

加强筋模型在轮胎有限元分析中的应用

尹伟奇¹, 姚振汉¹, 薛小香¹, 李 鹏², 洪宗跃², 阙元元²

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084; 2. 北京橡胶工业研究设计院, 北京 100039)

摘要:利用 MSC. Marc 软件建立子午线轮胎的三维非线性有限元模型。采用软件中的加强筋模型模拟轮胎中复杂的多层帘线-橡胶复合材料, 直接在前处理中定义轮胎中随位置变化的帘线铺设方向, 可以真实地模拟帘线-橡胶复合材料的几何和材料非线性, 并且能够合理简化模型, 提高计算效率和计算精度。模型中还考虑了橡胶材料的非线性和不可压缩性、轮胎大变形导致的几何非线性以及轮胎与轮辋和轮胎与路面的接触非线性边界条件。通过三维非线性有限元分析得到了在充气压力和静负荷作用下子午线轮胎的变形、内部应力分布及接地压力分布。

关键词:轮胎; 非线性有限元分析; 帘线-橡胶复合材料; 加强筋模型

中图分类号: TQ336.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-890X(2004)09-0543-06

轮胎结构的有限元分析是一项具有挑战性的工作, 其主要困难包括: ①轮胎是由橡胶、帘线-橡胶复合材料组成的复杂结构体, 其中橡胶材料是不可压缩的非线性超弹性材料, 帘线-橡胶复合材料呈现明显的各向异性; ②轮胎大变形引起的几何非线性; ③轮胎与轮辋和轮胎与路面的接触非线性边界条件。

本工作利用 MSC. Marc 软件建立了子午线轮胎的有限元模型。建模时考虑了橡胶材料的非线性和不可压缩性、帘线-橡胶复合材料的各向异性、轮胎大变形导致的几何非线性以及轮胎与轮辋和轮胎与路面的接触非线性边界条件。

为了更好地模拟帘线-橡胶复合材料, 合理简化模型, 本工作利用 MSC. Marc 软件提供的加强筋模型模拟轮胎中复杂的多层帘线-橡胶复合材料。利用加强筋模型可以直接在 Marc 前处理过程中定义轮胎中不同位置处帘线的铺设方向和铺设位置, 这能够比一般的复合材料模型更真实地模拟帘线-橡胶复合材料的几何和材料非线性。

1 加强筋模型简介

在加强筋模型中, 将加强筋部分和基体部分分别用加强筋单元和实体单元来表示, 即在橡胶基体单元中包括 1 层或多层不同方向的增强帘线

(如图 1 所示)。由于基体单元和加强筋单元选用相同的节点, 又没有引入附加的自由度, 不会增大计算量。加强筋单元可以用来描述加强筋的小应变和大应变状态, 可以定义任何材料性质。利用加强筋模型, 可以将基体和加强筋分别用不同的本构关系来描述, 试验得到的组分材料参数可以直接用到分析中, 并且基体和加强筋的应力状态可以分别得到。因此, 加强筋模型对模拟帘线-橡胶复合材料的几何和材料非线性分析非常有效。

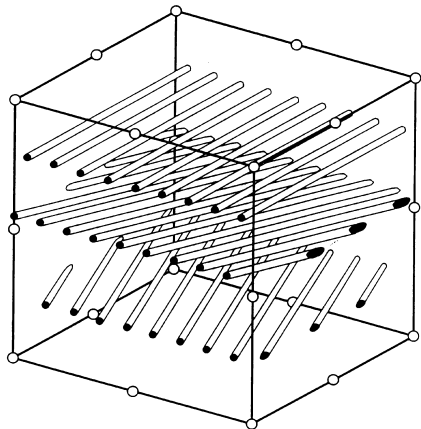


图 1 用加强筋单元模拟增强帘线层

定义加强筋材料时需要输入各层加强筋的材料性质、加强筋层的参考面或边(单元的面或边)、加强筋方向的参考轴、加强筋偏离参考轴的角度、加强筋层的相对位置、单根加强筋的横截面积和单位长度加强筋的根数。对于不同问题, 需要选择不同的加强筋单元, 图 2 所示为加

