**(3): 638-646. (CHEN Meng, CUI Xiuwen, YAN Xin, et al. Prediction model for compressive strength of rock-steel fiber reinforced concrete composite layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(3): 638-646. (in Chinese))
- [18] ZHANG X H, CHIU Y W, HAO H, et al. Dynamic compressive properties of Kalgoorlie basalt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, **135**: 104512.
- [19] 袁良柱, 苗春贺, 单俊芳, 等. 冲击下混凝土试样应变率效应和惯性效应探讨[J]. 爆炸与冲击, 2022, **42**(1): 1-13. (YUAN Liangzhu, MIAO Chunhe, SHAN Junfang, et al. On strain-rate and inertia effects of concrete samples under impact[J]. Explosion and shock waves, 2022, **42**(1): 1-13. (in Chinese))
- [20] FENG S W, ZHOU Y, WANG Y, et al. Experimental research on the dynamic mechanical properties and damage characteristics of lightweight foamed concrete under impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, **140**: 103558.
- [21] 王 健, 李二兵, 谭跃虎, 等. 层状盐岩及泥岩夹层动态力学特性对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(12): 3002-3011. (WANG Jian, LI Erbing, TAN Yuehu, et al. Comparative experimental study on dynamic mechanical properties of bedded salt rock and mudstone interbed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(12): 3002-3011. (in Chinese))
- [22] LI X Z, QI C Z. A micro-macro dynamic compressive-shear fracture model under static confining pressure in brittle rocks[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, **122**: 109-118.
- [23] ZHAO J, LI H B, WU M B, et al. Dynamic uniaxial compression tests on a granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(2): 273-277.