

文章编号:1000-582X(2010)01-0031-05

重轨万能轧制过程金属三维流动的复合分析法

郭煜敬¹, 谢志江¹, 王彦忠², 陶功明²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 攀枝花钢铁集团公司轨梁厂, 四川 攀枝花 617062)

摘要:利用 MSC. Marc 大变形有限元仿真软件进行轧制过程数值模拟;通过 X、Y 方向位移云图切片技术分析金属流动规律,并用横向切片轮廓节点的“时间-位移”图对变形过程进行细化分析,获得轧制后钢轨的轨高、头宽、腰厚及底宽等钢轨断面关键尺寸信息;通过 Z 方向位移分析优化延伸率的分配。结果表明:用该方法对依靠经验设计的重轨万能轧制孔型进行优化,缩短了产品孔型开发时间,节约了孔型开发成本,提高了产品轧制精度。

关键词:钢轨;三维流动;云图;延伸率

中图分类号: TG335.4

文献标志码: A

Multiplex analytical method for metal three-dimensional flow of heavy rail rolling by universal mill

GUO Yu-jing¹, XIE Zhi-jiang¹, WANG Yan-zhong², TAO Gong-ming²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Rail-Beam Plant of PZH Steel, Panzhihua, Sichuan 617062, P. R. China)

Abstract: The heavy-rail rolling process is simulated with MSC. Marc software. The flowing law of metal by slicing the nephogram of X, Y direction displacement is analyzed. Then the course of deforming by “time-displacement” chart of nodes on the outline of horizontal slice is particularly studied. The distribution of the coefficient of elongation is optimized through analyzing Z direction displacement. The result shows that utilizing this method to optimize the universal rolling pass which designed by experience can save the development time and the cost, and improve the quality of heavy rail.

Key words: rail; three dimensional flow; nephogram; elongation

重轨万能轧制孔型结构复杂,轧制变形过程既有强迫宽展又有自由宽展,精确的孔型设计是保证轧制精度的最关键因素^[1-2]。目前,孔型主要依靠经验进行设计,通过试轧进行修正,待试轧结果满足精度要求后定型;孔型开发周期长、成本高,且轧制精度也受到较大限制。用合理的分析方法,找出轧制过程金属流动规律、流动大小,为孔型的设计和优化提供依据是重轨万能轧制过程变形机理

研究的重要内容^[3-4]。基于该方面的研究国内外均处于探索阶段,文献[1-9]用有限元模型分析了孔型系统对钢轨断面尺寸、轧制精度的影响,研究了轧制后钢轨的残余应力分布;文献[10-15]对 H 型钢万能轧制进行了研究,分析了轧件翼缘水平和垂直方向的变形规律,为钢轨孔型设计提供了借鉴作用。但重轨万能轧制过程属于严重不对称轧制,必须对轨头、轨腰及轨底等各部位金属三维流动作具

收稿日期:2009-08-10

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(JW20 * 26017);国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA957C)

作者简介:郭煜敬(1980-),男,重庆大学博士研究生,主要从事轧钢设备状态监测及轧钢工艺技术方向的研究。

谢志江(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65105379;(E-mail)xzj99@vip.sina.com。

体研究分析,获得每道次、各部位及每个方向的具体流动值,才能对孔型设计提出优化依据。笔者利用 MSC.MARC 大变形有限元仿真分析软件,以 U75V 为原材料,对某规格重轨万能轧制设计孔型进行数值模拟轧制,用金属流动复合分析法对轧制过程金属流动进行具体分析,优化了孔型设计,提高了重轨轧制精度。

1 重轨万能轧制过程仿真模型的建立

攀钢重轨万能轧制线主要有二辊开坯机(BD1)、二辊粗轧机(BD2)、万能粗轧机(U1)、第一轧边机(E1)及万能中轧机(U2)、第二轧边机(E2)、万能精轧机(UF)组成。重轨轧制流程为:BD1 开坯机—BD2 粗轧机—U1E1 万能粗轧机组—U2E2 万能中轧机组—UF 万能精轧机组。

限于篇幅,这里对具代表性的万能初轧机 U1 第一道次轧制过程进行有限元仿真分析。

1.1 几何模型的建立

1) 轧件:要保证稳态轧制,轧件长度应是变形区长度的 3 倍以上,研究选取轧件长度为 600 mm;采用 8 节点 6 面体单元划分有限元网格,在保证计算精度、收敛稳定的条件下适当加密头部节点数、减少腰部及底部的节点数。

