

水泥基体中仿生钢纤维的拔出试验*

朱德举^{1,2†},李向阳^{1,2},史才军^{1,2},徐新华³

(1. 湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;3. 南通东泰新能源设备有限公司,江苏 启东 226200)

摘要:从仿生学的角度制备端部具有不同锥角($0^\circ, 2^\circ, 5^\circ, 7^\circ$)的异形钢纤维,根据纤维表面是否处理分为有化学黏结与无化学黏结2种,并使用MTS万能试验机测试了仿生异形钢纤维从水泥砂浆基体中以不同速率(2.5 mm/min, 25 mm/min, 250 mm/min)拔出的力和位移,并计算得到最大拔出力 and 拔出功.结果表明,当钢纤维端部锥角从 0° 增加到 5° 时,最大拔出力有明显的增加,但 7° 时稍有减小;对于 5° 及 7° 锥角的钢纤维,随着加载速率从2.5 mm/min增大到250 mm/min,钢纤维的最大拔出力分别增大20.2%和13.4%;而 0° 及 2° 锥角钢纤维在加载速率增加到250 mm/min时,最大拔出力相对于加载速率为25 mm/min时的最大拔出力分别减小25.9%和8.2%; $0^\circ, 2^\circ$ 和 5° 有黏结钢纤维的最大拔出力与相同锥角无黏结钢纤维的最大拔出力相比,分别增加64.1%,22.2%和6.7%,而 7° 锥角有黏结钢纤维的最大拔出力比无黏结钢纤维的最大拔出力减小6.2%;3种加载速率下, 2° 锥角钢纤维拔出力所做的功最大,纤维表面是否处理对拔出功无明显影响;本文设计的异形钢纤维能有效增强钢纤维与水泥砂浆基体的等效黏结强度.

关键词:钢纤维;锥角;加载速率;最大拔出力;拔出功

中图分类号:TU599

文献标志码:A

Pullout Test of Bio-inspired Steel Fiber from Cementitious Matrix

ZHU Deju^{1,2†}, LI Xiangyang^{1,2}, SHI Caijun^{1,2}, XU Xinhua³

(1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Nantong Dawntine New Energy Equipment Co, Ltd, Qidong 226200, China)

Abstract: In this study, tapered steel fibers with various angles ($0^\circ, 2^\circ, 5^\circ$, and 7°) were designed in the point view of biomimetic. The surfaces of the fibers were classified into chemical bonding and no chemical bonding based on whether their surfaces were treated or not. The fibers were pulled out from cementitious matrix under various loading speeds (2.5 mm/min, 25 mm/min, and 250 mm/min) using a MTS load frame. Pullout force and displacement of the fiber were recorded for further calculation of maximum pullout force and work of pullout. The experimental results show that the maximum pullout force increases significantly when the taper angle increases from 0° to 5° , but decreases slightly when the angle is 7° . The maximum pullout force increases by 20.2% and 13.4% with the pullout speed increasing from 2.5 mm/min

* 收稿日期:2016-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778220), National Natural Science Foundation of China(51778220); 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2016GK4016), Major Sci-Tech Research and Technological Achievements Transformation of Strategic Emerging Industry in Hunan Province (2016GK4016)

作者简介:朱德举(1978—),男,山东济宁人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

to 250mm/min for 5° and 7° fibers, respectively. The maximum pullout force decreases by 25.9% and 8.2% for 0° and 2° fiber when pullout speed increases from 25 mm/min to 250 mm/min, respectively. The maximum pullout force for untreated fibers are 64.1%, 22.2% and 6.7% higher than that for treated fiber when the taper angles are 0° , 2° and 5° , respectively. However, for the fibers with 7° taper angle, the maximum pullout force of untreated fiber is 6.2% lower than the treated ones. The work of pullout for 2° fiber is the largest under three various speeds. There is no obvious effect on the work of pullout whether the fiber is treated or not. The tapered fibers designed in this work can effectively enhance equivalent adhesive strength between the fiber and cement mortar matrix.

