第 49 卷第 5 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 5
2021 年 5 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　May，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200414

等离子体改性纤维增强油井水泥石的动态破坏规律

程小伟[1,2]，陈祖伟[2]，李雨威[3]，张　曲[4]，王福云[5]，郑友志[5]，黄　盛[2]，张春梅[2]，刘开强[2]

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室，成都 610500；2. 西南石油大学新能源与材料学院，成都 610500；
3. 中石化西南石油工程有限公司固井分公司，四川 德阳 618000；4. 中国石油西南油气田公司勘探事业部，成都 610041；
5. 中国石油西南油气田分公司工程技术研究院，四川 广汉 618300)

摘　要：利用霍普金森杆及高速-高分辨摄像技术，对比研究了纤维素纤维(CF)和改性纤维素纤维对动载荷下水泥石的力学性能、能量演变、裂纹扩展及界面破坏形式的影响。结果表明：在动载荷下水泥石的失效过程可分为 4 个时期，压密、微裂纹扩展、能量积累和能量释放。其中第 3 个时期，比能量的积累将直接影响试样的抗压强度，且当纤维掺入量相同时，掺入未改性纤维素纤维(UCF)的试样相较于改性纤维素纤维(MCF)的试样吸收能量更多，抗压强度更好；低温等离子体改性可以在纤维素纤维表面引入含氧基团，使 MCF 与水泥基体界面结合更为紧密，这使试样能量更偏向在漂珠等缺陷处进行聚集和释放，失效结果表现为改性纤维素纤维-油井水泥复合材料(MCF-OWC)在动载荷下抗压强度更低，失效后破碎程度更低。

关键词：动载荷；纤维素纤维；低温等离子改性；油井水泥石；失效
中图分类号：TE256　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)05–0964–08
网络出版时间：2021–04–13



Failure of Plasma Modified Fiber Reinforced Oil Well Cement Under Dynamic Load

CHENG Xiaowei[1,2], *CHEN Zuwei*[2], *LI Yuwei*[3], *ZHANG Qu*[4], *WANG Fuyun*[5], *ZHENG Youzhi*[5], *HUANG Sheng*[2], *ZHANG Chunmei*[2], *LIU Kaiqiang*[2]

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. School of New Energy and Material, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
3. Cementing Company of Sinopec Xinan Oilfield Service Corporation, Deyang 618000, Sichuan, China;
4. Exploration Division, Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610041, China;
5. Petro China Southwest Oil & Gas Field Company, Guanghan 618300, Sichuan, China)

Abstract: Effects of cellulose fiber (CF) and modified cellulose fiber on the mechanical properties, energy evolution, crack propagation and interface failure of cement under dynamic load were investigated by splitting hopkinson pressure bar and high speed-high resolution camera technology. In the third period, the accumulation of specific energy will directly affect the compressive strength of the sample, and the sample with unmodified cellulose fiber (UCF) absorbs more energy and has better compressive strength than the sample with modified cellulose fiber (MCF) at the same fiber incorporation amount. Low-temperature plasma modification can introduce oxygen-containing groups on the surface of cellulose fiber, so that the interface between MCF and cement matrix is more closely bound. The result of this failure is since the modified cellulose fiber-oil well cement composite (MCF-OWC) has a lower compressive strength under dynamic load and a lower crushing degree after failure.

Keywords: dynamic load; cellulose fibers; low temperature plasma modification; oil well cement paste; failure

固井是石油开采中极其重要的一项环节，固井质量的好坏将直接影响油气开采效率和施工安全。油井水泥多为硅酸盐水泥，是典型的硬脆性材料。水泥环在井下面临高温、高压复杂环境[1–2]，除受到静态应力挤压外，还会受到各种井下作业产生的动载冲击[3–5]。如钻进过程中钻具振动冲击，完井过程中的射孔冲击等[6]。这些冲击载荷易导致在水泥环自身产生的微裂纹、结构缺陷处形成应力集中[7]，

收稿日期：2020–06–13。　修订日期：2020–07–09。
基金项目：国家重点研发计划(2016YFB0303600)。
第一作者：程小伟(1977—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–06–13.　**Revised date:** 2020–07–09.
First author: CHENG Xiaowei(1977–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: chengxw@swpu.edu.cn.

缺陷、微裂纹进一步扩展、增大形成宏观裂纹，致使水泥环破坏失效，层间封隔能力丧失[8]，形成油气水窜流，严重影响油气井安全寿命和后期生产效益[9−10]。为改善水泥环易脆裂的特性[11]，学者们通过向其中加入纤维等增韧材料对水泥石进行增韧降脆[12−13]。但由于部分有机纤维表面极性基团少，亲水性差，与水泥基体黏结性差，结合不够紧密，会影响纤维对水泥石的增韧效果。于是学者们采用酸、碱溶液浸泡纤维[14]、为纤维镀膜[15]或低温等离子体表面处理纤维等手段对纤维表面进行改性处理，提高与水泥基体的黏结性，以改善水泥石力学性能。低温等离子体改性技术是一种材料表面改性技术，对材料表面的处理一般分两方面进行。一方面，当等离子体对材料表面进行处理时，使材料表面产生更多的含氧基团，增加材料表面的亲水性，达到材料与基体更紧密结合的目的；另一方面，当等离子体对材料表面进行冲击时，材料表面会被刻蚀，材料表面的粗糙程度增加，使材料与基体的界面黏接性能得到提升[16]。目前大量研究证明纤维改性水泥石的力学性能会有较明显提升，但这些结果大多是基于在静态载荷测试下得到的[17−18]。事实上，水泥环在复杂的井下环境中，常遭受动载荷的冲击[19]。目前动态载荷下的研究都大多在岩石力学[20−21]或建筑混凝土领域[22−24]，通过霍普金森冲击杆装置对岩石和混凝土进行高应变率的劈裂抗拉和抗压强度等力学实验测试，对动载荷下的井下水泥环和动载荷下的等离子体改性纤维增强油井水泥石的研究还较少[25−26]。

