

山东鲁西地区及济阳坳陷太古宇裂缝发育规律及油气储层意义

李守军^{1,2}, 贺淼^{1,2}, 赵秀丽¹, 金爱文², 原丽媛², 殷天涛²

1. 山东科技大学山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东青岛 266590

2. 山东科技大学地质科学与工程学院, 山东青岛 266590

摘要 在对山东鲁西地区野外露头及济阳坳陷钻井岩心进行野外观察基础上, 通过相似区露头调查、地层划分对比、薄片鉴定、试井测井资料分析、岩石力学测试、有限元分析等方法对鲁西及济阳坳陷地区太古宇裂缝进行了定性、定量分析, 并对其发育规律进行了探讨, 重点讨论了裂缝发育的控制因素: 岩性、构造应力及上覆岩层等。得到的裂缝描述参数及发育规律对揭示济阳坳陷地区太古宇裂缝储集空间的分布具有重要的指导意义。

关键词 鲁西地区; 济阳坳陷; 太古宇; 裂缝发育规律; 油气储层

中图分类号 TE122

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.35.004

Fracture Characteristics of Archean-Strata in the Area of Western Shandong and Jiyang Depression and the Meaning for Oil-gas Reservoir Bed

LI Shoujun^{1,2}, HE Miao^{1,2}, ZHAO Xiuli¹, JIN Aiwen², YUAN Liyuan², YIN Tiantao²

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong Province, China

2. College of Geological Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong Province, China

Abstract The fracture characteristics of Archean-Strata are studied based on the outcrops, drilling, well test, and log data in the areas of Jiyang Depression and Western Shandong. Then the qualitative and quantitative analyses on the characteristics are conducted through field work in the similar outcrop area, stratigraphic division and core comparison, thin section authentication, rock mechanics test, and finite element method. Finally, the main factors that control the fracture development in the study areas, such as lithology, tectonic stress, and overlying strata, are discussed. The fracture description parameters are obtained and they play a directive role for revealing the distribution of reservoir space of Archean-Strata in Jiyang depression.

Keywords Western Shandong; Jiyang Depression; Archean-Strata; fracture characteristic; oil-gas reservoir bed

0 引言

据不完全统计, 世界上裂缝性油藏的储量约占已探明总储量的一半^[1], 因此, 对裂缝性储层进行研究有着非常重要的

意义。

国外关于裂缝性储层的研究已有上百年历史, 许多学者也形成了大量研究成果, 如 Aguilera^[2-3], Nelson^[4], Lorenz 等^[5-6],

收稿日期: 2011-11-01; 修回日期: 2011-12-01

基金项目: 中石化先导项目 (SO-PT-1091D010Z)

作者简介: 李守军, 教授, 研究方向为油气勘探与地质学, 电子信箱: lishoujun@126.com

Pollard 等^[7], Narr 等^[8-9]。他们分别从力学、野外露头裂缝研究等方面对裂缝性储层进行了较深入的研究。近年来国外一些研究团体在成像测井及多波多分量地震技术方面对裂缝进行探索性检测,也取得了一些进展^[1],但从其研究情况看,还没有形成成熟的裂缝分布规律预测技术。

国内关于裂缝性储层的研究工作也有 50 年的历史。对四川的碳酸盐岩油藏、华北古潜山油藏、新疆火烧山裂缝性砂岩油藏、新疆小拐油田砂砾岩裂缝性储层、大港千米桥孔、缝、洞储层、玉门青西裂缝性白云质泥岩储层、吉林裂缝性低渗透储层等的研究,丰富了裂缝性储层的研究。

邢志贵^[10]对辽河坳陷太古宇变质岩储层进行了研究,分别对研究区太古宇变质岩的地球化学特征、原岩恢复、太古宇基底岩石测井曲线识别、太古宇变质岩储集特征等进行了研究。王端平、张敬轩等^[11-12]对济阳坳陷部分地区的基岩潜山油气储集空间的分布规律和评价方法进行了研究。刘传虎等^[13]对济阳坳陷非碳酸盐岩潜山油气藏进行了研究,对太古宇潜山地质构造特征、潜山分带、太古宇潜山储层地质特征、太古宇潜山油气成藏条件进行了研究。这为本文对鲁西及济阳坳陷地区进行深入研究提供了理论基础。但是,由于裂缝分布的复杂性,研究难度很大,使得目前该领域的研究仍处在探索性阶段。而且以上国内外研究大多是针对泥岩、砂岩、砂砾岩等油藏,几乎没有涉及深部太古宇变质岩油藏。因此随着深部油气资源勘探的开展,对太古宇变质岩油藏研究具有重要的理论与现实意义。

