

聚乙烯醇(PVA)纤维增强水泥基复合材料 单纤维拔出细观机理研究

谷凡,王凯,包忠彬,胡世超,应傲

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁沈阳110168)

摘要 目的 探索聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)高韧性、应变硬化宏观力学行为的细观机理,为其材料特性设计奠定理论基础。方法 基于黏聚力单元和非线性弹簧连接器,建立单PVA纤维/水泥基体的ABAQUS有限元模型,对单PVA纤维拔出水泥基体的全过程进行数值模拟分析。结果 PVA-ECC单纤维拉拔力-拉拔位移曲线可细分为线弹性阶段、连续脱黏阶段、整体滑移阶段、机械咬合硬化阶段和纤维磨损断裂阶段;纤维与水泥基体之间的传力机制包括剪滞切应力和机械咬合力;随着拉拔力的增加,机械咬合力逐渐成为主要传力机制。结论 水泥基体与纤维之间的机械咬合作用以及纤维表面的磨损是导致纤维断裂的根本原因,通过对纤维表面进行适当处理,可以降低水泥基体在机械咬合硬化阶段对纤维表面的磨损,使纤维断裂模式转变为纤维拔出模式,以更好地控制水泥基体的微裂纹失稳扩展,从而进一步提高PVA-ECC的韧性。

关键词 PVA纤维增强水泥基复合材料;单纤维拔出;粘结界面;细观机理

中图分类号 TU528.58

文献标志码 A

Micro-mechanism Study on the Single Fiber Pullout of PVA Engineered Cementitious Composite

GU Fan, WANG Kai, BAO Zhongbin, HU Shichao, YING Ao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to explore the micro-mechanism of the high toughness and strain-hardening macroscopic mechanical behavior of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC), and to lay a theoretical foundation for its purposeful material property design, based on the cohesive element and nonlinear spring connector, the ABAQUS finite element model of single PVA fiber/cement matrix was established, and the whole process of single PVA fiber pullout from cement matrix was simulated and analyzed. The single fiber pullout force-displacement curve of

收稿日期:2022-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52078309)

作者简介:谷凡(1973—),男,副教授,博士,主要从事结构工程和工程力学等方面研究。

PVA-ECC can be divided into linear elastic stage, continuous debonding stage, overall slip stage, mechanical interaction hardening stage, and fiber wear and fracture stage. The force transfer mechanism between fiber and cement includes shear lag stress and mechanical interaction force. With the increase of pullout force, the mechanical interaction force gradually becomes the main force transfer mechanism. The mechanical interaction effect and the surface wear of fiber are the fundamental causes of fiber fracture. By proper treatment of the fiber surface, the surface wears of fiber by cement can be reduced during the mechanical occlusal strengthening stage, and the fiber fracture mode can be changed to the fiber pullout mode, which can better control the microcrack instability propagation of the cement, and further improve the toughness of PVA-ECC.

Key words: PVA engineered cementitious composite; single fiber pullout; bonding interface; micro-mechanism

聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)具有韧性高、应变硬化以及多裂缝开裂等良好性能^[1],在老旧建筑结构修补与加固处理、高层结构耗能构件以及海洋工程领域具有广阔的应用前景。PVA-ECC是由水泥基体、纤维以及粘结界面组成的三相体系,在外荷载作用下,水泥基体通常先发生破坏并在其内部产生微裂缝;聚乙烯醇(PVA)纤维在水泥基体微裂缝处发挥桥接作用以限制微裂缝失稳扩展,从而提高PVA-ECC延性^[2]。PVA-ECC的增韧效应是纤维与水泥基体相互作用的结果,PVA-ECC吸收能量以及控制裂纹扩展的方式包括纤维拉伸、界面脱黏、纤维拔出和纤维断裂^[3]。Y. Zhou等^[4]基于分子动力学揭示了纤维与水泥基体之间的相互作用机制。E. Wolfel等^[5]探索了纤维性能对纤维与水泥基体相互作用以及破坏机理的影响规律。此外,PVA-ECC宏观力学性能与粘结界面的性质也有着密切关系。C. Redon等^[6]测定了PVA纤维的原位强度,发现在纤维表面涂抹油层可以降低界面强度,并能够促进纤维的拔出,从而达到提高PVA-ECC延性和耗能能力的效果。