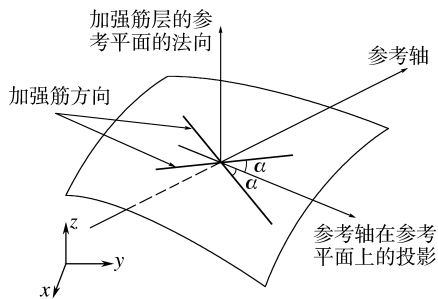


图2 加强筋方向的定义

强筋方向的定义。

2 子午线轮胎的三维有限元模型

子午线轮胎中主要包括胎面、胎肩、胎侧、胎体、带束层和胎圈等部位^[1]。胎侧、胎面和子口胶等使用硬度各不相同的纯胶；胎体、带束层、胎圈包布和钢丝圈是1层或多层帘线-橡胶复合材料。图3所示为子午线轮胎的子午面及其材料分布。

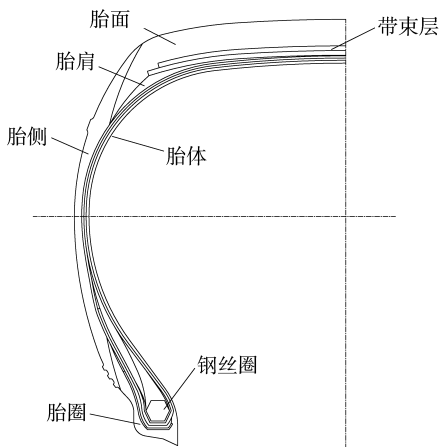


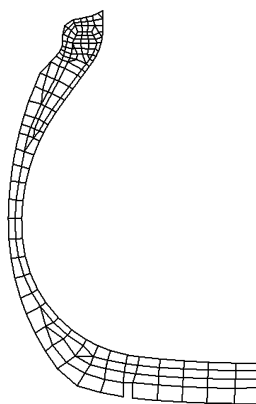
图3 子午线轮胎子午面及其材料分布

2.1 网格划分

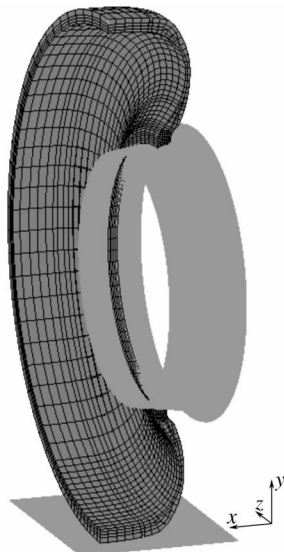
考虑到轮胎的多层帘线-橡胶复合结构,采用加强筋模型进行分析。为了简化模型,减小单元数目,节省计算时间,优化网格,在划分网格时将多层复合材料的基体橡胶划分为1层单元,然后在基体中不同的位置处定义多层帘线。例如2层带束层划分为1层单元,2层胎体以及内衬层也归为1层单元。应特别注意的是,在前处理时,对于帘线-橡胶复合材料,在相同的空间位置应该有共用相同节点的2份单元,一份单元代表橡胶基体,一份单元代表加强筋(帘线),并且为了定义方

便,单元的节点编号顺序也要相同,如在二维网格中,节点编号为1-2的单元边与帘线铺设层一致;在三维网格中,节点编号为2-1-5-6的单元表面与帘线铺设层一致。

先在 MSC. Marc 中调用轮胎材料分布的 CAD 图形,然后划分网格,得到轮胎子午面的 1/2 网格图[如图 4(a)所示],对可能接触轮辋的胎圈区域进行网格细分。使用该二维轴对称非线性有限元模型可以模拟轮胎的轮辋定位-充气-自由旋转过程^[2]。由平面网格旋转拉伸生成 1/4 的三维模型[如图 4(b)所示],接地部分的网格划分得也比较细。



(a)子午面网格



(b)三维网格

图4 有限元网格划分

2.2 材料模型

纯橡胶材料采用 Mooney-Rivlin 非线性弹

性材料模型^[3~5],通过单轴拉伸(压缩)、平面拉伸(纯剪切)、等轴双拉等简单试验测出的试验数据进行曲线拟合,可以得到相应的材料参数;带束层、胎体、钢丝圈和胎圈包布采用加强筋模型^[6,7],分别定义橡胶基体和帘线材料,橡胶基体采用 Mooney-Rivlin 模型,帘线采用线弹性模型。