采用霍普金森冲击杆进行冲击试验[27−28]，研究了添加等离子体改性纤维素的油井水泥复合材料在动态载荷下的力学性能及破坏规律。以加入了未处理纤维素纤维的水泥石试样作为对照组，考察了两种纤维对水泥复合材料在动载下力学性能、能量演变过程、裂纹衍生、破碎结果和微观形貌的影响。

1 实验

1.1 材料

所采用水泥为 G 级高抗硫酸盐油井水泥(SHR)，购于嘉华特种水泥股份有限公司，其主要化学成分见表 1；降失水剂为卫辉市化工有限公司生产的 G33S；分散剂为产于蓝德石化环保设备有限公司的 Landy 906L；纤维是由 Regal 有限公司提供的纤维素纤维，平均长度为 2~3 mm，直径 15~20 μm，抗拉强度为 500~1 000 MPa，使用前需先在水中进行预分散；漂珠是由美国明尼苏达矿业及机器制造公司(3M)生产，其重量轻，耐高温，化学稳定性好；微硅是由成都欧美克石油科技股份有限公司生产，灰色，真密度为 2.34 g/cm^3，不溶于水，堆积密度为 0.62 g/cm^3，325 目筛网过筛率为 0.51。实验配方为：G 级油井水泥+漂珠+微硅+降失水剂+分散剂+纤维素纤维+水，水固比为 0.44，各物质掺量见表 2。

表 1　G 级油井水泥化学成分

Table 1　Chemical composition of G grade oil well cement

w/%

CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Loss
63.74	22.48	4.01	3.41	1.47	0.9	1.55	1.40	1.04

w is mass fraction.

表 2　实验配方

Table 2　Experimental formula　　*w*/%

Experiment No.	G-class oil well cement	Floating beads	Micro silicon	G33S	906L	UCF	MCF
1	100	25	15	5	1.5		
2	100	25	15	5	1.5	0.2	
3	100	25	15	5	1.5	0.3	
4	100	25	15	5	1.5	0.4	
5	100	25	15	5	1.5	0.5	
6	100	25	15	5	1.5		0.2
7	100	25	15	5	1.5		0.3
8	100	25	15	5	1.5		0.4
9	100	25	15	5	1.5		0.5

G33S is fluid loss additive, 906L is dispersant, UCF is unmodified cellulose fiber; MCF is Modified cellulose fiber.

1.2 试样制备

水泥浆体的制备和试样的养护是按照 API RP10B 和 GB/T 19139–2012 标准中所推荐的方法进行，试样养护时间为 28 d，养护温度为 20 ℃，养护环境为水浴养护。将配制好的浆体倒入特制的模具中，固化后拆模即得标准试样，试样尺寸为 ϕ50 mm×50 mm。为防止试验偶然误差，SHPB 动载荷冲击试验每个配方都进行了 3 个试样的冲击。

1.3 纤维表面的低温等离子体处理

用苏州奥普斯等离子有限公司生产的型号为 DT-03 的低温等离子处理仪对试样中所掺入的纤维素纤维进行处理[29]。改性气体为氧气，气体流量

为 40 ccm，功率 120 W，时间 150 s，改性起始真空度 16 Pa。

1.4 霍普金森杆实验

动载荷冲击试验采用杆径为50 mm的分离式霍普金森杆(Splitting hopkinson pressure bar，SHPB)实验装置对圆柱状水泥试样进行力冲击试验的动态加载[30]。输入杆和输出杆上的电阻应变计会记录实验过程中实时的应力、应变、能量输入和输出等变化。同时利用高速摄影仪(675 000 帧/s)进行瞬时拍摄，对加载过程中水泥试样失效过程的每个瞬时状态进行记录[31]。试验冲击气压 P 值恒定为 0.5 MPa。

1.5 纤维素表面状态的 XPS 分析

使用配备单色 Al K_α X 射线源的型号为 PHI Quantum 2000的X射线光电子能谱仪对低温等离子改性前后的 CF 进行 XPS 测试，实验中采用电子枪和离子轰击相结合的方式进行电荷补偿，工作功率为 25 W。起步角相对于样品表面为 45°，分析面积为 500 μm × 400 μm。

1.6 硬化水泥石微观形貌的 SEM 观察

用美国 FEI 公司生产的型号为 Quanta450 的环境扫描电子显微镜对水泥石试样进行形貌观察。

2 结果与讨论

2.1 动载荷下掺入 UCF 与 MCF 对试样力学性能的影响

图 1 为动载荷下不同掺量 UCF 和 MCF 水泥石试样的峰值应力图，类比静载荷的抗压强度取值，此图也即动载荷下的抗压强度图。从图 1 可以看出，2 种纤维素在试样中的加量为 0～0.5%时，试样的抗压强度都出现了先增加再降低的趋势，且都是当加量为 0.3%时，达到最大抗压强度。静载荷条件下，纤维素纤维的表面在进行低温等离子体改性后掺入水泥石中可以对水泥石进行进一步的增强增韧[32]，这与图 1 的情况恰巧相反。在动载荷条件下，UCF 对水泥石试样抗压强度的增强效果反而优于含 MCF 的试样，抗压强度约提高了 23.95%(取 4 组掺量的平均增强值)。这说明在高应变率的冲击载荷下，低温等离子处理改性技术对含纤维素纤维的低密度水泥石试样抗压强度的增强效果起到了负影响。