Key words: steel fiber; taper angle; pullout speed; maximum pullout force; work of pullout

钢纤维混凝土是在普通混凝土中掺入钢纤维所形成的一种新型多相复合材料.钢纤维在混凝土中随机分布,能抑制基体混凝土裂缝的发生及扩展,从而使得钢纤维混凝土具有更高的抗裂、抗拉、韧性和吸收变形能的性能^[1-2].钢纤维的掺入能提高RPC的抗疲劳性能^[3].现已有各种钢纤维混凝土在实际的建筑工程、水利工程、道路桥梁工程中得到应用,有着良好的效果^[4-6].钢纤维水泥砂浆与钢筋搭配可用于结构柱体的加固,并有良好的效果^[7].钢纤维混凝土所用钢纤维有平直钢纤维及异形钢纤维,异形钢纤维在钢纤维混凝土中有广泛的应用.异形钢纤维根据形状的不同,有波浪形、端钩形、哑铃形、剪切形等,这些类型的钢纤维对混凝土性能增强作用的显著程度各有不同^[8],因此寻求更优类型的钢纤维来替代原有钢纤维就非常必要.

珍珠母的堆垛微结构具有微观的哑铃形结构^[9],其组成单元文石板片具有渐变厚度的几何特征(两端稍厚),使堆垛结构中的文石板片相互滑动时能够咬合锁定,从而使珍珠母的韧性是其组成矿物(文石)的3000倍^[10].Humburg等^[9]研究了一种端部放大钢纤维在环氧树脂中的拔出试验,试验表明钢纤维端部的锥角能增加钢纤维从环氧树脂中拔出的最大拔出力 and 拔出功.骨形纤维具有增强纤维复合材料的强度及韧性的能力^[11].短骨形聚乙烯纤维与聚酯基体复合材料的强度比直纤维增强复合材料高9倍^[12].

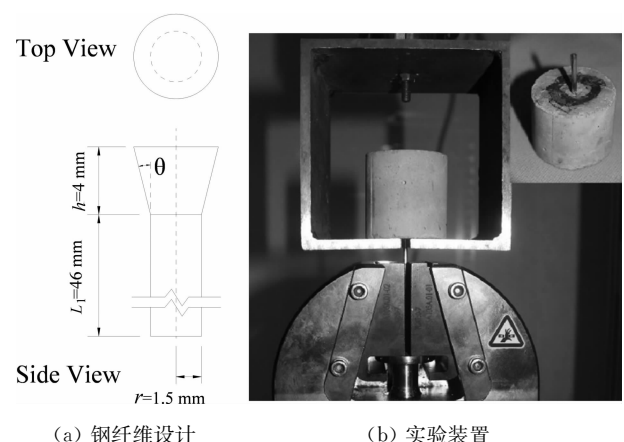
本文借鉴了这种微观结构,设计出端部带锥角的钢纤维,并进行了一系列拔出试验,重点研究了钢纤维端部的锥形形状对钢纤维与水泥砂浆基体间黏结作用的增强效果.试验中以不同锥角、不同加载速率、是否采用脱模剂处理钢纤维表面作为试验变量.测试出各种条件下钢纤维的最大拔出力 and 拔出功.采用最优设计的仿生纤维可以防止基体过早

开裂并显著增加纤维的拔出耗能,意味着钢纤维增强复合材料韧性的提高.通过对本文设计的钢纤维进行一系列的试验,为对钢纤维进行进一步优化和实际应用提供参考.

