

煤岩微观结构分析及其与压裂液设计的关系研究

管保山^{1,2}, 刘玉婷^{1,2}, 梁利^{1,2}, 崔丽³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 河北廊坊 065007; 2. 中国石油油气藏改造重点改造实验室, 河北廊坊 065007;
3. 中国石油大庆油田采油二厂, 黑龙江大庆 163461)

摘要:为了更直观和量化分析煤岩微观结构,以指导压裂液设计,提高压裂液效率和降低煤储层伤害,采用显微光度计、环境扫描电子显微镜和 CT 扫描等微观结构分析方法,得到了不同维度和角度的煤样裂隙结构图,并定量分析了煤样裂隙参数。结果表明:不同区块煤样的主裂隙长度、主裂隙宽度有很大不同;割理有明显的同向性,容易产生沟通的裂缝;裂缝的分布在微观尺寸上很复杂,使得裂缝对复杂的应力剖面 and 压裂过程中应力场的变化很敏感;裂缝具有各向异性和非均质性,提高了压裂液伤害的概率。通过定量分析可知:不同区块煤样的成分不同,其源于不同的地质作用,同时也导致了不同的压力液作用效果;CT 软件可以通过统计计算受测样品的孔隙度和渗透率,试验样品的孔隙度为 2.68%,渗透率为 $6.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与孔隙度-渗透率试验结果数值相近,印证了煤层低孔低渗的显著特点。润湿-吸附试验等数据证明不同的煤结构和成分是导致压裂液作用性能不同的原因,通过对煤岩微观结构分析能够指导压裂液的研究,为压裂液设计提供依据。

关键词:煤层气;压裂液;煤岩微观结构;裂隙

中图分类号:TE357.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)06-0178-05

Study on coal-rock microstructure and it's relationship with fracturing fluid design

GUAN Baoshan^{1,2}, LIU Yuting^{1,2}, LIANG Li^{1,2}, CUI Li³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China; 2. Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Stimulation, CNPC, Langfang 065007, China; 3. Daqing Oilfield The Second Production Plant, China National Petroleum Corporation, Daqing 163461, China)

Abstract: In order to more intuitively and quantitatively analyze the microstructure of coal-rock, the design of the fracturing fluid is guided through the understanding of the microstructure to improve the efficiency of the fracturing fluid and reduce the damage of coal reservoir. In this paper, microstructural analysis methods, such as microphotometer, scanning electron microscopy, and CT are used to establish coal structure fracture diagrams with different dimensions and angles, and to quantitatively analyze fracture parameters. Based on microscopic photometer, scanning electron microscope and CT; the main crack length and main crack width of different blocks of coal samples are very different; cleats have obvious isotropy and are prone to cracks in communication; the distribution of cracks is complex, making the cracks sensitive to complex stress profiles and changing stress field during fracturing; cracks have anisotropy and heterogeneity, increasing the chance of fracturing fluid damage. Quantitative analysis shows that: the coal samples in different blocks have different compositions. The different compositions of the coal samples come from different geological functions. At the same time, they also lead to different fluids effects. The CT software can calculate the porosity and permeability of the tested samples statistically. The porosity of sample is 2.68% and the permeability is $6.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. It is similar to the porosity-permeability experimental structure and confirms the remarkable characteristics of low permeability and low permeability in coal seams. Wetting and sorption experiments and other data prove that different coal structures and components are the causes of different fracturing fluids' performance. Intuitive structural micrographs and quantitative data analysis can guide the research direction of fracturing fluids for fracturing fluids and provide the basis for fracturing fluid design.

Key words: coalbed methane; fracturing fluid; coal-rock microstructure; crack

收稿日期:2018-03-20;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.06.030

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017ZX05023003)

作者简介:管保山(1968—),男,陕西渭南人,高级工程师,博士。Tel:010-69213477, E-mail: Gbs7611@163.com

引用格式:管保山,刘玉婷,梁利,等.煤岩微观结构分析及其与压裂液设计的关系研究[J].煤炭科学技术,2018,46(6):178-182.

