

超高分子量聚乙烯纤维混凝土的基本力学性能*

晏麓晖, 张玉武, 朱 林

(国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对 C70 等级高强混凝土, 设计了 4 种超高分子量聚乙烯纤维掺量混凝土, 通过立方体抗压、劈裂抗拉和四点弯曲抗折试验, 分析了纤维掺量对混凝土力学性能的影响。结果表明: 超高分子量聚乙烯纤维对混凝土的抗压强度增强作用不明显, 但较大提高了混凝土的抗拉强度和抗折强度, 且对混凝土有很好的阻裂、增韧效果。在纤维体积掺量为 0.3% ~ 0.5% 时, 劈裂抗拉强度提高 25% 以上; 掺量 0.5% 时, 弯曲抗折强度提高率超过 23%。

关键词: 超高分子量聚乙烯纤维; 混凝土; 力学性能; 试验

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)06-043-05

Basic mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene fiber concrete

YAN Luhui, ZHANG Yuwu, ZHU Lin

(College of Basic Education, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the rank C70 high strength concrete, the experiments of the cubic compression, splitting tensile and four-point bending for four kinds of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) concrete with different fiber contents were conducted to research the effects of the fiber content on mechanical properties of concrete. The results show that the enhancement effect of the UHMWPE fiber on the compressive strength of concrete is not obvious. However, the added UHMWPE fiber greatly improves the splitting tensile strength and bending strength of concrete and it has excellent effects on toughness and crack resistance of concrete. The splitting tensile strength increases more than 25% when the fiber content is between 0.3% and 0.5%; the bending strength increases more than 23% when the fiber content is 0.5%.

Key words: ultra high molecular weight polyethylene fiber; concrete; mechanical properties; experiment

混凝土作为建筑材料已经普遍应用于各类基础设施, 但由于拉伸强度低、韧性差, 使其不仅在爆炸、冲击等极端荷载作用时易产生剥落、破碎, 降低防护能力, 且在正常工作状态下也经常开裂, 导致钢筋混凝土结构的耐久性不足^[1]。在混凝土中掺入短纤维, 能够起到阻裂、增强和增韧作用, 很好地改善混凝土性能^[2]。研究表明^[2-5]: 纤维的增强效果主要取决于纤维的性质, 也与纤维在混凝土基体中的掺量、分布形式以及纤维自身界面特性有关。高强、高弹模纤维增强效果较好, 低弹模纤维早期阻裂和增韧效应突出。高性能纤维混凝土中较理想的纤维应具备细度小、强度高、韧性好、刚度大的特性^[6]。

超高分子量聚乙烯(Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE)纤维是一种抗冲击性能优良的防弹纤维^[7], 既具有比钢纤维、碳纤维更高的强度和相当的模量, 又具有聚丙烯(Polypropylene, PP)、聚

乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)纤维相当的细度和密度, 应用于以水泥净浆和砂浆为基体的水泥基纤维复合材料时, 表现出了优良的抗裂、增韧能力^[8-10]。已有含粉煤灰-页岩高强轻骨料的高强、高弹模聚乙烯纤维混凝土有效提高混凝土各项力学指标^[11]的相关报道, 但含卵石粗骨料的 UHMWPE 纤维混凝土基本力学性能却未见报道。本文研究了 UHMWPE 纤维混凝土的基本力学性能, 针对 C70 等级高强混凝土, 设计了 4 种纤维体积掺量的混凝土, 通过与素混凝土对比, 分析了纤维掺量对混凝土立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和弯曲抗折强度及其韧性的影响, 为进一步开展该种纤维混凝土的研究提供了基础。

1 试验概况

1.1 原材料

混凝土基体材料: 长沙坪塘 42.5R 级普通硅

* 收稿日期: 2014-04-26

作者简介: 晏麓晖(1962—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, E-mail: yan_l_h@aliyun.com.cn

