

矿物纤维增强覆膜砂的界面力学模型研究

陈 诚¹, 姚 晓¹, 武明鸣², 宋金波²

(1. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210009; 2. 中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院, 山东东营 257000)

摘要: 为深入了解纤维复合防砂技术中纤维复合砂体的增强作用机理, 对纤维与覆膜砂表面树脂层的界面性质进行了研究。基于纤维增强复合材料的剪滞理论模型, 对单纤维-树脂层微元体进行了界面力学分析; 根据矿物纤维覆膜砂体的特征, 对剪滞理论模型进行了修正, 建立了可定量计算纤维覆膜砂体抗压强度的剪滞理论力学模型。研究发现, 覆膜砂体具有宏观颗粒多孔特征和树脂反应收缩产生的大量微裂缝和微孔隙, 使砂体应力集中, 导致其在 60 和 80 ℃ 温度下的抗压强度分别为 2.75 和 8.88 MPa; 矿物纤维与覆膜砂体为点接触, 每个接触点的有效粘结长度为 0.3 mm 左右; 覆膜砂体中加入 0.2% 矿物纤维后, 纤维复合砂体的抗压强度比空白砂体提高了 0.92 MPa。研究结果表明, 最大剪应力与纤维有效粘结长度呈双曲正切函数关系, 纤维有效粘结长度等于所用覆膜砂粒的半径, 修正模型从界面力学的角度解释了纤维增强覆膜砂的作用机理, 并可在较小误差范围内定量计算适当纤维掺量下纤维复合砂体的抗压强度。

关键词: 纤维 防砂 覆膜砂 增强机理 力学分析 界面力学

中图分类号: TE358⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2014)04-0086-05

Interface Mechanical Model of Mineral Fiber-Resin Coated Sand

Chen Cheng¹, Yao Xiao¹, Wu Mingming², Song Jinbo²

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing, Jiangsu, 210009, China; 2. Oil Production Technology Research Institute, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: To further understand the enhancement mechanism of the fiber-resin coated sand control technique, the interfacial mechanical properties of fiber and resin coat were analyzed. The shear-lag model of fiber-reinforced composites was used to analyze the interfacial mechanics of single fiber-resin infinitesimal element. Then, this model was modified according to the characteristics of the mineral fiber-resin coated sand, into a shear-lag mechanical model that could quantify the compressive strength of the fiber-resin coated sand. SEM showed that there were a large number of micro-cracks and micro-pores resulting from resin shrinkage and pellet porous structure, which enabled the stress concentration in the sand body and made its compressive strength only 2.75 MPa(60 ℃) and 8.88 MPa(80 ℃). Point contact existed between mineral fiber and resin coated sand, with net bond length approximately 0.3 mm at each point. The compressive strength of the fiber-resin coated sand with 0.2% mineral fibers was 0.92 MPa higher than that of blank sample. The results proved that there was a hyperbolic tangent function relationship between the maximum shear stress and the effective bond length of fiber, and the effective bond length of fiber was equal to the radius of the resin coated sand. The modified model provided a more reasonable explanation of mechanism of the fiber-resin coated sand from the perspective of interface mechanics, and allowed the quantitative calculation of the compressive strength of fiber-resin coated sand with a appropriate fiber content in a small error range.

Key words: fiber; sand control; resin coated sand; enhancement mechanism; mechanical analysis; interface mechanical

纤维复合防砂技术的核心是在覆膜砂中加入纤维, 该技术可以弥补传统防砂技术的缺陷^[1-7], 提高覆膜砂的挡砂性能, 延长防砂有效期, 降低综合成本, 具有增产及防砂的双重效果。纤维复合砂体的强度直接决定着防砂效果及有效期, 目前主要基于纤维间距理论和复合材料理论^[8-9]解释纤维增强覆膜砂的作用机理, 但由于覆膜砂中纤维直接与覆膜砂表面的树脂层相互作用, 这 2 种理论均未涉及影

