

基于混合硬化模型的 ERW 焊管排辊成形数值模拟

(东北大学 机械工程学院, 沈阳 200030) 李建新 谢里阳
(宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900) 熊建辉

摘要: 针对 ERW 焊管排辊成形过程中带刚反复加载、卸载的复杂成形工艺特点, 提出了考虑包辛格效应的混合硬化材料本构模型; 通过 ABAQUS 用户材料子程序 VUMAT 的二次开发, 对混合硬化材料的本构模型进行了有限元程序实现; 基于混合硬化模型, 对 ERW 焊管排辊成形过程进行了数值模拟, 分析了成形过程中应力应变的变化规律, 并对计算结果进行了对比。结果表明, 混合硬化模型能够很好地体现 ERW 焊管排辊成形反复加载、卸载的成形工艺特点; 不同的材料硬化模型对排辊成形过程中板料的应力应变产生较大影响。

关键词: 混合硬化模型; ERW 焊管; 排辊成形; 包辛格效应; VUMAT

中图分类号: TG386.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2008) 06-0081-06

Numerical simulation of cage roll forming of ERW pipe based on mixed hardening model

LI Jian-xin XIE Li-yang

(School of Mechanical Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004 China)

XIONG Jian-hui

(Baoshan Iron & Steel corp., Ltd., Shanghai 201900 China)

Abstract: According to the processing characteristic of ERW cage roll forming a mixed hardening constitutive equation considering bausinger effect is put forward. A user-defined material routine (VUMAT) of the commercial finite element code ABAQUS/Explicit is developed, and the mixed hardening constitution model is realized by the finite element method through the VUMAT. Based on the mixed hardening constitutive equation, the numerical simulation of cage roll forming process of ERW pipe is performed. The variation of equivalent stress and strain is analyzed, and the calculated results are also compared. The results shown that the mixed hardening model is suit for the processing characteristic of ERW pipe cage roll forming, and the different material hardening model has important effects on the variation of equivalent stress and strain of strip steel.

Key words: mixed hardening model; ERW pipe; cage roll forming; bausinger effect; VUMAT

引言

高频直缝电阻焊管 (ERW, Electric Resistance Welding) 具有精度高、壁厚均匀、椭圆度小、焊缝质量可靠, 且内毛刺小、冲击韧性好等优点, 在石

油、石化、天然气、建筑、电力、矿山、煤炭、城市管网等工业领域中得到非常广泛的应用。排辊成形是生产 ERW 焊管的核心工艺^[1], 该工艺将传统辊弯成形机组中的立辊进行了排辊化, 且增加了很多排辊, 对变形量进行了合理分配, 分散了成形压力, 从而使变形更加均匀和连续, 提高了成形质量, 已经成为目前最为先进的成形工艺之一。

在排辊成形过程中, 带钢经历反复加载、卸载, 是典型的多参数耦合作用下复杂的多道次连续塑性成形过程, 其成形规律很难掌握。数值仿真技术由于可以模拟材料的成形过程, 揭示其变形机理和掌握成形规律, 近年来在焊管成形过程中得到了广泛应用。对于数值模拟而言, 能够反映材料变形特点

李建新 E-mail: chqf97@126.com

作者简介: 李建新, 男, 1975 年生, 东北大学机械学院, 博士研究生, 工程师, 主要从事焊管生产和产品技术研究和管理工作

收稿日期: 2007-11-14; 修订日期: 2007-12-05

的材料模型是一个至关重要的因素，因此，针对 ERW 焊管排辊成形的特性，很有必要在数值模拟过程中建立考虑材料各向异性的包辛格效应的混合硬化材料模型。国内外很多学者对材料的硬化模型进行了研究，李宏伟^[2]基于混合硬化材料模型对环件冷碾扩工艺进行了数值模拟；康国政^[3]对循环硬化材料模型进行了研究。近年来，也有学者对辊弯成形数值模拟技术进行了研究^[4-5]，但还未见有将混合硬化模型运用到排辊成形工艺数值模拟研究的报道，因此，有必要对排辊成形工艺过程中的材料硬化模型对成形规律的影响进行研究。

本文针对 ERW 焊管排辊成形过程中带刚反复加载、卸载的复杂成形工艺特点，提出了考虑包辛格效应的混合硬化材料本构模型；通过 ABAQUS 用户材料子程序 VUMAT 的二次开发，对混合硬化材料的本构模型进行了有限元程序实现；基于混合硬化模型，对 ERW 焊管排辊成形过程进行了数值模拟，分析了成形过程中应力应变的变化规律，对不同的硬化模型计算结果进行了对比，探讨。

1 混合硬化模型

硬化法则，即材料在变形中的加工硬化规律，规定了材料进入塑性变形后的后继屈服面（加载曲面）的形状、大小、位置随塑性变形的发展而变化的规律。后继屈服面只有大小变化的，称为各向同性硬化；后继屈服面只有位置变化的，称为运动硬化；介于二者之间，即后继屈服面的大小与位置都变化的情况，称为混合硬化。