在定义帘线材料时,要根据帘线的实际分

布情况对加强筋单元进行定义,如带束层的加强筋单元(定义如图 5 所示)共有 2 层加强筋层,在基体单元中的相对位置分别为 0.25 和 0.75。根据轮胎的旋转体结构特点,将参考轴方向定义为 x 方向,即轮胎的轴向,参考平面设置为节点编号为 1-5-6-2 单元表面,在该层加强筋单元中包含 2 层不同铺设角度的帘线材料。



图 5 带束层帘线材料定义

2.3 单元模型

该三维模型采用了 8 节点实体单元,一共有 10 800 个单元 9 108 个节点。为了适应橡胶材料的不可压缩性,橡胶材料单元采用基于 Hermann 公式^[8]的不可压缩单元,这种单元在中心点增加了静水压自由度;加强筋材料采用相应的加强筋单元。

2.4 边界条件

模型中考虑了轮胎与轮辋和轮胎与路面的接触边界条件以及对称边界条件,通过直接约束法解决接触问题。将轮辋和路面定义为刚性体,给定轮辋沿轴向的位移,给定路面移向轴心的位移,将可能与轮辋、路面发生接触的单元定义为可变形体,并建立接触体间的接触关系。

2.5 载荷工况

对该模型先后施加以下 3 种载荷。

- (1)轮辋定位载荷。通过轮辋沿轴向(x 方向)的位移来实现。
- (2)充气压力。施加在轮胎的内表面上。
- (3)静负荷。通过路面相对于轮胎轴心的下沉量来实现。

该模型采用全 Lagrange 格式的增量方法^[9]

处理轮胎的大变形几何非线性,并考虑了随动载荷(充气压力)。

3 计算结果分析

图 6 所示为不同加载阶段轮胎的整体变形情况。图 7 所示为不同加载阶段轮胎接地区域子午面的变形及等效 Cauchy 应力分布情况。由图 6 可以看出,轮辋定位后,胎圈部位向内收缩;充气后轮辋和胎圈配合紧密,轮胎整体向外膨胀;加静负荷后,接地部分受到路面的压力,胎面上升,胎侧向外膨胀,明显鼓出,整个轮胎垂直方向(即 y 方向)上的位移都有所增大。由图 7 可见,应力主要集中在钢丝圈,其次是带束层边缘和胎圈包布末端,这与实际情况是相符的,即胎圈脱层和胎面脱层是轮胎的主要破坏形式。

