

# 基体强度对钢纤维单丝拉拔性能的影响\*

陈沛然<sup>1</sup>, 张亚芳<sup>1</sup>, 李根<sup>2</sup>

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;

2. 中山大学工学院, 广东 广州 510275)

**摘要:**界面对钢纤维混凝土(SFRC)的宏观力学性能具有较大影响,尤其是钢纤维与混凝土基体间的界面层。文中分别建立混凝土基体和水泥砂浆基体的单丝拉拔模型,考虑了基体强度变化和骨料对单丝拉拔性能的影响。结果表明:基体强度越高,单丝拉拔试件的峰值荷载和界面最大黏结强度越大,而试件的拉拔韧度则越小。基体强度的变化对单丝拉拔损伤破坏过程影响甚微。与水泥砂浆基体相比,混凝土基体的单丝拉拔试件对基体的变化更为敏感。

**关键词:**界面;单丝拉拔;基体强度;骨料;黏结强度;拉拔韧度

**中图分类号:** TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)06-0068-08

## Effect of Matrix Strength on Properties of Steel Single Fiber Pull-out Test

CHEN Peiran<sup>1</sup>, ZHANG Yafang<sup>1</sup>, LI Gen<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The interface plays an important role in the macro-mechanical properties of SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete), especially the interface layer between the steel fiber and concrete matrix. The pull-out numerical models with or without aggregates have been established, then the effect of matrix strength on pullout properties of single fiber and the influence of aggregate have been studied. The results indicate that the higher the matrix strength, the larger the peak load of specimen and the higher the interfacial bond strength, but the pull-out toughness decreases. The variation of matrix strength has little impact upon the damage process of pullout procedure. The specimen with concrete matrix is more sensitive to the changes of matrix strength compared with cement.

**Key words:** interface; single fiber pull-out; matrix strength; aggregate; bond strength; pullout toughness

钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)已在房屋建筑<sup>[1]</sup>、公路桥梁、维护加固以及防爆等工程中得到应用,具有良好的力学性能<sup>[2]</sup>。它主要由钢纤维、水泥砂浆、骨料以及界面组成,界面的存在对复合材料的力学行为具有重要影响<sup>[3]</sup>。作为基体与增强相之间的“桥梁”,

界面的黏结强度直接影响钢纤维/基体间应力的传递与分布,进而影响材料的增强增韧效果<sup>[4]</sup>。由于在单丝拉拔试验中,纤维与基体的受力情况与实际材料开裂过程中出现的纤维桥联与基体开裂情况相近<sup>[5]</sup>,故而单丝拉拔成为纤维混凝土界面研究的通用表征方法之一。

\* 收稿日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278136); 广东省科技计划国际合作项目(2011B050300019); 广东省高等学校高层次人才项目(2050205); 广州市教育局羊城学者项目(12A007G)

作者简介: 陈沛然(1988年生),女;研究方向:纤维增强混凝土;通讯作者:张亚芳;E-mail: zhangyafang2004@163.com

至今为止，一些学者针对基体强度开展了单丝拉拔物理试验研究<sup>[6-9]</sup>，并取得相关成果，其中考虑骨料在混凝土基体中影响的研究还很少见，相关的数值模拟研究也不多<sup>[10]</sup>，且均是基于材料的理想状态假设而忽略了材料不均匀性对单丝拉拔力学性能的影响。钢纤维混凝土是一种典型的多相非均匀复合材料，破坏过程十分复杂且影响因素众多，采用数值模拟的研究方法能有效地开展定性和定量分析。本文利用大连理工大学数值计算实验室研发的 RFPA<sup>2D</sup> (Realistic Failure Process Analysis) 软件，基于有限元理论和统计损伤理论，从材料细观非均匀分布角度，分别对混凝土基体和水泥砂浆基体进行单丝拉拔试验的数值模拟研究，实现了单丝拉拔试件自裂纹萌生、扩展直至破坏的全过程，重点研究了不同基体强度对钢纤维单丝拉拔性能的影响。

## 1 数值模型的建立

本文数值模型采用两类不同的基体进行模拟，即混凝土基体（含有骨料）和水泥砂浆基体（无骨料），分析钢纤维自基体中拔出的损伤破坏过程，图 1 为本数值模型的示意图。

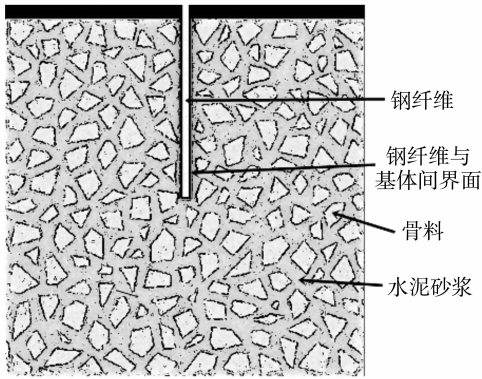


图 1 单丝拉拔数值模拟示意图

Fig. 1 Schematic of single fiber pull-out numerical simulation

该数值模拟试件，主要由钢纤维、骨料、水泥砂浆以及钢纤维与砂浆基质间的界面组成，基体尺寸为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ，由  $320 \times 320$  个单元组成。纤维四周基体的包裹厚度为  $r_m = 40 r_f$ ，纤维在基体中埋深  $L_f = 20\text{ mm}$ ，分别对 5 组不同的基体强度进行单丝拉拔数值模拟试验。模型按照位移控制加载方式，加载步长为  $0.0005\text{ mm}$ ，加载至试件破坏。由于钢纤维混凝土是典型的非均匀性材料，本数值模拟按照 RFPA 方法，考虑了材料的非均匀性、缺陷