1 单根纤维拔出试验

1.1 仿生异形钢纤维设计

本试验设计的钢纤维横截面为圆形,横截面半径(r)在钢纤维腹部为1.5 mm,在端部按一定锥角逐渐放大.端部锥角有4种,分别为 0° , 2° , 5° 和 7° .钢纤维总长度(L)为50 mm,其中端部锥角部分长度(h)为4 mm(如图1(a)所示).钢纤维采用304不锈钢制作(抗拉强度 ≥ 520 MPa,屈服强度 ≥ 205 MPa,弹性模量=193 GPa).将直径为3 mm(± 0.03 mm)的钢纤维加热软化后放入模具,然后压制成型.制成的异形钢纤维端部直径应为 $D = 2r + 2h \tan\theta$,用电子千分尺对制成的钢纤维端部直径进行检测(每种角度钢纤维测试5根),测得 2° , 5° 和 7° 钢纤维端部直径的平均值(标准差)分别为(单位



(a) 钢纤维设计

(b) 实验装置

图1 钢纤维设计和实验装置

Fig.1 Steel fiber and experimental setup

mm): 3.290 (0.0187), 3.706 (0.0207), 3.978 (0.0164).

1.2 试件设计与制作

单根纤维拔出测试的试件如图 1(b)所示.使用材料包括 P.O.32.5 水泥、标准砂、粉煤灰及 HSC 聚羧酸高性能减水剂.水泥砂浆基体配合比为水泥:砂:水:粉煤灰:减水剂=1:1:0.35:0.15:0.002,水胶比为 0.304.将钢纤维锥角一端埋入水泥砂浆基体中,基体为圆柱形(直径 50 mm,高 50 mm).钢纤维埋入深度为 20 mm,并与砂浆基体表面垂直.各种角度钢纤维试件数量见表 1.为了研究基体与钢纤维化学黏结力的影响,在部分钢纤维表面涂上数层脱模剂,避免钢纤维与水泥砂浆产生化学黏结^[9].所有试件在标准养护条件(湿度 95%以上,温度为 20℃±2℃)下养护 28 d 后取出进行拔出测试.

1.3 测试方法

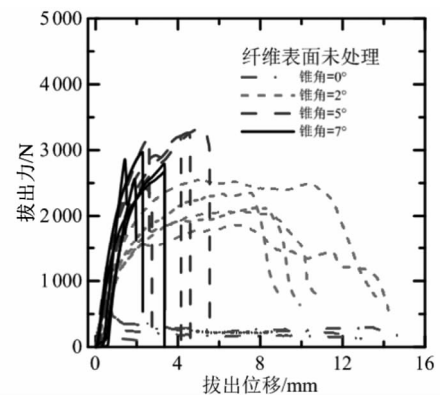
本试验在 MTS-C43 微机控制万能试验机上完成,试件夹持装置如图 1(b)所示,上部与荷载传感器连接,由荷载传感器采集实时拔出力.由试验机夹头测得实时拔出位移,自制夹持装置与试验机夹头紧密连接,可不考虑自制夹持装置带来的位移误差.钢纤维从下部孔中穿过并固定于实验机的夹具内,钢纤维暴露在基体与夹具之间的长度为 12 mm.应用 Quach 等^[13]提出的全局三段式不锈钢应力-应变模型,对本试验钢纤维的变形进行验算,在拔出力为 4 142 N(试验中出现的最大拔出力)时,钢纤维产生的应变为 0.005 66,则钢纤维暴露段的伸长量为 0.068 mm,这相对于钢纤维的拔出位移极小,可忽略不计.该试验机机架的负荷量程范围为 100 N~30 kN,数据采集频率最大可达 1 000 Hz,控制器分辨率为 20 bit.采用 30 kN 力传感器,数据采集频率为 20 Hz.试验采用速率控制方式,采用 3 种不同的速率(2.5 mm/min, 25 mm/min, 250 mm/min)将一端埋入基体的钢纤维拔出.各种钢纤维试件测试数量见表 1.