在混合硬化法则中，将塑性应变增量分为共线的两部分，即：

$$d_{ij} = d_{ij}^{p(i)} + d_{ij}^{p(k)} \quad (1)$$

式中 $d_{ij}^{p(i)}$ —— 屈服曲面扩张，即与各向同性硬化法则相关联部分塑性应变增量

$d_{ij}^{p(k)}$ —— 屈服曲面移动，即与运动硬化法则相关联部分塑性应变增量

分别为

$$d_{ij}^{p(i)} = Cd_{ij}^p \quad (2)$$

$$d_{ij}^{p(k)} = (1 - C)d_{ij}^p \quad (3)$$

式中 C —— 在 $-1 \sim 1$ 之间的材料参数，称之为混合硬化参数

混合硬化法则的后继屈服函数可以表示为

$$F(\bar{\sigma}_{ij}, \bar{\epsilon}_{ij}, k) = f - k \quad (4)$$

$$\text{式中 } f = \frac{1}{2} (\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_{ij}^0) (\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_{ij}^0)$$

$$k = \frac{1}{3} \bar{\sigma}_s^2 (\bar{\epsilon}_p, M)$$

一般情况下有：

$$\bar{\sigma}_s(\bar{\epsilon}_p, M) = \sigma_0 + M d_s(\bar{\epsilon}_p) \quad (5)$$

移动张量 $\bar{\epsilon}_{ij}$ ，视所采用的运动硬化法则而定，如采用 Prager 法则^[6]，则

$$\begin{aligned} d_{ij} &= cd_{ij}^{p(k)} = C(1 - C)d_{ij} \frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}_{ij}} \\ &= \frac{2}{3} E_p (1 - C) d (\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_{ij}^0) \end{aligned} \quad (6)$$

如采用 Zeigler 法则，则：

$$\begin{aligned} d_{ij} &= d\mu(1 - C) (\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_{ij}^0) \\ &= \frac{2}{3} E_p (1 - C) d (\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_{ij}^0) \end{aligned} \quad (7)$$

在以上各式中，如令 $C=1$ 或 $C=0$ ，混合硬化法则就分别蜕化为各向同性硬化法则和运动硬化法则。

2 混合硬化模型程序实现

ABAQUS 的本构接口提供了依赖于解的状态变量，用于存储在本构计算时用户定义的需要不断更新的变量，此处用依赖于解的状态变量存储背应力偏量和等效塑性应变。实现混合硬化弹塑性本构子程序流程图如图 1 所示，具体计算步骤为

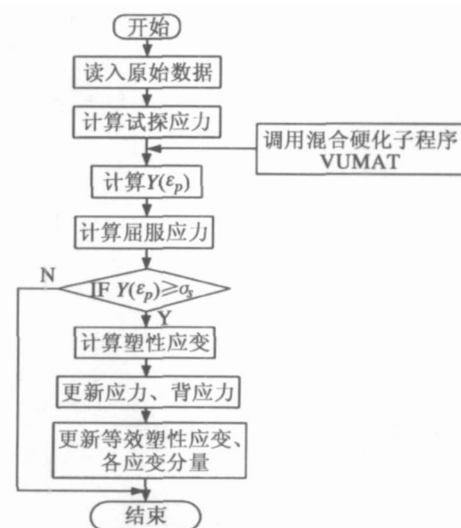


图 1 混合硬化子程序流程图

Fig. 1 Flow chart of mixed hardening subroutine

1) 从 ABAQUS 子程序接口读入本增量步的应变增量 $\bar{\epsilon}_{ij}$ 、增量步开始时的应力张量 σ_{old} 、背应力张量的偏量 b_{old} 和等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_p$ ；

2) 由广义胡克定律计算试探应力：

$$\sigma_{new}^{trial} = \sigma_{old} + \text{trace}(\epsilon) I + 2\mu \epsilon$$

3) 调用混合硬化子程序，计算 $Y(\bar{\epsilon}^p)$ 和 E_p ；

4) 将试探应力代入屈服准则，判断是否屈服；

5) 如果没有屈服， $\sigma_{new} = \sigma_{new}^{trial}$ ，返回主程序；

6) 若屈服，计算本增量步的塑性应变增量 $\epsilon^p = Q$ ，用应力补偿更新算法更新本增量步结束时的应力，更新背应力；

7) 更新等效塑性应变与各应变分量：

$$\bar{\epsilon}_{new}^p = \bar{\epsilon}_{old}^p + \frac{\sqrt{J_2}}{3}$$

8) 结束，返回主程序。

3 混合硬化模型本构子程序的可靠性验证

为了验证本文开发的混合硬化弹塑性本构子程序 VUMAT 的可靠性，本文以简单的平板模型为例，对循环加载过程进行了验证。平板模型边界条件为一端固定，一端为自由端；加载方式为循环的旋转位移；材料为 DIN St37-2，杨氏模量 $E = 210\,000\text{MPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.3$ ，密度 $\rho = 7.9\text{g/cm}^3$ ；求解器算法为动力显式算法，时间 $t = 1.4\text{s}$ 。图 2 和图 3 分别为采用各向同性硬化，运动硬化材料模型得到的变形过程中轴向应力与应变分布图，图 4 为等向强化系数对混合硬化模型的轴向应力应变分布的影响。