事实上,PVA-ECC是由PVA纤维、胶凝材料、粘结界面以及孔洞缺陷组成的多相复合材料,常规纤维拔出试验难以从微观层次揭示PVA-ECC的增韧机理。纤维与基体之间的相互作用是三维问题,而目前通常将单纤维拔出

模型简化为二维平面问题^[7],将PVA纤维与水泥基体的原生界面等效为双线性本构模型^[8],并结合剪滞理论进行相关研究^[9],这将对研究结果造成较大误差。基于此,笔者采用ABAQUS软件对PVA-ECC的单纤维拔出过程进行精细化数值模拟和更加细致的阶段划分,揭示PVA-ECC增韧微观机理,为其宏观力学性能参数的优化设计提供参考。

1 数值模型

1.1 数值模型的建立

参照文献[6]中的试验试件,采用ABAQUS软件建立单纤维拔出数值模型。其中,纤维长6.0 mm、直径0.04 mm,水泥基体为直径2.5 mm、高6.0 mm的圆柱体,纤维轴线与水泥基体轴线重合。

纤维增强水泥基复合材料的单纤维拔出过程可分为两个阶段:纤维与水泥基体之间的脱黏阶段、纤维与水泥基体完全脱黏后的相对滑移阶段。在脱黏阶段,纤维与基体之间的化学胶结作用不断失效。笔者在纤维与水泥基体之间设置几何厚度为0、计算厚度为1的八结点三维黏聚力COH3D8单元,以模拟纤维与水泥基体之间的脱黏过程,该单元通过定义纤维与水泥基体之间剪切力-相对分离位移的宏观物理关系来表示纤维与水泥基体之间的微观脱黏过程。PVA纤维属于亲水性纤维^[10],其脱黏强度受到界面化学脱黏能和纤

维/界面/基体之间摩擦力的共同影响,前者占比很大^[11]。笔者主要考虑界面化学脱黏这一因素,假设粘结界面服从纯剪切模式下的双线性本构关系^[8],见图1所示。

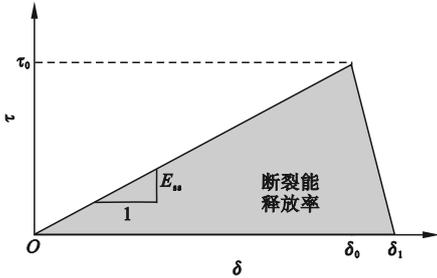


图1 粘结界面纯剪切双线性本构模型

Fig. 1 The bilinear constitutive model of bonding interface

当界面切应力 τ 达到界面脱黏强度 τ_0 后,界面处于持续性分离破坏状态,切应力随着粘结界面牵引分离度的增加(在数值模型中体现为粘结界面单元的退化)而降低,直至界面完全脱黏破坏^[12]。根据文献[6]试验数据确定 PVA 纤维与水泥基体之间的粘结界面本构参数:界面断裂能释放率 $G_d = 0.176 \text{ kJ/m}^2$ 、界面名义相对分离模量 $E_{ss} = 5.0 \text{ GPa/m}$ 、界面脱黏强度 $\tau_0 = 1.26 \text{ MPa}$,据此可以得到界面初始脱黏相对分离位移 $\delta_0 = 0.25 \text{ mm}$ 、界面完全脱黏相对分离位移 $\delta_1 = 0.28 \text{ mm}$ 、粘结界面的其他本构参数如表1所示。

表1 材料的本构参数

Table 1 The constitutive parameters of materials

组分	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度 f_c / MPa	抗拉强度 f_t / MPa	极限拉伸强度 σ_t / MPa	拉伸断裂应变 ϵ_f	界面脱黏强度 τ_0 / MPa
纤维	42.8	0.3	1 200	—	—	1 640	0.06	—
基体	34.6	0.2	2 100	33.6	2.73	—	—	—
界面	52.0	0.3	2 100	—	—	—	—	1.26

在完全脱黏后的滑移阶段,纤维与水泥基体之间将发生相对滑动并产生摩擦力。根据文献[6]试验数据可以得到滑移过程中纤维与水泥基体之间摩擦力与相对滑移位移的非线性关系,如图2所示。笔者采用 Python

