

层状页岩水力压裂裂缝与岩体弱面的干扰机理研究

彭春耀

(中国石油长城钻探工程公司,北京 100101)

摘 要:为了进一步认识水力压裂裂缝在层状页岩中的扩展行为,以四川盆地龙马溪组页岩为研究对象,根据 Mohr-Coulomb 准则,研究了水力压裂过程中层状页岩压裂裂缝与弱面的干扰机理,以及基质破坏、弱面剪切破坏、弱面张开破坏所对应的临界液压;根据断裂力学,研究了弱面在张开和剪切破坏下的剪切滑移量,建立了水力压裂裂缝与岩体弱面干扰理论模型,并对其进行了应用分析。实例计算分析表明: $0^{\circ}<\alpha<20^{\circ}$ 时(α 为弱面法向矢量与最大水平主应力方向的夹角),水力压裂裂缝中的液压容易促使岩石基质发生破坏; $25^{\circ}<\alpha<75^{\circ}$ 时,水力压裂裂缝中的液压容易促使页岩沿弱面剪切破坏; $80^{\circ}<\alpha<90^{\circ}$ 时,水力压裂裂缝的液压容易促使页岩沿弱面张开;剪切滑移量受弱面上摩擦系数、剪应力、正应力的共同影响,其中剪应力是剪切滑移的驱动因素。研究认为,当弱面发生张开或剪切破坏后,弱面滑移量与裂缝长度成正比,与弹性模量成反比;建立的理论模型与现场压裂微地震监测结果基本吻合,可用来预测水力裂缝与弱面的干扰行为。

关键词:页岩 水力压裂 压裂裂缝 层理 弱面

中图分类号:TE357.1+1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2014)04-0032-05

Mechanism of Interaction between Hydraulic Fractures and Weak Plane in Layered Shale

Peng Chunyao

(CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing, 100101, China)

Abstract: Taking Longmaxi Formation of the Sichuan Basin as an example, the mechanism of interaction between hydraulic fractures and weak plane was investigated to further understand the hydraulic fracture propagation in layered shale. Such mechanism in fracturing was analyzed based on Mohr-Coulomb Criteria, and the critical pressure for rock matrix failure, weak plane shear and opening failure were also studied. According to fracture mechanics, the shear displacement under opening and shear failure of a weak plane were considered, and then an interaction theoretical model was developed and applied in shale reservoir. The calculation example showed that, the pressure in hydraulic fracture could stimulate the rock matrix-failure when $0^{\circ}<\alpha<20^{\circ}$, the weak plane shear-failure when $25^{\circ}<\alpha<75^{\circ}$, and the weak plane opening-failure when $80^{\circ}<\alpha<90^{\circ}$; the shear displacement was jointly affected by frictional coefficient, shear stress (as the main factor) and normal stress. After the shear or opening failure of weak plane occurs, its displacement is proportional to fracture length and inversely proportional to elastic modulus. It was suggested that the theoretical model could be used in predicting the interaction between hydraulic fracture and weak plane, which was very consistent with the micro-seismic crack monitoring.

Key words: shale; hydraulic fracturing; fracturing fracture; bedding; weak plane

2010 年以来,我国在南方部分地区的下志留统龙马溪组和下寒武统筇竹寺组地层开始进行页岩气压裂先导试验,截至目前已完成 20 多口井的压裂试验,这些井多采用滑溜水压裂,但压裂后产量普遍较低。作为改造页岩储层的常用手段,水力压裂的目的是得到复杂的空间网状裂缝,高效沟通页岩储层中的天然裂缝和孔隙。那么,压裂后产量普遍较低

收稿日期:2013-08-26;**改回日期:**2014-05-16。

作者简介:彭春耀(1971—),男,江苏南通人,1995 年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,1998 年获石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,2013 年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,高级工程师,现从事钻井、完井工程方面的研究工作。