2) 轧辊:水平辊最大直径 $D_H = 1\ 200\ \text{mm}$,立辊最大直径 $D_V = 800\ \text{mm}$ 。

3) 后推板:假想的后推板给钢轨一个从 0 逐渐增加的力实现钢轨的顺利咬入;咬入后,让后推板与轧件分离,实现钢轨的稳定轧制。几何模型如图 1 所示。

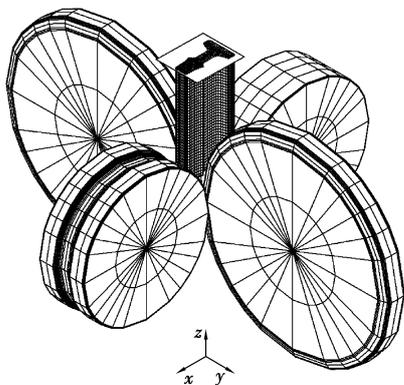


图 1 几何模型

1.2 轧件材料特性的设定

根据 Gleeble 热模拟机上测得的材料 U75V 变

形抗力曲线,求出在 $1\ 080^\circ\text{C}$ 时轧件的弹性模量 $E = 150\ 000\ \text{MPa}$,泊松比 $\nu = 0.32$,初始屈服应力 $\sigma_s = 80\ \text{MPa}$ 。

1.3 接触特性定义及边界条件的施加

1) 轧件设置为变形体,轧辊及后推板均设置为刚性表面。

2) 轧辊与轧件的接触特性选为 Touching 型,后推板与轧件接触特性选为 Glue 型;轧辊与后推板接触特性选为 No touching 型。

3) 摩擦模型采用修正的库仑摩擦模型,摩擦系数取 0.32。

4) 水平辊转速为 $\omega_H = 5\ \text{rad/s}$,立辊转速为 $\omega_V = 7.5\ \text{rad/s}$ 。

5) 采用 Von Mises 屈服准则。

2 仿真结果及分析

模拟轧制时间为 0.3 s,整个轧制过程划分为 300 步。通过 x 、 y 方向位移带状云图及位移带状云图切片图,分析金属流动规律,通过 z 方向位移分析延伸率分配是否合理。这里选择轧件与轧辊将要分离时(第 280 步)位移云图进行切片;并根据稳定轧制段的轧件轮廓质点“时间—位移”图对变形过程进行细化分析,限于篇幅这里选取轧件长度方向 300 mm 处截面轮廓线上具代表性的 8 个节点进行轨高、头宽、腰厚及底宽等关键尺寸分析。节点选择如图 2 所示。

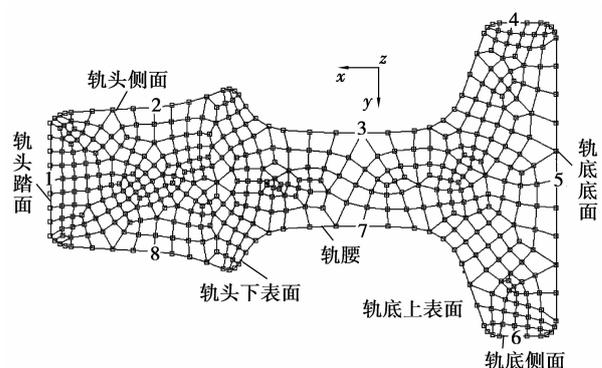


图 2 节点选择分布图

2.1 x 方向位移分析

根据需要可以选择不同基点,用不同的间隔进行切片。这里只对一组切面进行金属流动分析:切片选择与向量 $(0, 0, 1)$ 垂直的一簇平行截面,间隔取 60 mm。

从 x 方向位移带状云图(如图 3)及其切片图(如图 4)综合判断(云图中金属流动值分为 10 个区间显示),在稳定轧制阶段轧件各部位金属 x 方向位移流动趋势稳定;从轧制后 x 方向金属流动比较图(如图 5)看出金属流动规律表现为:1)轨头踏面金属在轧制力的作用下向 x 负方向流动,且由轨头中心线向两侧逐渐减小;2)轨底金属由轨底底面向轨底上表面流动,且由轨底中心线向两侧逐渐增加;3)轨腰处金属几乎以中截面为界分别流向轨头和轨底(轮廓线为轧制前轧件断面轮廓,云图为轧制后轧件断面图,以轨头方向作为 x 正方向,以向下方向作为 y 正方向)。

