

高阶煤支撑剂嵌入模型

张遂安, 曹立虎, 谭扬军, 刘岩, 王伟, 黄兆鑫

中国石油大学(北京)煤层气研究中心; 气体能源开发与利用教育部工程研究中心, 北京 102249

摘要 支撑剂嵌入煤层会损害压裂支撑裂缝导流能力。目前关于煤层支撑剂嵌入的研究主要为实验研究, 缺乏相应的理论数值计算模型。为此, 对沁水盆地端氏、曲堤和候村高阶煤层的支撑剂进行嵌入实验, 分析了闭合压力和煤岩坚固性系数对支撑剂嵌入的影响; 根据 Langmuir 定律, 推导出二维多层支撑剂嵌入煤岩的缝宽模型和压嵌模型, 利用实验数据对模型进行了验证。结果表明: 支撑剂嵌入煤岩时, 存在临界嵌入压力, 煤岩坚固性系数越小, 临界嵌入压力越小, 支撑剂越易嵌入煤岩; 在闭合压力小于 30 MPa 时, 支撑剂嵌入煤岩程度小于支撑剂粒径的 1/2 时, 模型计算结果与实验测试结果相似程度较高, 推导出的缝宽模型和压嵌模型能有效指导沁水盆地高阶煤层的水力压裂施工设计。

关键词 高阶煤; 坚固性系数; 支撑剂嵌入; 缝宽模型; 压嵌模型

中图分类号 TE375

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.14.008

Proppant Embedment Model of High Rank Coal

ZHANG Suian, CAO Lihu, TAN Yangjun, LIU Yan, WANG Wei, HUANG Zhaoxin

Engineering Research Center of the Ministry of Education for Gas Energy Development & Utilization; Coalbed Methane Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The successful development of coalbed methane in China is essential to national energy security, coal mining safety and the environment. Creating high conductivity fracture within coal matrix using hydrofracture has been regarded as one of the most effective technologies for coalbed methane development. As a complicated procedure, however, the ability to create fractures with high conductivity is significantly influenced by flowing back, smashing and embedding of the proppant, which can be well represented by the operations in the study area Qinshui basin. The proppant is easily embedded into the surface around the fracture during hydrofracture in highly matured soft coal in Qinshui basin. Hence, conductivity of the generated fracture is dramatically reduced as a result of narrow fracture with embedded proppant. Currently, studies on proppant embedding are mainly conducted in physical experiments, lacking the corresponding numerical models. To analyze the influence of closure pressure and Protodyakonov coefficient on proppant embedding in a numerical method, width formulas and embedded pressure formulas for coal were deduced based on Langmuir law. Experiments for examining the model have been conducted as well. The results show that there is a critical pressure during insertion of the proppant into the coal surface. The smaller the protodyakonov coefficient is, the lower the critical pressure becomes, and the easier the insertion of the proppant is. When the closure pressure was lower than 30 MPa, and only half or even less of the proppant was inserted into the coal, relatively high similarity was obtained between the calculated results from the numerical model and the experimental results. Thereby, the deduced width formulas and embedded pressure formulas are valuable in the hydrofracture design for the high rank coal in Qinshui Basin.

Keywords high rank coal; protodyakonov coefficient; proppant embedment; slit width model; pressure embedded model

收稿日期: 2014-01-13; 修回日期: 2014-03-11

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05034-003, 2011ZX05061, 2011ZX05062, 2011ZX05063)

作者简介: 张遂安, 教授, 研究方向为煤层气开发理论与技术, 电子邮箱: sazhang@263.net; 曹立虎(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为煤层气井水力压裂, 电子邮箱: cupbelh@163.com。

引用格式: 张遂安, 曹立虎, 谭扬军, 等. 高阶煤支撑剂嵌入模型[J]. 科技导报, 2014, 32(14): 54-58.