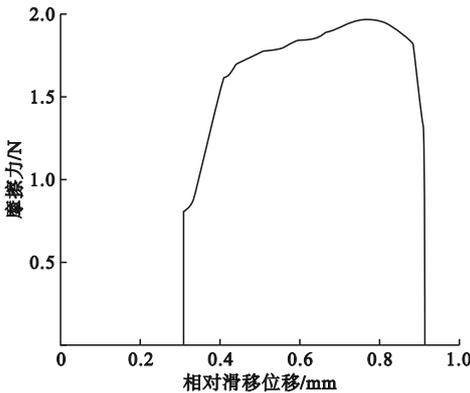


图2 滑移阶段纤维与水泥基体之间摩擦力与相对滑移位移的非线性关系

Fig. 2 The nonlinear relationship between fiber/cement friction force and relative slip displacement in slip stage

脚本批量生成 8 040 个非线性弹簧连接器,以模拟纤维与水泥基体之间的滑移过程,非线性弹簧连接器力学模型如图3所示,其中刚度系数 k 根据图2进行设定,阻尼系数 c 设定为常数,其作用是消除显式动力求解器(采用准静力分析方法)在计算力-位移曲线过程中产生的数值抖动,笔者选取 $c = 1.0 \times 10^{-5} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

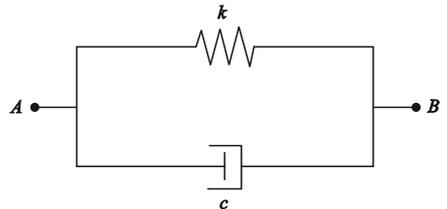


图3 非线性弹簧连接器力学模型

Fig. 3 The mechanical model of nonlinear spring connector

1.2 网格划分

纤维与水泥基体采用八结点减缩积分实

体单元 C3D8R, 粘结界面采用三维八节点黏聚力 COH3D8 单元。采用网格过渡技术以平衡计算精度与计算时间之间的矛盾, 对于纤维以及纤维周围一定范围内的水泥基体进行网格加密处理, 对于远离纤维的水泥基体区域逐渐加大网格尺寸, 数值模型单元总数为 523 858 个, 如图 4 所示。

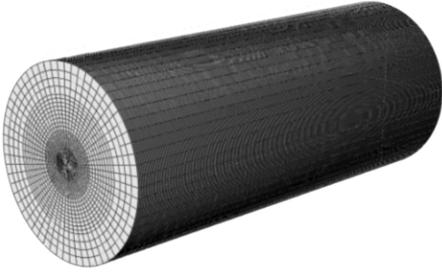


图 4 有限元模型

Fig. 4 The finite element model

1.3 材料本构参数设置

纤维采用损伤弹塑性本构模型, 纤维的弹塑性本构参数以及纤维的断裂应变根据文献[13]进行选取(见表1); 纤维的损伤本构采用 Johnson-Cook 动态损伤本构模型, 即以纤维累计损伤来表示纤维的破坏过程:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 、 ε 分别为纤维的轴向应力与轴向应变; $\dot{\varepsilon}$ 为纤维应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, 通常取值为 1 s^{-1} ; T_{room} 、 T_{melt} 分别为室温与纤维熔点; A 为室温条件下纤维的初始屈服应力, MPa; B 为纤维的应变硬化模量; C 为纤维的应变率常数; n 为纤维的应变硬化指数; m 为纤维的热软化指数。

本研究不涉及温度场的变化, 因此式(1)等号右侧的第三项取值为 1。根据文献[14]确定纤维动态损伤本构模型中参数: $A = 1\ 640 \text{ MPa}$, $B = 1$, $C = 1$, $n = 0.551$, $m = 0.859$ 。

水泥基体采用混凝土损伤塑性本构模型^[15-16], 目前广泛用于描述混凝土材料在往

复加载和动态加载过程中由于损伤所导致的刚度退化和塑性变形, 笔者根据文献[13]选取水泥基体塑性阶段的损伤因子-应力-非弹性应变之间的关系, PVA 纤维与水泥基体之间的黏聚力界面采用粘结裂缝模型^[17]以及虚拟裂缝模型, 其本构模型采用图 1 所示的双线性模型。

