

半骨盆截肢后自体下肢长骨重建坐姿的生物力学研究

牛文鑫¹, 樊瑜波¹, 倪明^{2,3}, 梅炯³

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191

2. 上海市浦东新区人民医院骨科, 上海 201200

3. 同济大学附属同济医院骨科, 上海 200065

摘要 利用截肢后废弃的自体长骨重建半骨盆环是一种有效的生物学重建方法, 其生物力学性质从未被研究过。本文旨在应用有限元分析方法研究半骨盆截肢后自体骨重建坐骨结节和骨盆环的可行性, 对重建骨盆应力分布进行研究。评价了分别使用股骨髓和胫骨平台替代坐骨结节的重建方案, 连同完整模型共建立 3 个有限元模型。对 3 个模型模拟坐姿进行计算, 对 von Mises 应力比较分析。模型可靠性经过尸体标本应变与位移测试验证。重建骨盆的应力分布与完整骨盆明显不同, 股骨髓重建模型应力主要集中在股骨与骶骨左侧耳状面接触处、右骶髂关节和接骨长钉左侧。与重建股骨不同, 重建用胫骨最大应力位于胫骨干部, 分布面积较大。从生物力学角度看, 使用自体下肢骨重建半骨盆环应该优先考虑股骨重建方案。在实际手术设计中也要注意适当增加长钉的直径, 并在保证强度的条件下适当降低其刚度。

关键词 半骨盆截肢; 自体骨; 骨盆重建; 生物力学; 有限元方法

中图分类号 R318

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)20-0022-05

Reconstructed Pelvis with Autogenous Lower-extremity Long Bones after Hindquarter Amputation: Biomechanical Analysis in the Sitting Posture

NIU Wenxin¹, FAN Yubo¹, NI Ming^{2,3}, MEI Jiong³

1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Department of Orthopedics, Pudong New Area People's Hospital, Shanghai 201200, China

3. Department of Orthopedics, Tongji Hospital, Tongji University, Shanghai 200065, China

Abstract After hindquarter amputation, the pelvis reconstruction using abandoned autogenous lower-extremity long bones is an effective biological reconstruction method. However, the biomechanical effects of this reconstruction have never been well

studied. The objective of the present study is to estimate the feasibility of the operation using the finite element simulation, and to analyze the stress distributions before and after the reconstruction under sitting posture. Two operative schemes, the ischiadic tuberosity replacement with condyles of femur and tibial plateau, respectively, are considered. With additionally the intact model, three finite element models are constructed, and the intact model is validated through stress and displacement measurements in a cadaver specimen. Normal sitting posture is considered in the simulations of these models, and von Mises stresses are used as indexes in comparison. The stress distributions are found to be significantly different before and after the reconstructions. In the model of condyles of femur reconstruction, severe stresses are mainly distributed at the contact surface between femur and the facies auricularis of the left sacral bone, the right iliosacral articulation, and the left long bar. In the model of tibial plateau reconstruction, the peak stresses in the remained iliac and sacral bones, the bridging bone, and long bar are greater than those in the model of condyles of femur reconstruction. Compared with the peak stress in the grafted femur of the latter model, the peak stress in the tibial of the former model is distributed at the shaft of bone, with a broader distribution area. From the view point of biomechanics, the

收稿日期: 2009-09-09

作者简介: 牛文鑫, 博士研究生, 研究方向为骨肌生物力学、运动人体科学, 电子信箱: niuwenxin@gmail.com; 樊瑜波 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S032301064M, S090800337M, M083900897M), 教授, 研究方向为生物医学工程, 电子信箱: yubofan@buaa.edu.cn

reconstruction with condyles of femur shows a better performance. In the operation design, the diameter of long bars should be appropriately great, and the rigidity of the bars should be reduced as long as a sufficient strength is allowed.