实践表明,水力压裂产生高导流能力支撑裂缝已成为煤层气高效开发的主要工程技术^[1,2]。能否产生高速的导流支撑裂缝,取决于支撑剂的回流、破碎和嵌入等因素^[3,4]。沁水盆地南部高阶煤相比普通砂岩和中、低阶煤,煤质较软^[5,6],支撑剂容易嵌入裂缝壁,减小裂缝的宽度,从而损害了裂缝的导流能力。国内学者对支撑剂嵌入开展了一定的实验分析,并得出一些有益的认识,但对支撑剂嵌入理论数值模型研究较少。支撑剂嵌入煤岩与常规岩石差异较大,嵌入程度受到闭合压力、岩坚固性系数、支撑剂性能和铺砂浓度等因素的影响^[7-9],对于煤岩压裂裂缝,煤岩的坚固性系数和闭合压力为决定支撑剂嵌入程度的主要因素^[9]。国外学者对支撑剂嵌入有深入研究,推导出了裂缝缝宽公式和嵌入深度与抗压强度关系等式,通过实验验证了所提出公式的有效性^[10-13]。但

公式应用需要知道支撑剂粒度、铺砂浓度、滤失速度和有效应力,而且推导过程中,认为裂缝中间只有一层支撑剂,过于简化。为此,本研究进行支撑剂嵌入煤岩实验,推导二维多层支撑剂嵌入缝宽公式和压嵌公式,通过支撑剂嵌入实验数据结果对公式进行验证分析。

1 支撑剂嵌入煤岩实验

1.1 实验设备

实验使用LD-1A导流能力测试仪,按照API标准设计,最高实验温度150℃最大闭合压力200 MPa,加载装置使用WHY-800型压力试验机。图1为LD-1A导流能力测试仪实物,图2为API支撑剂导流室示意图。



图1 LD-1A导流能力测试仪
Fig. 1 LD-1A conductivity meter

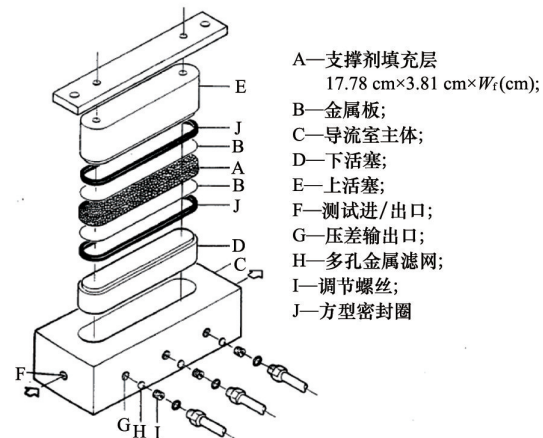


图2 API支撑剂导流室示意图
Fig. 2 API proppant diversion chamber schematic diagram

1.2 实验样品

1.2.1 支撑剂样品

根据郭天魁^[7]、刘岩等^[9]的研究成果,陶粒支撑剂更容易嵌入煤层气。因此选取16~30目陶粒支撑剂作为实验的支撑剂,测得16~30目陶粒支撑剂性能参数为:粒径0.09 cm,圆度0.9,球度0.9,视密度2.67 g/cm³,体积密度1.53 g/cm³,52 MPa闭合压力破碎率2.02%,浊度49.36,酸溶解度2.71。

1.2.2 煤岩样品

样品制备:煤心需加工成与导流室腔体形状一样,厚度1.5 cm左右,表面尽量平整,上下两个表面要相互平行。按照导流室尺寸,使用岩心切割机加工煤块成煤心,用砂纸沾水打磨至表面平整。图3为煤岩样品成品实物。



图3 煤岩样品实物
Fig. 3 Finished product of coal samples

选取沁水盆地候村、曲堤、端氏煤样进行对比实验,测得3种煤样坚固性系数分别为0.71、0.63、0.50。

1.3 嵌入深度计算

实验中,嵌入深度计算公式为

$$h = (W_g - W_{g1}) - (W_y - W_{y1}) \quad (1)$$

其中, h 为支撑剂嵌入煤岩深度,cm; W_g 为用钢板模拟的初始裂缝宽度,mm; W_{g1} 为用钢板模拟的任意时刻裂缝宽度,mm; W_y 为岩心模拟的初始裂缝宽度,mm; W_{y1} 为岩心模拟的任意时刻裂缝宽度,mm。

1.4 实验步骤

- 1) 钢板测试:钢板模拟裂缝缝壁,假设无嵌入,测量不同闭合压力下的缝宽。
- 2) 煤样测试:煤样模拟裂缝缝壁,支撑剂嵌入煤样,测量不同闭合压力下的缝宽。
- 3) 根据钢板测试和煤测试结果,根据式(1)计算不同闭合压力下的嵌入深度。