表 1 各角度钢纤维试件测试数量
Tab.1 Number of tested steel-fiber specimens of various taper angles

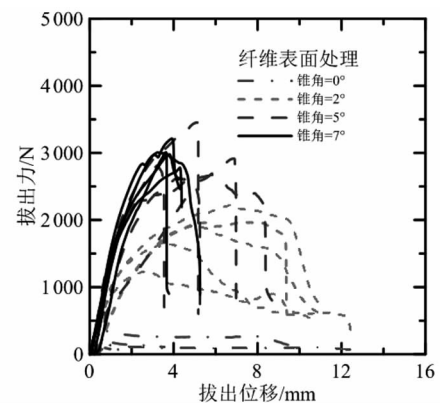
加载速率/ (mm·min ⁻¹)	试件测试数量				表面处理
	0°	2°	5°	7°	
2.5	5	5	5	5	否
25	2	5	5	5	否
250	3	5	5	5	否
2.5	4	5	5	5	是

2 试验结果

图 2 和图 3 给出了不同加载速率(2.5 mm/min, 25 mm/min, 250 mm/min)下,各种角度(0°, 2°, 5°和 7°)钢纤维的拔出力-位移曲线.从图 2 和图 3 可看出,0°锥角钢纤维拔出的力在试验初期随着拔出位移的增大而增大,达到最大值后缓慢减小,并且在很长的拔出位移范围内相对保持稳定,试验结束时拔出位移较大.2°锥角钢纤维拔出力在试验初期随着拔出位移的增大而增大,增大速率随着拔出位移的增加明显减小,拔出力达到最大值后并未急剧减小.5°和 7°锥角钢纤维拔出的力-位移曲线相似,拔出力在试验初期随着拔出位移的增大而迅速增大,增加速率随着拔出位移的增加而有所放缓.当拔出力达到最大时,水泥砂浆基体瞬间炸裂成 2 或 3 部分,基体对纤维的约束瞬间消失,此时曲线急剧下降,拔出位移亦在此时达到最大,试验立刻停止.



(a) 无表面处理



(b) 有表面处理

图 2 钢纤维拔出测试的力-位移曲线(2.5 mm/min)
Fig.2 Experimental pullout force vs. displacement curves of steel fiber (2.5 mm/min)

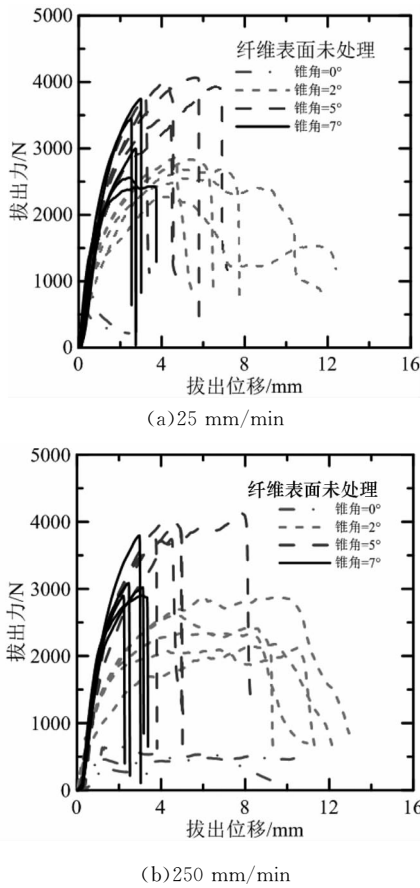


图 3 不同加载速率时各角度钢纤维拔出的力-位移曲线

Fig.3 Experimental pullout force vs. displacement curves of steel fiber with various angles at different speeds

3 结果讨论

3.1 锥角角度、加载速率、有无表面处理对最大拔出力的影响

本试验中不同角度的钢纤维试件在不同加载速率下产生不同的破坏形式,如钢纤维拔出、微细裂缝、基体炸裂等.本节将讨论锥角角度、加载速率、有无表面处理对最大拔出力的影响.