响复合砂体性能的界面力学性质^[10-11]这一主要因

收稿日期: 2014-02-23; 改回日期: 2014-06-03。

作者简介: 陈诚(1988—), 男, 江苏盐城人, 2012 年毕业于扬州大学高分子材料与工程专业, 在读硕士研究生, 主要从事油田化学材料方面的研究。

联系方式: (025)83587253, chzhw1988@sina.com。

通讯作者: 姚晓, yaoxiao@njut.edu.cn。系本刊编委。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司前瞻性项目“纤维在防砂堵调领域可行性研究”(编号: P13045)和江苏高校优势学科建设工程项目资助。

素。纤维与树脂界面间的相互作用理论主要有界面浸润理论、过渡层理论和化学键理论^[12],但这些理论均只能进行定性分析,不能进行定量计算。

加入纤维后,从本质上改变了纤维覆膜砂体复合材料的界面作用性质,使其宏观性能得以增强,所以纤维-覆膜砂体界面力学性质对纤维复合砂体的强度至关重要,但目前涉及其界面力学性质的理论研究甚少。为此,笔者基于纤维复合材料的剪滞理论^[13-14],对纤维-覆膜砂体的界面力学性能进行研究,并根据矿物纤维覆膜砂体的特征,对剪滞理论模型进行了修正,建立了可定量计算纤维覆膜砂复合体抗压强度的修正模型,尝试从界面力学的角度解释纤维增强覆膜砂的作用机理。

1 试验方法

目前,主要依据行业推荐标准 SY/T 5276—2000^[15]测试覆膜砂人工岩心的抗折、抗压强度,但该标准并不适用于纤维复合覆膜砂,因为纤维在Φ25 mm玻璃管中很难均匀分散。笔者借鉴纤维水泥混凝土相关成型方法,尝试解决纤维分散不均和测试结果误差大的问题。

试验选用粒径0.4~0.8 mm的酚醛树脂覆膜砂(胜利油田)和直径13 μm、长度12 mm的矿物纤维(掺量为0.2%)进行研究,改进后的试验方法为:

1) 将矿物纤维放入250 mL 0.3% 胺胶溶液中搅拌分散,然后倒入装有定量覆膜砂的砂浆搅拌机中搅拌至纤维在砂体中均匀分散;

2) 将搅拌好的纤维覆膜砂用滤布挤压出气泡和胺胶溶液,然后倒入尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的三联模中,用振动台振动捣实90次;

3) 将捣实成型的模具表面刮平,用玻璃板盖住,放入恒温(分别为60和80 °C)水浴箱中养护48 h,拆模,测试其力学性能。

4) 取样品干燥,喷金,使用ZEISS EVO MA18型扫描电子显微镜观测微观形貌。

2 纤维-覆膜砂界面性质

高温下覆膜砂粒表面的树脂膜会软化,具有一定的黏性和流动性,树脂经固化反应后体积收缩,相互粘结硬化形成具有一定强度的树脂固化胶结层,对砂粒起到固化作用。覆膜砂固结后的载荷主要由砂体承担,由于石英砂的强度远大于固化树脂,因此

其载荷强度由砂粒表面包覆树脂层的胶结强度决定。载荷作用时,砂体承受的应力传递至树脂层,从树脂基体到纤维-树脂基体界面再到纤维,相当于载荷是由树脂基体和纤维共同来承担,故树脂层以及纤维-树脂的界面性质是决定砂体强度的关键因素。

扫描电镜下可见砂粒表面树脂层和矿物纤维与树脂接触面都存在大量微裂缝和微孔隙(见图1和图2)。覆膜砂体呈现为宏观多孔,且具有明显的颗粒特征。同时,树脂固化反应是放热收缩过程,会产生大量的微裂缝和微孔隙,导致固结体基体内部存在明显的结构缺陷。在外载荷与环境因素共同作用下有结构缺陷之处产生应力集中,促使裂缝进一步扩展,表现为固结体基体容易被破坏。