分布的随机性，利用给定的统计学 Weibull 双曲线函数对各相材料的物理力学参数进行赋值<sup>[11]</sup>，见表 1、2、3（数据来源于参考文献 [12]）。

表 1 钢纤维、界面的力学参数<sup>[12]</sup>

Table 1 Mechanical parameters for steel fiber and interface

组分	弹性模量/GPa	极限抗拉强度/MPa	泊松比
界面	3.5 (1.5)	0.5 (1.5)	0.25 (100)
钢纤维	210 (15)	1000 (15)	0.30 (100)

表 2 混凝土基体（含有骨料）的力学参数<sup>[12]</sup>

Table 2 Mechanical parameters for concrete matrix with aggregates

试件	组分	弹性模量 /GPa	极限抗拉强度 /MPa	泊松比
C1	砂浆	20.4 (2)	3.2 (2)	0.25 (100)
	骨料	72.0 (6)	24.5 (6)	0.30 (100)
C2	砂浆	21.3 (2)	3.6 (2)	0.25 (100)
	骨料	72.0 (6)	24.5 (6)	0.30 (100)
C3	砂浆	23.0 (2)	4.1 (2)	0.25 (100)
	骨料	72.0 (6)	24.5 (6)	0.30 (100)
C4	砂浆	25.3 (2)	4.6 (2)	0.25 (100)
	骨料	72.0 (6)	24.5 (6)	0.30 (100)
C5	砂浆	26.8 (2)	5.1 (2)	0.25 (100)
	骨料	72.0 (6)	24.5 (6)	0.30 (100)

表 3 水泥砂浆基体（不含有骨料）的力学参数<sup>[12]</sup>

Table 3 Mechanical parameters for cement matrix without aggregates

试件	组分	弹性模量 /GPa	极限抗拉强度 /MPa	泊松比
M1	砂浆基质	20.4 (2) <sup>1)</sup>	3.2 (2)	0.25 (100)
M2		21.3 (2)	3.6 (2)	0.25 (100)
M3		23.0 (2)	4.1 (2)	0.25 (100)
M4		25.3 (2)	4.6 (2)	0.25 (100)
M5		26.8 (2)	5.1 (2)	0.25 (100)

1) 括号内的数值表示相应材料的均值度，该值越大则相应材料参数的分布越均匀。

## 2 数值模拟结果与讨论

### 2.1 单丝拉拔损伤破坏过程及其应力分布情况

图 2 分别为钢纤维单丝拉拔试件在混凝土基体和水泥砂浆基体中的弹性模量变化情况，篇幅所限，仅列出部分特征加载步的损伤破坏图。图 2 主要展现了单丝拉拔试件由裂纹萌生、扩展、贯通直至纤维完全剥离破坏的过程，由于界面的弹性模量

较小 (为钢纤维的 1.67%), 相对于其它相材料强度较弱, 故而裂纹主要在界面上萌生和扩展。由图可知, 裂纹首先出现在钢纤维的埋入端 (纤维外露处附近) 和埋置端 (纤维伸入基体端), 随着荷载的不断增大, 裂纹在界面上逐渐扩展、延伸, 同