2 PVA-ECC 单纤维拔出微观机理

数值模拟得到 PVA-ECC 单纤维拉拔力-拔出位移曲线如图 5 所示。可分为线弹性阶段、连续脱黏阶段、整体滑移阶段、机械咬合硬化阶段和纤维磨损断裂阶段。

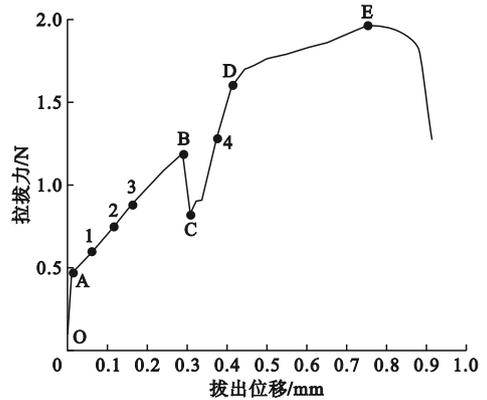


图 5 单纤维拉拔力-拔出位移曲线

Fig. 5 The pullout force-displacement curve of single fiber

(1) 线弹性阶段(OA)。纤维拔出位移随着拉拔力的增加而近似线性增加。在 A 点处, 纤维拉拔力为 0.47 N, 纤维 Mises 应力沿轴向方向从加载端向自由端呈降低趋势, 最大值为 370.9 MPa, 如图 6(a) 所示; 纤维与水泥基体之间的剪滞传力机制集中在纤维加载端附近区域, 该区域水泥基体基本上处于纯剪切状态, 且水泥基体应力在径向方向上呈快速降低趋势, 第一主应力最大值为 1.84 MPa, 绝对值最大的第三主应力为 -1.13 MPa, 如图 6(b)、(c) 所示。总体来看, OA 弹性阶段纤维和水泥基体均处于线弹性状态。

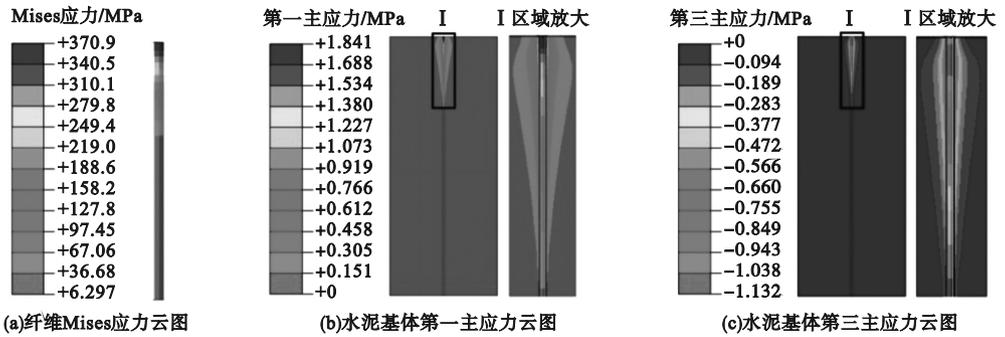


图6 纤维与水泥基体的应力云图(图5中A点)

Fig. 6 The stress distribution of fiber and cement(point A in Fig. 5)

(2) 连续脱黏阶段(AB)。随着拉拔力的增加,界面切应力峰值不断内移且因达到脱黏强度而导致界面失效,界面沿轴向方向发生连续性脱黏现象。采用 ABAQUS 有限元软件中的生死单元技术,将脱黏失效的界面单元进行单元删除,对应于图5中A点、1、2、3点的界面脱黏状态如图7所示。在界面连续脱黏过程中,脱黏段的纤维与水泥基体之间的静摩擦力代替了原有的界面粘结力,因此纤维拉拔力随着界面脱黏段的蔓延而不断增加。在图5所示的B点处,纤维拉拔力为1.18 N,此时界面完全脱黏;纤维 Mises 应力最大值为960.9 MPa,仍处于弹性状态,如图8(a)所示。在图5所示的B点处,水泥基体的应力场分布情况:剪滞切应力 τ_{rz} 沿轴向方向近似均匀分布,沿径向方向呈递减趋势,在纤维外表面处 $\tau_{rz} \approx 1.26$ MPa,如图8(b)所示;在纤维加载端局部区域内,存在轴向压应力(绝对最大值为-4.94 MPa)和径向压应力(绝对最大值为-6.22 MPa),并沿径向方向快速降低,如图8(c)、(d)所示;纤维加载端局部区域内的径向压应力导致该区域产生环向拉应力(最大值为1.44 MPa),而该区域的核心区(即纤维外表面处)则存在环向压应力(绝对最大值为-5.52 MPa),如图8(e)所示。总体来看,在图5所示的B点处,纤维加载端局部区域内的水泥基体处于三向复杂应力状态,其余区域的水泥基体处于纯剪切应力状态,其第一、第三主应力云图如图8