Keywords hindquarter amputation; autogenous bone; pelvis reconstruction; biomechanics; finite element method

0 前言

骨盆恶性肿瘤至今仍是骨科医师所面临的最重大的挑战之一。半骨盆截肢技术是唯一可对肿瘤根治切除的手术,但该手术致骨盆功能不全,患者需要依靠轮椅生活。如果能够恢复骨盆承重功能,有助于提高患者生活质量^[1]。

由于截肢后的废弃肢体保留有完整的长骨,而长骨正是重建骨缺损的重要材料。利用截肢后废弃的自体长骨在原先坐骨结节的空间位置重建承重点,同时恢复骨盆环完整,是一种有效的方法。该方法属于生物学重建,具有骨愈合快、无免疫反应等优点^[2]。Bramer 和 Taminiau^[3]曾报道用一根股骨重建骨盆环和坐骨结节,但作者未说明用于替代坐骨结节的股骨髁是否位于坐骨结节的空间位点。单根股骨或胫骨在半骨盆截肢时只能重建骨盆环,不能原位重建坐骨结节。只有将两根长骨联合使用,才可能在恢复骨盆完整的同时,原位重建坐骨结节。尽管这样手术相对复杂,但更加符合临床实际。

应用自体废弃长骨重建骨盆环在临床上还没有普及应用,仅有数例报道^[3]。该手术的可行性由许多影响因素确定,生物力学是决定因素之一。但是对这一问题从未有人研究过。本文应用有限元分析方法研究半骨盆截肢后自体骨重建坐骨结节和骨盆环的可行性,对重建骨盆坐姿的应力分布进行研究,并通过与正常骨盆作对比,对可用的手术方式做出初步评价,为临床上开展半骨盆截肢后重建提供理论支持和参考意见。

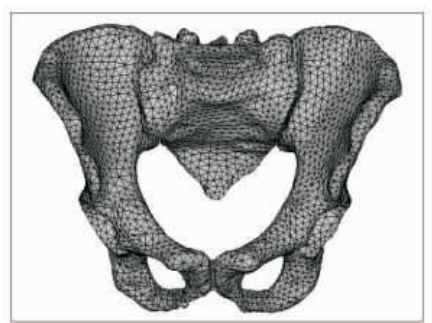
1 材料与方法

1.1 有限元建模

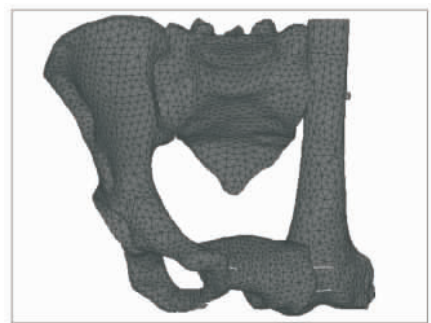
选取正常男性志愿者,30岁,身高172 cm,体重65 kg,骨盆及下肢无病变、外伤和畸形。应用GE公司Light Speed 16排螺旋CT扫描仪沿人体横断面以层厚1.25 mm、螺距1.25 mm自上而下进行螺旋扫描。扫描范围起于第三腰椎至胫骨中段,共得到960张CT图片,实际建模采用中间有效图片620张。

共建立3个模型:①包括髌骨和双侧胫骨的正常骨盆模型;②去除右侧胫骨,以股骨髁替代坐骨结节的重建模型;③去除右侧胫骨,以胫骨平台替代坐骨结节的重建模型。模型②以股骨髁重建坐骨结节,使其到正中矢状面和经耳状面中心冠状面的距离与坐骨结节到这两个平面的距离相等,并与对侧坐骨结节保持同一水平面。用2枚长松质骨螺钉将股骨近端固定于髌骨。由于坐骨结节为原位重建,股骨髁与耻骨联合间存在一定的骨缺损,该缺损应用胫骨上端的松质骨填补,将胫骨近端用重建钢板与耻骨上支进行固定,并经耻骨下支向胫骨内固定2枚长松质骨螺钉。将股骨髁和胫骨平台截骨修剪匹配后,再用松质骨螺钉和重建钢板固定。模型③重建过程与股骨重建类似,不同之处在于将胫骨干固定于髌骨耳状面,以胫骨平台替代坐骨结节。胫骨平台到耻骨联合间的骨缺损应用股骨髁的松质骨植骨。

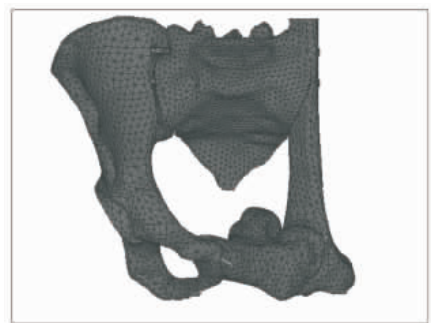
模型材料参数依照参考文献[4]~[6],皮质骨的弹性模量为12 000 MPa,泊松比为0.3;松质骨的弹性模量为100 MPa,泊松比为0.2。耻骨联合弹性模量1 MPa,泊松比为0.49;钛合金的弹性模量为110 MPa,泊松比为0.3。建模方法参考了此前成功的经验^[7-10]。对耻骨联合处用三维杆单元模拟,杆单元建模方式如文献[7]中足底自适应壳结构与骨组织的联结方式。根据临床手术要求,加入2枚松质骨钉,股骨和胫骨连接处、耻骨联合生理位置处在临床手术中都采用钢板固定,在建模中以梁单元进行力学等效处理。模型如图1所示。