图 8 所示为不同下沉量时接触区接触压力的分布情况。由图 8 可见,随着轮胎下沉量增大,轮胎接地区域扩大,接触压力增大,并且接触区域为近似的 1/4 椭圆形。

研究路面的接触反力随下沉量变化的情况发现,随着下沉量增大,接触反力增大,并且接触反力与下沉量近似呈线性关系(见图 9)。

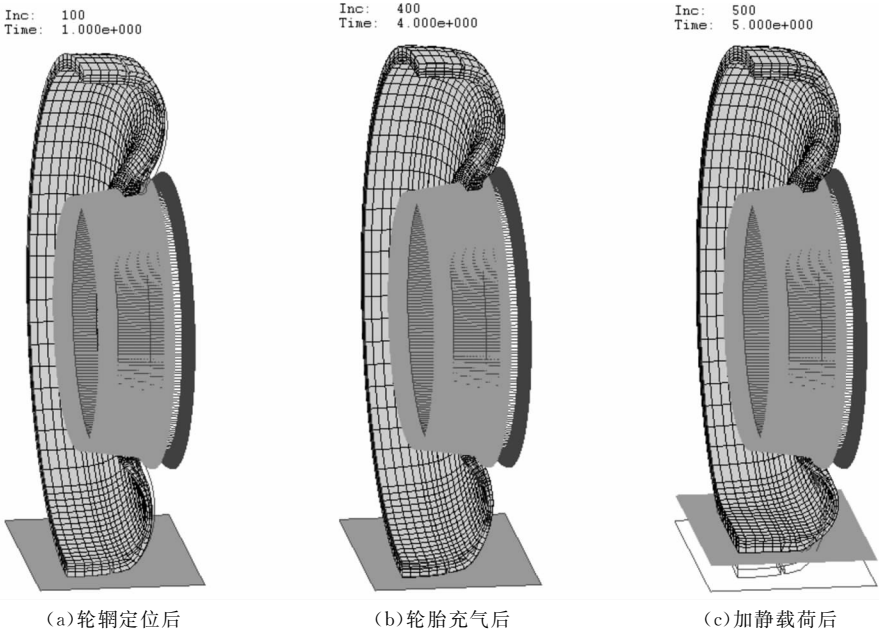


图 6 不同载荷下的轮胎变形

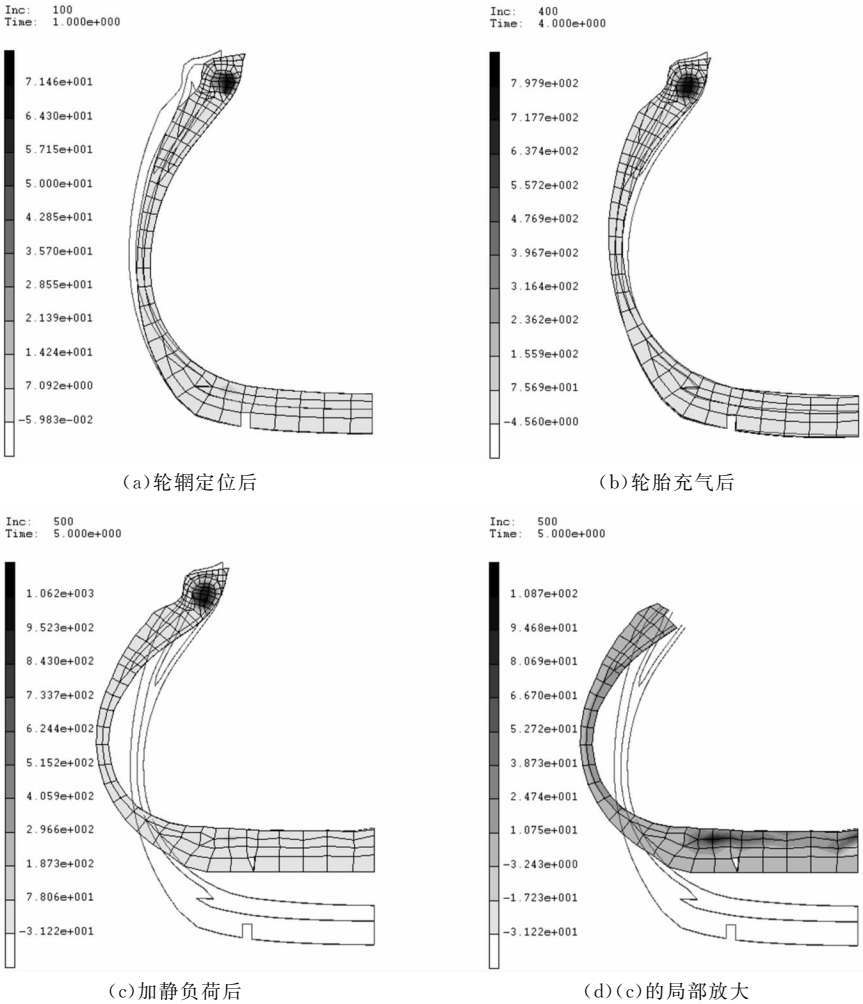


图 7 轮胎接地区域子午面变形和等效 Cauchy 应力分布

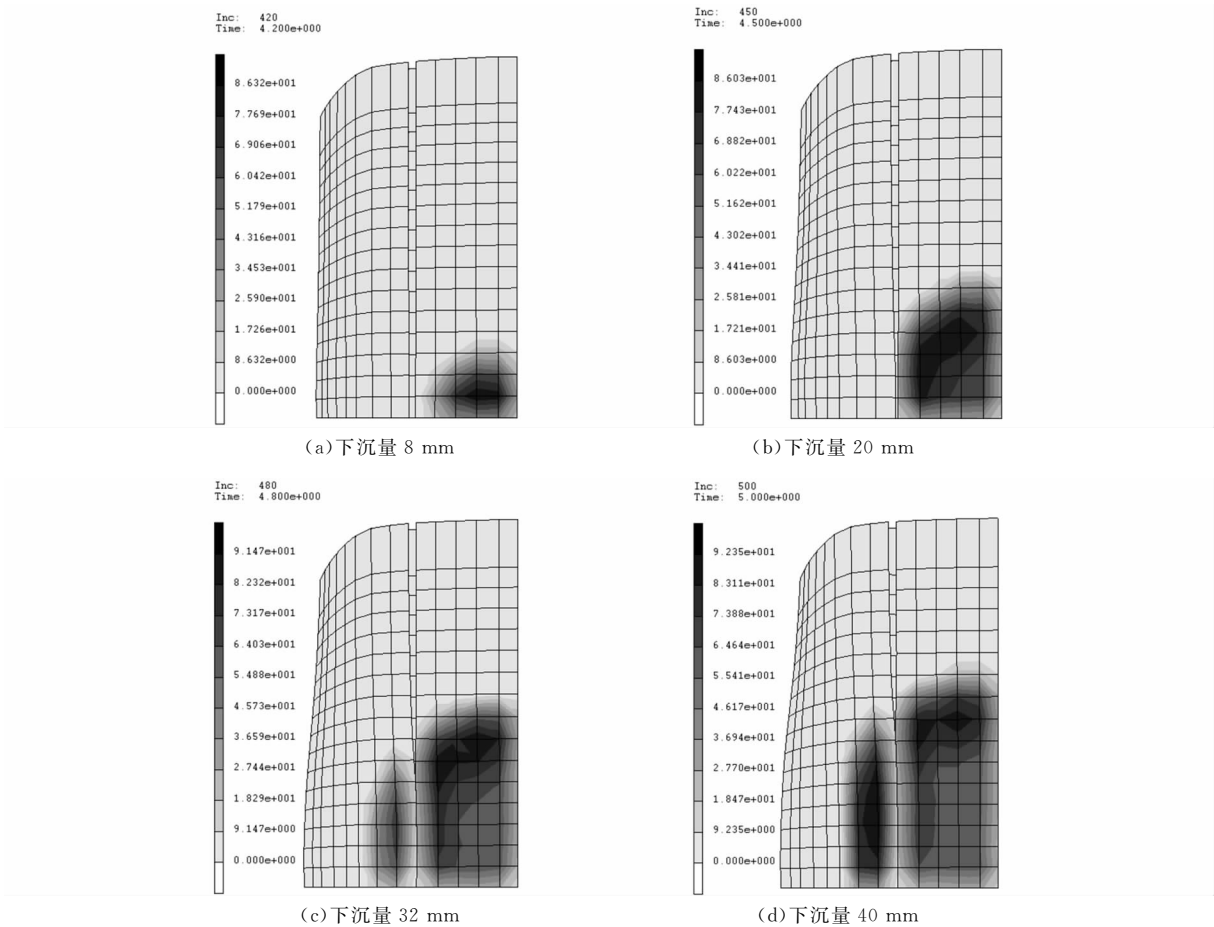


图 8 不同下沉量时的接触压力分布

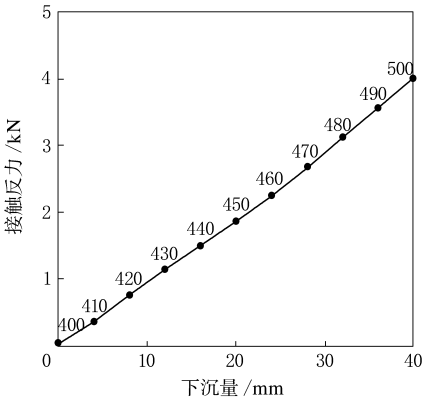


图 9 接触反力与下沉量的关系
图中数字表示增量步数。

4 结语

轮胎是一种集几何非线性、材料非线性和边界条件非线性于一身的复杂结构体。本工作利用 MSC. Marc 软件建立一种子午线轮胎的有限元模型,采用该软件中的加强筋模型来精确地

模拟轮胎中复杂的多层帘线-橡胶复合材料,同时合理简化了模型;模型中考虑了橡胶材料的非线性和不可压缩性、轮胎大变形导致的几何非线性以及轮胎与轮辋、轮胎与路面的接触非线性边界条件。通过三维非线性有限元分析得到了在充气压力和静负荷作用下子午线轮胎的整体变形、内部应力分布以及接地区压力分布情况。

参考文献：

[1] 薛小香,姚振汉,李 鹏,等. 子午线轮胎的轴对称非线性有限元分析[J]. 橡胶工业,2003,50(5):292-297.