联系方式:pcycpdf@vip. sina. com。

基金项目:国家科技重大专项项目“塔里木盆地库车前陆冲断带油气开发示范工程”(编号:2011ZX05046)资助。

是什么原因呢? 这就需要进一步认识页岩储层中水力压裂裂缝的扩展行为和影响因素。关于该方面的研究, 国内外已有一些成果: H. Gu 等人^[1]提出了一种预测水力压裂裂缝能否穿透非正交天然裂缝的准则; 杨丽娜等人^[2]利用复变函数理论和位错理论, 考虑裂缝表面流体的作用, 分析了裂缝间的相互干扰; 陈勉等人^[3]通过模拟随机性裂缝性储层的压裂, 指出了水平应力差对水力压裂裂缝形态的影响; 周健等人^[4-7]采用 Mohr-Coulomb 准则研究了轮南碳酸盐岩储层水力压裂过程中, 天然裂缝张开和剪切破坏的机理, 定量研究了水平应力差和逼近角对裂缝破坏机制的影响; Zhao Haifeng 等人^[8]研究了水力压裂裂缝在层状地层中扩展时的应力强度因子, 并以此来判断水力压裂裂缝遭遇层理面后的扩展行为; S. C. Blair 等人^[9]指出水力压裂裂缝垂直于界面扩展时, 流体首先会沿着界面渗透, 然后突破界面沿着原方向扩展, 但受试验条件的限制, 忽略了岩石沿界面张开或剪切滑移的可能性; 程万等人^[10]建立了三维空间中水力压裂裂缝穿透天然裂缝的判别准则, 并通过水力压裂试验进行了验证。笔者在上述研究成果的基础上, 建立了水力压裂裂缝与不同产状岩体弱面的干扰模型, 并用某试验井压裂龙马溪组页岩气储层时的微地震检测数据验证了其合理性。

1 水力压裂裂缝与岩体弱面干扰模型

笔者以四川盆地志留统龙马溪组黑色页岩为研究对象, 从基质破坏、弱面剪切、弱面滑移等 3 个方面出发, 建立水力压裂裂缝与不同产状弱面的干扰模型。

1.1 水力压裂中层状页岩的破坏机制

图 1 所示为龙马溪组黑色页岩的岩心, 图 2 为露头岩样。从图 1 和图 2 可以看出, 该页岩层理和裂缝(以下均简称“弱面”)发育, 天然裂缝面与层理面基本平行。水平井水力裂缝扩展必然会遭遇弱面, 其扩展路径因此而受到影响。以 3 个主应力($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)方向为坐标轴建立空间坐标系(x, y, z)(见图 3), 则弱面的法向矢量 $\mathbf{n} = (l_x, l_y, l_z)$, 其承受的正应力和剪切应力为:

$$\sigma_n = \sigma_1 l_x^2 + \sigma_2 l_y^2 + \sigma_3 l_z^2 \quad (1)$$

$$\tau = \sqrt{\sigma_1^2 l_x^2 + \sigma_2^2 l_y^2 + \sigma_3^2 l_z^2 - (\sigma_1 l_x^2 + \sigma_2 l_y^2 + \sigma_3 l_z^2)^2} \quad (2)$$

水力压裂裂缝与弱面沟通后, 裂缝内的流体会沿



图 1 龙马溪组页岩岩心

Fig. 1 Core of Longmaxi Formation shale



图 2 龙马溪组页岩露头

Fig. 2 Outcrop of Longmaxi Formation shale

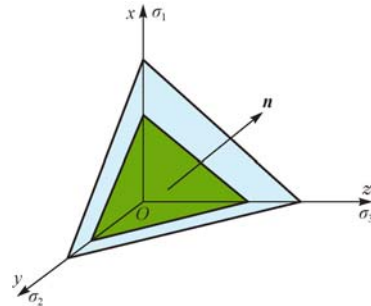


图 3 层状页岩弱面空间示意

Fig. 3 Dimensional indication of weak plane in layered shale

着弱面渗透, 水力压裂裂缝附近弱面内的流体压力近似等于水力裂缝内的压力。根据 Mohr-Coulomb 准则, 可得弱面剪切破坏的临界液压力:

$$p_{c1} = \sigma_n - \frac{\tau - \tau_0}{\mu} \quad (3)$$

岩石基质剪切破坏的临界液压力^[11]为:

$$p_{c2} = \frac{S_i}{\mu_1} + \sigma_3 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\mu_1(\sqrt{1 + \mu_1^2} + \mu_1)} \quad (4)$$