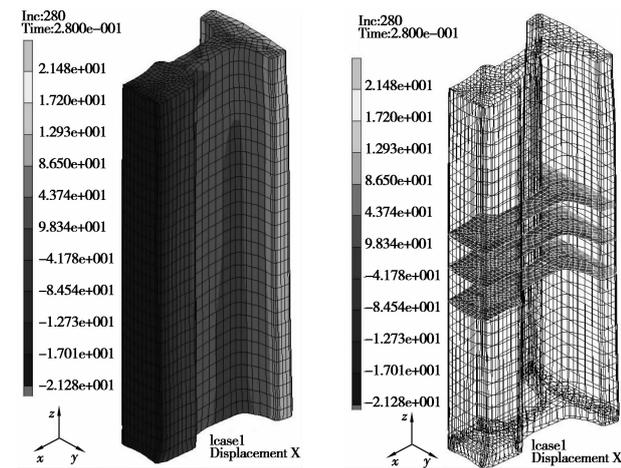


图 3 x 方向位移带状云图

图 4 x 方向位移切片图

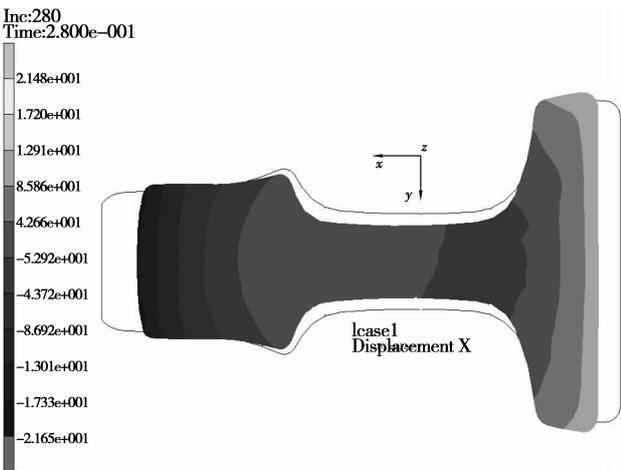


图 5 x 方向位移流动比较图

所选节点 x 方向位移每隔 5 步取一个值,所得“时间-位移”曲线如图 6 所示,可以看出位移曲线分为 3 部分:1~90 步,所选截面处于变形区前,截面 x 方向位移为 0;90~165 步附近,所选截面经过轧制中性面前后,该阶段所选节点根据轧件受力基于最小阻力定律,以不同的速度流向各自的平衡位置;165

~210 步,随着分析节点逐渐远离轧制中性面,所选节点 x 方向位移保持稳定值;节点 1 x 方向位移为 -17.96 mm,节点 5 为 10.82 mm。经该道次轧制后,轨高压下 28.88 mm。

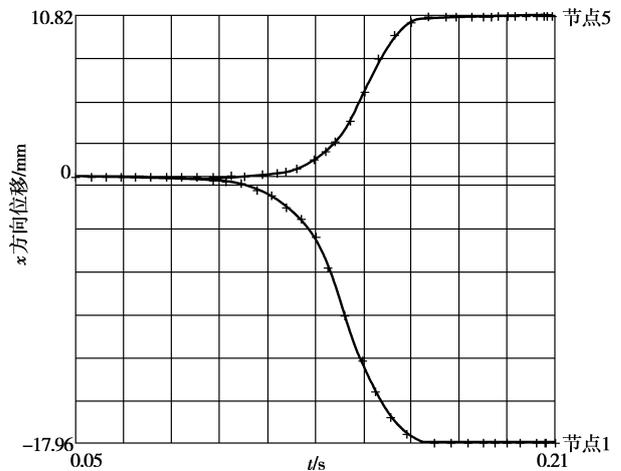


图 6 所选节点 x 方向时间-位移图

2.2 y 方向位移分析

在万能轧制过程中,轨头侧面及轨底侧面处于自由宽展状态。

从 y 方向位移带状云图(如图 7)及其切片图(如图 8)综合判断,在稳定轧制阶段轧件各部位金属 y 方向位移流动趋势稳定;从轧制后 y 方向金属流动比较图(如图 9)看出金属流动规律表现为:1)轨头踏面金属以对称面为基准面向外流动,并从轨头踏面到轨头下颚金属流动逐渐由向外流动过渡到向里流动;2)轨腰金属以对称面为基准面向里流动;3)轨底金属以对称面为基准面向外流动。