(a) 完整模型
(a) Intact model



(b) 股骨髁替代坐骨结节重建模型
(b) Model of condyles of femur reconstruction



(c) 胫骨平台替代坐骨结节重建模型
(c) Model of tibial plateau reconstruction

图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element models

1.2 边界与加载条件

固定完整及重建骨盆模型和重建坐骨结节各方向自由度均模拟正常坐姿。从腰椎骶椎间盘位置垂直向下均匀分布加载 500 N, 模拟正常体重。在 ANSYS 中对 3 个模型进行相同的计算分析。

1.3 模型验证

为保证计算结果的有效性,对完整模型进行了一例尸体标本实验验证。如图 2 所示,应用材料试验机对一例男性骨盆标本模拟上身体重加载至 500 N。骨盆双侧坐骨结节应用骨水泥固定,模拟正常坐姿,截断腰椎上方使用骨水泥塑形为一个碗状托,与试验机加载单元球形末端契合,模拟脊柱的活动性。实验应用数字散斑测量系统测量图中点 1~4 的纵向位移,测量方法应用和文献[7]、[11]、[12]一致。同时,应用电阻应变花(BE20-2CA)和静态电阻应变仪(DH3818)对称测量双侧髂窝内下侧区域表面应变,测量方法应用和文献 [11]~[13]一致。实验结果与模拟计算结果进行对照。

2 结果

尸体标本实验测点 1~4 纵向位移分别为 5.12、0.33、0.01 和 0.02 mm,有限元模拟对应区域位移分别为 4.63、0.12、-0.04 和 0.01 mm。尸体标本实验两对称测点第一主应变分别

为 $152\mu\varepsilon$ 和 $162\mu\varepsilon$, 第三主应变分别为 $-365\mu\varepsilon$ 和 $-1\,181\mu\varepsilon$, 有限元模拟对应区域应变分布介于测量值之间。

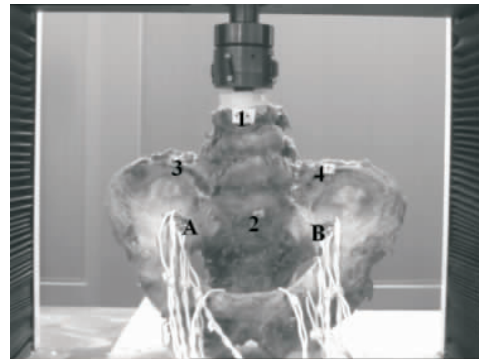


图2 骨盆尸体标本实验

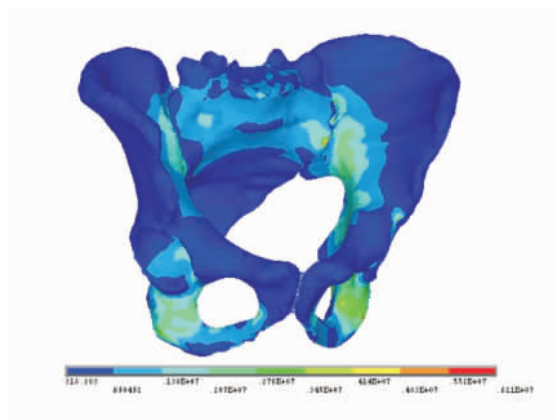
Fig. 2 Pelvis cadaver experiment

注: 1~4 为纵向位移测点; A、B 为表面应变测点

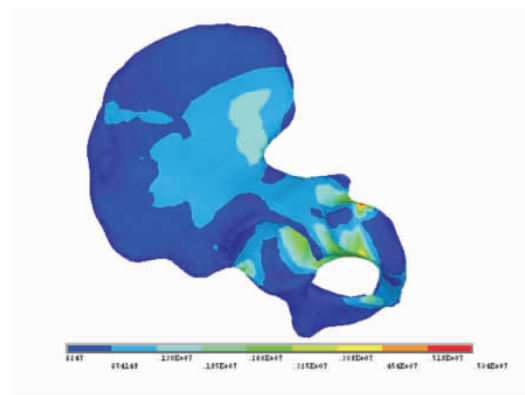
Notes: 1~4, the measurement points for perpendicular displacements;