GUAN Baoshan, LIU Yuting, LIANG Li, et al. Study on coal-rock microstructure and it's relationship with fracturing fluid design[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 178-182.

0 引言

我国煤层渗透率一般在 $(0.001 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低渗透或致密储层,所以煤层气井需要通过水力压裂进行增产改造^[1-4]。煤层裂缝和油气赋存具有不均一性^[5-8],有很强的吸附能力且天然裂缝很发育,选择不适当的压裂液将会导致2大问题:伤害煤层和水力压裂形成的裂缝;无法形成和传播水力压裂裂缝。煤层中天然裂缝发育,水力裂缝与之沟通会增大渗流空间,扩大压裂液滤失范围,减小裂缝长度。此外,煤岩中的黏土矿物与压裂液接触引起的水敏膨胀,煤储层低温低压特性导致压裂液难以破胶返排,较强的毛管力引发的毛细管自吸等,均会引起储层渗透率降低。因此,特殊的储层结构让煤层气压裂液具有特殊性能。煤层气压裂液在满足造缝、携砂能力、返排效率、煤储层配伍性及低成本等指标要求时往往相互矛盾,很难做到各个指标都优异的压裂液。传统压裂液能够改变煤层基质的润湿性,不利于煤层脱水,为煤层气生产开发的添加剂应具有增加水相有效渗透率,保持地层亲水性不变的特性,保持煤表面的润湿性,还能减少微粒运移。对煤储层结构的研究是压裂液设计的基础,也能对压裂液伤害等性能的分析提供依据,目前一般通过孔隙度-渗透率、X衍射、薄片鉴定^[9-11]等常规试验方法研究储层特点^[12-14]。孔隙度-渗透率可以直接测量岩心样品的孔隙度-渗透率数据,由于伤害作用对孔隙度-渗透率的影响,因此不能分析伤害或作用前后渗透率的变化;X衍射和薄片鉴定试验都需要破坏岩心的结构得到粉末或切片再进一步观察,因此不能直观分析岩心孔隙结构。常规储层研究试验提供的数据难以有形化体现煤层非均质性和割理同向性等特点。基于此,笔者通过显微光度计、扫描电镜和CT建立了不同维度和角度的煤样裂隙结构图,并定量分析裂隙参数,进一步印证宏观分析数据。通过微观层面的煤样结构分析可以直观观察割理状态和裂隙尺寸,结合煤层压裂的相关特性,优化压裂液设计,专门开发针对煤层气藏特性的压裂材料,对经济有效开发煤层气具有重要意义。

1 试验

1.1 显微光度计裂缝参数和形貌试验

将来自3个区域(韩城、保德、晋城)的煤岩制成立方定向光片,采用德国Leiz显微光度计,分别

测试层理面和剖面的裂隙发育程度,在显微光度计下定量测试煤样组分和裂隙参数,原煤煤岩显微组分含量测定结果见表1。

表1 原煤煤岩显微组分含量测定结果

| 样品 | 质量分数/% | | |
|------|--------|-------|------|
| | 镜质组 | 丝质组 | 壳质组 |
| 韩城 1 | 87.76 | 12.24 | 0 |
| 韩城 2 | 57.30 | 42.70 | 0 |
| 韩城 3 | 85.97 | 14.03 | 0 |
| 保德 1 | 64.75 | 31.42 | 3.83 |
| 保德 2 | 53.45 | 41.09 | 5.45 |
| 保德 3 | 57.53 | 36.99 | 5.48 |
| 晋城 1 | 88.36 | 11.64 | 0 |
| 晋城 2 | 80.46 | 19.54 | 0 |
| 晋城 3 | 61.94 | 38.06 | 0 |

由表1可知,韩城煤和晋城煤镜质组含量高,丝质组含量低,未发现壳质组;保德煤属高丝质组煤,含有少量壳质组。镜质组是腐植煤中最主要的显微组分,来源于植物茎和叶的木质纤维组织,经凝胶化作用(也称镜煤化作用)形成的各种凝胶体。丝质组原始物料与镜质组相同,但是经丝质化作用而形成。壳质组是由成煤植物中生物化学稳定性最强的部分,即由植物的繁殖器官和保护器官所形成的。