(f)、(g)所示。

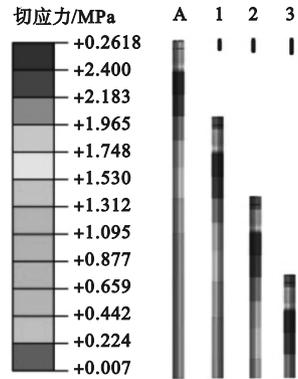


图7 界面层连续脱黏

Fig. 7 The continuous debonding of interfacial layer

(3) 整体滑移阶段(BC)。在图5所示B点处,界面完全脱黏,纤维与水泥基体之间将发生短暂的整体相对滑动,并以滑动摩擦力代替原有的静摩擦力,进而导致拉拔力出现瞬时下降现象。在这个过程中,纤维 Mises 应力随之下降,水泥基体内部应力重分布,并在图5所示C点处达到新的平衡状态,此时纤维拉拔力为0.81 N,纤维 Mises 应力最大值为646.6 MPa,如图9(a)所示;水泥基体应力场分布情况与图5所示B点处的应力场分布情况相似,剪滞切应力 τ_{rz} 沿轴向方向均匀分布,沿径向方向呈递减趋势,在纤维外表面处 $\tau_{rz} \approx 1.08$ MPa,如图9(b)所示;在纤维加载端局部区域内,存在轴向压应力(绝对最大值为-16.12 MPa)、径向压应力(绝对最大值为-25.10 MPa)和环向压应力(绝对最大值为-29.77 MPa),且径向压应力区

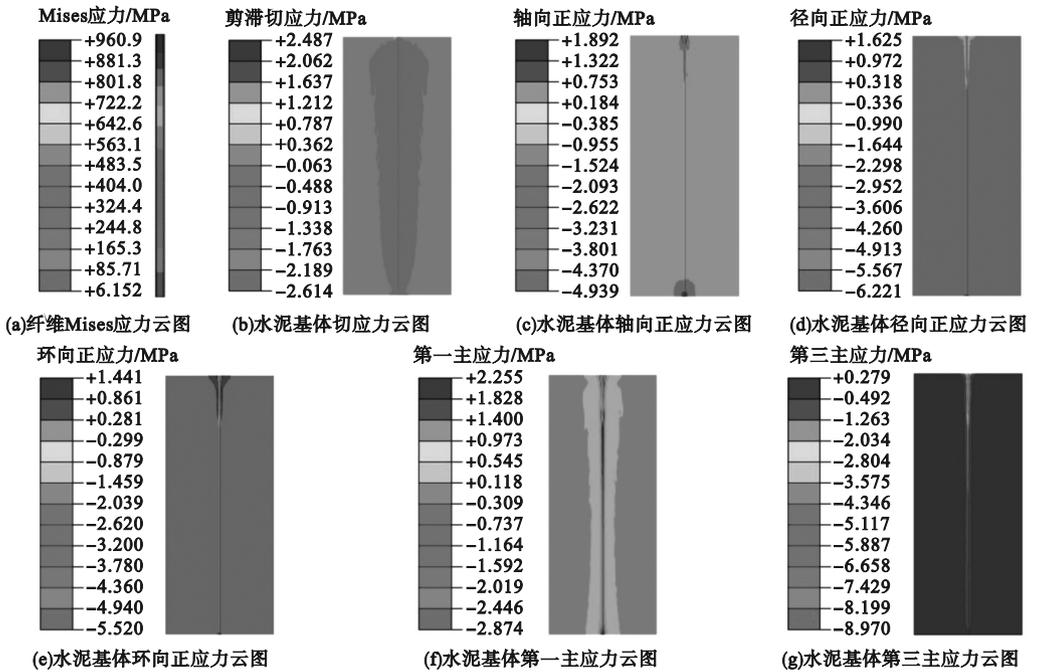


图8 纤维与水泥基体的应力云图(图5中B点)