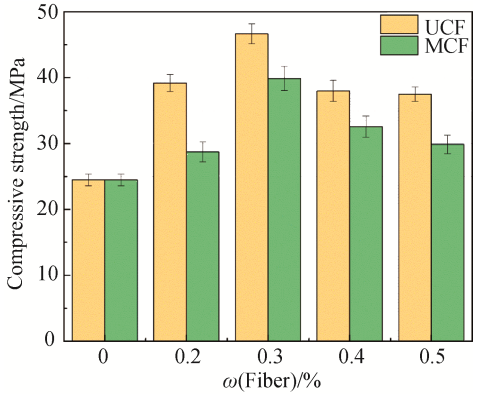


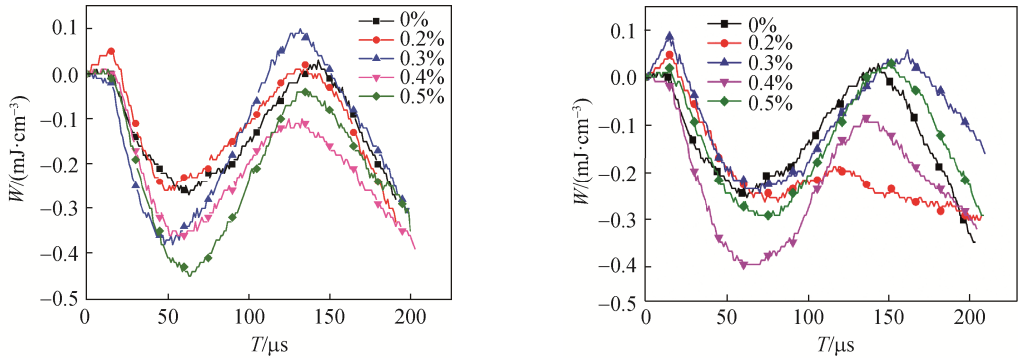
图 1 动载荷下不同掺量 UCF 和 MCF 试样的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of samples with different contents of UCF and MCF under dynamic load

2.2 掺入 UCF 与 MCF 试样失效过程中的能量演变及裂纹扩展情况

图 2 为动载荷下纤维素纤维改性前后试样破裂过程中能量随时间变化的比能量特性图[33]。图 3 为加量 0.3%UCF 水泥石试样裂纹扩展。图 4 为加量 0.3%MCF 水泥石试样裂纹扩展情况图，图片为各阶段中图片，并非各阶段起始图片。从比能量曲线可以发现曲线大都呈现双峰现象，可以依据峰的趋势将其分为 4 个阶段：压密阶段(有的曲线未呈现)、微裂纹扩展阶段、能量积累阶段和能量释放阶段。压密阶段：水泥石作为一种非均质无机材料其内部存在一些微孔隙[34]。当试样两端面受到挤压时，这些孔隙会在受挤压的情况下减小或变少，水泥石更加密实，此时试样处于加载情况下，试样会吸收能量使本身的能量上升，如此便形成了第 1 个能量峰的上升阶段，如图 2。而部分试样比能量图的第 1 个峰不明显甚至平缓向下，这是因为在实验施加的载荷方向上非均质水泥石较为密实[35]，微孔隙在此方向上很少，故而试样在压密阶段的比能量峰不明显甚至消失，试样比能量图直接进入第2阶段—微裂纹扩展阶段。微裂纹扩展阶段：此阶段为比能量图的首个比能量下降阶段。水泥石试样中存在大量的缺陷和微裂纹，在试样受载荷吸收能量的过程中，试样中众多的微裂纹发生延伸扩展。裂纹的扩展需要损耗能量[36]，当受载荷吸收的能量不足以提供裂纹扩展消耗的能量时，试样此阶段整体表现为比能量下降，试样表面无明显变化(如图 3a 和图 4a 所示，分别对应 24 μs 和 20 μs 时的试样破裂图)。能量积累阶段：随着动载荷冲击的继续，试样的裂纹扩展会继续演变，甚至表面出现较大的未贯穿的次生裂纹，如 UCF 试样第 3 阶段中时间为 80 μs 和 119 μs 时的破裂图(图 3b 和图 3c)，如 MCF 试