显微光度计观察的不同煤样裂隙形态如图1所示。3个区域煤样的裂隙参数见表2。由于形成过程的地质作用,不同区块煤样的主裂隙长度、主裂隙宽度有很大不同,其中韩城煤裂隙宽度和长度最大;而晋城煤裂隙密度最大。

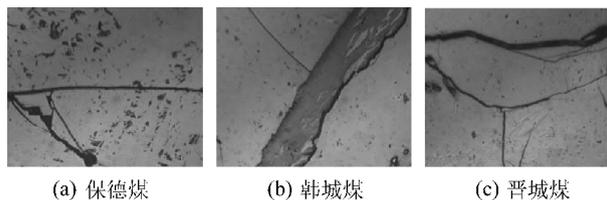


图1 煤样的裂隙分布

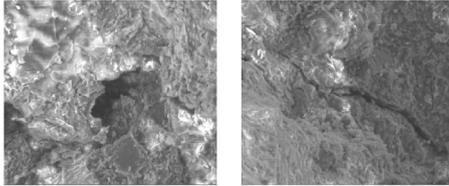
Fig.1 Crack distribution of coal samples

表2 样品裂隙参数

| 样品 | 主裂隙长度 (平均值)/cm | 主裂隙宽度 (平均值)/ μm | 主裂隙密度/ (条· cm^{-1}) |
|-----|-------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 保德煤 | 0.08~1.5/(0.58) | 8~60/(19) | 4.1 |
| 韩城煤 | 0.08~2.5/(1.25) | 8~240/(149) | 4.1 |
| 晋城煤 | 0.07~0.5/(0.42) | 8~30/(9) | 6.7 |

1.2 扫描电子显微镜表面分析试验

采用 Quanta 200 环境扫描电子显微镜观察煤样品微观形态(图2)可知:煤结构中存在微纳米结构孔隙和裂隙,这些结构是压裂液被孔隙吸附,吸收的结构基础。

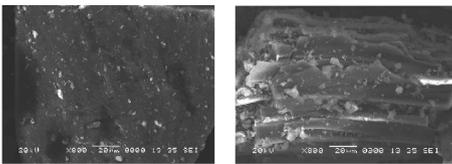


(a) 孔隙 (b) 裂隙

图2 煤样的孔隙和裂隙

Fig.2 Pores and cracks of coal samples

由于形成过程和来源不同,煤岩具有不同的组分,体现出不同的表面形貌。镜质组(图3a)外观呈块状,表面较为光滑,丝质组(图3b)结构较为松散,有明显的裂纹和裂隙。



(a) 镜质组 (b) 丝质组

图3 不同煤岩组分的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of different coal-rock components

1.3 CT技术的煤岩结构重建试验

采用 Phoenix nanotom m CT系统对韩城地区的煤样进行微观分析。微米-纳米级CT扫描系统最高分辨率达50 nm,可以实现微纳米级别的微观孔隙观察和测试,也可实现样品原始状态无损三维成像。CT结果可以直观而清楚地反映其割理走向和排布(图4),割理有明显的同向性。试验煤样裂隙区域的CT分析结果如图5所示,可见明显割理和裂隙发育,其中裂隙方向杂乱而割理排列具有一定的方向,裂隙的排布在微观尺寸上很复杂。复杂的裂隙排布对应不同的裂隙-孔隙表面积,裂隙复杂、排布密集的区域表面积越大。

为了更好地辨别割理排列类型和主要裂缝走向,将裂缝和割理分开考虑。利用CT技术可以将“兴趣区域”单独割离开(图6)进行精确分析,图6a是图5中部区域黑实线圆圈部分裂隙的放大图,水平裂缝与大部分斜向割理近垂直排列,还存在大量方向杂乱的微小裂缝;图6b是图5右下部分区域黑虚线圆圈部分裂隙的放大图,由图6b可知,斜向割理