时水泥砂浆中的弱单元也开始出现破坏。最后, 界面上的裂纹完全贯通, 钢纤维被拔出且埋置端出现空腔。这与文献 [13] 中通过物理试验所得到的结果相吻合。

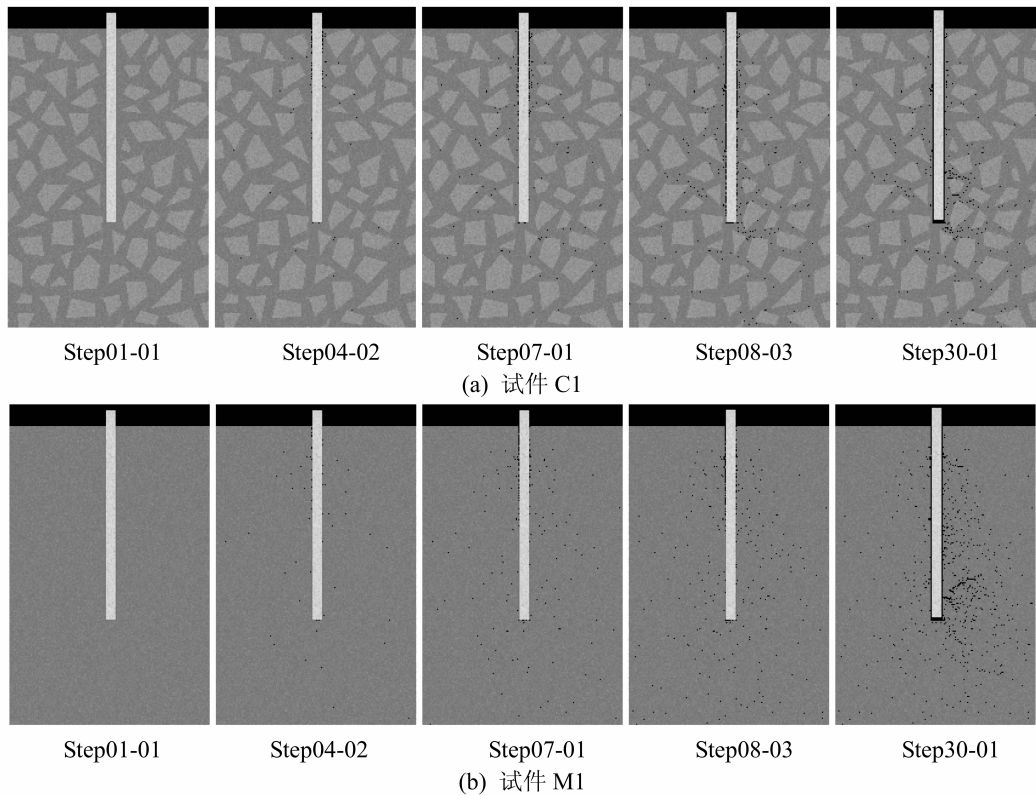


图 2 不同基体单丝拉拔试件弹性模量变化图

Fig. 2 Variation of elastic modulus of single fiber pull-out specimen with different matrix

钢纤维两侧呈现不均匀的界面脱黏, 如图 2 所示。在混凝土和水泥砂浆基体中, 裂纹总是先由纤维一侧界面开始萌发, 而后随着荷载的不断增大, 界面上弱单元逐渐出现损伤破坏, 直至界面完全脱黏。

通过对图 2 (a) 与 (b) 的比较分析可知, 在钢纤维埋深相同 (即钢纤维掺量均为 1.25%) 时, 单丝拉拔试件在两类基体中的损伤破坏过程基本相似, 裂纹均是由钢纤维埋入端开始萌生, 随之在钢纤维与基体间的界面上得到扩展, 最终使得界面完全脱黏。试件 C1 与 M1 中的水泥砂浆具有相同材料参数, 有无骨料的参与对基体中裂纹的萌生和扩展具有一定影响, 与试件 C1 相比, 试件 M1 的基体中出现的裂纹较多, 说明在一定程度上骨料具有阻裂作用。

为深入研究弹性变形阶段下界面的剪应力分布

情况, 对不同基体强度的试件取多单元信息, 经处理, 可得到不同基体强度时界面的剪应力分布图 (见图 3)。由图可知, 在加载初期, 钢纤维埋入端存在应力集中, 界面开始出现局部脱黏现象, 随着钢纤维埋入深度的增加, 界面剪应力分布基本呈逐渐递减的趋势, 直到接近纤维埋置端附近又开始有所回升, 这与 Farhad Aslani 等<sup>[14]</sup>开展的钢纤维单丝拉拔试验、齐雷等<sup>[15]</sup>进行数值模拟研究的结果相一致。

如图 3 (a) 所示, 在混凝土基体中, 钢纤维埋入端处的界面剪应力值最大, 且随着基体强度的增加而增大, 当基体的弹性模量和抗拉强度分别为 30.8 GPa 和 4.5 MPa (即试件 C4, 数据由文献 [12] 相关公式推算得到) 时, 埋入端以及埋置端处的界面剪应力值将逐渐趋于稳定, 不再出现大幅度的增加或者减少。而在水泥砂浆基体中, 不同基