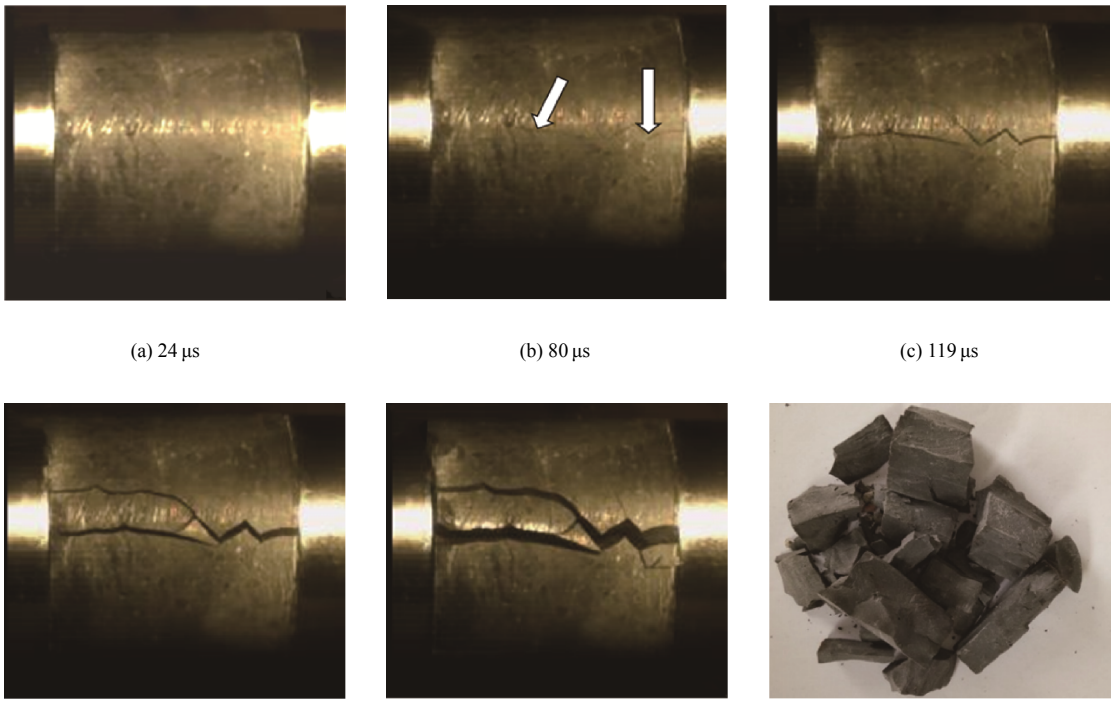
样第 3 阶段中时间为 75 μs 和 104 μs 时的破裂图(图 4b 和图 4c)。但在此阶段，已经被压实的试样吸收集聚能量的速度将会快速的增加，所以此阶段比能量曲线表现为第 2 个比能量峰的能量攀升(第 3 阶段)，如图 2 所示。此外，此阶段的能量积累也是为主裂纹的产生做准备，直至主裂纹开始产生。发展至第 4 阶段—能量释放阶段：前面 3 个阶段的能量吸收在此时产生了主裂纹贯穿整个试样，水泥石试样碎裂，如 UCF 试样第 4 阶段中时间为 152 μs 和 195 μs 时的破裂图(图 3d 和图 3e)，如 MCF 试样第 4 阶段中时间为 161 μs 和 197 μs 时的破裂图(图 4d 和图 4e)，此时能量大量释放，比能量图表现为第 2 个比能量峰能量快速下降(第 4 阶段，如图 2)。图 3f 与图 4f 分别为试样破裂失效后的试样碎裂图，添加了 0.3%MCF 的试样碎块体积明显更为完整。



(a) UCF　　(b) MCF

图 2　动载荷下不同掺量纤维素纤维改性前后试样破裂比能量图

Fig. 2　Fracture specific energy diagram of samples with different dosage of cellulose fiber under dynamic load