3.1.1 锥角角度对最大拔出力的影响

图 4(a)给出了角度对钢纤维最大拔出力的影响.从图中可看出:在各种速率下,0°锥角钢纤维的最大拔出力最小,2°锥角钢纤维的最大拔出力较大,5°锥角钢纤维的最大拔出力最大,7°锥角钢纤维的最大拔出力稍有减小.5°锥角钢纤维试件与7°锥角钢纤维试件在拔出过程中有明显的破坏特征,基体在瞬间炸开成 2 或 3 部分.钢纤维锥形部分在拔出时受到基体的约束,在接触面产生法向压力 p ,法向压力 p 的水平分量在基体的纵截面产生拉应力.随着

纤维的逐渐拔出,钢纤维锥形部分在接触面所施加的压力不断增加,基体中的拉应力也随之增加.当拉应力超过砂浆基体的拉伸强度时,基体将在中间纵截面发生破坏.从图 2 和图 3 可看出,在基体没有破坏的阶段,锥角较大的钢纤维的拔出力更大,这是因为法向压力在竖直方向的分量 $p \sin\theta$ 随着锥角 θ 的增大而增大,从而导致拔出力的增大.纤维拔出过程中基体的受力破坏机理如图 5 所示.

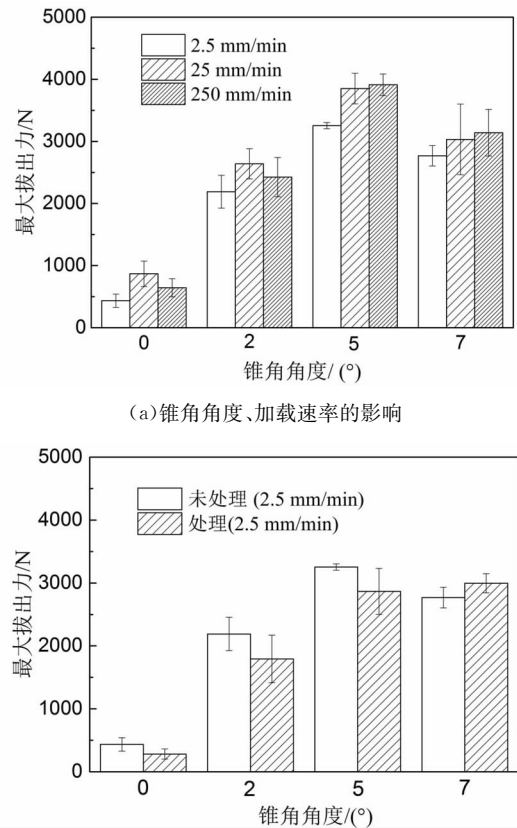


图 4 锥角角度、加载速率和钢纤维表面有无表面处理对最大拔出力的影响
Fig.4 Effects of taper angle, test speed, and treated and untreated steel fiber surface on the maximum pullout force

3.1.2 加载速率对最大拔出力的影响

图 4(a)还给出了加载速率对钢纤维最大拔出力的影响.从图中可看出:当钢纤维端部锥角较大(5°,7°)时,最大拔出力始终因为加载速率的增大而增大.当角度较小(0°,2°)时,最大拔出力并没有因为加载速率的增大而始终增大.可见加载速率对钢纤维最大拔出力的影响会因为角度的不同而有所不同.Kim^[14]等人研究了加载速率对端钩形钢纤维与扭曲形钢纤维拔出结果的影响.结果表明,端钩形钢纤维拔出时,其试验结果并没有对速率表现出明显的敏感性,而扭曲形钢纤维拔出时,加载速率对结