体强度下界面剪应力的分布情况基本相似，仅在钢纤维埋入端处，界面剪应力值会随着基体强度的增加而出现小幅度的增大，如图 3 (b) 所示。

对比图 3 基体中有无骨料的情况可知，相对于混凝土基体，水泥砂浆基体中界面剪应力的分布较

为稳定且均匀。可见，骨料的存在对界面剪应力值的大小和分布情况具有较大影响。总之，在一般条件下，随着基体强度的增加，钢纤维埋入端的界面剪应力值也随之增大。

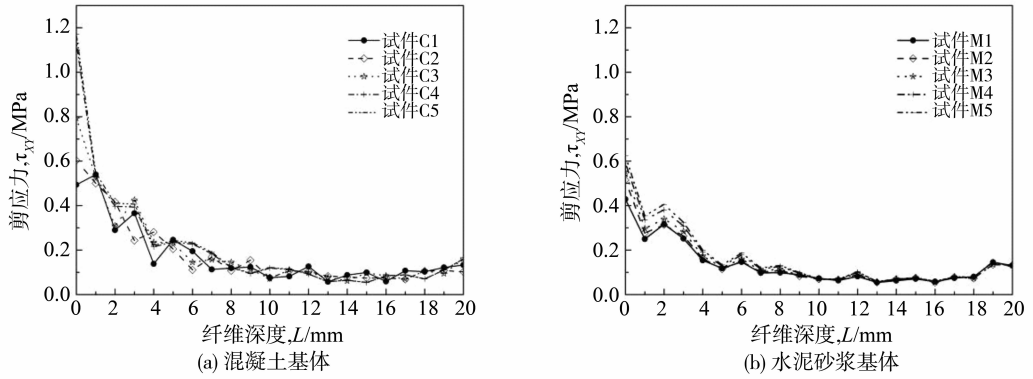


图 3 不同基体下界面剪应力分布图

Fig. 3 Shear stress distribution along the interface with different matrix

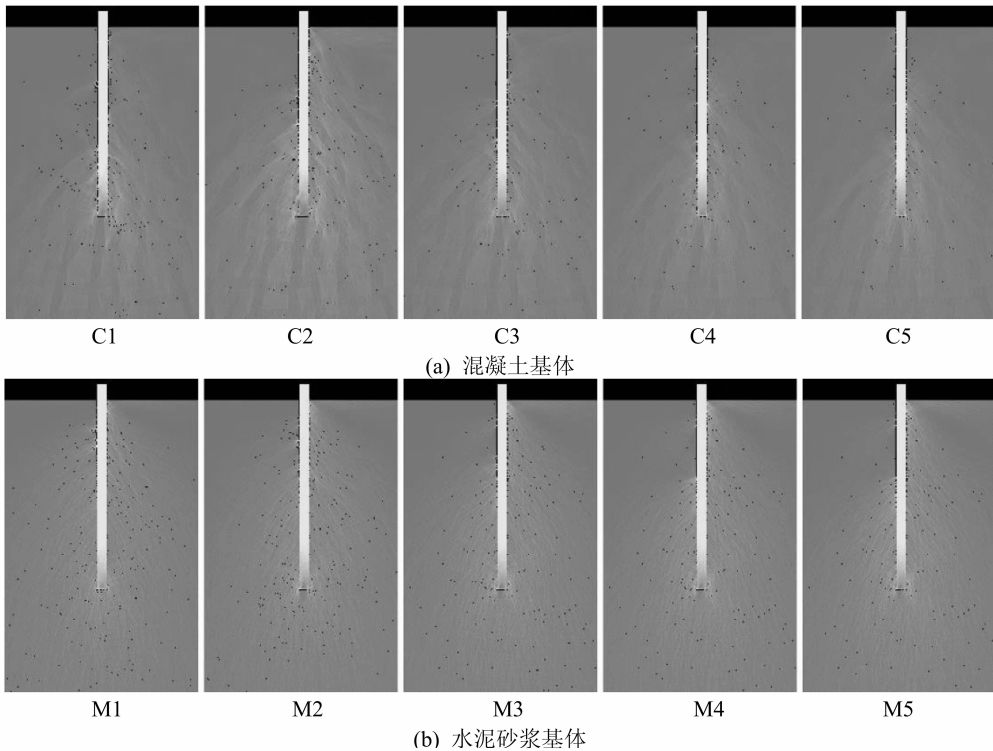


图 4 加载步 Step08 - 02 时单丝拉拔试件应力分布图

Fig. 4 Shear stress distribution of single fiber pull-out specimen when loading step is 08 - 02

图 4 为加载步 Step08 - 02 (第 8 加载步, 第 2 子步) 时两类基体下单丝拉拔试件的应力分布图。如图所示, 随着基体强度的提高, 试件基体中出现裂纹有所减少。对混凝土基体而言, 基体强度的提高减缓了钢纤维与基体间界面脱黏破坏的趋势; 对

水泥砂浆基体而言, 基体强度越大, 界面脱黏的速度越快。可见, 当改变单丝拉拔试件的基体强度时, 骨料存在与否对基体强度变化造成的效果影响较大。

本文假设钢纤维与基体间存在着界面层, 该界面层具有一定的厚度和相对应的物理力学参数。当

外拉荷载施加于钢纤维时, 通过钢纤维 - 基体间界面层的传递作用将一部分荷载传递给脆性材料基体, 使得单丝拉拔试件中各相材料共同承担荷载。关于界面应力传递的剪滞理论, 其中最为经典的是 Cox<sup>[16]</sup> 于 1952 年提出的剪滞理论, 认为界面剪应力可以用于平衡纤维受到的拉应力, 忽略了界面的厚度和基体与增强材料间的相对滑动作用。相关的理论和试验研究都证明了界面层的存在和该界面对复合材料宏观力学性能的重要性, Piggott<sup>[17]</sup> 在此基础上提出了弹性滑移应力模型, 考虑了界面层的影响, 认为界面能够传递径向和切向应力, 界面传递的应力大小如公式 (1) 所示