分布清晰,连续性强,是潜在的渗流通道。煤层具有特殊的双孔隙结构^[15],割理发育,具有更大的各向异性和非均质性。CT软件可以通过统计计算受测样品的孔隙度和渗透率,试验样品的孔隙度为2.68%,渗透率为 $6.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

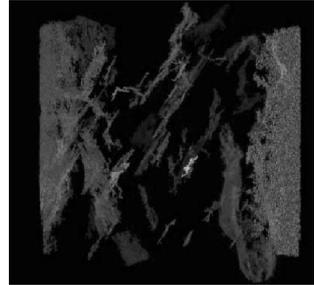


图4 煤层岩柱CT扫描结果

Fig.4 CT map of coal core

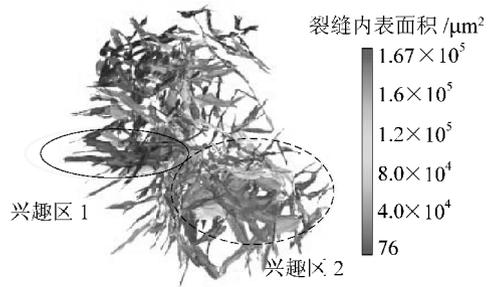
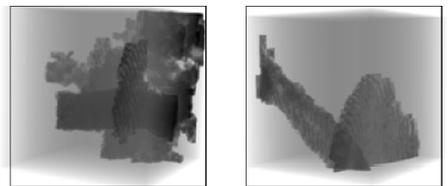


图5 煤样裂缝分布

Fig.5 Coal crack distribution



(a) 煤样兴趣区1 (b) 煤样兴趣区2

图6 煤样兴趣区CT分析

Fig.6 Coal interest area analysis

2 煤岩微观结构测定结果分析

2.1 裂隙形态

对割理的认识是压裂设计的重要部分,割理方向是人工裂缝容易形成的方向,同时也是压裂施工结束后油气产出的方向,压裂煤层时大多数的异常现象都是因为煤层特殊的机械特征和广泛而复杂的天然割理裂缝而造成的。通过CT对煤岩的扫描分析可知,割理有明显的同向性,因此在割理方向容易沟通裂缝,同时施工过程也会因为割理方向影响裂缝走向、长度和深度,另外发育的割理也是煤层气压裂液滤失的主要原因。因此在压裂施工设计中要考

考虑割理走向对施工压力的影响,同时在压裂液设计中考虑使用暂堵剂或转向剂调节割理对裂缝走向的影响。

裂缝的排布在微观尺寸上很复杂,这种复杂性使得裂缝对复杂的应力剖面和压裂过程中应力场的变化很敏感。煤岩具有更大的各向异性和非均质性,其微观结构的复杂程度提高了压裂液成分与储层岩心发生化学反应的概率,要提前进行敏感和孔隙试验,分析影响压裂液性能的影响因素。

2.2 裂隙结构参数

显微光度计和电镜试验结果均显示煤样存在非均匀分布的微纳米级别的裂缝和孔隙,储层易伤害,通常返排困难。采用孔隙度-渗透率评价韩城煤样的试验结果是:煤岩孔隙度为 1.91%~4.01%,平均 2.82%;渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 4.29 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$,平均在 $7.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,数据表明 CT 分析与常规分析方法得到的数据吻合。因此,对某个样品进行微观分析时也可以同时计算其孔隙度和渗透率数据,作为后期煤储层伤害程度等评价的指标。这种低孔低渗储层需要低伤害、低残渣的压裂液进行施工。