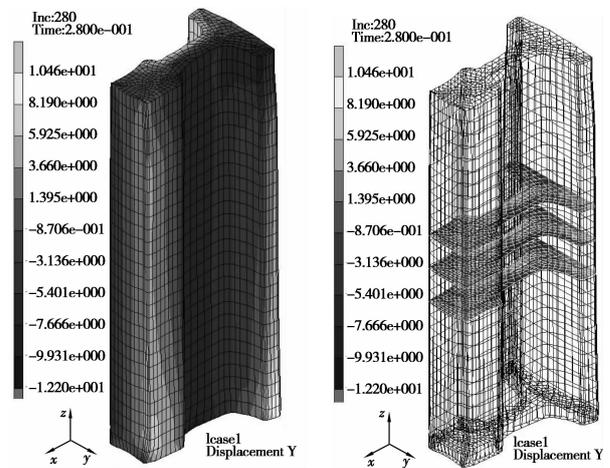


图 7 y 方向位移带状云图

图 8 y 方向位移切片图

从所选节点 y 方向“时间-位移”图(如图 10),可以看出从 50~90 步,由于轧件表面受库伦摩擦力

的影响,所选节点 y 方向位移在一定范围内波动;从 90~165 步附近,所选截面经过轧制中性面前后,该阶段所选节点根据轧件受力基于最小阻力定律,以不同的速度流向各自的平衡位置;165~210 步,随着分析节点逐渐远离轧制中性面,所选节点 y 方向位移保持稳定值;节点 2 y 方向位移为 -1.44 mm,节点 3 y 方向的位移为 5.69 mm,节点 4 y 方向位移为 -3.06 mm,节点 6 y 方向的位移为 2.28 mm,节点 7 y 方向位移为 -5.61 mm,节点 8 y 方向的位移为 2.13 mm。经该道次轧制后,头宽展宽 3.57 mm,腰厚压下 11.30 mm,底宽展宽 5.34 mm。

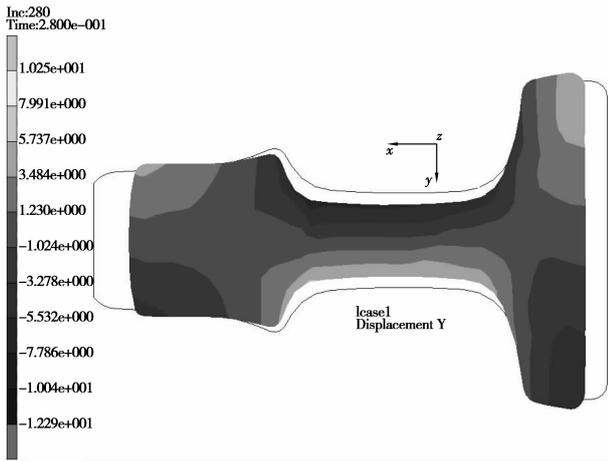


图 9 y 方向位移流动比较图

轧制过程中轧件发生弯曲的关键因素,通过 z 方向金属流动分析为优化孔型每道次各部位面积及延伸率提供重要依据。

从 z 方向位移带状云图(如图 11)、其切片图(如图 12)及所选节点的 z 向“时间-位移”图(如图 13)综合判断,在稳定轧制阶段所选 8 个节点 z 方向位移几乎完全相同,且随着轧制的进行呈线性规律逐渐增大,故轧件变形是均匀延伸或近似均匀延伸,该道次孔型各部位延伸率比较合理。