$$\tau(\delta) = K \times \delta \quad (1)$$

其中,  $\delta$  为界面处基体和纤维间的位移差,  $K$  为刚度系数。可见, 界面所传递的应力大小与界面处基体 - 纤维的位移差呈正比关系。本数值模拟关于受损材料的本构关系与此理论相吻合, 主要是根据应变等价原理<sup>[12]</sup>, 通过无损材料中的名义应力得到, 如公式 (2)、(3) 所示:

$$\varepsilon = \sigma/E = \sigma/(1-D)E_0 \quad (2)$$

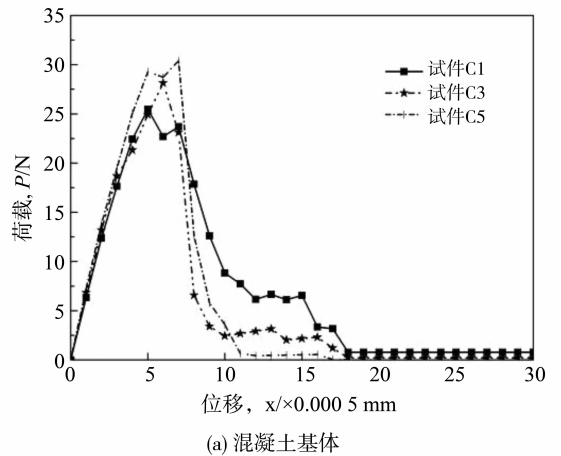
$$\text{或} \quad \sigma = E_0(1-D)\varepsilon \quad (3)$$

式中:  $E$  和  $E_0$  分别是材料损伤后的弹性模量和初始弹性模量;  $D$  为损伤变量。当  $D=0$  时, 表明界面上不存在损伤; 当  $D=1$  时, 表明界面完全损伤 (断裂或破坏); 当  $0 < D < 1$  时, 表明界面存在一定程度的损伤破坏。可见, 随着单丝拉拔试件划分单元应力的增加, 直至达到给定的损伤阈值 (准则) 时, 单元开始损伤。另外, 由于界面处基体与纤维间的位移具有非连续性, 故而当界面某位置上传递的应力达到界面的剪切强度时, 该处将会出现脱黏现象。

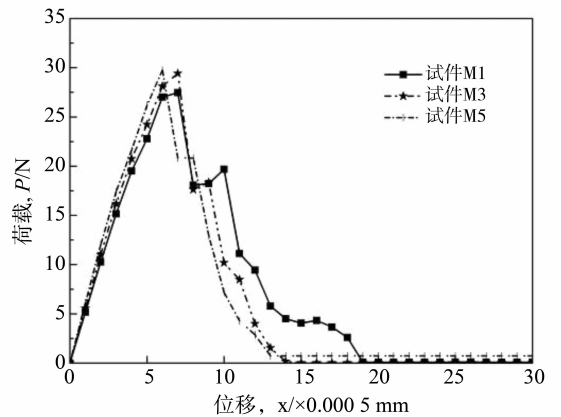
## 2.2 增强增韧效果

图 5 为不同基体强度时单丝拉拔试件的位移 - 荷载曲线。如图所示, 随着基体强度的增加, 单丝拉拔试件的峰值荷载也逐渐增大, 峰值荷载出现的时间也有提前的趋势, 待峰值荷载过后, 曲线也随之下降的越快, 这与杨萌<sup>[6]</sup>、李建辉<sup>[18]</sup> 通过物理试验得到的结论相似。同时, 相对于水泥砂浆基体, 基体强度增加对钢纤维混凝土试件的增强作用更为显著。对比图 (a) 与 (b) 可知, 当钢纤维埋深为 20 mm 时, 随着基体强度的增加, 钢纤维混凝土与同配比的水泥砂浆基体的峰值荷载基本相差不多。

本文仅考虑基体强度变化对界面最大黏结强度的影响, 已知峰值荷载  $P_{\max}$ 、纤维埋置深度  $L_f$  和



(a) 混凝土基体



(b) 水泥砂浆基体

图 5 不同基体强度时单丝拉拔的位移 - 荷载图

Fig. 5 Displacement-load curves of single fiber pull-out test with varied matrix strength

半径  $r_f$ , 即可得到最大界面黏结强度  $\tau_{\max}$ , 如式 (4) 所示:

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{2\pi r_f L_f} \quad (4)$$

表 4 为不同基体强度时界面最大黏结强度汇总表。其中, 以试件 C1 和试件 M1 的界面最大黏结强度为基准, 假设其值为 1.000, 分析其他试件与该试件相对值的变化结果, 并作图 6 以示说明。由图 6 可知, 界面最大黏结强度随着钢纤维混凝土强度的提高而提高, 这与罗兴华<sup>[19]</sup> 关于界面黏结性能的研究结果相吻合。对于水泥砂浆基体而言, 界面的最大黏结强度并不是一直随砂浆强度的增加而增大, 也存在减小的情况。