A and B, the strain rosettes

完整模型计算结果应力云图(图3)显示,应力集中区主要分布在髌韧带、弓状线、髌臼、坐骨支和坐骨结节,各部分最大应力如表1所示。应力分布基本左右对称,考虑生理不对称性、建模误差和计算误差,结果非常理想。



(a) 整体
(a) Whole model



(b) 左側髌骨
(b) Left ilium

图3 完整骨盆模型 von Mises 应力分析结果云图

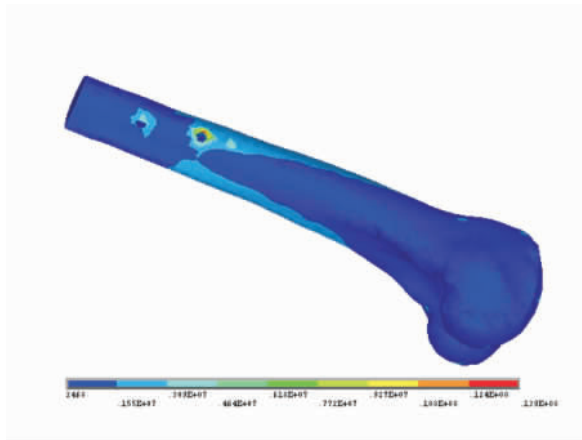
Fig. 3 von Mises stress distribution of the intact model

股骨髁替代坐骨结节的重建模型计算结果表明,重建骨盆的应力分布与完整骨盆明显不同,应力主要集中在股骨与髌骨左侧耳状面接触处、右髌髁关节和接骨长钉左侧。如表 1 所示,重建骨盆中各组织最大应力显著大于完整骨盆。胫骨平台替代坐骨结节的重建模型结果表明,该模型中应力分布规律与股骨重建模型基本一致。模型中正常髌骨、髌骨、桥接骨和长钉的最大应力高于股骨重建模型。如图 4 所示,虽然重建胫骨最大应力小于重建股骨最大应力,但重建用胫骨最大应力位于胫骨干部,分布面积较大,不同于重建股骨最大应力分布于长钉的接触表面,面积非常小。

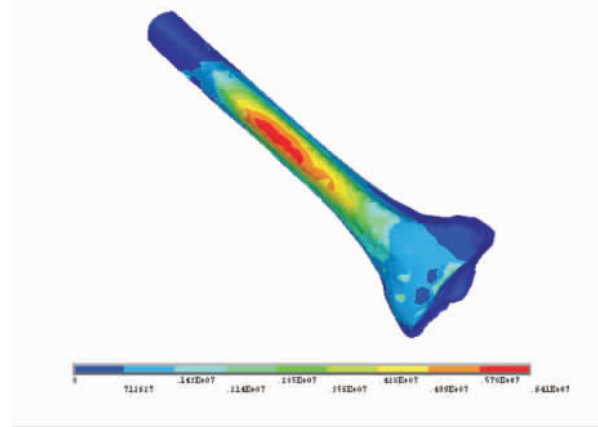
表 1 完整及重建骨盆的最大 von Mises 应力 (单位:MPa)

Table 1 Maximal von Mises stress of various parts in three models (unit: MPa)

骨盆模型	骶骨	右侧 髂骨	左侧髂骨 或其重建	桥接骨	长钉
完整骨盆模型	5.40	6.21	5.84	—	—
股骨髓重建	21.3	23.7	13.9	2.43	67.8
胫骨平台重建	68.1	32.1	6.41	3.49	72.5



(a) 股骨
(a) Femur



(b) 胫骨
(b) Tibia

图 4 重建骨盆模型重建骨 von Mises 应力分析结果云图

Fig. 4 von Mises stress distribution of the graft bones in the reconstruction models

3 讨论

由于有限元技术的快速发展及其各种优势,其在骨科手术模拟评价中的作用越来越大^[13]。但是此前用来分析的各种骨盆有限元模型的精确性和有效性普遍缺乏验证,而对计算模型进行验证,是生物力学模拟分析的重要环节。虽然人体尸体标本实验是一种被普遍接受的验证方式^[7],但是由于实验成本昂贵,实验影响因素复杂,其广泛应用还存在较大困难。本文使用一例标本实验验证,并无统计学意义,实验测量受实验力学技术发展的制约,并不能认为是对模型的严格验证。但是本文计算模型精确性从一定程度上得到了证实,类似实验在生物力学研究领域非常罕见,其意义重大。