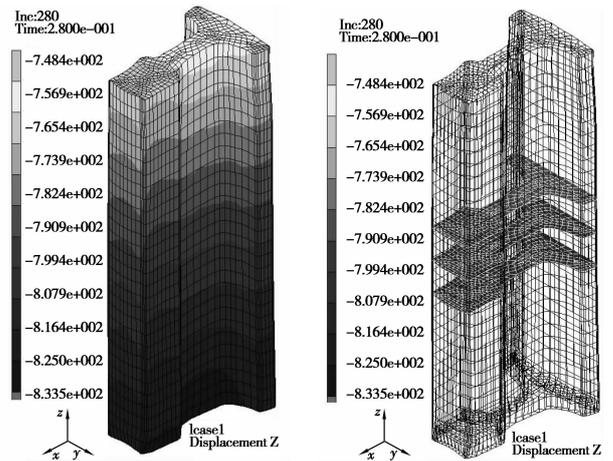


图 11 z 方向位移带状云图

图 12 z 方向位移切片图

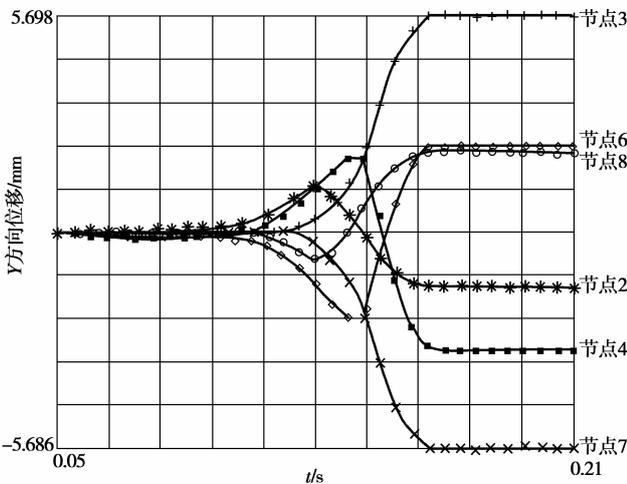


图 10 点 y 方向时间-位移图

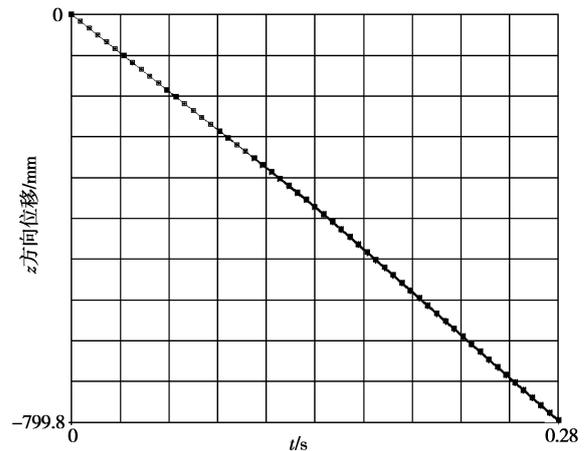


图 13 点 z 方向时间-位移图

轨头精度是重轨质量的重要指标,且头部断面结构最为复杂,由 x 、 y 方向位移分析可见孔型尺寸轨头压下量足够大,充满了万能轧机孔型。

2.3 z 方向位移分析

钢轨各部位 z 方向的流动速度差异是造成钢轨

3 孔型的优化

BD1、BD2 孔型不同规格产品共用,只设计万能区孔型。孔型设计的依据:1)轧机主动传动参数;2)总延伸系数;3)轨腰厚度压下量。孔型设计达到的关键尺寸:1)轨高;2)头宽;3)腰厚;4)底宽;5)断面面积。孔型设计时,依照轧机功率分配各道次压下量,把轨腰压下量作为依据;根据总延伸率,依照经验分

配每道次轨头、轨腰、轨底各部位的面积及延伸率,断面划分如图 14 所示。但不同规格的重轨每道次各部位面积及延伸率不同,且孔型设计中涉及到的具体参数有 12 个之多(如图 15),设计过程中主观性太强。各部位延伸率分配不合理,造成轧制过程钢轨出钢弯曲;具体参数设计不合理,造成断面尺寸偏差过大。轧机主传动数据如表 1 所示,优化前孔型延伸率如图 16 所示。

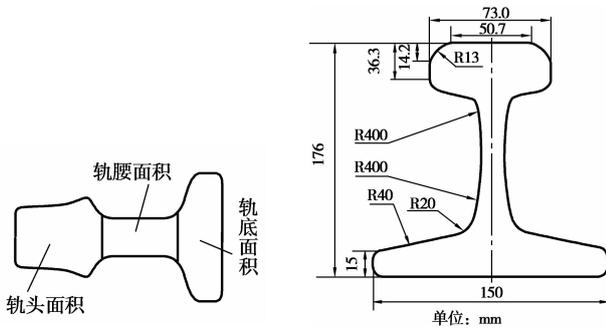
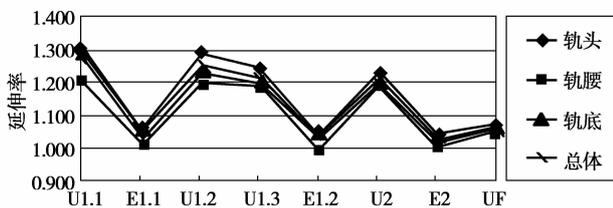