Fig. 8 The stress distribution of fiber and cement(point B in Fig. 5)

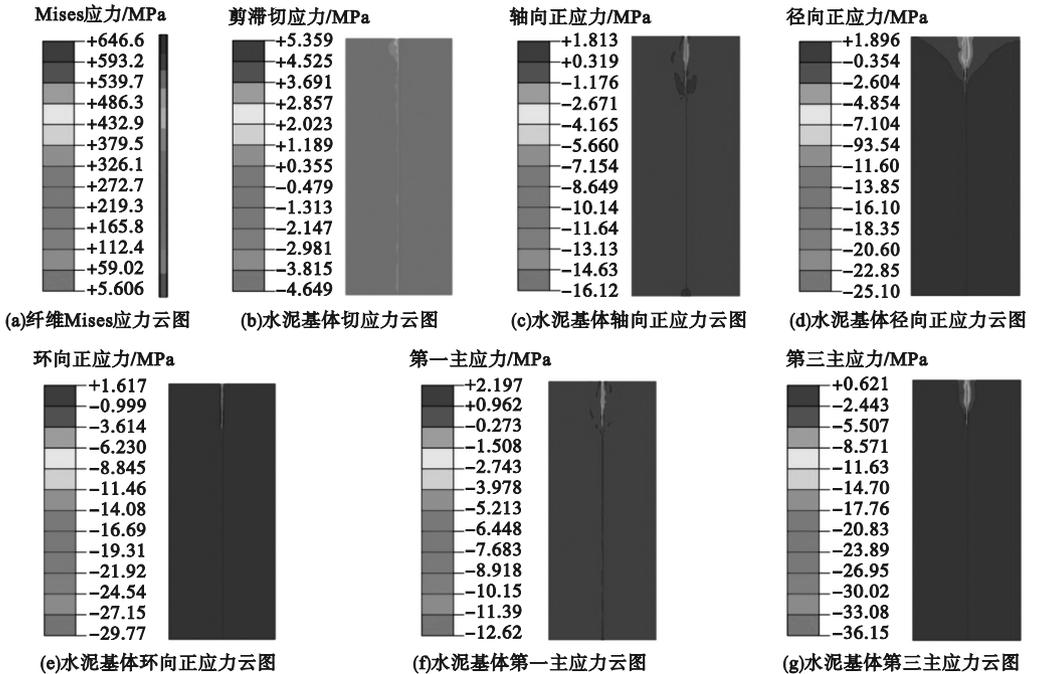


图9 纤维与水泥基体的应力云图(图5中C点)

Fig. 9 The stress distribution of fiber and cement(point C in Fig. 5)

沿径向方向扩展为圆锥状区域,如图9(c)、(d)、(e)所示。总体来看,在整体滑移应力重分布阶段后的新平衡状态下,大部分区域的水泥基体依然处于纯剪切应力状态,纤维Mises应力、纤维/水泥基体剪滞切应力比图

5所示B点状态下下降32.7%;在纤维加载端附近区域的水泥基体处于三向受压状态,其第三主应力达到了-36.15 MPa,导致该区域水泥基体出现压溃脱落现象,如图9(f)、(g)所示;此时纤维与水泥基体之间的传力

机制包括两方面:沿轴向方向均匀分布的剪滞切应力、纤维加载端附近的圆锥状三向受压传力区,并且后者逐渐成为主要传力机制。

(4) 机械咬合硬化阶段(CD)。随着拉拔力的增加,纤维加载端附近圆锥状三向受压传力区的范围逐渐扩大,水泥基体中的轴向压应力区、环向压应力区沿轴向方向向自由端扩展,如图 10 所示;水泥基体中的径向压应力区沿轴向方向、径向方向同时扩展,如图 11 所示。在纤维加载端附近的圆锥状三向受压区,核心区域(即纤维外表面处)的水

泥基体出现压溃脱落现象,导致纤维与水泥基体之间形成机械咬合力。随着拉拔力的增加,水泥基体损伤区域、纤维与水泥基体之间的机械咬合区域同步沿轴向方向向自由端扩展,导致宏观硬化现象;纤维/水泥基体剪滞切应力逐渐降低,纤维加载端附近圆锥状区域内的机械咬合作用逐渐成为纤维与水泥基体之间的主要传力机制;在图 5 所示 D 点处的纤维拉拔力为 1.60 N,纤维 Mises 应力最大值为 1 268.0 MPa,比 C 点处状态提高约 96.1%。