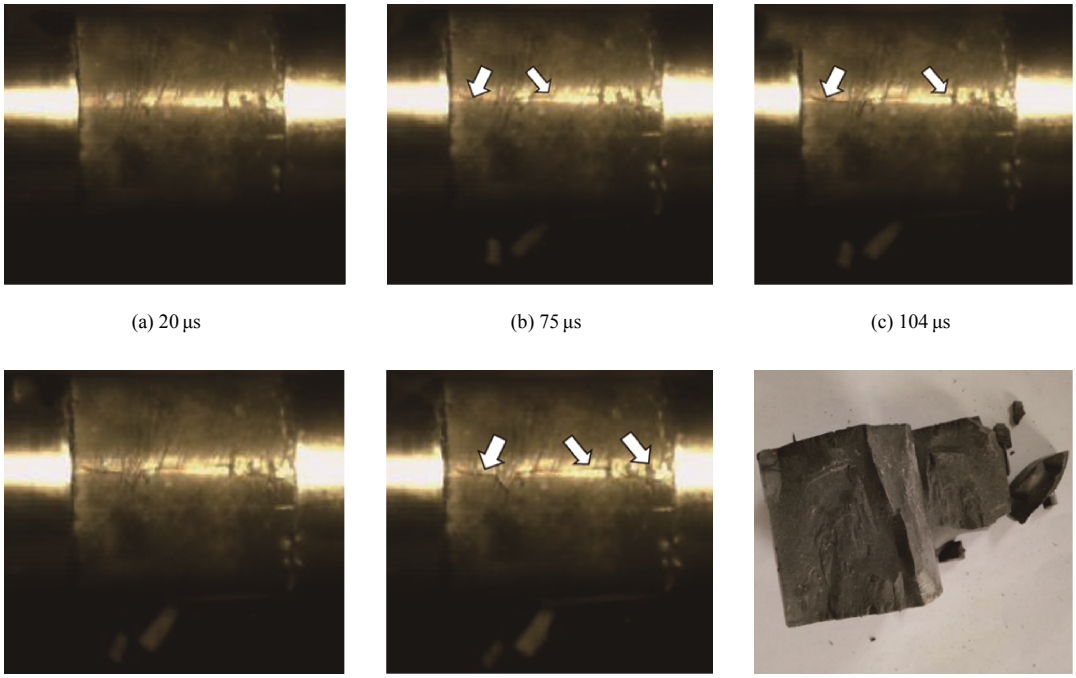


(a) 24 μs　　(b) 80 μs　　(c) 119 μs

(d) 152 μs　　(e) 195 μs　　(f) Broken

图 3　加量 0.3%UCF 水泥石试样裂纹扩展

Fig. 3　Crack propagation of cement sample with 0.3% UCF



(a) 20 μs (b) 75 μs (c) 104 μs

(d) 161 μs (e) 197 μs (f) Broken

图 4 加量 0.3%MCF 水泥石试样裂纹扩展

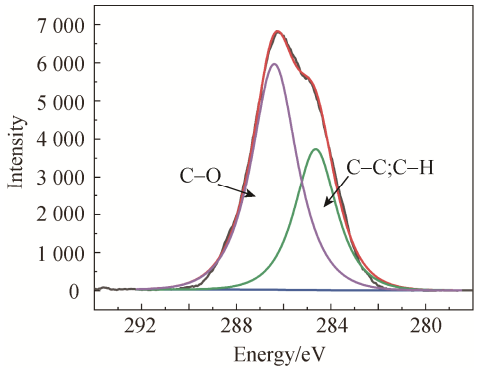
Fig. 4 Crack propagation of cement sample with 0.3% MCF

值得注意的是，图 2 中在第 3 个阶段，即能量快速积累阶段，当 UCF 与 MCF 的掺量相同，分别为 0.2%、0.3%和 0.5%时，掺入 UCF 试样的能量攀升量都是大于相同掺量下掺入 MCF 试样的能量攀升量，这也对应了动载荷下掺入 UCF 试样的抗压强度都大于相同掺量下掺入 MCF 试样的抗压强度，如图 1。而在含量为 0.4%时，图 2 中第 3 阶段能量攀升由于实验误差出现了一定的差异性，这也对应了图 1 中掺入 UCF 含量为 0.4%时抗压强度和掺入 UCF0.5%的抗压强度几乎相同的这一异常。针对这一异常，从图 1 可以看出，虽然 UCF 含量在 4%和 5%时的抗压强度十分接近，但依然 UCF 含量为 4%时略高，这一异常的出现依然满足随着 UCF 加量增加，试样抗压强度出现先增后降的趋势，可以理解为此试样的误差在实验误差允许范围内。综上所述，动载荷下油井水泥石抗压强度的大小与其比能量图的第 3 阶段能量攀升量有着直接的关系。

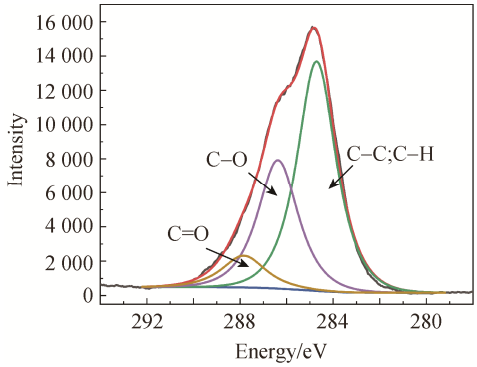
3 低温等离子改性对动载荷失效的微观影响

3.1 UCF 与 MCF 试样的 XPS 分析

图 5 为 CF 在低温等离子改性前后的 XPS 结合能能谱，其中图 5a 和图 5b 分别为纤维素改性前后的 C 谱，表 3 为 UCF 与 MCF 样品 C 1*s* 测试数据[37]。从图 5a 可知，在进行低温等离子改性前，UCF 中包含的 C 原子结合方式主要为 C—H、C—C 和 C—O 3 种，对应的结合能峰位分别为 284.52 eV 和 286.36 eV；从图 5b 可知，在进行低温等离子改性后，MCF 中包含的 C 原子结合方式主要为 C—H、C—C、C—O 和 C═O 4 种[38]，对应的结合能峰位分别为 284.71、286.37 eV 和 287.84eV。对比表 3 中 2 种纤维素的 C1*s* 测试数据，可发现改性使纤维素中被引入了羰基(—C=O)或羧基(—COOH)，C—O 结合方式由 67.6%减少到 26.9%，C—C 或 C—H 结合方式由 32.4%增加到 60%，C═O 结合方式从无增加到了 13.1%。此类基团的形成一是因为带电 O 粒子的轰击过程中常会出现 C 原子上羟基(—OH)的增加[39]，当 1 个 C 原子上出现多个羟基(C(—OH)$_n$)，此结构不稳定，会生成羰基或羧基等形式的基团；二是在带电 O 粒子的轰击过程中，纤维素中的醚键(—C—O—C—)发生断裂，生成新的烷基(—CH$_n$)与羟基(—OH)；以上 2 种情况的产生导致了新含氧基团的引入，将增加 MCF 的亲水性，使其更易与水泥浆紧密结合。



(a) UCF-C



(b) MCF-C

图 5　纤维素纤维试样 XPS 能谱

Fig. 5　XPS binding energy spectra of cellulose fiber sample

表 3　纤维素样品 C 1*s* 测试数据

Table 3　Test data of cellulose sample C 1*s*

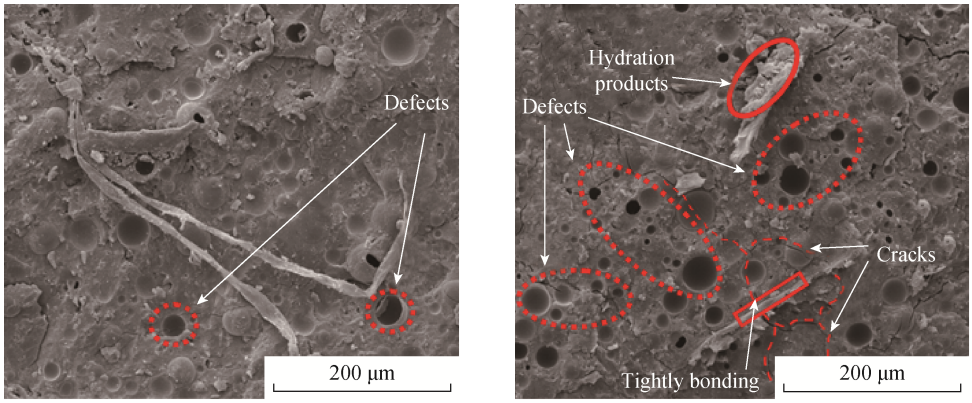
Fiber	Peak position/eV				Relative amount/%			
	C—C，C—H	C—O	C=O		C—C，C—H	C—O	C=O	
UCF	284.52	286.36			32.4	67.6		
MCF	284.71	286.37	287.84		60.0	26.9	13.1	