当混凝土基体强度增加 1.5 倍时, 界面的最大黏结强度提高 17.3%, 而当水泥砂浆基体强度增加 1.5 倍时, 相对应的界面最大黏结强度约提高 3.3%。可见, 钢纤维混凝土试件界面最大黏结强度对基体强度的变化较为敏感, 如图 6 所示, 混凝土基体试件的曲线斜率较大。

表 4 不同基体强度时界面最大黏结强度汇总表

Table 4 Summary of interfacial maximum bond strength with varied matrix strength

基体	最大黏结强度相对值				
	1	2	3	4	5
混凝土	1.000	1.088	1.105	1.173	1.193
水泥砂浆	1.000	1.029	1.071	1.033	1.083

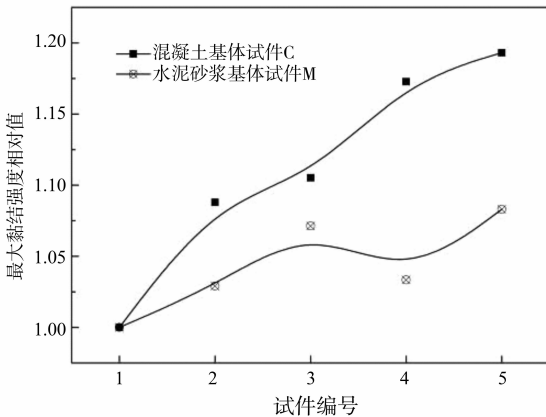


图 6 不同基体强度时界面最大黏结强度相对值

Fig. 6 Relative values of interfacial maximum bond strength of single fiber pull-out test with varied matrix strength

本文将位移 - 荷载曲线下的面积定义为试件的拉拔韧度, 该值可以很好地描述材料的韧性, 有利于研究基体强度对试件拉拔韧度的影响, 拉拔韧度越大, 试件越不可能出现脆性破坏。

通过计算 10 组试件位移 - 荷载曲线下的覆盖面积, 可得到各个试件的拉拔韧度。现分别以 C1 和 M1 的拉拔韧度为基准, 假设其值为 1.000, 分析其他试件与该试件相对值的变化情况, 汇总结果见表 5, 并作图 7 以示说明。

表 5 不同基体强度时拉拔韧度汇总表

Table 5 Summary of pullout toughness with varied matrix strength

基体	拉拔韧度相对值				
	1	2	3	4	5
混凝土	1.000	0.951	0.764	0.787	0.817
水泥砂浆	1.000	0.870	0.853	0.912	0.848

随着基体强度的增加, 试件的拉拔韧度均随之减小。由于本文考虑了钢纤维复合材料的非均匀性, 图 7 所示的两条曲线在下降段波动较大, 基体强度较高时拉拔韧度变化的趋向性不稳定。当混凝土

基体强度增加 1.5 倍时, 拉拔韧度减小 21.3%, 而当水泥砂浆基体强度增加 1.5 倍时, 相对应的拉拔韧度约减小 8.8%。可见, 钢纤维混凝土试件拉拔韧度对基体强度的变化较为敏感, 如图 7 所示。

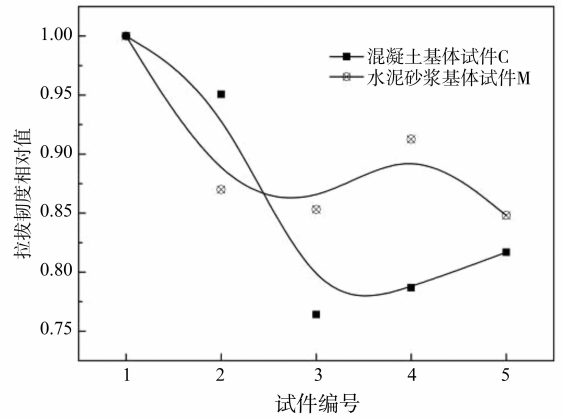


图 7 不同基体强度时拉拔韧度相对值

Fig. 7 Relative values of pullout toughness of single fiber pull-out test with varied matrix strength

### 2.3 声发射

在数值模拟计算中, 单元的损伤量与接收的声发射信号之间呈正比关系<sup>[12]</sup>。通过声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE) 技术<sup>[20-21]</sup>, 可以判断材料内部裂纹 (损伤) 的情况。对于非均匀的钢纤维混凝土材料, 不同组分损伤时释放的能量是不同的, 可以依据能量的不同分析单元损伤的原理。本文假定声发射能量释放率与损伤单元释放的弹性应变能相关, 且能够根据所接收的声发射次数判断单元的损伤数目。