图 14 断面划分图

图 15 孔型设计断面参数

表 1 轧机主传动数据

机架	功率/kW	辊身直径/mm		最大轧制力/kN	
		H	V	H	V
U1	5 000	1 200	800	6 000	4 000
E1	1 500	1 200		2 500	
U2	3 500	1 200	800	6 000	4 000
E2	1 500	1 200		2 500	
UF	2 500	1 200	800	4 000	200



U1.1、U1.2、U1.3 分别代表 U1 第 1、2、3 道次;

E1.1、E1.2 分别代表 E1 第 1、2 道次

图 16 优化前延伸率

根据轧制过程数据模拟结果,分析 z 方向位移变化,结合 Von Mises 屈服准则及 Prandtl-Reuss 流动理论优化各部位延伸率,优化后延伸率如图 17 所示;分析 x、y 方向位移变化,优化断面具体控制参数。

孔型优化后初次试轧钢轨出钢平直,轧制精度达到轨高±0.5 mm,头宽±0.4 mm,腰厚±0.4 mm,底宽±0.5 mm 的精度要求;实现了孔型一次定型,产

品开发周期由 3 个月缩短到 1 个月;避免孔型设计缺陷造成的大量钢轨轧废。

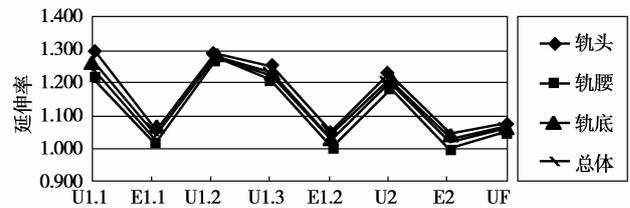


图 17 优化后延伸率

4 结 语

1)通过实测钢轨材料特性、轧制温度、轧制速度,利用 Marc 有限元分析软件能够较好地模拟重轨万能轧制变形过程。

2)通过轨头、轨腰及轨底的金属流动分析,为各道次延伸率的分配及孔型优化提供了理论依据。

参考文献:

[1] 许秀梅,张文志. 钢轨万能轧制过程的数值模拟[J]. 塑性工程学报,2005,12(4): 47-49.
XU XIU MEI, ZHANG WEN-ZHI. Numerical simulation and study on universal rolling process of rail[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005,12(4): 47-49.

[2] 董永刚,张文志,宋剑锋. 应用刚塑性体的变分原理求解钢轨万能轧制过程的力能参数[J]. 北京科技大学学报, 2008,30(2): 169-176.
DONG YONG-GANG, ZHANG WEN-ZHI, SONG JIAN-FENG. Application of the variation principle for calculating the force energy parameters of rail rolling by a universal mill[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008,30(2): 169-176.

[3] 王艳敏,吴迪,赵宪明,等. 轧制 60 kg/m 高精度重轨半万能和全万能成品孔的研究[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(7): 32-35.
WANG YAN-MIN, WU DI, ZHAO XIAN-MING, et al. Semi-universal and universal finish pass of rolling high precision 60 kg/m heavy rail[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007,19(7): 32-35.

[4] SHIOV V A, SHVARTS D L, LITVINOV R A. Shaping of metal when rolling rails in universal grooves [J]. Steel in Translation, 2008, 38 (3): 214-216.

[5] SUI X L, ZHANG J T, GE J H, et al. Modeling and simulation of milling force in virtual numerical control milling process [J]. Key Engineering Materials, 2009 (392/394):697-702.