太古宇指 40—25 亿年的地质年代(国际地球科学联合会, 2008)。长期以来济阳坳陷的太古宙地层均被归于新太古代(地质年代 28—25 亿年),统一使用鲁西露头区的岩石地层单位“泰山群”,变质程度为低交闪岩相的变质岩^[14-15],各组特征复杂。济阳坳陷新太古宇研究程度较低,泰山群未细分到组,地震资料反射杂乱、难以解释,地层结构与组成不清楚。随着油气勘探向深层扩展,与新太古宇有关的这些基础地质问题阻碍了潜山油气的勘探开发,亟需开展系统的研究。

1 研究方法

1.1 变质岩恢复及地层对比方法

使用地球化学法对济阳坳陷太古宇变质岩原岩进行初步探讨,对相似露头区鲁西地区与济阳坳陷地区地层进行划分与对比,定位目标层位裂缝进行研究。

1.2 裂缝识别方法

裂缝识别是指根据其在地质、地球物理资料上的响应,认识并描述裂缝。主要方法如下^[16]。

(1) 岩心观察法:观察到裂缝的力学性质、组系关系、充填、含油气性等,测量裂缝的产状、开度、密度、深度、层位、孔隙度等。

(2) 镜下统计法:从微观领域得到裂缝发育段岩性及层位深度、裂缝的力学性质、组系关系、充填、含油气性、开度、

密度、以及孔隙度等信息。

(3) 测井方法:以地质资料为基础,应用电阻率测井、声波测井、中子测井、密度测井、岩性测井、电磁波测井、地层倾角测井、裂缝识别测井、成像测井等方法对裂缝进行识别。

(4) 地震方法:根据地震资料中的反射界面以及岩石物理性质的差异,在基础地质资料基础上对地层发育层段以及风化壳进行识别,识别裂缝作为参考。

(5) 开发数据分析法:分析油藏开发数据,确定裂缝储层、判断裂缝发育强弱以及大致确定裂缝带延伸方向等。

通过以上方法,识别裂缝发育地区及层段,测量统计裂缝参数并确定裂缝的类型,分析裂缝的成因、影响因素及形成时期。

1.3 裂缝预测方法

(1) 地质类比法:选择与研究区济阳坳陷地区构造演化历史、岩石力学特征、构造变形特征、地质特征相似的野外露头区鲁西地区,开展细致的裂缝测量、统计工作,总结裂缝发育规律,将鲁西露头区裂缝研究成果应用于济阳坳陷裂缝的预测。

(2) 构造应力场模拟法:在建立地质模型的基础上,用有限元法计算各点的最大主应力、最小主应力和最大剪应力,并计算各点的主应力方向和剪应力方向,根据应变能计算裂缝发育程度。

2 结果与讨论

2.1 裂缝发育特征

(1) 裂缝组系

本文对泰山群野外测点数据中选取了 8 个测点,对 499 个裂缝方向进行了统计分析(图 1、图 2),裂缝走向南南东分布最多(倾向为 220°—230°、50°—60°),与地层分布区断层大多为南南东向相类似,与本区断层走向垂直方向裂缝发育次之,其余为与断层斜交。多组不同走向的裂缝在空间上相互