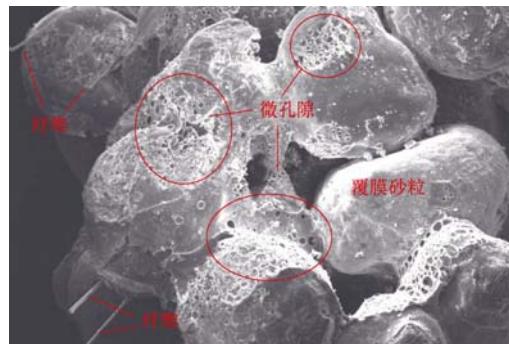


图1 纤维复合砂体的裂缝和孔洞

Fig. 1 Cracks and holes in the fiber-resin coated sand

矿物纤维与砂粒表面树脂层的粘结特征如图2所示。纤维表面被树脂包裹,说明纤维和树脂之间的粘结较为理想。纤维与树脂的作用力主要取决于界面粘结面积和界面粘结强度,且界面间作用力越大对覆膜砂固结体的增强作用越显著。

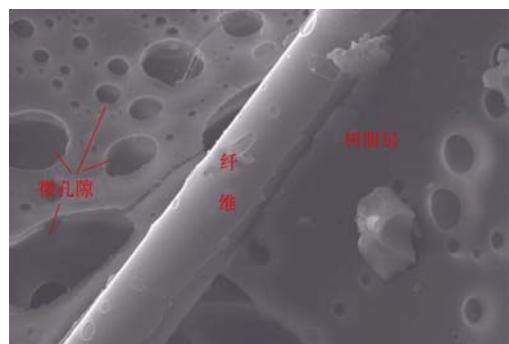


图2 纤维与树脂粘结界面

Fig. 2 Bond interface between fiber and resin

3 单纤维界面作用力分析

矿物纤维加入覆膜砂体后,基本作用单元是由

单纤维与覆膜砂粒表面树脂层构成的微元体。由于矿物纤维在复合砂体中的真实状况非常复杂,因此为了分析界面间的力学作用,特作简化假定:1)树脂层基体及纤维在外力作用下均发生弹性形变,界面粘结完好;2)拉应力全部由纤维承受,纤维-树脂界面只承受剪应力;3)剪应力沿界面和纤维轴向变化,但不随纤维中心轴环向角而变化;4)不考虑纤维端面上所受应力。

界面应力分析模型如图3所示,其中单元中间是一根半径为 r_f 的纤维,周围是半径为R的树脂基体。

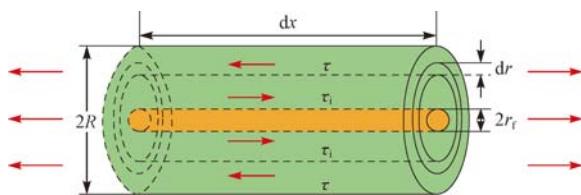


图3 纤维-树脂界面应力分析模型
Fig. 3 Stress analysis model of resin

通过推导^[16]可得:

$$\sigma_f = E_f \bar{\epsilon} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{\eta}{r_f} x\right)}{\cosh(\eta n)} \right) \quad (1)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} \eta E_f \bar{\epsilon} \frac{\sinh\left(\frac{\eta}{r_f} x\right)}{\cosh(\eta n)} \quad (2)$$

其中

$$\eta = \sqrt{\frac{2G_m}{E_f \ln\left(\frac{R}{r_f}\right)}} \quad (3)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (4)$$

$$n = \frac{L}{2r_f} \quad (5)$$

式中: σ_f 为纤维轴向拉应力, MPa; τ_i 为纤维-树脂界面的剪应力, MPa; $\bar{\epsilon}$ 为纤维的轴向应变; G_m 为树脂的剪切模量, MPa; E_m 为树脂的弹性模量, MPa; ν_m 为树脂的泊松比; E_f 为纤维的弹性模量, MPa; η 为与纤维性能参数(G_m 、 E_f 、 r_f)以及纤维在基体中的分布 $\frac{R}{r_f}$ 有关的因子,对于连续纤维增强复合材料,当纤