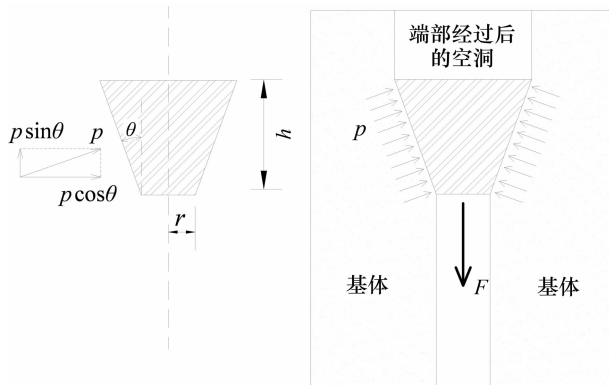


图5 纤维拔出过程中基体的受力破坏机理

Fig.5 Failure mechanism of matrix during fiber pullout

果有明显的影.可见加载速率对纤维拔出结果的影响与纤维端部的形状有关.本试验中,速率从 2.5 mm/min 增加到 250 mm/min 时,端部形状为锥形的钢纤维的最大拔出力明显受到速率的影响,且与角度有关.

3.1.3 有无表面处理对钢纤维最大拔出力的影响

本试验为考虑钢纤维表面与水泥基体间的化学黏结力对钢纤维最大拔出力的影响,对部分钢纤维的表面进行处理(见表 1).处理方法为在钢纤维表面涂上数层脱模剂,以隔绝钢纤维表面与基体,使得钢纤维与基体不产生化学黏结力.通过比较有无化学黏结情况下的钢纤维最大拔出力,来得到化学黏结对钢纤维最大拔出力的影响.图 4(b)给出了有无黏结情况下,各角度钢纤维的最大拔出力对比情况.可见,0°,2°和 5°有黏结钢纤维的最大拔出力比同锥角无黏结钢纤维的最大拔出力大,而 7°锥角有黏结钢纤维的最大拔出力比无黏结钢纤维的最大拔出力小.

3.1.4 钢纤维与基体的等效黏结强度

带锥角的钢纤维与基体间存在化学黏结、锚固及机械咬合等作用,本试验将各种作用产生的效果综合考虑为等效黏结强度.李丽等^[15]研究了 6 种不同形状的钢纤维从水泥砂浆基体中拔出的界面等效黏结强度,结果显示各种形状钢纤维与基体等效黏结强度分别为:平直形 3.37 MPa,端钩形 8.19 MPa,盾铃形 7.35 MPa,哑铃形 8.61 MPa,凹痕形 9.66 MPa,螺旋形 8.51 MPa.表 2 给出了本试验各种钢纤维与基体的等效黏结强度,黏结强度参照文献^[15]给出的方法计算.结果表明 0°锥角钢纤维与基体的等效黏结强度与文献^[14]平直钢纤维相当,而 2°,5°和 7°锥角钢纤维与基体的等效黏结强度普遍大于文献^[15]中 6 种钢纤维与基体的等效黏结强

度.证明本试验所设计的异形钢纤维能有效增加钢纤维与水泥砂浆基体的等效黏结强度.

表 2 钢纤维与基体的等效黏结强度

Tab.2 Equivalent adhesive strength of steel

加载速率/ (mm · min ⁻¹)	fiber and matrix 锥角				表面处理
	0°	2°	5°	7°	
2.5	2.31	11.52	16.86	14.20	否
25	4.61	13.88	19.96	15.56	否
250	3.41	12.75	20.26	16.10	否
2.5	1.50	9.43	14.86	15.37	是

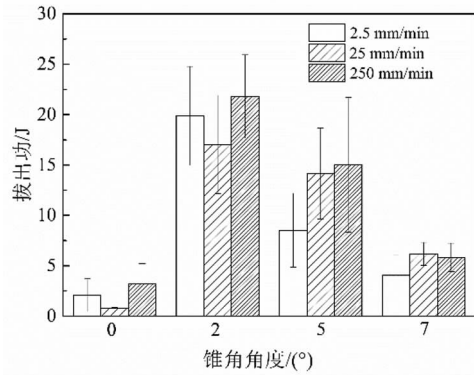
不同锥角钢纤维的侧面积相差很小,比如 0°和 7°锥角钢纤维的侧面积相差 3%,其余角度钢纤维侧面积差别更小.因此,等效黏结强度取决于拔出力的大小.如图 5 所示,在基体没有破坏的阶段,法向压力在竖直方向的分量 $p \sin \theta$ 随着锥角 θ 的增大而增大,从而导致等效黏结强度的增大.5°和 7°锥角钢纤维由于基体瞬间炸裂,其端部的锚固作用没有完全发挥,其实际等效黏结强度要大于所测得的数值.