酸盐水泥; 粒径为 3~10mm 连续级配卵石; 细度模数 2.8、表观密度 $2.68\text{g}/\text{cm}^3$ 中等河砂; 湖南博赛特建材公司生产的微硅灰 (SiO_2 含量不低于 95%, 比表面积 $25\,000\text{m}^2/\text{kg}$, 粒径 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$, 堆积密度 $200\sim 250\text{kg}/\text{m}^3$); 湖南博赛特建材公司的 FDN-5 早强高效减水剂; 普通自来水。纤维材料: 湖南中泰特种装备有限责任公司的 ZTX99-1200D UHMWPE 纤维 (分子量为 $1.0\times 10^8\sim 5.0\times 10^8$), 具体的物理、力学性能指标见表 1。

表 1 UHMWPE 纤维基本力学性能指标

Tab. 1 Mechanical properties of UHMWPE fiber

直径/ μm	长度/ mm	密度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	极限延 伸率/%
20~50	30	0.97	3000	100	2.5~4.0

1.2 配合比

按强度等级 C70 高强混凝土设计, 配合比基本设计参数为: 水胶比 0.3, 砂率 42%, 高效减水剂掺量 2.5%, 微硅灰掺量 10%。考虑纤维体积掺量 0.1%、0.3%、0.5% 和 0.8% 设计了 4 种纤维混凝土, 具体配合比见表 2, 表中 SO 为素混凝

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete

编号	$V_f/\%$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$						
		水	水泥	粗骨料	细骨料	微硅灰	高效减水剂	UHMWPE 纤维
S0	0	154	495	977.0	708.0	55	11	0
F1	0.1	154	495	976.4	707.6	55	11	0.97
F3	0.3	154	495	975.2	706.8	55	11	2.91
F5	0.5	154	495	974.0	706.0	55	11	4.85
F8	0.8	154	495	972.2	704.8	55	11	7.76

2 试验结果

图 1~3 为素混凝土和纤维混凝土在立方体压缩、劈裂和四点弯曲下的破坏形态, 表 3 为不同纤维体积掺量下的 UHMWPE 纤维混凝土强

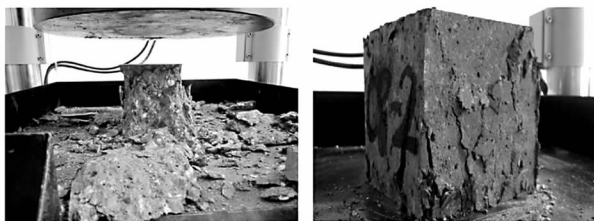
度试验结果, 表中 f_c 、 f_t 和 f_b 分别为抗压、抗拉和抗折强度, η_c 、 η_t 和 η_b 为 3 类强度提高率, 定义为纤维混凝土强度相对素混凝土强度提高的百分数。

1.3 试件制备

UHMWPE 纤维是一种细长软纤维, 为保证纤维的分散均匀, 避免缠绕、结团导致混凝土内部形成大缺陷, 参考文献 [2, 12], 经多方案试制, 采用制备流程为: ①水泥、砂、石、微硅灰干拌 30s; ②掺入 UHMWPE 纤维干拌, 纤维小股分散掺入, 边掺边搅拌, 直到全部掺入搅拌均匀为止; ③加入水和减水剂搅拌 120s; ④卸料装模, 振动台振动密实; ⑤24h 后拆模, 标准养护 28d。

1.4 试验方法

按照国家标准 [13] 进行立方体抗压、劈裂抗拉和弯曲抗折试验。抗压和抗拉试验采用边长为 150mm 标准立方体试件, 抗折试验为 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 550\text{mm}$ 标准试件, 每组 3 个。抗压试验采用 YAW-2000B 压力试验机, 以 $0.8\text{MPa}/\text{s}$ 的速率均匀加载; 劈裂抗拉试验和弯曲抗折试验均采用 WAW-G600D 试验机, 分别以 $0.08\text{MPa}/\text{s}$ 和 $0.10\text{mm}/\text{min}$ 的速率均匀加载。