当弱面内部液压超过作用在弱面的正应力与抗拉强度之和时, 弱面张开, 因此弱面张开的临界液压为:

$$p_{c3} = \sigma_n + \sigma_t \quad (5)$$

比较式(1)~(5)可知, 层状页岩破坏的临界液压力为:

$$p_c = \min(p_{c1}, p_{c2}, p_{c3}) \quad (6)$$

式(6)中, $p_c = p_{c1}$ 时,弱面开始剪切破坏; $p_c = p_{c2}$ 时,基质开始破坏; $p_c = p_{c3}$ 时,弱面开始张开破坏。因此,水力裂缝沟通弱面后,裂缝扩展行为与流体压力、地应力、弱面产状、弱面抗剪强度、弱面抗拉强度、弱面内摩擦系数、基质抗剪强度、基质内摩擦系数等因素相关。

记弱面法向矢量 \mathbf{n} 与 σ_1 的夹角为 α , 弱面与平面 y - O - z 的交线与 σ_2 的夹角记为 β , 则:

$$\alpha = \arccos l_x \quad (7)$$

$$\beta = \arccos \frac{l_z}{\sqrt{l_x^2 + l_z^2}} \quad (8)$$

当空间坐标系 (x, y, z) 与大地坐标系 (U, N, E) 一致时, α 代表弱面倾角, β 代表弱面走向; 当坐标系 (x, y, z) 与坐标系 (U, N, E) 不一致时, 需进行空间坐标转换。

1.2 水力压裂中弱面剪切滑移量计算模型

赵海峰等人^[12]以清水为流体介质, 通过试验测试了裂缝导流能力与裂缝面相对滑移量之间的关系曲线。测试发现, 当裂缝面滑移量达到临界滑移量后, 导流能力趋于稳定。并发现, 当水力压裂裂缝端部液压 p_f 满足 $p_{c1} < p_f < p_{c3}$ 时, 弱面发生剪切滑移而不张开, 粘聚力为 0。根据断裂力学^[13], 弱面相对剪切滑移量为:

$$\Delta u = 4\sqrt{2} \frac{a}{E'} [\tau - (\sigma_n + \sigma_t - p_f)\mu] \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (10)$$

当裂缝内部液压 p_f 满足 $p_f > p_{c3}$ 时弱面张开, 作用在弱面上的摩擦力以及粘聚力均为 0。剪应力释放导致的弱面滑移量与在张开的弱面上施加大小相等、方向相反的剪应力所产生的滑移量相等。根据断裂力学^[13], 弱面相对剪切滑移量为:

$$\Delta u = 4\sqrt{2} \frac{a}{E'} \tau \quad (11)$$

由式(9)和式(11)知, 弱面滑移量 Δu 与 a 为线性关系, 表明长天然裂缝更容易在压裂中激活。弱面上的剪应力是剪切滑移的驱动因素, 弹性常数 E' 越大, 弱面剪切滑移量越小。

2 实例计算与分析

四川盆地志留统龙马溪组页岩气藏发育层段埋深 2 400.00~2 525.00 m, 上覆岩层应力梯度 0.020 MPa/m, 水平最小应力梯度 0.019 MPa/m,

水平最大应力梯度 0.023 MPa/m, 岩石基质弹性模量 36.5 GPa, 泊松比 0.21。通过现场资料和室内试验结果, 获得如下基本参数: 层理面内摩擦系数 0.6, 层理面粘聚力 5.0 MPa, 层理面抗拉强度 4.0 MPa, 基质内摩擦系数 0.7, 基质粘聚力 6.5 MPa, 天然裂缝面摩擦系数 0.61, 天然裂缝面粘聚力 2.0 MPa。依据式(1)~(8)计算层状页岩破坏的临界液压分布, 结果如图 4 所示。