(下转第 66 页)

- ZHANG MIN, TIAN FENG-CHUN, DAI CAI-LI. Development of transducer system of medical electronic nose [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, 25 (4): 1-4.
- [8] 刘帼巾, 陆俭国, 苏秀苹, 等. 神经网络法优化接触器电磁系统[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(1): 62-66.
LIU GUO-JIN, LU JIAN-GUO, SU XIU-PING, et al. Optimization of the electromagnetic system of contactor by neural network [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(1): 62-66.
- [9] PALMES P, HAYASAKA T, USUI S. Mutation-based genetic neural network [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(3): 587-600.
- [10] 王东风, 韩璞. 基于免疫遗传算法优化的汽温系统变参数PID控制[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(9): 212-217.
WANG DONG-FENG, HAN PU. Variable arguments PID control for main steam temperature system based on immune genetic optimization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(9): 212-217.
- [11] 王晓霞, 王涛. 基于粒子群优化神经网络的变压器故障诊断[J]. *高电压技术*, 2008, 34(11): 2362-2367.
WANG XIAO-XIA, WANG TAO. Power transformer fault diagnosis based on neural network evolved by particle swarm optimization [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(11): 2362-2367.
- [12] 刘克非, 何祖威. 基于蚁群神经网络的凝汽设备故障诊断[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(5): 214-217.
LIU KE-FEI, HE ZU-WEI. Fault diagnosis of condensing equipment based on ant colony neural network [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(5): 214-217.
- [13] YILDIZ A R. A novel hybrid immune algorithm for global optimization in design and manufacturing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 25(2): 261-270.
- [14] KIM D, ABRAHAM A. Optimal learning of fuzzy neural network using artificial immune algorithm [J]. *Neural Network World*, 2008, 18(2): 147-170.
- [15] 佟继春, 陈伟根, 陈荣柱. 一种在线分析变压器故障特征气体的智能传感器[J]. *高压电器*, 2004, 40(6): 433-435, 438.
TONG JI-CHUN, CHEN WEI-GEN, CHEN RONG-ZHU. One intelligent sensor for online analysis of oil-dissolved gas in transformer [J]. *High Voltage Apparatus*, 2004, 40(6): 433-435, 438.
- [16] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

(编辑 王维朗)

~~~~~

(上接第35页)

- [6] JEONQ S H, LEE S H, KIM G H. Computer simulation of U-channel for under-rail roll forming using rigid-plastic finite element methods [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(1/3): 118-122.
- [7] GLOWACKI M. The mathematical modeling of thermo-mechanical processing of steel during multi-pass shape rolling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 168(2): 336-343.
- [8] BETEGON BIEMPICA C, DEL COZ DIAZ J J, GARCIA NIETO P J, et al. Nonlinear analysis of residual stresses in a rail manufacturing process by FEM [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2009, 33(1): 34-53.
- [9] HSIEH K T. Numerical study on groove formation of rails for various materials [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(1): 380-382.
- [10] 段明南, 臧勇, 马光亭, 等. H型钢轧制有限元模型研究及应用[J]. *钢铁*, 2006, 41(11): 42-45.  
DUAN MING-NAN, ZANG YONG, MA GUANG-TING, et al. FEM model of H-beam rolling and its application [J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(11): 42-45.
- [11] 曹杰, 奚铁, 章静, 等. H型钢万能轧制变形分析[J]. *重型机械*, 2005(1): 23-25.  
CAO JIE, XI TIE, ZHANG JING, et al. Analysis of metal deforming during rolling of H-beam by universal mill [J]. *Heavy Machine*, 2005(1): 23-25.
- [12] 赵学武, 黄贞益. H型钢万能轧制宽展有限元分析[J]. *钢结构*, 2006, 21(1): 65-68.  
ZHAO XUE-WU, HUANG ZHEN-YI. FEM analysis of flange spread during universal rolling of H-beam [J]. *Steel Construction*, 2006, 21(1): 65-68.
- [13] 朱旭光, 程鼎. H型钢万能轧制宽展分析[J]. *轧钢*, 2006, 23(1): 22-23.  
ZHU XU-GUANG, CHENG DING. Analysis of flange spread during universal rolling of H-beam [J]. *Steel Rolling*, 2006, 23(1): 22-23.
- [14] 马光亭, 臧勇, 朱国明, 等. H型钢万能轧制过程中金属流动的有限元分析[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(2): 165-168.  
MA GUANG-TING, ZANG YONG, ZHU GUANG-MING, et al. Finite element analysis of metal flow during H-beam rolling by a universal mill [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(2): 165-168.
- [15] MITROFANOV A A, SMIRNOV V K. Analysis of the production of I-beams on a universal beam mill [J]. *Metallurgist*, 2005, 45(9): 195-199.

(编辑 张 苹)