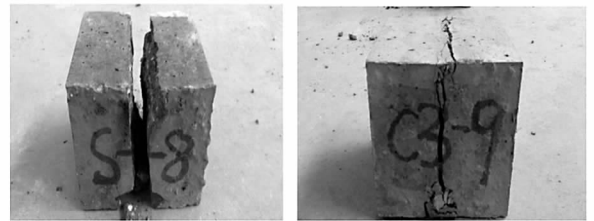


(a) S0

(b) F3

图 1 压缩破坏形态

Fig. 1 Compressive failure forms



(a) S0

(b) F3

图 2 劈裂破坏形态

Fig. 2 Split failure forms

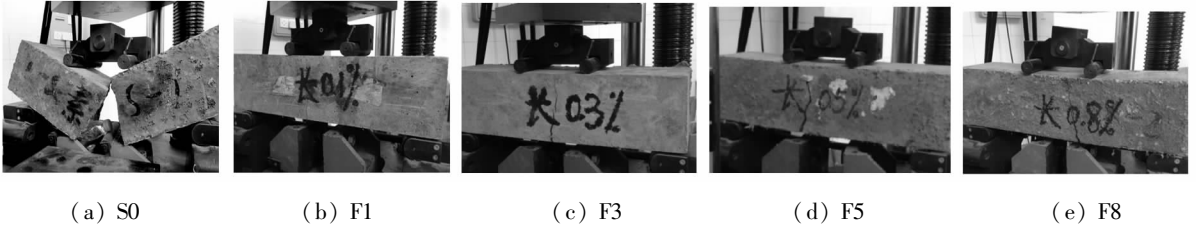


图3 四点弯曲破坏形态

Fig. 3 Failure forms at four-point bending

表3 混凝土抗压、抗拉和抗折强度

Tab. 3 Strengths of compression, tension and bending

编号	f_c/MPa	$\eta_c/\%$	f_t/MPa	$\eta_t/\%$	f_b/MPa	$\eta_b/\%$
S0	72.2	0	5.30	0	6.30	0
F1	78.5	8.73	6.10	15.09	6.71	6.51
F3	74.1	2.63	6.68	26.04	7.46	18.41
F5	71.1	-1.52	6.66	25.09	7.77	23.33
F8	70.1	-2.91	6.21	17.17	7.44	18.10

立方体压缩下,素混凝土在达到强度极限时发生崩裂破坏,如图1(a)所示。而纤维混凝土基本保持正六面体形状,表面呈现多裂纹和脱皮,但裂而不散,如图1(b)所示。劈裂作用下,素混凝土当裂纹出现后迅速劈裂成两半,如图2(a)所示,且伴有劈裂声;而纤维混凝土从裂纹出现到劈裂破坏的时间明显增加,断裂面纤维呈现被拉断特征,且当纤维掺量较高时,试件没有劈成两半,如图2(b)所示。四点弯曲时,素混凝土也是一旦裂纹出现便迅速断裂,如图3(a)所示;而纤维混凝土首先在底部出现许多小裂缝,随着荷载增加,裂缝逐渐增多增宽,并形成一条主裂缝,最后试件沿主裂缝发生破坏;随着纤维掺量的增加,主裂缝开裂点由试件中央向两端发展,且为非直线贯通,如图3(b)至图3(e)所示。综上表明纤维具有很好的阻裂作用。

UHMWPE 纤维对混凝土的抗压强度作用不明显:当掺量为 0.1% 时,提高了 8.73%;掺量增加,影响在 $\pm 3\%$ 范围内。纤维对混凝土的抗拉和抗折强度呈现不同程度的提高作用:在所研究的纤维掺量范围内,对劈裂抗拉强度的提高率都在 15% 以上,当掺量为 0.3% ~ 0.5% 时,达到 25% 以上;掺量为 0.3% ~ 0.8% 时,抗折强度提高率为 18% 以上,其中掺量为 0.5% 时,达到 23.33%。