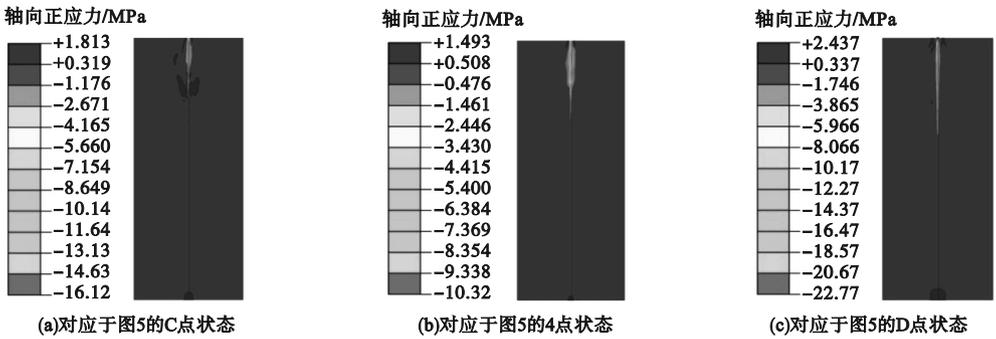


图 10 机械咬合硬化阶段的水泥基体轴向正应力变化过程

Fig. 10 The variations of axial normal stress distribution in cement matrix during mechanical interaction stage

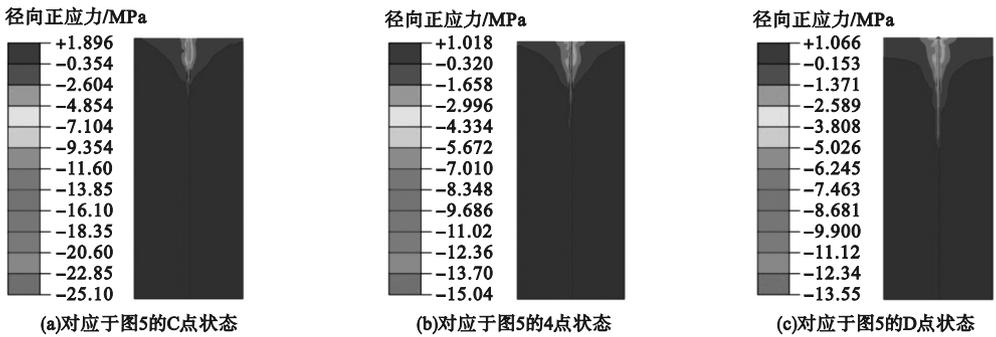


图 11 机械咬合硬化阶段的水泥基体径向正应力变化过程

Fig. 11 The variations of radial normal stress distribution in cement matrix during mechanical interaction stage

(5) 纤维磨损断裂阶段(DE)。纤维与水泥基体之间机械咬合作用不断加剧,并在纤维加载端区域随机出现外表面磨损现象。随着拉拔力的增加,纤维磨损程度不断加剧,纤维有效横截面积不断降低,最终导致在纤维磨损最严重部位处发生颈缩正断。随着拉拔力的增加,水泥基体中的轴向压应力区、径向压应力区和环向压应力区沿轴向方向向自

由端快速扩展,并在径向方向上收缩聚拢。

3 结 论

(1) PVA-ECC 单纤维拔出过程可细分为 5 个阶段:①线弹性阶段,纤维和水泥基体处于线弹性状态,传力机制为剪滞切应力,集中在纤维加载端区域;②连续脱黏阶段,界面切应力峰值不断内移并导致沿轴向方向发生

连续性界面脱黏现象;③整体滑移阶段,界面完全脱黏后,纤维与水泥基体之间发生短暂的整体相对滑动,拉拔力出现瞬时下降现象;④机械咬合硬化阶段,在纤维加载端附近圆锥状三向受压核心区域(即纤维外表面处)的水泥基体压溃脱落,导致纤维与水泥基体之间形成机械咬合力并出现宏观硬化现象,纤维/水泥基体剪滞切应力逐渐降低,机械咬合作用逐渐成为纤维与水泥基体之间的主要传力机制;⑤纤维磨损断裂阶段,纤维与水泥基体之间发生剧烈机械咬合作用,并在纤维外表面随机出现磨损现象,最终导致在纤维磨损最严重部位处发生颈缩正断。