1.5 结果分析

实验选取闭合压力区间为5~60 MPa,铺砂浓度5 kg/m²,计算不同闭合压力下支撑剂的嵌入深度 h ,如图4所示。

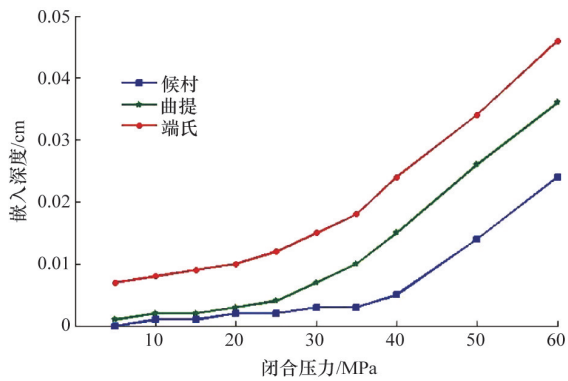
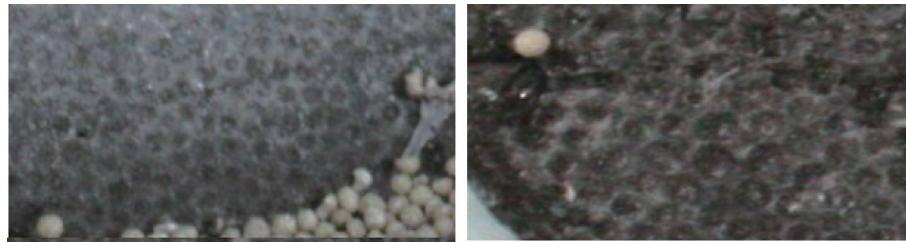


图4 不同闭合压力下的支撑剂嵌入深度

Fig. 4 Proppant embedment depth under different closure pressures

1) 随着闭合压力的增加,支撑剂嵌入深度增加,并且嵌入深度增加的幅度增大。曲线分为两个阶段:第1阶段嵌入程度变化不明显,比较平缓;第2阶段急剧增大,几乎成直

线。因为第1阶段闭合压力较低,导致缝宽变化的主要原因是岩心的弹性变形,但在达到一定闭合压力后,支撑剂和岩心都被压实,这种影响就可以忽略不计,嵌入开始急剧增大。从图4可以看出,在第2阶段,嵌入程度随压力增大几乎成直线急剧增大,因此闭合压力是影响支撑剂嵌入的最重要的因素之一。2) 支撑剂嵌入煤岩时,存在临界嵌入压力,煤岩坚固性系数越小,煤抵抗外力破坏的能力就越小,支撑剂越易嵌入煤岩,煤岩临界嵌入压力越小,侯村煤岩为20 MPa,曲堤煤岩为15 MPa,端氏煤岩为5 MPa。当压力大于临界嵌入压力后,坚固性系数越大,曲线斜率越大,说明支撑剂嵌入单位长度所需要的闭合压力也越大。坚固性系数是反映岩石各种抗性的综合指标,本实验表明坚固性系数能反映煤岩的抗嵌入能力,即坚固性系数越大的煤岩越不容易被嵌入,相反则容易被嵌入。从图5,可以看出在60 MPa闭合压力下,端氏煤岩的压痕比侯村煤岩的更紧密,压痕大小与支撑剂颗粒尺寸差别不大,甚至会有部分重叠的压痕。



(a) 侯村煤岩

(b) 端氏煤岩

图5 60 MPa闭合压力下侯村煤岩与端氏煤岩嵌入深度

Fig. 5 Embedment of Houcun coal and Duanshi coal samples depth under 60 MPa

2 支撑剂嵌入模型

2.1 物理模型

假设煤层均质,支撑剂嵌入时只发生弹性变形;支撑剂为理想的刚性球状,嵌入过程中不变形、不破碎,嵌入深度不超过一个支撑剂粒径;支撑剂呈多层均匀分布,相邻支撑剂颗粒之间紧密接触。多层支撑剂嵌入煤层模型如图6所示。