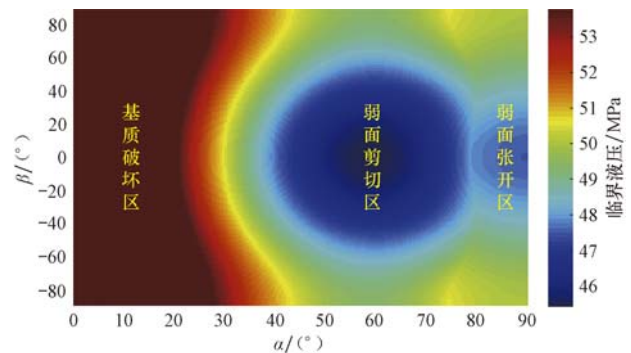


图 4 层状页岩临界缝内液压分布

Fig. 4 Critical pressure in fractures of layered shale

由图 4 可知: 页岩基质发生破坏的临界液压为 53.1 MPa; 页岩水力压裂裂缝在临界液压下, 扩展分为基质破坏区、弱面剪切破坏区、弱面张开破坏区 3 个区域; 与 β 相比, α 是水力压裂裂缝扩展模式的主导因素, 当 $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ 时, 页岩基质容易发生破坏, 当 $25^\circ < \alpha < 75^\circ$ 时, 页岩容易沿着天然裂缝面剪切破坏, 当 $80^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时, 页岩容易沿着裂缝张开。

由式(3)~(5)计算可得, 弱面破坏形式下的临界液压分布如图 5 所示。

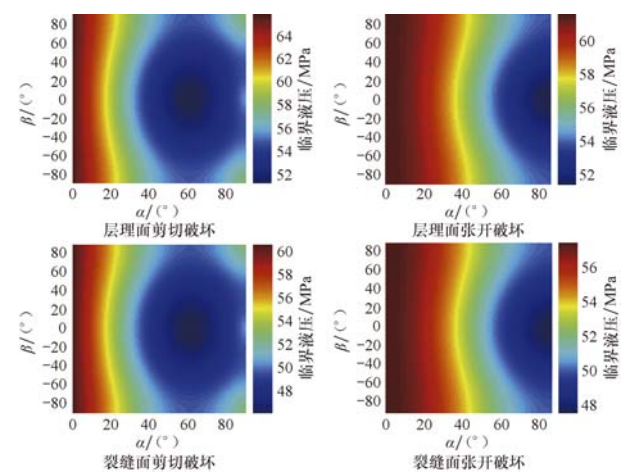


图 5 页岩弱面破坏临界缝内液压分布

Fig. 5 Critical failure pressure in fractures of weak plane in shale

由图 5 可知, 当水力压裂裂缝端部液压大于层

状页岩临界缝内液压,并满足 $p_{c1} < p_f < p_{c3}$ 时,弱面发生剪切滑移但不张开,剪切滑移量与裂缝内的压力有关;当水力压裂裂缝端部液压大于层状页岩临界缝内液压,并满足 $p_f > p_{c3}$ 时,弱面张开后再发生剪切滑移,剪切滑移量与裂缝内的压力无关。

某试验井龙马溪组页岩地层的最大水平主应力方向为北西西—南东东约 115° , 倾角约 9° , 走向为北东东—南西西约 25° , 平行于最小水平主应力方向, 且与中间主应力方向垂直。将坐标系 (U, N, E) 转换到以 3 主应力方向为坐标轴建立的坐标系, 可知 α 为 81° , β 为 90° , 数据点落在图 4 中弱面张开区域, 层状页岩破坏临界液压 p_c 为 49.8 MPa。由此可知, 该层段水力压裂裂缝扩展遇到天然裂缝面后, 先张开天然裂缝面, 压裂液进入裂缝面要损失能量, 不利于穿透更多的弱面, 难以形成复杂裂缝网络。