3.2 锥角角度、加载速率及有无表面处理对拔出功的影响

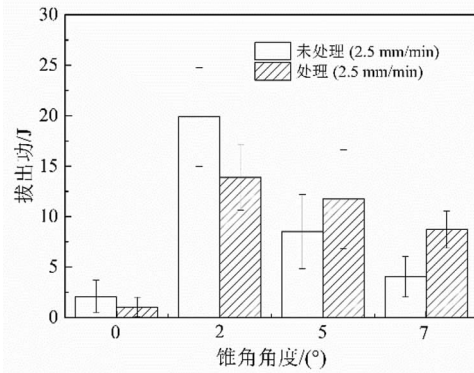
钢纤维能提高混凝土的韧性^[1],这体现在钢纤维拔出时拔出力所做的功,即拔出功.图 6 给出了角度、加载速率和有无化学黏结力对拔出功的影响.图 6(a)显示,在 3 个加载速率下,0°锥角钢纤维拔出功总是最小;2°锥角钢纤维在试验中拔出功明显比 0°,5°和 7°锥角钢纤维大得多;角度大于 2°时,拔出功随着角度的增加而减少.5°锥角钢纤维试件与 7°锥角钢纤维试件的破坏都是因为基体承受由内向外的侧向压力而破坏,破坏时拔出力正处于增大阶段,破坏时拔出位移很小,因此在本试验中,对于 5°锥角钢纤维与 7°锥角钢纤维,钢纤维端部锥角对钢纤维的增强作用没有达到最优效果.可以考虑将基体的尺寸加大,使得 5°锥角钢纤维与 7°锥角钢纤维完全拔出时,基体不发生明显的破坏.图 6(a)还显示,0°,2°和 5°锥角钢纤维在加载速率为 250 mm/min 时拔出力做功最大,7°锥角钢纤维在 3 个加载速率下拔出功相差不大.图 6(b)表明,钢纤维与基体之间有无化学黏结力对拔出功并无一致性的影响.0°及 2°锥角钢纤维在有黏结的情况下拔出功较大,而 5°及 7°锥角钢纤维在无黏结的情况下拔出功较大.

4 结论

本文系统地研究了钢纤维端部锥角、加载速



(a)加载速率、锥角角度的影响



(b)钢纤维表面有无处理的影响

图6 不同加载速率、锥角角度和钢纤维表面有无处理对拔出功的影响

Fig.6 Effects of various test speed and taper angles, and treated and untreated steel fiber surface on the work of pullout force

率、有无表面处理对仿生异形钢纤维从水泥砂浆中拔出结果的影响,最终得到以下结论:

1)钢纤维端部锥角从 0° 增加到 5° 时,最大拔出力有明显的增加, 7° 时稍有减小; 5° 及 7° 锥角钢纤维,随着加载速率增大,钢纤维最大拔出力增大;而 0° 及 2° 锥角钢纤维的加载速率增加到 250 mm/min 时,最大拔出力稍有减小; 0° , 2° , 5° 有黏结钢纤维的最大拔出力比同锥角无黏结钢纤维的最大拔出力大,而 7° 锥角有黏结钢纤维的最大拔出力比无黏结钢纤维的最大拔出力小。