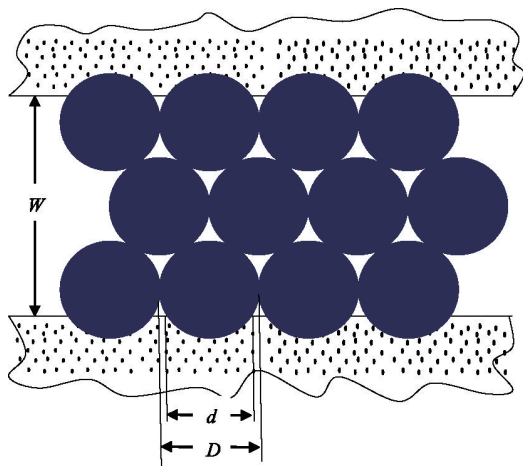


图6 多层支撑剂嵌入煤层示意,

Fig. 6 Multilayer proppant embedment seams

2.2 数值模型

2.2.1 压痕直径

由图6可知,支撑剂压痕直径 d 、支撑剂粒径 D 和嵌入深度 h 的关系如式(2)所示:

$$d = 2(Dh - h^2)^{0.5} \quad (2)$$

根据支撑剂嵌入煤样实验所得嵌入深度数据,可计算出压痕直径如表1所示。

表1 不同闭合压力下的支撑剂压痕直径

Table 1 Impression diameters of the proppant under different

闭合压力/MPa	压痕直径/cm		
	侯村	曲堤	端氏
5	0.006	0.019	0.048
10	0.013	0.024	0.051
15	0.019	0.025	0.054
20	0.023	0.032	0.057
25	0.027	0.037	0.061
30	0.030	0.048	0.067
35	0.032	0.057	0.072
40	0.041	0.067	0.080
50	0.065	0.082	0.087
60	0.080	0.088	0.090

2.2.2 Langmuir定律

Langmuir 定律常用来描述受载刚性球压入金属平板试样的过程, Huit 等^[10]用该定律模拟支撑剂嵌入地层的机制, 其表达式为

$$F = Ad^n \quad (3)$$

$$A = BD^{2-n} \quad (4)$$

其中, F 为刚性小球所受压载, MPa; A 、 B 为与材料有关的常数; n 为 Langmuir 指数, 取决于材料性质。

将等式(3)代入式(4)就可以得到关于压载 F 、压痕直径 d 和刚性球直径的关系式

$$F = BD^{2-n} d^n \quad (5)$$

式(5)可变换为

$$d/D = B^{-1/n} (F/D^2)^{1/n} \quad (6)$$

假设支撑剂嵌入煤岩与刚性球压入金属平板的机制相同, 则式(6)就能用来描述支撑剂的嵌入。

2.2.3 缝宽模型

假设支撑剂有 3 层, 如图 6 所示, 裂缝宽度由下式确定:

$$W = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2D + \sqrt{(D^2 - d^2)} \quad h \leq D/2 \quad (7)$$

$$W = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2D - \sqrt{(D^2 - d^2)} \quad D/2 < h \leq D \quad (8)$$

假设支撑剂有 $N+1$ 层, 在相同假设条件下, 可以由下式确定裂缝宽度:

$$W = \frac{\sqrt{3}}{2} ND \pm \sqrt{(D^2 - d^2)} = D \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} N \pm \left[\left(1 - \frac{d}{D} \right)^2 \right]^{0.5} \right\} \quad (9)$$

当 $h \leq D/2$ 时, 式(9)取“+”, 否则取“-”。

当 $h \leq D/2$ 时, 将式(6)和式(9)结合, 令 $K = B^{-2/n}$, $m = 2/n$, 裂缝宽度模型变为

$$W = D \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} N + [1 - K(F/D^2)^m]^{0.5} \right\} \quad (10)$$

其中, F 为单颗支撑剂颗粒所受的压载, 实验时记录的压载是整体支撑剂承受的载荷 p , 假如单面裂缝单位面积支撑剂颗粒数目相等为 τ , 则 $F = p/\tau$ 。因此, 可得到缝宽模型。

令 $K' = K\tau^{-2/n}$, 则缝宽模型为

$$W = D \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} N + [1 - K'(p/D^2)^m]^{0.5} \right\} \quad (11)$$