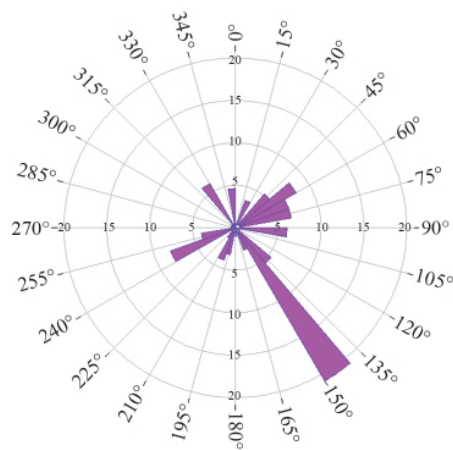


图 1 泰山群野外测点裂缝走向玫瑰花图

Fig. 1 Rose diagram of Taishan-group-fracture direction in outcrop area

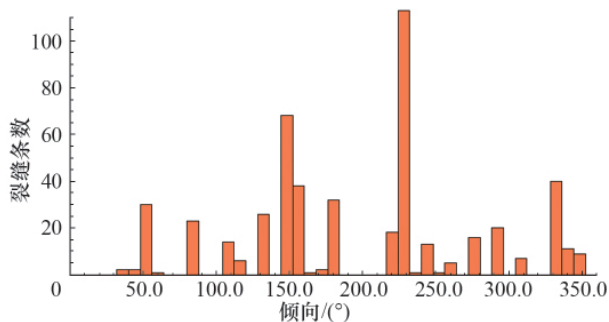


图2 泰山群野外测点裂缝倾向特征分布

Fig. 2 Distribution diagram of Taishan-group-fracture tendency in outcrop area

交错联通,形成网络状裂缝储集系统,有利于油气储集与运移。

(2) 裂缝倾角

裂缝倾角多集中发育在 40° — 90° , 占统计倾角总数的 90.38%, 在 58° — 82° 尤为集中 (图 3), 占倾角统计总数的 76.15%, 高角度裂缝发育。而由于油藏钻井多以直井为主, 因此地下裂缝系统的实际发育程度远高于钻井资料揭示的裂缝发育程度。

(3) 裂缝密度

微细裂缝发育, 密度大。最多可达 1m 直线距离内有 600 多条微细裂缝 (图 4(a)), 而且离断层越近, 裂缝宽度越大, 密

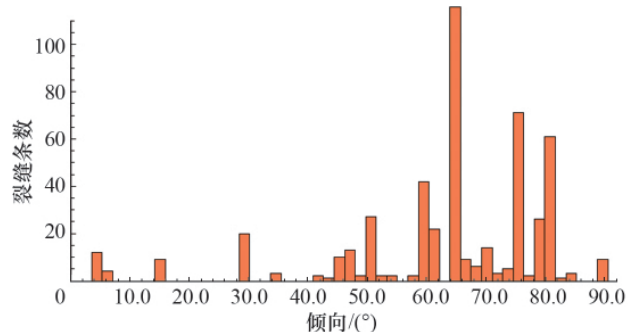


图3 泰山群野外测点裂缝倾角特征分布

Fig. 3 Distribution of fracture dip of Taishan group field points

度也越高, 面孔率越大, 说明裂缝发育程度在很大程度上受断层控制影响, 离断层越近裂缝越发育。且裂缝多为未充填缝, 有油斑及含油。裂缝多以 $<1\text{mm}$ 为主, 微裂缝发育, 可多达裂缝发育总数的 52% (图 4(b), 4(c))。多具碎裂结构 (图 4(b)—4(e)), 碎基含量多达 26%—34%, 岩石碎裂成大小不一的角砾, 粒度 0.05 — 12mm 。含角砾者多为花岗闪长质岩石, 尖棱角状, 角砾裂纹、裂隙发育, 裂纹、裂隙发生碳酸盐化, 角砾中的矿物主要有斜长石、正长石、微斜长石和石英, 角砾含量 60%—70%。个别微裂缝分析可见碳酸盐脉体, 面孔率约 13%—22%。