2)3种加载速率下, 2° 锥角钢纤维的拔出功总是最大; 0° , 2° 和 5° 锥角钢纤维在加载速率为 250 mm/min 时拔出功明显最大, 7° 锥角钢纤维在3个加载速率下拔出功相差不大; 0° 及 2° 锥角钢纤维在有黏结的情况下拔出功较大,而 5° 及 7° 锥角钢纤维在无黏结的情况下拔出功较大。

3)本试验将化学黏结、锚固及机械咬合等作用产生的效果综合考虑为等效黏结强度,结果表明本试验设计的异形钢纤维能有效增加钢纤维与水泥砂浆基体的等效黏结强度。

参考文献

- [1] 王春来,徐必根,李庶林,等.不同围压条件下钢纤维混凝土受压试验研究[J].矿业研究与开发,2004,24(4):4-7.
WANG C L, XU B G, LI S L, et al. Press test of SFRC under different confined pressures[J]. Mining Research and Development, 2004, 24(4): 4-7. (In Chinese)
- [2] 孙伟.钢纤维对高强混凝土的增强、增韧与阻裂效应的研究[J].东南大学学报(自然科学版),1991,21(1):50-57.
SUN W. Influence of steel fiber on the effects of strengthening, toughening and crack arresting of high strength concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 1991, 21(1): 50-57. (In Chinese)
- [3] 方志,向宇,匡镇,等.钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(6):6-12.
FANG Z, XIANG Y, KUANG Z, et al. Fatigue properties of reactive powder concrete with different steel fiber ratios[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(6): 6-12. (In Chinese)
- [4] MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Behavior of concrete columns confined by fiber composites[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(5): 583-590.
- [5] 黄云生,罗志强.钢纤维混凝土桥面铺装的应用研究[J].广东工业大学学报,1998(2):47-51.
HUANG Y S, LUO Z Q. Application and research of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 1998(2): 47-51. (In Chinese)
- [6] RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Mechanical properties of steel fiber concrete and application in joint with specially shaped column[J]. Concrete, 2012(9): 12-14.
- [7] 卜良桃,鲁晨,朱健.水泥钢纤维砂浆钢筋网加固矩形RC偏压柱试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(3):15-20.
BU L T, LU C, ZHU J. Experimental study of RC columns strengthened with steel fiber cement mortar with mesh reinforcement under eccentric loading[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(3): 15-20. (In Chinese)
- [8] 秦鸿根,刘斯凤,孙伟,等.钢纤维掺量和类型对混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2003,6(4):364-368.
QIN H G, LIU S F, SUN W, et al. Effect of types and volume percentage of steel fiber on properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(4): 364-368. (In Chinese)
- [9] HUMBURG H, ZHU D, BEZNIA S, et al. Bio-inspired tapered fibers for composites with superior toughness[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(9): 1012-1019.
- [10] BARTHELAT F, ESPINOSA H. An experimental investigation of deformation and fracture of nacre-mother of pearl[J]. Experimental Mechanics, 2007, 47(3): 311-324.
- [11] ZHU Y, VALDEZ J, SHI N, et al. A composite reinforced with bone-shaped short fibers[J]. Scripta Materialia, 1998, 38(9): 1321-1325.
- [12] ZHU Y, VALDEZ J, BEYERLEIN I, et al. Mechanical properties of bone-shaped-short-fiber reinforced composites[J]. Acta Materialia, 1999, 47(6): 1767-1781.
- [13] QUACH W, TENG J, CHUNG K. Three-stage full-range stress-strain model for stainless steels [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(9): 1518-1527.
- [14] KIM D J, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers[J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(6): 576-584.
- [15] 李丽,秦鸿根.钢纤维与水泥砂浆界面黏结性能的试验研究[J].洛阳大学学报,2002,17(4):82-85.
LI L, QIN H G. Study of interface bond performance of steel fibers within cement mortar [J]. Journal of Luoyang University, 2002, 17(4): 82-85. (In Chinese)