2.2.4 压嵌模型

根据式(6), 可以得到确定支撑剂压嵌模型(支撑剂压痕直径与闭合压力之间的关系)

$$d = B^{-1/n} F^{1/n} D^{1-2/n} \quad (12)$$

令 $K = B^{-2/n}$, 则压嵌模型变为

$$d = K^{0.5} F^{1/n} D^{1-2/n} \quad (13)$$

同理, 缝宽模型推导, 令 $F = p/\tau$, $K' = K\tau^{-2/n}$, 压嵌模型变为

$$d = K^{0.5} p^{1/n} D^{1-2/n} \quad (14)$$

3 数值模型验证

对压嵌模型式(14)两边取对数, 可得

$$\ln p = n \ln d - 0.5 \ln K' - (n-2) \ln D \quad (15)$$

即 $\ln p$ 与 $\ln d$ 成线性关系, 选用曲堤煤样嵌入程度小于 $D/2$ 的数据, 进行线性拟合, 得到

$$\ln p = 2.954 \ln d + 11.171, R^2 = 0.9994 \quad (16)$$

计算得 $K' = 8.91 \times 10^{-4}$, $K = 0.025$ 。

在 5 MPa 时, 模拟缝宽约为 0.22 cm, 假设无压力时缝宽为 0.24 cm, 则 $N = 0.24/0.09 = 2.6$, 综合以上数据得缝宽模型为

$$W = 0.09 [1.501 + (1 - 0.024 p^{0.686})^{0.5}] \quad (17)$$

用式(17)计算的缝宽结果与实验记录的缝宽对比如图 7 所示。由图 7 可知, 当闭合压力较小时, 模型计算的缝宽与实验缝宽非常接近, 但当闭合压力大于 30 MPa 后, 随着闭合压力的增加, 两者之间的差距越来越大, 缝宽模型结果在高闭合压力下比实验结果大, 这是因为支撑剂形状的不规则性和高闭合压力下支撑剂破碎对实验数据产生了影响。模型的成立条件是支撑剂嵌入程度不大于支撑剂粒径的 50%, 但实验数据表明, 沁水盆地候村、曲堤和端氏煤样在闭合压力小于 60 MPa 时, 支撑剂嵌入深度均小于支撑剂粒径的 1/2, 由于沁水盆地高阶煤层深度一般小于 1000 m^[5,6], 估测闭合压力小于 30 MPa, 因此推导出的缝宽模型和压嵌模型在实际生产中具有较高的实用价值。

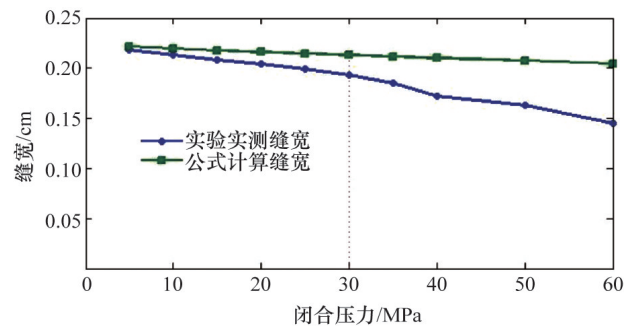


图 7 公式计算缝宽与实验实测缝宽对比

Fig. 7 Calculated slit width compared with the experimental records

4 结论

1) 进行了支撑剂嵌入煤岩的实验, 在一定的假设条件下, 建立了沁水盆地煤岩支撑剂裂缝缝宽和压痕直径计算模型, 利用支撑剂嵌入实验结果验证了计算模型, 模型计算结果与实验测试结果相似程度较高。

2) 随着闭合压力的增大, 支撑剂嵌入程度增加, 并且嵌入深度增加的幅度增大。可以看出曲线分为两个阶段: 第 1 阶段嵌入程度变化不明显, 比较平缓; 第 2 阶段急剧增大, 几

乎成直线。

3) 支撑剂嵌入煤样时,存在临界嵌入压力,煤样坚固性系数越小,煤抵抗外力破坏的能力就越小,支撑剂越易嵌入煤岩。

参考文献(References)