2.3 煤样组成和表面结构

由电镜扫描结果(图 3),可直接观察到丝质组和镜质组表面形貌的不同,煤样的不同组成和表面结构会直接影响压裂液在煤样表面的润湿和吸附。分别采用含镜质组多的韩城煤样和丝质组多的保德煤样进行润湿-吸附试验,试验过程按 SY/T 5153—2007《油藏岩石润湿性测定方法》进行,采用自主研发质量分数为 0.5%的表面活性剂 SF 为压裂液,压裂液在镜质组和丝质组表面的润湿和吸附参数见表 3。由表 3 可知,丝质组是一种多孔渗水、吸水性很强的固体,因此试验后润湿角变化大,压裂液吸收率为 77.34%;而镜质组表面不易吸水,试验后润湿角变化小,压裂液吸收率仅为 14.74%。

表 3 煤岩接触角随时间的变化规律

Table 3 Coal-rock contact angle variation with time

| 项目 | 润湿角/(°) | | 润湿角降幅/% |
|-----|---------|-------|---------|
| | 试验前 | 试验后 | |
| 丝质组 | 63.38 | 14.36 | 77.34 |
| 镜质组 | 63.69 | 54.30 | 14.74 |

3 煤储层压裂液研究方向

从微观层面对煤岩结构进行观察和分析为压裂液的设计提供了新参考,结合煤层气本身低杨氏模量、高泊松比和渗透率低等特点,煤岩裂隙割理走

向,复杂孔渗结构,表面形态差异大等结构特质,需要煤层气压裂液在以下 3 点实现突破。

1) 在多层次认识储层的基础上,优化压裂液配方,配以合适的施工流程,使之达到最好压裂效果同时产生最小储层伤害。

2) 选用优质稠化剂或低伤害的压裂液体系,尽可能降低压裂液不溶物残渣而带来的伤害应用。例如,瓜胶基础改性形成的羟丙基瓜胶、羧甲基羟丙基瓜胶等,活性水压裂液和清洁压裂液等。

3) 特殊化学试剂的研发应用应与煤层特性相适应。煤储层温度低(30~60℃),使用常规破胶剂破胶不彻底,研究如生物酶破胶^[16]的低温破胶技术很有前景;采用特殊的煤粉悬浮剂^[17-18]降低煤粉对储层的伤害,将低能的煤粉表面变为高能表面,以增加煤粉表面分子和液体分子间的附着力;与煤层配伍的降滤失剂的研发,煤层用暂堵剂的优选和改进,暂堵剂与煤层的配伍性研究等。

4 结 论

1) 显微光度计、环境扫描电子显微镜和 CT 扫描等微观分析技术能直观观察割理状态和裂隙尺寸,进一步印证宏观分析数据,为压裂液设计提供依据。

2) 煤岩微观分析结果表明,不同区块煤样的主裂隙长度、主裂隙长度和宽度有很大不同,割理有明显的同向性。裂缝的排布在微观尺寸上很复杂,具有各向异性和非均质性。这些微观层面的结构分析明确指导了压裂液的研究和设计方向:液体体系的优化和施工工艺的配合设计;适合煤层气储层的低伤害液体体系,特殊试剂的研发和改进等。

3) 不同区块的煤样具有不同的成分,煤样存在非均匀分布的微-纳米级别的裂缝和孔隙。可视化试验的定量分析手段印证了煤层成分差别大、低孔低渗的显著特点。

参考文献 (References):

- [1] 鲜保安,高德利,陈彩红,等.煤层气高效开发技术[J].特种油气藏,2004,24(8):63-66.
XIAN Baoan, GAO Deli, CHEN Caihong, et al. Efficient development of coal-bed gas[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2004, 24(8): 63-66.
- [2] 张彦平,何湘清,金建新,等.国外煤层甲烷气开发技术译文集[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [3] 赵庆波.煤层气地质与勘探技术[M].北京:石油工业出版社