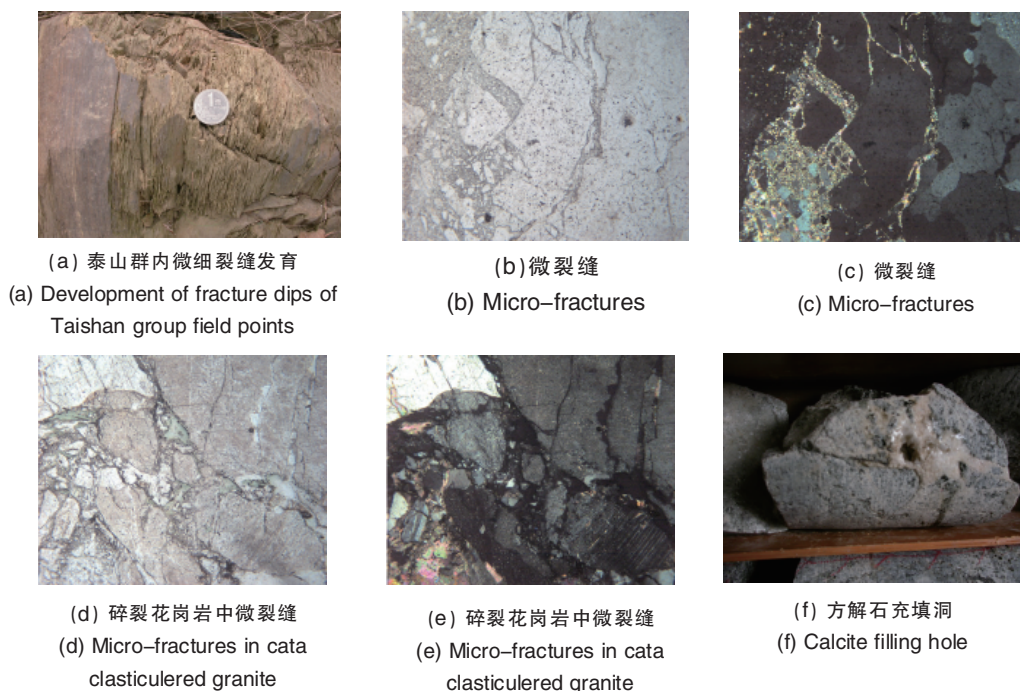


图4 裂缝发育特征

Fig. 4 Development features of fractures

注: 图 4(b) 和 4(d) 单偏光, 图 4(c) 和 4(e) 正交偏光, 照片长边 2.9mm。

Notes: Fig. 4(b) and 4(d) are taken by plane polarized light, Fig. 4(c) and 4(e) are taken by crossed polarized light, and the pictures have length of 2.9mm.

2.2 影响裂缝发育的因素

根据对济阳拗陷 15 口太古宇岩心裂缝的观察, 对影响其发育的主要因素分析如下。

(1) 岩性与裂缝发育

对埕岛—桩西地区太古宇裂缝发育资料进行统计分析, 该地区太古宇岩石裂缝发育由易到难顺序如图 5 所示。

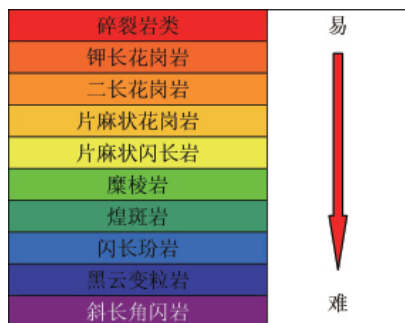


图 5 太古界岩石裂缝发育难易顺序

Fig. 5 Archean rock fracture development arranged with the order from easy to difficult

(2) 构造应力与裂缝发育

碎裂程度取决于所受应力的强弱、深度以及作用时间的长短。应力作用太弱则不能产生足够的裂缝, 太大则容易使岩石碎粒化, 矿物容易变成粉末以致重结晶, 填充堵塞裂缝, 使得裂缝失去连通性。只有应力大小适中, 处于岩石正好发生碎裂而又不至于碎粒化的区间, 才能形成油气运移的良好通道和储集空间。作为渤海湾叠合盆地的重要组成部分, 东营凹陷经历了古生代、中生代及新生代的 multi 构造旋回演化, 这为太古宇潜山内部碎裂变质作用提供了动力条件, 形成丰富的裂缝。