- [1] 高旺来. 不同闭合压力下内衣支撑剂导流能力变化特征的试验研究[J]. 江汉石油学院学报, 2006, 28(5): 125-127.
Gao Wanglai. Experimental study on the characteristics of flow conductivity of coated proppants under different close pressures[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2006, 28(5): 125-127.
- [2] 张毅, 周志齐. 压裂用陶粒支撑剂短期导流能力试验研究[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2000, 15(5): 39-41.
Zhang Yi, Zhou Zhiqi. Experimental study on the short-term flow conductivity of the cracks filled with ceramic site fracturing proppant[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2000, 15(5): 39-41.
- [3] 温庆志, 张士诚, 李林地. 低渗透油藏支撑裂缝长期导流能力实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(2): 97-99.
Wen Qingzhi, Zhang Shicheng, Li Lindi. Experimental research fo long-term flow capacity of propping fractures in the low permeability oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(2): 97-99.
- [4] 张士诚, 牟善波, 张劲, 等. 煤岩对压裂裂缝长期导流能力影响的实验研究[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1441-1448.
Zhang Shicheng, Mou Shanbo, Zhang Jing, et al. Experimental evaluation of long-term conductivity of fracturing in coal beds[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1441-1448.
- [5] 连承波, 李汉林. 地应力对煤储层渗透性影响的机理研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 30-32.
Lian Chengbo, Lin Hanlin. Mechanism research about effect of in-situ stress on coalbed permeability[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(2): 30-32.
- [6] 傅雪海, 秦勇, 姜波, 等. 山西沁水盆地中、南部煤储层渗透率物理模拟与数值模拟[J]. 地质科学, 2003, 38(2): 221-229.
Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. Physical and numerical simulations of permeability of coal reservoirs in central and southern part of the Qinshui Basin, Shanxi[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(2): 221-229.
- [7] 郭天魁, 张士诚. 影响支撑剂嵌入的因素研究[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 527-529.
Guo Tiankui, Zhang Shicheng. The factors affecting proppant embedment in weak gelling formation[J]. Fault-blocks Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 527-529.
- [8] 郭建春, 卢聪, 王文耀, 等. 支撑剂嵌入及对裂缝导流能力损害的实验研究[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 99-101.
Guo Jianchun, Lu Cong, Wang Wenyao, et al. Experimental research on proppant embedment and its damage to fractures conductivity[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2) 99-101.
- [9] 刘岩, 张遂安, 石惠宁, 等. 支撑剂嵌入不同坚固性煤岩导流能力实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(2): 75-78.
Liu Yan, Zhang Suian, Shi Huining, et al. Experimental research on flow conductivity of different firmness coal rock embedded by proppant[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(2): 75-78.
- [10] Huit J L, Mcglothlin Jr B B. The propping of fractures in formations susceptible to propping sand embedment[C]. Drilling and Production Practice, New York, January 1, 1958.
- [11] Lacy L L, Richards A R, Bilden D M. Fracture width and embedment testing in soft reservoir sandstone[J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 13(1): 25-29.
- [12] Milton-Taylor D, Stephenson C, Asgian I I. Factors affecting the stability of proppant in propped fractures: Results of a laboratory study[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington DC, October 4-7, 1992.
- [13] Lacy L L, Richards A R, Ali S A. Embedment and fracture conductivity in soft formations associated with HEC borate and water-based fracture designs[J]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 5-8, 1997.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



欢迎捐资加盟“《科技导报》博士生创新研究资助计划”

为支持在读博士研究生积极开展创新科学研究,为优秀青年科技人才起步科研工作添力助跑,并培养《科技导报》的论文作者、读者,促进《科技导报》组织、刊登高质量研究论文,科技日报社于2008年8月创设“《科技导报》博士生创新研究资助计划”。

至2013年,“《科技导报》博士生创新研究资助计划”已实施5批,60名优秀博士生获得资助。

科技日报社设立了“博士生创新研究资助基金”,将根据基金募集情况发布“博士生创新研究资助计划”资助名额。

为保障该计划的持续实施,并进一步扩大规模,欢迎科研机构、企业和科学家、企业家捐资、冠名,共同打造“《科技导报》博士生创新研究资助计划”这一平台,扶持优秀博士生成长。

联系人:《科技导报》编辑部 王媛媛

电话:010-61292956

电子信箱:wangyuanyuan@cast.org.cn