3 结果分析

3.1 纤维体积掺量对强度影响分析

UHMWPE 纤维混凝土强度提高率随纤维体积掺量的变化,如图4所示。图中还给出了 PP 纤维高强混凝土(素混凝土压缩强度 68.5MPa,PP 纤维

长度 19mm)的相关强度随纤维的变化情况^[5]。由图4可知,两种纤维混凝土强度随纤维掺量的变化规律一致,即纤维掺量增加,强度先增大后减小。本文研究的 UHMWPE 纤维混凝土抗压强度最大值在掺量为 0.1% 左右,抗拉强度最大时纤维掺量为 0.3%,抗折强度相应地在 0.5% 纤维掺量时达到最大;而文献[5]研究的 PP 纤维混凝土抗压、抗拉和抗折强度的较优掺量分别为 0.05%、0.35% 和 0.22%。显然,UHMWPE 纤维混凝土较优掺量大于 PP 纤维混凝土,而且超过较优掺量后,强度提高率下降平缓,即使掺量达到 0.8% 时,UHMWPE 纤维混凝土抗压强度也还有素混凝土水平的 0.97 倍,而 PP 纤维混凝土当纤维掺量为 0.55% 时,抗压强度只有相应素混凝土的 0.77 倍。所以,UHMWPE 纤维混凝土性能明显优于 PP 纤维混凝土。

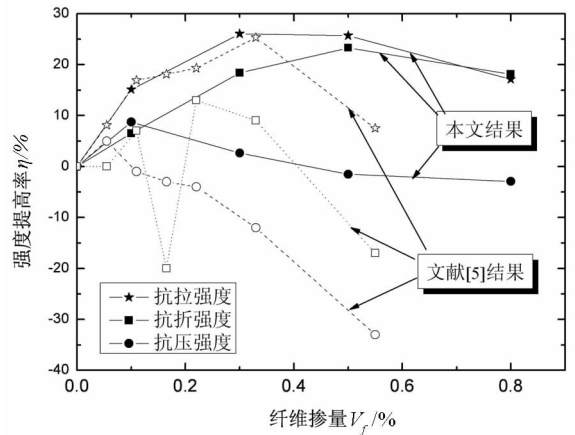


图4 强度与 PP 纤维混凝土对比

Fig. 4 Comparison on strength of UHMWPE-FC and PPFC

根据试验结果,UHMWPE 纤维混凝土抗拉强度和抗折强度提高率 η 随纤维掺量 V_f 的变化可用式(1)拟合。

$$\eta = AV_f(1 - BV_f^n) \quad (1)$$

图5给出了式(1)预测结果与试验结果的对比,吻合很好。其中,抗拉强度: $A = 998.215$ 、 $B = 1.365$ 、 $n = 0.06886$;抗折强度: $A = 490.219$ 、 $B = 1.5292$ 、 $n = 0.9753$ 。

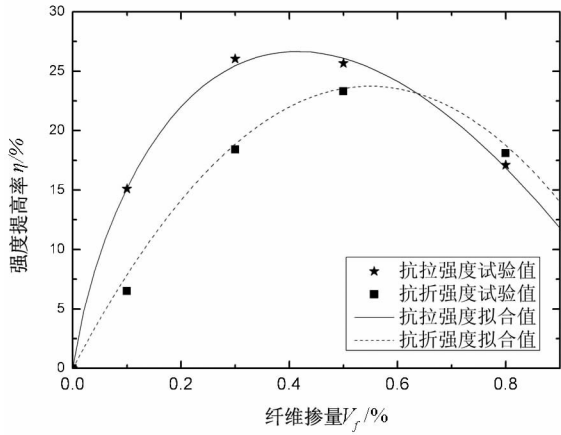


图 5 抗拉与抗折强度随纤维掺量变化规律

Fig. 5 The change rules of tension and bending strengths with fiber mixing amount

3.2 纤维掺量对弯曲韧性影响分析

根据四点弯曲试验测得的荷载与中点挠度曲线(图 6),参考我国《纤维混凝土应用技术规程 JGJ/T221 - 2010》^[14]弯曲韧性指数法对纤维混凝土韧性进行评定。表 4 给出了 UHMWPE 纤维混凝土的韧性指数,表中 I_5, I_{10}, I_{20} 分别表示挠度为初裂挠度 3.0 倍、5.5 倍和 15.5 倍时试件弯曲韧性指数, $R_{5,10}, R_{10,20}$ 分别表示残余强度指数,其值越大说明韧性越好。