由于人体骨盆骨骼结构复杂,同时限于医学影像技术和计算机图形学的发展程度,早期骨盆有限元模型是二维或轴对称的准三维模型。这些模型过于简化,难以准确模拟非规则几何形状并有复杂关节的真实实体^[6]。高性能计算机的出现,使建立骨盆三维有限元模型成为可能。但早期的三维骨盆模型报道中,松质骨的分布被假设为均一的,皮质骨的厚度也是固定的。从生物力学观点来看,这样所建立的模型必然不能反映骨盆的真实力学特性。螺旋 CT 给骨盆有限元的模型建立带来极大的方便。本文模型在建模上采用了先进的方法,参考了此前的成功实例^[7-10],保证了模型的精确性。

有限元模拟应力结果是实验应变测量,与尸体实验相比具有相似性,虽然骨盆切除区域和重建方式不尽相同,但是都体现为重建并不能完全恢复正常骨盆的生物力学功能^[13]。与完整骨盆模型计算结果相比,股骨或胫骨重建模型各组织最大应力都显著增大,其原因在于贯穿髌骨左右的 2 枚长钉承载了全部载荷,发挥了类似扁担的作用,在髌膝关节对原关节形成明显的应力遮挡效应。2 枚长钉都在左侧重建骨部位应力最大,可以认为是由于右侧髌骨比左侧重建股骨或胫

骨与长钉间有更大的接触面积,所以应力才在左侧重建骨更大。另外由于股骨或髌骨较髌骨在轴向上强度更大,拥有更强的承载能力,所以右侧髌骨比左侧重建骨应力更大,这在重建手术后初期对保护尚不稳定的重建有积极作用,但也要看到长期对正常髌骨构成的损害。髌骨承受的最大应力较完整骨盆显著增大,这对正常侧髌膝关节的稳定有所损害,术后可引发髌膝关节疼痛。所以重建时应尽可能使用直径较大的长钉,以增大骨与钉的接触面,对保护正常髌骨和重建位置局部组织都有积极作用。

股骨重建的骨盆模型与胫骨重建的模型比较,因为股骨比胫骨强度更大,所以股骨重建分担了比胫骨重建更大的载荷。胫骨重建条件下正常髌骨、髌骨、桥接骨和长钉的最大应力都显著大于股骨重建条件下的相应应力,其中髌骨应力大 35%,髌骨应力大 219%,桥接骨应力大 43%,接骨长钉的应力大 6%,应力的分布位置和规律在两种模型中基本一致。胫骨重建条件下重建用胫骨的最大应力比股骨重建条件下重建用股骨的最大应力显著小,仅为后者的 46%,但胫骨最大应力出现在干部,而股骨的最大应力出现在与长钉接触的部位,并且胫骨应力集中处拥有更大的分布面积,极易引发局部和完全骨折,对重建效果可能会构成较大的威胁。桥接骨在正常坐姿下承受应力不大,主要分布在两骨接触部位,对重建的生物力学效果影响不大。

4 结论

综上所述,本研究认为出于保护正常侧和防止出现重建侧严重骨折的目的,从生物力学角度应该优先考虑股骨重建的方案^[3]。但在实际手术设计中也要注意适当增加长钉的直径,并在保证强度的条件下适当降低其刚度。

致谢 真诚感谢同济大学生命科学与技术学院生物医学工程研究所丁祖泉教授对部分实验的殷切指导。

参考文献 (References)