(2)PVA 纤维为亲水性材料,未经界面处理的PVA 纤维与水泥基体之间的界面强度较大,在拉拔过程中往往出现硬化现象。

(3)水泥基体与纤维之间的机械咬合力以及对水泥基体对纤维表面的磨损作用是导致纤维断裂的根本原因。从降低纤维磨损的角度出发,通过对纤维表面进行适当处理,可以降低水泥基体在机械咬合硬化阶段对纤维表面的磨损,使纤维断裂模式转变为纤维拔出模式,可以进一步提高PVA-ECC的韧性。

参考文献

[1] 徐世焯,李贺东.超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J].土木工程学报,2009,42(9):32-41.
(XU Shilang,LI Hedong.Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. China civil engineering journal,2009,42(9):32-41.)

[2] 闻洋,陈伟.聚乙烯醇纤维混凝土早期抗裂抗渗性能试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(2):267-274.
(WEN Yang,CHEN Wei.Effect of polyvinyl alcohol fiber on anti-cracking and impermeability of concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2018,34(2):267-274.)

[3] ZOLLO R F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development [J]. Cement and concrete composites,1997,19(2):107-122.

[4] ZHOU Y, HUANG J L, YANG X, et al. Enhancing the PVA fiber-matrix interface properties in ultra high performance concrete: an experimental and molecular dynamics study [J]. Construction and building materials, 2021,285(1):1-12.

[5] WOLFEL E, BRUNIG H, CUROSU I, et al. Dynamic single-fiber pull-out of polypropylene

fibers produced with different mechanical and surface properties for concrete reinforcement [J]. Materials,2021,14(722):1-20.

[6] REDON C, LI V C, WU C, et al. Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix [J]. Journal of materials in civil engineering,2001,13(6):399-406.

[7] 张慧.纤维混凝土复杂破坏过程的离散-连续耦合细观有限元模拟[D].杭州:浙江大学,2018.
(ZHANG Hui. A discrete-continuum coupled meso-scale finite element model for simulation of complicated failure modes in fibre reinforced concrete [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2018.)

[8] LI V C, WU C, WANG S X, et al. Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. ACI materials journal, 2002, 99(5):463-472.

[9] CHEN Z R, YAN W Y. A shear-lag model with a cohesive fibre-matrix interface for analysis of fibre pull-out [J]. Mechanics of materials,2015,91(1):119-135.

[10] CUROSU I, MECHTCHERINE V, FORNI D, et al. Performance of various strain-hardening cement-based composites (SHCC) subject to uniaxial impact tensile loading [J]. Cement and concrete research,2018,102:16-28.

[11] GUO L P, LEI D Y. Effect of fiber type and fiber hybrids on strain-hardening and multiple cracking properties of the ultra-high performance cementitious composites under uniaxial loads [C]//The 8th international conference on concrete under severe conditions environment and loading. Italy:[s. n.],2016. 187-194.

[12] LEI D Y, GUO L P, LI Y, et al. Micro-mechanical model for ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC) [J]. Construction and building materials,2021,267:1-13.

[13] 李贺东.超高韧性水泥基复合材料试验研究[D].大连:大连理工大学,2008.
(LI Hedong. Experimental research on ultra high toughness cementitious composites [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2008.)

[14] 柳爱群,黄西成.高应变率变形的Johnson-Cook动态本构模型参数识别方法[J].应用数学和力学,2014,35(2):219-225.
(LIU Aiqun,HUANG Xicheng. Identification of high-strain-rate material parameters in dynamic Johnson-Cook constitutive model [J]. Applied mathematics and mechanics, 2014,35(2):219-225.)

[15] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International journal of solids and structures, 1989,25(3):299-326.

[16] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of engineering mechanics, 1998, 124(8):892-900.

[17] CHEN Z, YAN W. A shear-lag model with a cohesive fibre-matrix interface for analysis of fibre pull-out [J]. Mechanics of materials, 2015,91(1):119-135.

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)