3.2　动载荷下 UCF 与 MCF 水泥石试样的 SEM 微观形貌分析

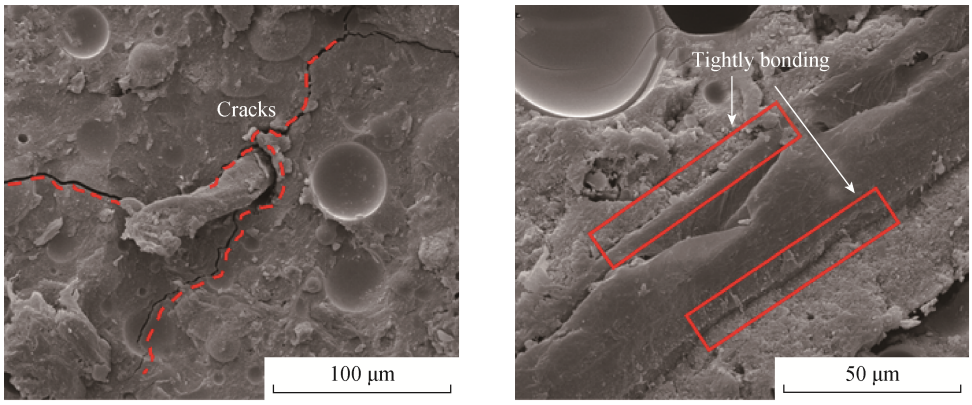
图 6 为动载荷下试样碎块的破裂面在扫描电镜下的 SEM 照片，其中图 6a、图 6c 为掺入 UCF 试样，图 6b、图 6d 为掺入 MCF 试样。对比图 6a 和图 6b 可以发现，图 6b 中漂珠大量脱落，出现更多的孔洞，由此可推测断裂面漂珠–水泥基体结合处出现大量缺陷与加入的纤维经过改性处理可能有一定关系。对比图 6c、图 6d 可发现，动载荷结束后 UCF–水泥基体界面却出现了纤维的脱落和拔出，然而 MCF 与水泥界面的结合依然十分紧密，这与改性处理使纤维素纤维表面亲水的含氧基团引入有关。在动载荷条件下，低温等离子改性使纤维素表面与水泥石结合更为紧密，有助于纤维素与水泥基材料的界面锚固更为牢固。此结论在图 6a、图 6b 中也能得到体现，MCF 相比于 UCF 其附着有更多的水化产物。此外在图 6b 中，虽然断面内出现众多裂纹，但 MCF 与水泥基体的紧密结合使 MCF 不易被拔出，裂纹的产生与能量的释放未发生在 MCF 和基体的结合面，而在其他力学性能薄弱处发生(如图中漂珠–水泥基体结合面处的缺陷)。此结合面缺陷的扩大使动载荷下断裂面的漂珠出现大量脱落[40]，与前文推测相吻合。在图 6b 中，虽存在大量细小裂纹，但未见均匀分布的较大裂纹，这是因为与水泥石基体界面更为紧密结合的 MCF 起到了更好的桥联作用[41]。大量的 MCF 在试样内形成网状，试样虽然有微裂纹产生，但却依然能被 MCF 所形成的网状锚固在一起，这也是掺入了 MCF 的试样在动载荷冲击后碎块相比掺入 UCF 试样的碎块尺寸更大的原因(如图 3f 和图 4f)。

图 6 中漂珠发生大量脱落。结合以上的分析，表明漂珠与水泥石的界面结合远低于 MCF 与水泥石的界面结合，所以 MCF 在水泥石中的加入，使动载荷下水泥石吸收的能量，几乎都集中在了无 MCF 锚固的漂珠界面缺陷处进行释放[42]，应力的更集中释放使漂珠处的裂纹在更低应力时提前形成主裂纹，能量无法继续吸收集聚，且开始大量剧烈释放，表现为 MCF 使漂珠水泥石的抗压强度降低，如图 1。从裂纹的扩展方面来看，MCF 水泥石试样次生裂纹和主裂纹的形成更易在漂珠处而非 MCF 与水泥基的结合面，当主裂纹进一步扩展时就形成了断裂面，这也进一步解释了 MCF 水泥石试样的断裂面出现了大量漂珠脱落的现象。然而未改性纤维素-油井水泥石(UCF-OWC)相对于 MCF-OWC，动载荷下吸收的能量可以在 UCF 界面和大量漂珠处释放，能量集聚与释放更为均匀分布于 UCF-OWC 中，能量集聚也会更多，主裂纹不会因应力过于集中，在承受较低应力时提前产生，表现为 UCF 水泥石的抗压强度高于 MCF 水泥石。UCF-OWC 试样在能量释放时，也会因聚集更多而释放更多，更多的能量均匀释放在水泥石试样中，主裂纹在试样中的分布也更为均匀，使试样破碎程度更低。