该井分 10 级压裂, 每一级压裂都采用微地震监测技术, 压裂效果如图 6、图 7 所示。由图 6 和图 7 可知, 微地震事件点主要分布在水平面上, 而不是分布在垂直于最小水平主应力方向的平面上, 表明水力压裂裂缝遭遇弱面后弱面张开, 没有形成复杂的空间网络裂缝, 这也验证了层状页岩水力压裂裂缝与弱面干扰机理的合理性。

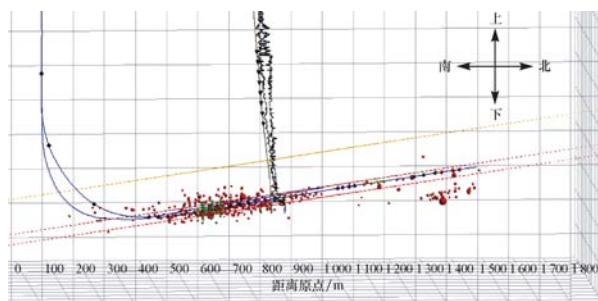


图 6 某井龙马溪组地层微地震裂缝监测解释结果侧视图

Fig. 6 Side view of micro-seismic crack monitoring of a well in Longmaxi Formation

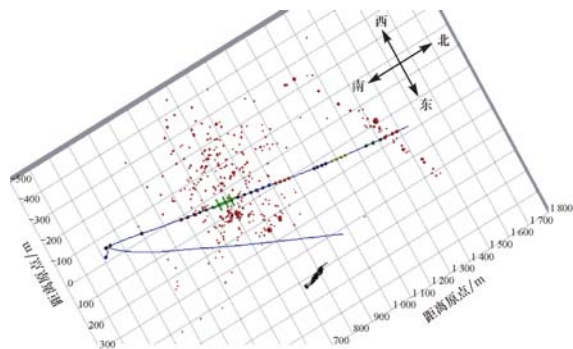


图 7 某井龙马溪组地层微地震裂缝监测解释结果俯视图

Fig. 7 Top view of micro-seismic crack monitoring of a well in Longmaxi Formation

3 结论与认识

1) 水力压裂裂缝沟通弱面后, 其扩展行为与流体压力、地应力、弱面产状、弱面抗剪强度、弱面抗拉强度、弱面内摩擦系数、基质抗剪强度、基质内摩擦系数等因素相关。

2) 四川盆地志留统龙马溪组页岩的水力压裂裂缝扩展可分为基质破坏区、弱面剪切破坏区、弱面张开破坏区 3 个区域。弱面法向矢量与最大水平主应力方向的夹角 α 是水力压裂裂缝扩展行为的主导因素: 当 $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ 时, 水力压裂裂缝中的液压容易促使岩石基质发生破坏; 当 $25^\circ < \alpha < 75^\circ$ 时, 水力压裂裂缝中的液压容易促使页岩沿着天然裂缝面剪切破坏; 当 $80^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时, 水力压裂裂缝的液压容易促使页岩沿着裂缝张开。

3) 四川盆地试验井压裂下志留统龙马溪组页岩地层时, 水力压裂裂缝遭遇弱面后弱面张开, 验证了层状页岩水力压裂裂缝与弱面的干扰机理。

符号说明

σ_1 为最大水平主应力, MPa; σ_2 为中间主应力, MPa; σ_3 为最小水平主应力, MPa; τ 为作用在弱面上的剪切应力, MPa; σ_n 为作用在弱面上的正应力, MPa; τ_0 为粘聚力 (固有剪切强度), MPa; μ 为内摩擦系数; p_{c1} 为弱面剪切破坏的临界液压, MPa; p_{c2} 为基质剪切破坏的临界液压, MPa; S_i 为岩石基质粘聚力, MPa; μ_i 为岩石基质内摩擦系数; p_{c3} 为弱面张开的临界液压, MPa; σ_t 为弱面抗拉强度, MPa; p_f 为水力压裂裂缝端部液压, MPa; a 为天然裂缝的长度或层理面张开的长度, m; E 为弹性模量, GPa; ν 为泊松比。

参 考 文 献

References

- [1] Gu H, Weng X, Lund J B, et al. Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles: a criterion and its validation[J]. SPE Production & Operations, 2012, 27(1): 20-26.
- [2] 杨丽娜, 陈勉. 水力压裂中多裂缝间相互干扰力学分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(3): 43-45.
Yang Lina, Chen Mian. Mechanism of multi-fracture interaction in multi-layer hydraulic fracturing[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2003, 27(3): 43-45.
- [3] 陈勉, 周健, 金衍, 等. 随机裂缝性储层压裂特征实验研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 431-434.