(3) 上覆地层与裂缝发育

当上覆地层为古生界时, 岩性多为碳酸盐岩, 裂缝充填物重结晶后, 裂缝更大, 开启性更好(图 4(f))。当上覆地层为中、新生界碎屑岩时, 太古宇顶面风化较重, 裂缝、微裂缝较发育, 有时也可泥质充填, 滴水渗入也容易发生风化淋滤。太古宇储集岩多属硅酸盐结晶岩, 在高温混合熔融条件下生成, 其本身缺乏孔隙。因此其储集空间主要是在先期发育之构造裂缝基础上, 接受风化淋滤作用改造而形成一系列孔、缝、洞。溶蚀空隙、缝洞主要由不稳定的暗色矿物黑云母蚀变作用引起, 次之为长石等矿物的溶蚀淋滤作用^[7]。

3 模型分析

根据研究区的主要特点, 对埕岛—桩海区域变质岩地应力的二维应力场进行了模拟分析。研究区东西方向为 x 向, 南北为 y 向。包括了工作区域内的 24 条断层, 按方向分为北东向和南东向段层两类。按断裂大小分为二级与三级断层。

根据研究区性质, 本次建模采用自由划分网格形式, 对

重点区域(如目的层底部断裂带、关键井点处等)进行人工干预划分。所采用的岩石力学参数如表 1 所示。

表 1 建模采用的岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters of modeling

编号	介质类型	弹性模量/GPa	泊松比
1	二级断层	20	0.18
2	三级断层	30	0.20
3	花岗片麻岩	40	0.25

定义此次研究区域主要受力为水平挤压主应力近东西、南北向。分别是, 东西向约为 120MPa, 南北向约为 70MPa。工区边界南边界为约束端, 没有位移和转动。

建立了济阳拗陷埕岛—桩海地区构造应力模型(图 6), 其中, 应力分布范围主要集中在断层附近, 以及两个南北向的条带状应力高值区; 工区内最大应力分布在埕北 303 井西北区域, 以及部分断层的边缘及末梢位置。这种应力集中区域分布范围有其局限性, 故而是裂缝发育的集中地区。在岩性相同的地层中, 构造裂缝的发育程度受控于构造应力场, 因而在构造应力场高值区, 构造裂缝也相对较发育。

其中, 埕北 303 井段, 初期日产油 132.3t, 含水 2%; 目前日产油 17.1t, 含水 24.1%, 生产天数 2210.2d, 累产 105838.7t。根据埕岛地区部分井单位厚度产液量统计与构造应力分析图(图 6)可以看出, 模拟主应力大的地区, 单位厚度产液量相对较多。由于太古宇井的产液量主要取决于地层裂缝的发育情况, 因此构造应力场越高, 裂缝相对越发育, 越是油气聚集的有利场所。

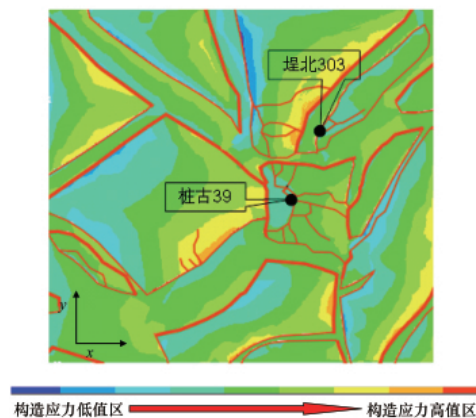


图 6 埕岛—桩海地区太古界构造应力分析

Fig. 6 Archean-strata tectonic stress analysis on Chengdao-Zhuanghai region

断裂带往往是破裂带, 前人对华北等地区太古宇的裂缝发育规律研究认为二者关系非常密切。在研究区内发育有许多断层, 无疑其附近也是裂缝发育带。控“山”断裂对裂缝发育起主导作用, 发育至太古宇内幕的各级断裂对其附近裂缝发育均起作用。

4 结论

(1) 济阳坳陷太古宙广泛发育裂缝,研究区裂缝主要以构造裂缝为主,其发育主要受控于构造应力影响,离大断裂越近,裂缝越发育,离断层越远,裂缝发育程度降低。

(2) 裂缝发育与岩性关系,由易到难依次为碎裂岩类、钾长花岗岩、二长花岗岩、片麻状花岗岩、片麻状闪长岩、糜棱岩、煌斑岩、闪长玢岩、黑云变粒岩、斜长角闪岩。上覆地层为古生界碳酸盐岩和中、新生界碎屑岩,为不整合接触、溶蚀以及风化淋滤作用可改善储层储集性能,但在太古宇变质岩地层中,作用较为有限。