综上所述，从 MCF 试样中形成了更为紧密的网状结构和能量的释放相对更为集中两方面[43]，都解释了添加 MCF 的试样碎裂程度更低的现象(如图 3f 和图 4f)。



(a) UCF (b) MCF



(c) UCF (d) MCF

图 6 动载荷下 UCF 和 MCF 水泥石试样 SEM 照片

Fig. 6 SEM photographs of cementing stone samples mixed with UCF and MCF under dynamic load

4 结论

1) 与静载荷下水泥石增强效果不同，动载荷下未改性纤维增强油井水泥石的抗压强度高于改性纤维增强油井水泥石。

2) 相同纤维掺量时，在能量快速积累阶段，比能量攀升量与动载荷下对应抗压强度值呈现正相关，改性纤维增强油井水泥石在此阶段的能量攀升量和抗压强度大多更低。

3) 对纤维进行低温等离子改性处理，会在其表面引入新的含氧基团，使其与水泥石结合更紧密。改性纤维增强油井水泥石试样在动载荷下能量的释放和裂纹的衍生相比于未改性纤维增强油井水泥石试样更易发生在漂珠处，这使动载荷下改性纤维增强油井水泥石的抗压强度更低，但破裂体碎裂程度更低。

参考文献:

[1] GENG Jishi, SUN Qiang, ZHANG Weiqiang, et al. Effect of high temperature on mechanical and acoustic emission properties of calcareous-aggregate concrete[J]. Appl Thermal Eng, 2016, 106: 1200–1208.

[2] DENG Kuanhai, LIU Wanying, XIA Tianguo, et al. Experimental study the collapse failure mechanism of cemented casing under non-uniform load[J]. Eng Failure Anal, 2017, 73: 1–10.

[3] XI Yan, LI Jun, LIU Gonghui, et al. A new numerical investigation of cement sheath integrity during multistage hydraulic fracturing shale gas wells[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2018, 49: 331–341.

[4] ZHANG Hong, SHEN Ruichen, YUAN Guangjie, et al. Cement sheath integrity analysis of underground gas storage well based on elastoplastic theory[J]. J Petrol Sci Eng, 2017, 159: 818–829.

[5] 刘洋, 严海兵, 余鑫, 等. 井内压力变化对水泥环密封完整性的影响及对策[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 95–98.
LIU Yang, YAN Haibing, YU Xin, et al. Nat Gas Ind (in Chinese), 2014, 34(4): 95–98.

[6] LIU He, WANG Feng, WANG Yucai, et al. Oil well perforation technology: Status and prospects[J]. Petrol Explor Dev, 2014, 41(6): 798–804.

[7] TANG S B, HUANG R Q, WANG S Y, et al. Study of the fracture process in heterogeneous materials around boreholes filled with expansion cement[J]. Int J Solids Struct 2017, 112: 1–15.

[8] WANG W, DAHI TALEGHANI A. Impact of hydraulic fracturing on cement sheath integrity; A modelling approach[J]. J Natl Gas Sci Eng, 2017, 44: 265–277.

[9] WANG W, TALEGHANI A D. Three-dimensional analysis of cement sheath integrity around Wellbores[J]. J Petrol Sci Eng, 2014, 121: 38–51.

[10] 张春梅, 程小伟, 杨永胜, 等. 固井水泥环微裂纹自修复微胶囊的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 2035–2041.
ZHANG Chunmei, CHENG Xiaowei, YANG Yongsheng, et al. Bull

Chin Ceram Soc, 2018, 37(6): 2035–2041.

[11] 胡晓波. 碳纤维—尼龙纤维混杂改性水泥力学性能及显微结构观察[J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(6): 707–711.
HU Xiaobo. J Chin Ceram Soc, 1996, 24(6): 707–711.

[12] 吴宇萌, 许明标, 宋建建, 等. 碳纤维与胶乳液协同作用对固井水泥浆力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 253–258.
WU Yumeng, XU Mingbiao, SONG Jianjian, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(1): 253–258.

[13] 苏东华, 姚晓. 高韧性油井固井材料的性能与应用[J]. 硅酸盐学报, 2007 (6): 112–116.
SU Donghua, YAO Xiao. J Chin Ceram Soc, 2007 (6): 112–116.

[14] 王振军, 高杰, 魏永锋, 等. 碳纤维表面处理工艺对水泥基复合材料韧性影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(2): 26–30.
WANG Zhenjun, GAO Jie, WEI Yongfeng, et al. J Chang'an Univ(in Chinese), 2015, 35(2): 26–30.

[15] ULUS H, ÜSTÜN T, ŞAHIN Ö S, et al. Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates[J]. J Compos Mater, 2015, 50(6): 761–770.

[16] CHENG Xiaowei, HUANG Sheng, GUO Xiaoyang, et al. Crumb waste tire rubber surface modification by plasma polymerization of ethanol and its application on oil-well cement[J]. Appl Surf Sci, 2017, 409: 325–342.

[17] KHAN M Z N, HAO Yifei, HAO Hong, et al. Experimental evaluation of quasi-static and dynamic compressive properties of ambient-cured high-strength plain and fiber reinforced geopolymer composites[J]. Constr Build Mater, 2018, 166: 482–499.

[18] LUO Lin, LI Xibing, TAO Ming, et al. Mechanical behavior of rock-shotcrete interface under static and dynamic tensile loads[J]. Tunn Undergr Sp Tech, 2017, 65: 215–224.