- Chen Mian, Zhou Jian, Jin Yan, et al. Experimental study on fracturing features in naturally fractured reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 431-434.
- [4] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增刊 1): 2637-2641.
- Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Mechanism study of shearing slippage damage of natural fracture in hydraulic fracturing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(supplement 1): 2637-2641.
- [5] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 109-113.
- Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 109-113.
- [6] Zhou Jian, Jin Yan, Chen Mian. Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2010, 47(7): 1193-1199.
- [7] Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2008, 45(7): 1143-1152.
- [8] Zhao Haifeng, Chen Mian. Extending behavior of hydraulic fracture when reaching formation interface[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 74(1/2): 26-30.
- [9] Blair S C, Thorpe R K, Heuze F E, et al. Laboratory observations of the effect of geological discontinuities on hydrofracture propagation: proceeding of the 30th U. S. Symposium on Rock Mechanics, Morgantown, West Virginia, June 19-22, 1989[C].
- [10] 程万, 金衍, 陈勉, 等. 三维空间中水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 1-6.
- Cheng Wan, Jin Yan, Chen Mian, et al. A criterion for identifying hydraulic fractures crossing natural fractures in 3D space[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 1-6.
- [11] Lee Hikweon, Ong See Hong, Azeemuddin Mohammed, et al. A wellbore stability model for formations with anisotropic rock strengths[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 96-97: 109-119.
- [12] 赵海峰, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气藏网状裂缝系统的岩石断裂动力学[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 465-470.
- Zhao Haifeng, Chen Mian, Jin Yan, et al. Rock fracture kinetics of the fracture mesh system in shale gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 465-470.
- [13] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 14-17.
- Chen Jin, Zhao Shushan. *Fracture mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2008: 14-17.

[编辑 令文学]

本刊令文学编辑荣获中国科技期刊青年编辑奖

7月3日—5日,中国科技期刊编辑学会第14届青年编辑学术研讨会暨第7届青年编辑奖颁奖大会在北京举行。会议紧紧围绕“全媒体时代的科技期刊发展”这一主题进行了广泛、深入的交流与探讨,宣读了第7届青年编辑奖获奖名单。来自中宣部出版局、国家新闻出版广电总局出版产业发展司、中国科技期刊编辑学会的有关领导出席会议并为获奖者颁奖。

本次评奖今年1月份启动,4月中旬结束申报并开始正式评选。经过评审组对申报材料的严格审核及严肃认真的初评、复评,共有102名青年编辑从265名申报者中脱颖而出,荣获第7届中国科技期刊青年编辑奖,本刊令文学编辑是其中之一。

中国科技期刊编辑学会是隶属于中国科协的全国一级学会。中国科技期刊青年编辑奖又名骏马奖,是该学会为奖励年龄在40周岁以下、连续编龄不少于5年、在出版工作中取得优异成绩的科技期刊编辑而设立的奖项,每4年在全国范围内评选一次,旨在肯定青年编辑为办好科技期刊所做出的成绩,并鼓励青年编辑再接再厉、不断创新,促进编辑队伍后继力量健康成长,推动科技期刊编辑事业繁荣与发展。

令文学同志2004年大学毕业后即进入《石油钻探技术》编辑部工作。10年来,他踏实、精干、勤勉,在编辑工作中表现优异;勤于思考,善于总结,在正式出版物上发表编辑出版方面论文多篇,得到了编辑同行的赞誉。该荣誉的获得,不仅是对其个人成绩的肯定和鼓励,也必将进一步激发编辑部的活力,推动《石油钻探技术》向既定目标快速发展。