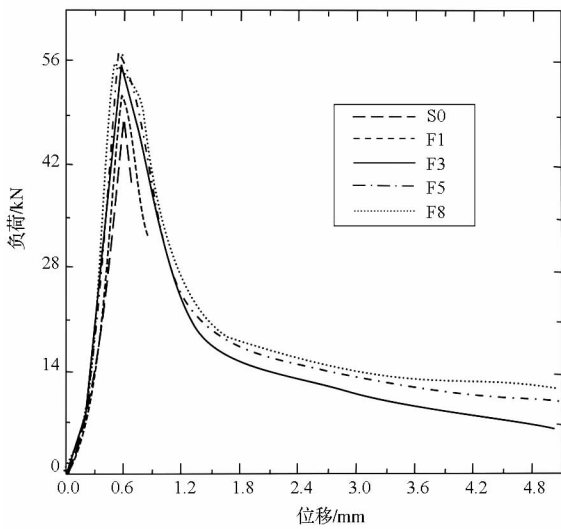


图 6 弯曲荷载挠度曲线

Fig. 6 Curves of deflection with load at bending

表 4 弯曲韧性指数

Tab. 4 Indices of bending toughness

编号	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
S0	1	1	1	0	0
F1	1	1	1	0	0
F3	3.87	6.40	10.97	50.6	45.7
F5	4.02	6.47	10.62	49.0	41.5
F8	4.15	7.19	11.46	60.8	42.7

由图 6 和表 4 可知,素混凝土和纤维掺量为 0.1% 纤维混凝土,当荷载达到极限时,发生完全脆性破坏,直接丧失继续承载能力;当纤维掺量大于 0.1%,混凝土的韧性明显增加,且呈现纤维掺量增加,韧性增大趋势。

4 结论

本文通过立方体压缩、劈裂抗拉和弯曲抗折试验研究了一种由 UHMWPE 纤维增强的混凝土的基本力学性能,主要结论如下:

1) UHMWPE 纤维对混凝土立方体抗压强度的提高不明显,对劈裂抗拉强度和弯曲抗折强度有较大增强作用。纤维体积掺量为 0.3% ~ 0.5% 时,抗拉强度提高率达到 25% 以上;掺量为 0.5% 时,抗折强度提高率超过 23%。

2) UHMWPE 纤维对混凝土有很好的阻裂、增韧作用。当纤维掺量大于 0.1%,对混凝土的增韧效果较为明显,随着纤维掺量增加,韧性有增大趋势,但掺量超过 0.3% 后,趋势变缓。

3) 与同强度等级 PP 纤维混凝土比较, UHMWPE 纤维对混凝土的增强作用有较大改善。

参考文献 (References)

[1] 徐至钧. 纤维混凝土技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
XU Zhijun. Technology and application of fiber concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)

[2] 张育宁. 高强高性能纤维混凝土及其性能与应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
ZHANG Yuning. Study on performance and application of high strength high performance fiber reinforced concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2010. (in Chinese)

[3] 王成启, 吴科如. 钢纤维和碳纤维混凝土力学性能的研究[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(3): 253 - 256.
WANG Chengqi, WU Keru. Study on the mechanical properties of carbon fiber and steel fiber concrete[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(3): 253 - 256. (in Chinese)

[4] Wang Z L, Wu J, Wang J G. Experimental and numerical analysis on effect of fiber aspect ratio on mechanical properties of SFRC[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (4): 559 - 565.

[5] 张伟. 聚丙烯纤维高强混凝土的力学性能试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
ZHANG Wei. Experimental research of the mechanical properties of polypropylene fiber reinforced high-strength concrete [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese)

[6] Li V C, Leung K Y. Steady state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 188(11): 2246 - 2264.

[7] 王晓强, 朱锡, 梅志远, 等. 超高分子量聚乙烯纤维增强层合板抗弹性能实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2009(1): 29

- 34.