(3) 露头观测及钻井岩心资料表明,储集裂缝以高角度裂缝为主,垂直井钻遇裂缝概率较水平井低得多,建议利用斜井和水平井钻遇多个裂缝,便于裂缝性油藏的高效开发。

参考文献(References)

- [1] 袁士义, 宋新民, 冉启全. 裂缝性油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
Yuan Shiyi, Song Xinmin, Ran Qiquan. Development technology of fractured reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [2] Aguileria R. Determination of subsurface distance between vertical parallel natural fractures based on core data [J]. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1988, 72(7): 845-851.
- [3] Aguileria R. Natural fractured reservoir [M]. Oklahoma: Penewell Publishing Company, 1995: 181-183.
- [4] Nelson R A. Geological analysis of naturally fractured reservoirs[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985.
- [5] Lorenz J C, Teufel L W, Warpinski N R. Regional fractures I : A mechanism for the formation of regional fractures at depth in flat-lying reservoirs[J]. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1991, 75(11): 1714-1737.
- [6] Lorenz J C, Finley S J. Regional fractures II : Fracturing of mesaverde reservoirs in the piceance basin Colorado[J]. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1991, 75(1): 1738-1757.
- [7] Pollard D D, Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century[J]. *Bull Geol Soc Am*, 1988, 100(8): 1811-1204.

- [8] Narr W, Lerch I A. Method for estimating subsurface fracture density in core[J]. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1984, 68(5): 637-648.
- [9] Narr W, Suppe J. Joint spacing in sedimentary rocks [J]. *Structural Geol*, 1991, 13(9): 1037-1048.
- [10] 邢志贵. 辽河坳陷太古宇变质岩储层研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Xing Zhigui. Study of archaean-metamorphic rock reservoir in Liaohedepression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [11] 王端平, 金强, 戴俊生, 等. 基岩潜山油气藏储集空间分布规律和评价方法[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
Wang Duanping, Jin Qiang, Dai Junsheng, et al. Distribution rule and methods of evaluation of buried-hill oil-gas reservoir space[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [12] 张敬轩, 金强. 山东莱芜地区太古界露头裂缝特征及其油气储层意义[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(4): 371-374.
Zhang Jingxuan, Jin Qiang. *Petroleum Geology and Experiment*, 2003, 25(4): 371-374.
- [13] 刘传虎, 任建业. 济阳坳陷非碳酸盐岩潜山油气藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Liu Chuanhu, Ren Jianye. Non-carbonate buried hill reservoir in Jiyang depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [14] 张增奇, 刘明渭. 山东省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
Zhang Zengqi, Liu Mingwei. Stratigraphy of Shandong province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [15] 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province. Regional geology of Shandong province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [16] 穆龙新, 赵国良, 田中元, 等. 储层裂缝研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 52-57.
Mu Longxin, Zhao Guoliang, Tian Zhongyuan, et al. Study on reservoir fractures[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 52-57.
- [17] 刘家铎, 孟万斌, 周文, 等. 埕岛-胜海潜山带的古岩溶作用 [J]. *古地理学报*, 1999, 1(4): 80-86.
Liu Jiaduo, Meng Wanbin, Zhou Wen, et al. *Journal of Palaeogeography*, 1999, 1(4): 80-86.

(责任编辑 马晓晓)

·学术动态·

“第十届全国工程爆破学术会议”征文



由中国工程爆破协会和中国力学学会主办的“第十届全国工程爆破学术会议”拟于2012年3月20日在武汉市召开。

征文范围:(1)爆炸力学和爆破理论研究;(2)岩石破碎和凿岩机理研究;(3)爆破设计和施工技术;(4)爆破器材;(5)爆破安全技术;(6)钻爆作业机具及设备;(7)爆破测试及仪表;(8)爆炸加工技术;(9)工程爆破管理。

论文截止日期:2012年3月31日。

联系电话:010-51901723;18618288758;010-51717511;13466772273。

通信地址:北京市海淀区阜成路42号院11号楼A座(100036)。

电子信箱:blast@cseb.org.cn。

会议网站: <http://www.cseb.org.cn/>。