维呈正四边形列阵排列时, $\frac{R}{r_f}$ 可以近似为 $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\nu_f}}$; ν_f 为纤维的泊松比; n 为纤维的长度与其直径之比; L 为纤维的长度, m。

拉应力 σ_f 和界面剪应力 τ_i 分别在 $x=0$ 处和 $x=\pm \frac{L}{2}$ 处取得最大值, 即:

$$\sigma_{f\max} = E_f \bar{\epsilon} [1 - \operatorname{sech}(\eta n)] \quad (6)$$

$$\tau_{i\max} = \frac{1}{2} \eta E_f \bar{\epsilon} \tanh(\eta n) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知, 在一定范围内, 随着纤维长度 L 和弹性模量 E_f 的增大及纤维直径 d_f 的减小, 基体通过粘结界面向纤维传递的载荷增大, 符合界面性能增强提高复合材料性能的规律。

纤维轴向拉应力由两端的零值逐渐增至中间的最大值, 并等于纤维的极限强度, 定义此时的纤维长度为纤维临界长度。该长度是纤维的最大拉应力达到纤维破坏应力所必须的最小长度, 符合下面的关系式。

$$\frac{L_c}{d_f} = \frac{\sigma_{fu}}{2 \tau_0} \quad (8)$$

式中: d_f 为纤维直径, m; σ_{fu} 为纤维的极限强度, MPa; L_c 为纤维临界长度, m; 纤维临界长度上平均单位剪切力, MPa。

由式(8)即可确定纤维临界长度。在纤维复合材料中, 要使纤维能够充分发挥增强效应, 其长度必须不小于其临界长度。

4 矿物纤维覆膜砂抗压强度修正计算

树脂受热反应收缩, 会出现大量的微裂缝和微孔洞, 树脂砂体应力集中, 导致其破坏应力大幅降低。由于纤维的弹性模量远大于固化树脂, 纤维复合砂体破坏时纤维主要为拔出而非断裂。当树脂基体与纤维结合非常紧密时, 纤维将抑制基体产生过大变形, 在树脂-纤维界面层会出现剪切应变和剪切应力。因此, 可以将纤维复合砂体中纤维-树脂界面受到的总剪应力看成是树脂砂体加入纤维后比空白砂体增加的抗压强度。

上节力学模型建立的前提是纤维完全被树脂包覆, 但实际上由于覆膜砂的宏观颗粒性多孔特征, 纤维与树脂砂体是点接触。因此需对模型进行修正, 采用纤维有效粘结长度进行计算。

试验所用覆膜砂的粒径(直径)为 0.4~0.8 mm(取平均值 0.6 mm)、纤维尺寸为 $\phi 13.0 \mu\text{m} \times 12 \text{ mm}$, 假定砂粒表面的树脂层厚度均匀。纤维与砂粒表面的树脂层是点接触, 设每个接触点上(见图4中红色框)纤维与树脂层交点到砂粒球心的连线夹角为 60°(见图5), 则每个接触点穿过树脂层的纤维长度为 0.3 mm, 即纤维的有效粘结长度为 0.3 mm。在覆膜砂粒紧密排列情况下, 12 mm 长纤维被树脂包覆的总长度为 6 mm。

对模型进行修正后, 剪应力的计算式为:

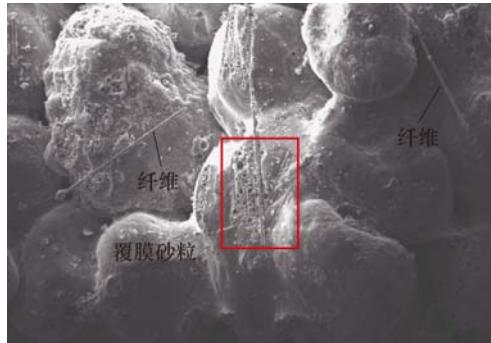


图 4 纤维与树脂粘结形貌

Fig. 4 Morphology of fiber-resin bond

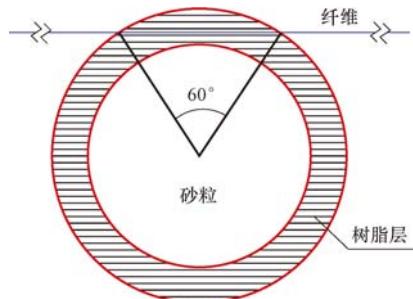


图 5 纤维穿过树脂砂体结构示意

Fig. 5 Schematic diagram of fiber crossing resin

$$\tau_{i \max} = \frac{1}{2} \eta E_f \bar{\epsilon} \tanh(\eta n_e) \quad (9)$$

其中

$$n_e = \frac{L_e}{2 r_f} \quad (10)$$

式中, L_e 为纤维的有效粘结长度, m。

根据修正后的式(9)可以计算出矿物纤维覆膜砂抗压强度, 其计算过程如下:

1) 已知固结酚醛树脂弹性模量 $E_m = 1.0$ GPa, 泊松比 $\nu_m = 0.35$, 代入式(4)求得 $G_m = 370$ MPa; 已知矿物纤维弹性模量 $E_f = 100$ GPa, 泊松比 $\nu_f = 0.2$, 代入 $\frac{R}{r_f} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{V_f}}$ 求得 $\frac{R}{r_f} = 1.98$; 利用式(3)计算求得 $\eta = 0.104$ 。

2) 已知纤维有效粘结长度 $L_e = 0.3$ mm, 由式(10)计算得 $n_e = 23$ 。

3) 已知矿物纤维轴向应变 $\bar{\epsilon} = 0.032$, 带入式(9)计算得 $\tau_{i \max} = 163.64$ MPa。由纤维的临界长度定义可知, 纤维轴向拉应力由两端的零值逐渐增至中间的最大值, 由式(1)、(2)可知, 拉应力 σ_f 和界面剪应力 τ_i 分别在 $x=0$ 处和 $x=\pm \frac{L_e}{2}$ 处取得最大值。

由于 x 的值很小, 修正计算中近似认为纤维的剪应力是从两端以最大值呈线性方式逐渐减至零, 则纤维临界长度上单位剪应力平均值 $\tau_0 = 81.82$ MPa。

4) 已知矿物纤维极限拉伸强度 $\sigma_{fu} = 3.2$ GPa, 由

式(8)计算得纤维临界长度 $L_c = 0.25$ mm, 而纤维有效粘结长度为 0.3 mm, 所以加入纤维有效。由于纤维的有效粘结长度与临界长度相差很小, 计算有效粘结长度上的单位剪应力平均值时必须考虑线性变化。图 6 为纤维有效粘结长度上的剪应力分布, 由

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{-\frac{L_e}{2}}^{\frac{L_e}{2}} \tau_i dx}{L_e} \quad \text{计算得纤维有效粘结长度上的平均剪应力 } \bar{\tau} \text{ 为 } 68.18 \text{ MPa}。$$