WANG Xiaoqiang, ZHU Xi, MEI Zhiyuan, et al. Ballistic performances of ultra-high molecular weight polyethylene fiber-reinforced thick laminated plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009(1): 29 - 34. (in Chinese)

- [8] Li V C, Mishra D K, Wu H C. Matrix design for pseudo strain-hardening fiber reinforced cementitious composites [J]. *Materials and Structures*, 1995, 28(10): 586 - 595.
- [9] Kamada T, Li V C. The effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22(6): 423 - 431.
- [10] Fisher G. Deformation behavior of reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [D]. USA: University of Michigan, 2002.
- [11] 董祥, 高建明, 吉伯海. 纤维增强高性能轻骨料混凝土的力学性能研究 [J]. *工业建筑*, 2005, 35(1): 662, 680 - 683.
- DONG Xiang, GAO Jianming, JI Bohai. Study on mechanical properties of fiber reinforced high performance lightweight aggregate concrete [J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(1): 662, 680 - 683. (in Chinese)

- [12] Macea P, Sovják R, Konvalinka P. Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 63: 158 - 163.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB/T50081 - 2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China. GB/T50081 - 2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T221 - 2010 纤维混凝土应用技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T221 - 2010 Technical specification for application of fiber reinforced concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(上接第 11 页)

参考文献 (References)

- [1] 刘仲, 陈跃跃, 陈海燕. 支持任意系数长度和数据类型的 FIR 滤波器向量化方法 [J]. *电子学报*, 2013, 41(2): 346 - 351.
- LIU Zhong, CHEN Yueyue, CHEN Haiyan. A vectorization of FIR filter supporting any length and data types of coefficients [J]. *Acta Electronics Sinica*, 2013, 41(2): 346 - 351. (in Chinese)
- [2] 刘仲, 邢彬朝, 陈跃跃. 一种面向多核处理器的高效并行 PCA-SIFT 算法 [J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(4): 103 - 107.
- LIU Zhong, XING Binchao, CHEN Yueyue. An efficient parallel PCA-SIFT algorithm for multi-core processor [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(4): 103 - 107. (in Chinese)
- [3] Intel MKL Homepage [EB/OL]. [2014 - 04 - 24]. <http://software.intel.com/en-us/articles/intel-mkl/>.
- [4] GotoBLAS Homepage. [EB/OL]. [2014 - 04 - 24]. <http://www.tacc.utexas.edu/tacc-projects/gotoblas2>.
- [5] Goto K, van de Geijn R A. High-performance implementation of the level-3 BLAS [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2008, 35(1): 1 - 14.
- [6] ATLAS Homepage. [EB/OL]. [2014 - 04 - 24]. <http://math-atlas.sourceforge.net/>.
- [7] Volkov V, Demmel J W. Benchmarking GPUs to tune dense linear algebra [C] // Proceedings of the 2008 ACM/IEEE Conference on Supercomputing, NY: IEEE Press, 2008: 131 - 142.
- [8] Marker B, van Zee F G, Goto K, et al. Toward scalable matrix multiply on multithreaded architectures [C] // Proceedings of the 13th International European Conference on Parallel and Distributed Computing, Rennes, France, 2007: 748 - 757.
- [9] 张先轶, 王茜, 张云泉. OpenBLAS: 龙芯 3A CPU 的高性能 BLAS 库 [J]. *软件学报*, 2011, 22(zk2): 208 - 216.
- ZHANG Xianyi, WANG Qian, ZHANG Yunquan. OpenBLAS: a high performance BLAS library on loongson 3A CPU [J]. *Journal of Software*, 2011, 22(zk2): 208 - 216. (in Chinese)
- [10] CUDA Programming Guide. [EB/OL]. [2014 - 04 - 24]. <https://developer.nvidia.com/cublas>.
- [11] Ali M, Stotzer E, Igual F D, et al. Level-3 BLAS on the TI C6678 multi-core DSP [C] // Proceedings of IEEE 24th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing, NY: IEEE Press, 2012: 179 - 186.