- [1] 戴 戎. 半骨盆截除术后的功能重建[J]. 国外医学·骨科学分册, 2004, 25(1): 3-4.
Dai Kerong. *Foreign Medicine Science-Section of Orthopaedics*, 2004, 25(1): 3-4.
- [2] 高悠水, 倪明, 梅炯. 半骨盆截技术后废弃肢体的再利用[J]. 中华矫形外科杂志, 2008, 16(17): 1332-1334.
Gao Youshui, Ni Ming, Mei Jiong. *Orthopedic Journal of China*, 2008, 16(17): 1332-1334.
- [3] Bramer J A M, Taminiau A H M. Reconstruction of the pelvic ring with an autograft after hindquarter amputation. Improvement of sitting stability and prosthesis support[J]. *Acta Orthopaedica*, 2005, 76(3): 453-454.
- [4] Dalstra M, Huiskes R, van Erning L. Development and validation of a three-dimensional finite element model of the pelvic bone [J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 1995, 117(3): 272-278.
- [5] Dalstra M, Huiskes R, Odgaard A, et al. Mechanical and textural properties of pelvic trabecular bone [J]. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26 (4-5): 523-535.
- [6] Huiskes R. Finite element analysis of acetabular reconstruction. Noncemented threaded cups [J]. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 1987, 58 (6): 620-625.
- [7] 牛文鑫, 杨云峰, 俞光荣, 等. 人体足部三维有限元模型的有效构建方法及其合理性的实验分析研究 [J]. 生物医学工程学杂志, 2009, 26(1): 80-84.
Niu Wenxin, Yang Yunfeng, Yu Guangrong, et al. *Journal of Biomedical*

Engineering, 2009, 26(1): 80-84.

- [8] 牛文鑫, 丁祖泉. 三种三维有限元建模方法在跟骨模型建立中的应用和比较[J]. 医用生物力学, 2007, 22(4): 345-350.
Niu Wenxin, Ding Zuquan. *Journal of Medical Biomechanics*, 2007, 22(4): 345-350.
- [9] Niu W X, Fan Y B. Biomechanical effect of kyphoplasty on the adjacent vertebrae in osteoporotic vertebral fracture [C]//Proceedings of WACBE World Congress on Bioengineering, Hong Kong, 2009: 270.
- [10] Yang Y F, Yu G R, Niu W X, et al. Effect of the plantar ligaments injury on the longitudinal arch height of the human foot[C]//Lecture Notes in Computer Science V 4689 LNBI, Life System Modeling and Simulation, International Conference. 2007: 111-119.
- [11] Niu W X, Xu F, Ding Z Q, et al. Experimental measurement in multi-fields of human foot under simulated body weight loading[C]//Proceeding of The 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2008: 1177-1180.
- [12] Niu W X, Yang Y F, Fan Y B, et al. Experimental modeling and biomechanical measurement of flatfoot deformity [C]//Peng Y, Weng X. The Seventh Asian-Pacific Conference on Medical and Biological Engineering, IFMBE Proceedings. 2008, 19: 133-138.
- [13] 游木荣, 俞光荣, 贾永伟, 等. 髌臼周围肿瘤切除腓骨移植重建骨盆环的应变研究[J]. 中华关节外科杂志: 电子版, 2008, 2(2): 41-44.
You Murong, Yu Guangrong, Jia Yongwei, et al. *Chinese Journal of Joint Surgery: Electronic Version*, 2008, 2(2): 41-44.

(责任编辑 李慧政)

·学术动态·



“第 6 届国际稀土开发与应用研讨会”征文

稀土是 21 世纪的战略资源,因其独特的化学和光、电、磁等物理化学性质成为新材料开发领域的重要元素,已广泛应用于国民经济各个领域,是可持续发展不可或缺的重要资源。

中国稀土学会将于 2010 年 8 月在北京举行“第六届国际稀土开发与应用研讨会”(ICRE'2010),现面向所有的从事稀土及其相关科技与工业领域的研究人员征稿,范围如下。

1) 稀土材料及应用:磁学及磁性材料,储氢材料及电池,超磁致伸缩材料,磁致冷,磁光存储材料,光学及荧光材料,高温超导,催化材料,复合材料,生物医用材料等。

2) 稀土化学和物理:配位化学和有机金属化学,生物无机化学,固体化学和物理,物理化学,溶液化学,熔盐化学,电子结构和光谱,分析化学。

3) 稀土在传统领域应用的新进展:稀土在钢铁,有色金属及合金,玻璃陶瓷,催化剂,农业和医药等领域的应用。

4) 稀土资源和冶金:稀土地球化学和选矿,萃取原理和工艺设计方法,分离和湿法冶金,金属及合金的制备,高纯金属及合金的制备,环境保护,生产设备和分析测试仪器。

论文摘要截止日期:2010 年 3 月 31 日,全文截止日期:2010 年 8 月 31 日。

网址: <http://www.cs-re.org.cn/icre2010/>; 地址:北京市海淀区学院南路 76 号中国稀土学会办公室(100081) 陈占恒,韩晓英; 电话:010-62182748; 传真:010-62188304; 电子邮箱: icre2010@126.com, csre@cs-re.org.cn。