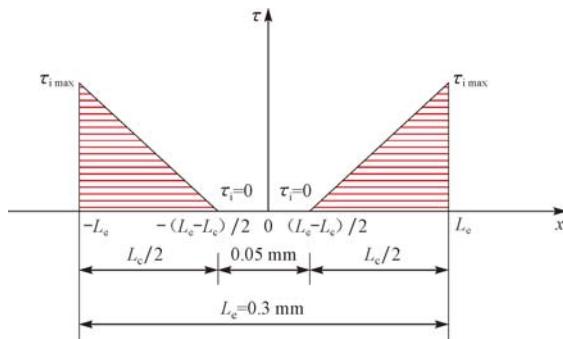


图 6 纤维上的剪应力分布示意

Fig. 6 Schematic diagram of shear stress distribution along the fiber surface

5) 试验所用矿物纤维规格为 $\phi 13.0 \mu\text{m} \times 12$ mm, 密度 2.65 g/cm^3 , 掺量 0.2%, 由此计算得纤维总根数 $N=55309$, 单根纤维有效粘结表面积 $S=0.245 \text{ mm}^2$, 单根纤维剪应力 $\tau=\bar{\tau}S=16.7 \text{ Pa}$, 总剪应力 $T=N\tau=0.92 \text{ MPa}$ 。

可见覆膜砂体掺入 0.2% 矿物纤维后增加的总剪应力 $T=0.92 \text{ MPa}$, 理论上纤维复合砂体应该比空白砂体抗压强度提高 0.92 MPa。

为了验证修正模型计算的准确性, 在 60 和 80 °C 温度条件下分别进行了掺入 0.2% 的 $\phi 13.0 \mu\text{m} \times 12$ mm 矿物纤维复合砂体试验和理论抗压强度对比试验, 试验结果和模型计算结果见表 1。

表 1 矿物纤维复合砂体试验和理论抗压强度

Table 1 Test and theoretical compressive strength of mineral fiber-resin coated sand

温度/°C	实测覆膜砂体抗压强度/MPa	纤维复合砂体抗压强度/MPa		相对误差, %
		实测	理论计算	
60	2.75	3.28	3.67	11.89
80	8.88	9.48	9.80	3.38

由表 1 可知, 较高温度下的计算值更接近实测值。这是因为 80 °C 可以使固结反应更加完全, 粘结效果更接近理论假设条件; 纤维复合砂体抗压强度模型的计算值均大于实测值, 其原因在于: 模型适用

于无限长平行纤维,没有考虑短纤维的分散、取向以及团簇等因素,纤维-树脂界面无法保证全部为理想粘结状态,也未考虑试验误差和相关物性参数误差,以及修正模型的近似处理等,致使理论计算结果有所偏差。但修正后的理论计算模型突破了过去只能对纤维增强覆膜砂固结体机理进行定性解释的不足,可以定量计算其抗压强度,且误差较小。

5 结 论

1) 根据纤维覆膜砂体中纤维与覆膜砂粒是点接触的特点,确定了每个接触点的纤维有效粘结长度,并对纤维增强复合材料的剪滞理论模型进行了修正,得到了可定量计算纤维复合覆膜砂体抗压强度的修正模型。

2) 修正模型是在覆膜砂粒树脂层涂覆均匀、纤维分散均匀的前提下建立的,但实际施工中受到树脂包覆以及纤维分散均匀度、分布方向和密度等因素的影响,造成修正模型的计算结果与实际情况有所偏差。

3) 修正前的模型中纤维被基体全部包覆,有效粘结长度即为纤维的总长度,与基体尺寸无关;而修正后的模型中,纤维有效粘结长度等于所使用覆膜砂粒的平均半径,即纤维的包覆长度与基体(覆膜砂粒尺寸)有关。