[19] LI Zaoyuan, ZHANG Kai, GUO Xiaoyang, et al. Study of the failure mechanisms of a cement sheath based on an equivalent physical experiment[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2016, 31: 331–339.

[20] LIU Ping, HU Dean, WU Qiankun, et al. Sensitivity and uncertainty analysis of interfacial effect in SHPB tests for concrete-like materials[J]. Constr Build Mater, 2018, 163: 414–427.

[21] WANG Q Z, LI W, XIE H P. Dynamic split tensile test of Flattened Brazilian Disc of rock with SHPB setup[J]. Mech Mater, 2009, 41(3): 252–260.

[22] LIU Haifeng, MA Jurong, WANG Yiying, et al. Influence of desert sand on the mechanical properties of concrete subjected to impact loading[J]. Acta Mech Solida Sin, 2017, 30(6): 583–595.

[23] WANG S, LE H T N, POH L H, et al. Effect of high strain rate on compressive behavior of strain-hardening cement composite in comparison to that of ordinary fiber-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 136: 31–43.

[24] GUO Y B, GAO G F, JING L, et al. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading[J]. Int J Impact Eng, 2017, 108: 114–135.

[25] XIE Youjun, FU Qiang, ZHENG Keren, et al. Dynamic mechanical properties of cement and asphalt mortar based on SHPB test[J]. Constr Build Mater, 2014, 70: 217–225.

[26] 程小伟, 秦丹, 赵殊勋, 等. 动态冲击下纤维素固井水泥石力学性能及增韧机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1918–1922.
CHENG Xiaowei, QIN Dan, ZHAO Shuxun, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2019, 38(6): 1918–1922.

[27] LUNDBERG B. A Split hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1976, 6(13): 187–197.

[28] 莫继春, 李杨, 卢东红, 等. 霍布金森水泥石动态力学性能与射孔验窜试验装置[J]. 钻井液与完井液, 2004(6): 10–13.
MO Jichun, LI Yang, LU Donghong, et al. Drill Fluid Compl Fluid(in Chinese), 2004(6): 10–13.

[29] GILMAN A B, PISKAREV M S, KUZNETSOV A A, et al. Modification of ultrahigh-molecular-weight polyethylene by low-temperature plasma (review)[J]. High Energy Chem, 2017, 51(2): 136–144.

[30] ZHANG Q B, ZHANG Q B, ZHAO J, et al. A Review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mech Rock Eng, 2014, 47(4): 1411–1478.

[31] HAN Zhenyu, LI Diyuan, ZHU Quanqi, et al. Dynamic fracture evolution and mechanical behavior of sandstone containing noncoplanar elliptical flaws under impact loading[J]. Adv Civ Eng, 2018, 2018: 1–16.

[32] 程小伟, 时宇, 龙丹, 等. 等离子改性碳纤维对固井水泥界面的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(5): 673–677.
CHENG Xiaowei, SHI Yu, LONG Dan. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(5): 673–677.

[33] CHENG Xiaowei, QIN Dan, CHEN Zuwei, et al. Mechanical response and crack propagation of oil well cement under dynamic and static loads[J]. J Adhes Sci Technol, 2019, 33(15): 1658–1675.

[34] GONG Fuyuan, ZHANG Dawei, SICAT Evdon. Empirical estimation of pore size distribution in cement, mortar, and concrete[J]. J Mater Civil Eng, 2014, 7(26): 1–11.

[35] IOANNIDOU K. Heterogeneity in cement hydrates[J]. ACS Symposium Series, 2018, 1296: 357–371.

[36] NISHIKAWA Tadahiro, TADATSU Manabu. Fracture behavior of hardened cement paste incorporating mineral additions[J]. Cem Concr Res, 1995, 6(25): 1218–1224.

[37] 金二锁, 杨芳, 朱阳阳, 等. 碱处理后纤维素纳米晶体的 XRD、FT-IR 和 XPS 分析[J]. 纤维素科学与技术, 2016, 3(24): 1–6.
JIN Ersuo, YANG Fang, ZHU Yangyang, et al. J Cellulose Sci Technol(in Chinese), 2016, 3(24): 1–6.

[38] JOHANSSON Leenasisko, CAMPBELL J M, KOLJONEN Krista, et al. Evaluation of surface lignin on cellulose fibers with XPS[J]. Appl Surface Sci, 1999, 144: 92–95.

[39] 张成, 刘兆政, 孙明娟, 等. 低温等离子体碳纤维表面处理技术研究[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 294–296.
ZHANG Cheng, LIU Zhaozheng, SUN Mingjuan, et al. Mater Rep(in Chinese), 2018, 32(S1): 294–296.

[40] CHENG Xiaowei, DONG Qingguang, LI Zaoyuan, et al. Influence of potassium titanate whisker on the mechanical properties and microstructure of calcium aluminate cement for in situ combustion[J]. J Adhes Sci Technol, 2018, 32(4): 343–358.

[41] LV Xiangfeng, ZHOU Hongyuan, LIU Xiaoli, et al. Experimental study on the effect of basalt fiber on the shear behavior of cemented sand[J]. Environ Earth Sci, 2019, 78(24): 1–13.

[42] 徐礼华, 余红芸, 池寅, 等. 钢纤维-水泥基界面过渡区纳米力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(8): 1134–1146.
XU Lihua, YU Hongyun, CHI Yin, at al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(8): 1134–1146.

[43] 孙伟, MANDEL J A. 纤维间距对界面层的影响[J]. 硅酸盐学报, 1989, 17(3): 76–81.
SUN Wei, MANDEL J A. J Chin Ceram Soc, 1989, 17(3): 76–81.