- 社,1999.
- [4] 张华珍,王利鹏,刘嘉.煤层气开发技术现状及发展趋势[J].石油科技论坛,2013,32(5):17-21,27.
ZHANG Huazhen, WANG Lipeng, LIU Jia. Present conditions and development trend of CBM technology [J]. Oil Technology Forum, 2013, 32(5): 17-21, 27.
- [5] 张群,冯三利,杨锡禄.试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略[J].煤炭学报,2001,26(3):230-235.
ZHANG Qun, FENG Sanli, YANG Xilu. Discussion on the basic reservoir characteristics and development strategy of coalbed methane in China [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 230-235.
- [6] 陈飞,池晓明,王祖文,等.煤岩储层保护技术研究进展[J].中国煤层气,2013,10(1):26-30.
CHEN Fei, CHI Xiaoming, WANG Zuwen, *et al.* The research progress of coal reservoir protection techniques [J]. China Coal Bed Methane, 2013, 10(1): 26-30.
- [7] LI Guihong. Coal reservoir characteristics and their controlling factors in the eastern Ordos Basin in China [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(6): 1051-1058.
- [8] 刘贻军,娄建青.中国煤层气储层特征及开发技术探讨[J].天然气工业,2004,24(3):68-71.
LIU Yijun, LOU Jianqing. Study on reservoir characteristics and development technology of coalbed gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(3): 68-71.
- [9] 王明磊,张遂安,关辉,等.致密油储层特点与压裂液伤害的关系:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J].石油与天然气地质,2015,36(5):848-854.
WANG Minglei, ZHANG Suian, GUAN Hui, *et al.* The relationship between the characteristics of tight oil reservoirs and fracturing fluid damage: a case study of the Chang 7 Member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 848-854.
- [10] 庞振宇,孙卫,李进步,等.低渗透致密气藏微观孔隙结构及渗流特征研究:以苏里格气田苏48和苏120区块储层为例[J].地质科技情报,2013,32(7):133-138.
PANG Zhenyu, SUN Wei, LI Jinbu, *et al.* Microscopic pore structure and seepage characteristics of low-permeability and tight sandstone gas reservoir: taking blocks Su 48 and Su 120 in Sulige Gas Field as an example [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(7): 133-138.
- [11] 管保山,周焕顺,程玉梅,等.鄂尔多斯盆地西峰油田压裂液对储层伤害的微观机理研究[J].中国石油勘探,2007,59(4):59-62.
GUAN Baoshan, ZHOU Huanshun, CHENG Yumei, *et al.* Microcosmic analysis of damage of fracturing fluids to reservoirs in Xifeng Oilfield of Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2007, 59(4): 59-62.
- [12] 张小东,张鹏,刘浩,等.高煤级煤储层水力压裂裂缝扩展模型研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):573-580.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Peng, LIU Hao, *et al.* Fracture extended model under hydraulic fracturing engineering for high rank coal reservoirs [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 573-580.
- [13] 王晓锋,解慧,扈金刚,等.压裂参数对煤储层水力压裂裂缝的影响[J].特种油气藏,2013,20(6):129-134.
WANG Xiaofeng, XIE Hui, HU Jingang, *et al.* Influences of hydrofracturing factors on coal reservoir fractures [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6): 129-134.
- [14] 邵先杰,孙玉波,孙景民,等.煤岩参数测井解释方法:以韩城矿区为例[J].天然气勘探与开发,2013,40(5):559-566.
SHAO Xianjie, SUN Yubo, SUN Jingmin, *et al.* Logging interpretation of coal petrologic parameters: a case study of Hancheng Mining Area [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 40(5): 559-566.
- [15] 王斌,潘建国,尹路,等.基于双重孔隙结构的测井解释模型及应用[J].岩性油气藏,2013,25(4):68-73.
WANG Bin, PAN Jianguo, YIN Lu, *et al.* Well logging interpretation model based on double pores and its application [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(4): 68-73.
- [16] 李亭.煤层气压裂液研究及展望[J].天然气勘探与开发,2013,36(1):51-55.
LI Ting. Fracturing fluid of CMB [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(1): 51-55.
- [17] ADAM Wilson. An innovative approach to gel breakers for hydraulic fracturing [J]. Journal of Petroleum Technology, 2017, 69(3): 48-51.
- [18] KAREN Bybee. Enzyme breaker technology increases production [J]. Journal of Petroleum Technology, 2000, 52(10): 36-37.