[2] 俞 淇,周 锋,丁剑平. 充气轮胎性能和结构[M]. 广州:华南理工大学出版社,1997.

[3] Kim Y, Saleeb A F, Chang T Y P. Implementation of material stiffness coefficients in finite element applications to rubber [J]. Tire Science and Technology, 1994, 22(4): 223-241.

[4] Yoeh O H. Characterization of elastic properties of carbon black filled rubber vulcanizates[J]. Rubber Chemistry and

- Technology, 1990, 63(5): 792-805.
- [5] 危银涛, 杨挺青, 杜星文. 橡胶类材料大变形本构关系及其有限元方法[J]. 固体力学学报, 1999, 20(4): 281-189.
- [6] Helnwein P, Liu C H, Meschke G, *et al.* A new 3D-FE-model of cord-reinforced composites application to analysis of automobile tires[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1993, 14: 1-16.
- [7] Meschke G, Helnwein P. Large-strain 3D analysis of fibre-reinforced composites using rebar element: hyperelastic formulation for cord[J]. Computational Mechanics, 1994, 13(4): 241-254.
- [8] Herrmann L R. Elasticity equations for incompressible and nearly incompressible[J]. AIAA Journal, 1965, 3: 1 896.
- [9] 王勖成, 邵敏. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

第13届全国轮胎技术研讨会论文(三等奖)

Application of rebar model in finite element analysis of tire

YIN Wei-qi¹, YAO Zhen-han¹, XUE Xiao-xiang¹, LI Peng², HONG Zong-yue², QUE Yuan-yuan²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry, Beijing 100039, China)

Abstract: A 3D nonlinear finite element model of radial tire has been built by using MSC. Marc software. Using the rebar model provided by this software to simulate complex multilayer rubber/cord composites and directly define the cord directions varying with their positions in pretreatment, the geometric and material's nonlinearities of rubber/cord composites can be really simulated, the built model can be reasonably simplified and at the same time the calculation efficiency and precision can be improved. In this model, the nonlinearity and incompressibility of rubber material, the geometric nonlinearity of large deformations in tire, and the nonlinear boundary conditions in contact areas between tire and rim or ground are taken into account. The deformation and internal stress distribution of radial tire under inflation and static load, as well as the pressure distribution in contact area are obtained by 3D nonlinear finite element analysis.

Keywords: tire; nonlinear finite element analysis; rubber/cord composite; rebar model

《石化技术与应用》杂志订阅启事

《石化技术与应用》是中国石油兰州石化公司和兰州化学工业公司联合主办的石油化工技术性刊物。公开发刊。国内统一刊号: CN 62-1138/TQ, 国际标准刊号: ISSN 1009-0045。广告经营许可证号: 6201004000005。自1983年创刊以来, 始终坚持科研开发与工业生产相结合的办刊思想, 深受广大读者、作者的厚爱的好评。主要报道内容: 石油化工、三大合成材料、催化剂、助剂及石油炼制等方面新产品、新工艺、新设备的开发、技术改造、分析测试及与石油化工有关的环境保护、自动控制、计算机技术等。本刊曾多次被评为全国石油化工行业及甘肃省优秀期刊, 并已被全国各地大多数图书馆、相关高等院校、科研单位及企业订阅和收藏。现已被俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、

美国《化学文摘》(CA)及《工程材料文摘》(EMA)等国际著名检索机构收录。

《石化技术与应用》为双月刊, 大16开, 单月10日出版。每期定价10元, 全年订价60元。欢迎您在全国各地邮局(所)订阅, 国内邮发代号: 54-102。如错过邮局每年的订阅时间, 可直接从本刊编辑部订阅。国外读者可通过中国国际图书贸易总公司(北京399信箱, 邮编: 100044)订阅, 邮发代号: 4859BM。同时, 热忱欢迎您在本刊刊登新产品、新技术广告及企业形象宣传广告。

编辑部通讯地址: 甘肃省兰州市西固区合水北路1号《石化技术与应用》编辑部; 邮编: 730060; 联系电话: (0931)7314247, 7981693; 联系人: 赵丰砂; E-mail: shjs@0931mail.com; shjs@public.lz.gs.cn。