图 8 为不同基体时接收的声发射信号情况。其中, 试件 C3 与试件 M3 具有相同的砂浆配比。如图 8 所示, 在弹性变形阶段, 声发射次数随着荷载的增加逐渐增多, 当试件达到峰值荷载之后, 声发射次数最大, 此时, 由于单元的损伤破坏, 试件中释放的能量也最大。当所施加的荷载继续增大时, 声发射次数开始减少, 在有所回调之后陡然下降, 直至归零, 这时界面已完全脱黏破坏, 纤维与基体间仅剩下滑动摩擦作用, 直至钢纤维被拔出。同时, 由图可知, 最大声发射次数 (或峰值荷载) 出现在界面的局部脱黏阶段。

与试件 C3 相比, 不含骨料的试件 M3 能够接收到更多的声发射信号, 试件 M3 的基体中出现更多裂纹, 释放更多的能量, 如图 4 所示。可见, 骨料对声发射的次数具有一定影响。

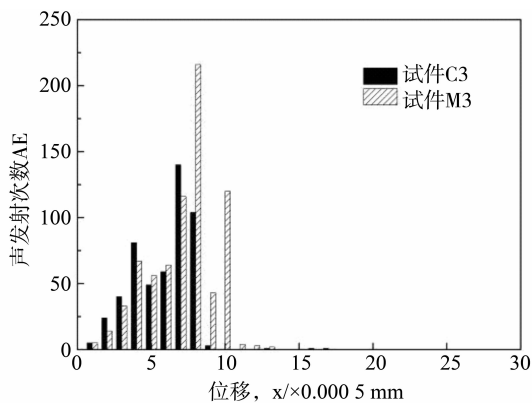


图 8 不同基体的声发射次数

Fig. 8 The acoustic emission of single fiber pull-out test with varied matrix strength

为了进一步研究基体强度对声发射信号的影响, 本文考虑了不同基体强度对累计声发射次数 (Accumulated Acoustic Emission, 简称 AAE) 的影响, 如图 9 所示。由图可知, 水泥砂浆基体的试件能够获得较高的累计声发射次数。随着基体强度的提高, 累计声发射次数随之减小, 且在混凝土基体中, 基体强度变化对累计声发射次数影响甚微。可见, 骨料能够缓解基体中的应力集中, 而且不均匀基体材料强度的提高能够改善基体中单元的抗损伤破坏能力。

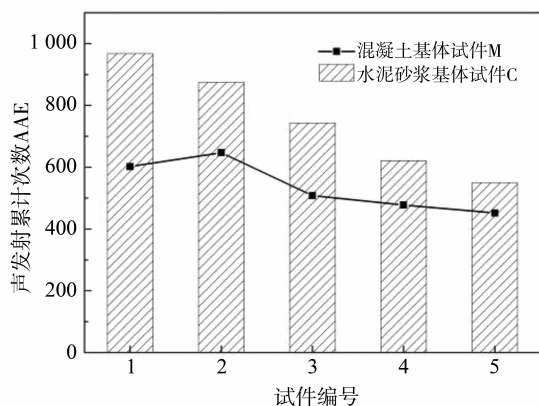


图 9 不同基体强度的累计声发射次数

Fig. 9 Accumulated acoustic emission of single fiber pull-out test with varied matrix strength

### 3 结论

本文利用 RFPA<sup>2D</sup> 有限元软件, 对不同的基体强度情况进行了单丝拉拔试验的数值模拟, 综合考虑了基体强度和骨料对单丝拉拔性能的影响, 得到

相关的剪应力分布曲线和位移-荷载曲线, 并且探讨了基体强度变化对钢纤维增强混凝土试件的增强增韧效果, 同时也对有无骨料所造成的影响进行对比分析。得到如下结论:

1) 在一定基体强度范围内, 当纤维埋深为 20 mm 时, 随着基体强度的提高, 单丝拉拔试件的峰值荷载和界面的最大黏结强度随之提高, 单丝拉拔试件的拉拔韧度开始减小。

2) 基体强度的变化对单丝拉拔整体的损伤破坏过程影响甚微。一般情况下, 随着基体强度的增加, 含有骨料的混凝土基体中出现的裂纹少于水泥砂浆基体。同时, 单丝拉拔试件的峰值荷载一般出现在界面局部脱黏阶段。

3) 与水泥砂浆基体试件相比, 含有骨料的混凝土基体试件对基体强度的变化更为敏感。

### 参考文献:

- [1] 王莹, 赵星明, 王建君. 钢纤维混凝土在房屋建筑工程中的应用[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 255-258.
- [2] 赵国藩, 彭少民, 黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [4] HUGHES B P, DOUDILL J W. Fibre bond strengths in cement and concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1975, 27(92): 161-166.
- [5] 董振英, 李庆斌. 纤维增强脆性复合材料细观力学若干进展[J]. 力学进展, 2001, 31(4): 555-582.
- [6] 杨萌. 钢纤维高强混凝土增强、增韧机理及基于韧性的设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [7] ROBINS P, AUSTIN S, JONES P. Pull-out behaviour of hooked steel fibres[J]. Materials and structures, 2002, 35(7): 434-442.
- [8] GRUNEWALD S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete[M]. Delft, The Netherlands: Delft University Press, 2004.
- [9] SUJIVORAKUL C, WAAS A M, GUERRERO P. Pull-out of a smooth fiber with an end anchorage[J]. ASCE J Mater Civ Eng, 2000, 126(9): 986-993.
- [10] BANHOLZER B, BRAMESHUBER W, JUNG W. Analytical simulation of pull-out tests-the direct problem [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(1): 93-101.
- [11] 杨文龙, 张亚芳, 刘浩, 等. 界面强度对 CFRP-混凝土组合梁弯曲性能的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(6): 28-32.