参 考 文 献

References

- [1] 李鹏,赵修太,邱广敏,等.纤维复合防砂技术的研究及现场应用[J].特种油气藏,2005,12(4):87-91.
Li Peng, Zhao Xiutai, Qiu Guangmin, et al. Study and field application of fibre complex sand control[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(4): 87-91.
- [2] 李怀文,邵力飞,刘计超,等.降水防砂复合材料的研究与应用[J].石油钻探技术,2011,39(5):79-81.
Li Huaiwen, Shao Lifei, Liu Jichao, et al. Research and application of composite material for lowering water cut and sand control[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5): 79-81.
- [3] 齐宁,张琪,周福建,等.纤维复合防砂技术的机理研究及应用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(2):83-87.
Qi Ning, Zhang Qi, Zhou Fujian, et al. Mechanism and application of fiber-resin coated sand control technique[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2007, 31(2): 83-87.
- [4] 金潮苏.绕丝筛管高压充填防砂井失效原因及对策[J].石油钻探技术,2010,38(4):118-120.
Jin Chaosu. Failure analysis of wire-wrapped screen gravel packing and its countermeasures[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 118-120.
- [5] 赵修太,陈东明.油井出砂后期多级防砂技术级数研究[J].石油钻探技术,2011,39(1):94-100.
Zhao Xiutai, Chen Dongming. Multiple sand control technology in late stage of sand production[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(1): 94-100.
- [6] 周福建,熊春明,杨贤友,等.纤维复合无筛管防细粉砂理论研究[J].石油勘探与开发,2005,32(6):72-74.
Zhou Fujian, Xiong Chunming, Yang Xianyou, et al. Theory of screenless fiber resin-coated sand complex fine-silty sand control[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 72-74.
- [7] 李金发,齐宁,周福建,等.井下高压充填纤维复合防砂体的力学分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(5):67-72.
Li Jinfa, Qi Ning, Zhou Fujian, et al. Mechanics analysis of fiber-complex sand control of downhole high-pressure packing[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(5): 67-72.
- [8] 周德喜,侯建国,崔蕾.国内外钢纤维混凝土受力性能研究述评[J].武汉大学学报:工学版,2008,41(增刊1):57-60.
Zhou Dexi, Hou Jianguo, Cui Lei. Review of researches on force performance of steel fiber reinforced concrete at home and abroad[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41 (supplement 1): 57-60.
- [9] 马一平,谈慕华.聚丙烯单丝与水泥石界面脱粘强度及其影响因素[J].同济大学学报,2001,29(4):406-409.
Ma Yiping, Tan Muhua. Research on the interfacial dedonding strength of polypropylene filament pull-out from cement paste and its affecting factors[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(4): 406-409.
- [10] 张莉,申士杰.纤维增强树脂基复合材料界面结合机理研究现状[J].纤维复合材料,2011(4):30-33.
Zhang Li, Shen Shijie. The research of fiber reinforced polymer interface[J]. Fiber Composites, 2011(4): 30-33.
- [11] 赵福明,中村直人.界面粘结强度对单向玻璃纤维增强环氧复合材料力学性能的影响[J].复合材料学报,2000,17(1):1215-1224.
Zhao F M, Takeda N. Effect of interfacial adhesion and statistical fiber strength on tensile strength of unidirectional glass fiber/epoxy composites: part II: comparison with prediction[J]. Composites; Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(11): 1215-1224.
- [12] 高庆,康国政.短纤维复合材料应力传递的修正剪滞理论[J].固体力学学报,2000,21(3):198-204.
Gao Qing, Kang Guozheng. The revised shear-lag theory for stress transfer in short fiber composites[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2000, 21(3): 198-204.
- [13] 张滇军,徐世烺.短纤维增强混凝土应力传递剪滞理论的改进[J].工程力学,2005,22(6):165-169.
Zhang Dianjun, Xu Shilang. The improvement on shear-lag theory for stress transfer in short fibre reinforced concrete[J]. Engineering mechanics, 2005, 22(6): 165-169.
- [14] SY/T 5276—2000 化学防砂人工岩心抗折强度、抗压强度以及气体渗透率的测定[S].
SY/T 5276—2000 Test method for flexural strength compression strength and air permeability of chemical sand consolidation in man-made core[S].
- [15] 刘永胜.纤维混凝土增强机理的界面力学分析[J].混凝土,2008(4):34-35.
Liu Yongsheng. Analysis of interface mechanics of fiber reinforced concrete[J]. Concrete, 2008(4): 34-35.

[编辑 滕春鸣]