密度函数的真实本质特性。最后通过对比损伤检测结果,指出准确的 ToF 测量值概率密度函数估计结果对损伤检测结果精度有着直接的影响。

因此,在基于概率的 Lamb 波损伤检测中引入 Botev 核估计方法,首先能够完善整个检测过程方法的理论体系,不再依赖于经验公式;其次,也能够提高基于概率的 Lamb 波损伤检测的可靠性和精度。

### 参考文献:

- [1] LU X, LU M Y, ZHOU L M, et al. Evaluation of welding damage in welded tubular steel structures using guided waves and a probability-based imaging approach [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(1):015018.
- [2] CHEN J G, SU Z Q, CHENG L. Identification of corrosion damage in submerged structures using fundamental anti-symmetric Lamb waves [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(1):015004.
- [3] ZUMPARNO G, MEO M B. A new nonlinear elastic time reversal acoustic method for the identification and localisation of stress corrosion cracking in welded plate-like structures - A simulation study[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44: 3666 - 3684.
- [4] 王强,袁慎芳. 无参考主动 Lamb 波结构损伤时反成像监测方法[J]. *航空学报*, 2010, 31(1): 178 - 183.
- [5] 王瑜,袁慎芳,邱雷,等. 主动 Lamb 波中的空间滤波器结构健康监测[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(6): 794 - 797.
- [6] SU Z Q, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures : A review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295: 753 - 780.
- [7] AJAY Raghavan, CARLOS E S. Cesnik, review of guided-wave structural health monitoring[J]. *The Shock and Vibration*, 2007, 39: 91 - 114.
- [8] 胥保春,袁慎芳,邱雷. Lamb 波与瞬时相位技术在损伤识别中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(3): 240 - 244.
- [9] 张海燕,于建波,孙修立,等. HHT 在 Lamb 波检测信号分析中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(3): 223 - 226.
- [10] WANG D, YE L, SU Z Q, et al. Probabilistic Damage Identification Based on Correlation Analysis Using Guided Wave Signals in Aluminum Plates[J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, 9(2): 133 - 144.
- [11] SU Z Q, WANG X M, CHENG L, et al. On selection of data fusion schemes for structural damage evaluation [J]. *Structural Health Monitoring*, 2009, 8(3):223 - 241.
- [12] SU Z Q, CHENG L, WANG X M, et al. Predicting delamination of composite laminates using an imaging approach[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(7):074002.
- [13] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:78 - 100.
- [14] LILLIEFORS H W. On the kolmogorov-smirnov test for the exponential distribution with mean unknown [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1969, 64:387 - 389.
- [15] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 合肥:中国科技大学出版社,2009:52 - 61.
- [16] 陈希孺,方兆本,李国英,等. 非参数统计[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1989:45 - 52.
- [17] BOTEV Z I, GROTOWSKI J F, KROESE D P. Kernel density estimation via diffusion[J]. *Annals of Statistics*, 2010, 38(5): 2916 - 2957.
- [12] 唐春安,朱万成. 混凝土损伤与断裂 - 数值模拟 [M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [13] 赵燕茹,邢永明,黄建永,等. 数字图像相关方法在纤维混凝土拉拔试验中的应用[J]. *工程力学*, 2010, 27(6):169 - 175.
- [14] ASLANI F, NEJADI S. Bond characteristics of steel fiber and deformed reinforcing steel bar embedded in steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFRSCC) [J]. *Central European Journal of Engineering*, 2012, 2(3):445 - 470.
- [15] 齐雷,张亚芳,陈树坚. 纤维增强脆性基复合材料界面脱粘过程的数值模拟[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2007, 46(6): 48 - 51.
- [16] COX H L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials[J]. *Brit J Appl Phys*,1952, 3: 72 - 79.
- [17] PIGGOTT M R. Load bearing fibre composites [M]. Springer, 2002.
- [18] 李建辉,邓宗才,唐劼,等. 异型粗合成纤维与砂浆基体界面的粘结性能及其微观增强机理[J]. *公路*, 2005, 12: 166 - 169.
- [19] 罗兴华. 钢纤维水泥砂浆与混凝土界面粘结性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
- [20] WEVERS M, LAMBRIGHS K. Application of acoustic emission for SHM: A review [J]. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009.
- [21] AGGELIS D G, SOULIOTI D V, BARKOULA N M, et al. Influence of the fiber chemical coating on the fracture behavior of steel fiber concrete measured by acoustic emission [C]. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V*, 2012: 111.

(上接第 74 页)