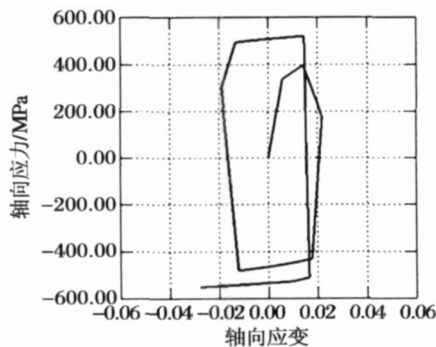


图 2 平板变形过程中轴向应变与轴向应力分布图（各向同性硬化）

Fig. 2 Distribution of axial strain and axial stress in flat deformation process (Isotropic hardening)

由图 4 可以看出，随着等向强化系数的依次增大，其轴向应变变化范围依次减少，而轴向应力变化范围依次增大，同时反向加载的屈服应力依次增大。当等向强化系数 $C = 1$ 时，混合硬化模型就退化到了各向同性硬化状态，其结果与图 2 用

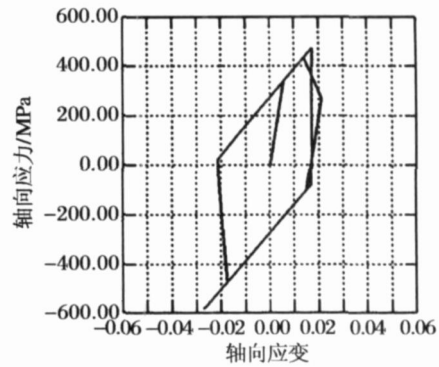


图 3 平板变形过程中轴向应变与轴向应力分布图（运动硬化）

Fig. 3 Distribution of axial strain and axial stress in flat deformation process (Kinematics hardening)

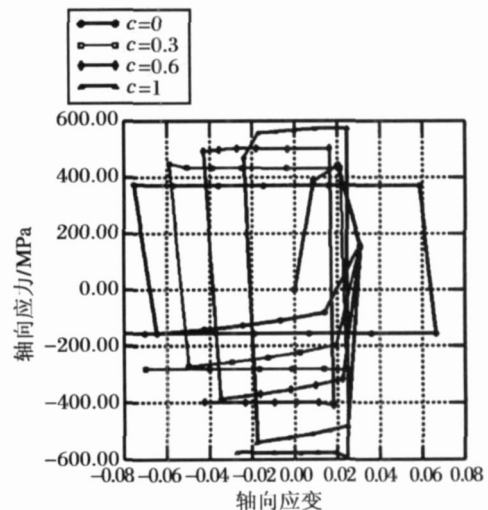


图 4 等向强化系数对轴向应力应变分布的影响

Fig. 4 Effect of isotropic hardening coefficient on axial stress and strain

ABAQUS 自带的各向同性材料硬化模型算得的结果吻合，证明了所开发的子程序是可靠的。

4 ERW 焊管排辊成形数值模拟

ERW 焊管排辊成形工艺主要由预成形、线成形和精成形 3 个成形段组成。预成形段由上夹送辊、下夹送辊、上压辊、下压辊、上弯边辊、下弯边辊、内成形工具 R1 ~ R4、Breakdown、导向辊 (6 个)、预成形排辊 (2 排) 等组成；线成形段主要由导向辊 (6 个)、排辊架 (6 个)、线成形排辊 (6 排)、支撑辊 (8 个)、内成形工具 (4 组) 等组成；精成形段主要包括 3 组小排辊 (3 × 4 个)、边辊 (6 个)、顶辊 (3 个)、下辊 (3 个)。建立的 ERW 焊管排辊成形有限元模型如图 5 所示。采用具有 4 节点、面内单点积分的 S4R

壳单元对板带和轧辊进行网格划分,壳单元厚度方向使用 5 个积分点,整个模型的节点数为 44 860,单元数为 40 570。

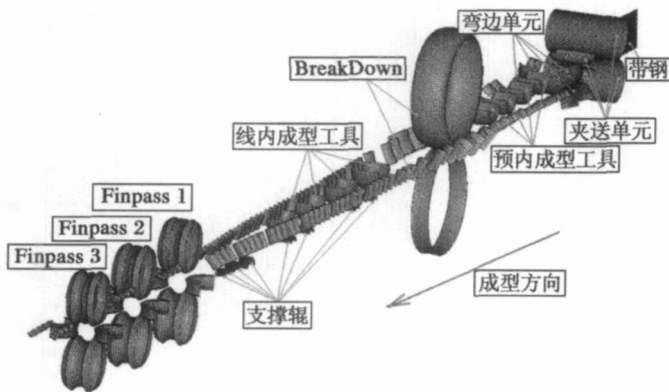


图 5 直缝焊管全流程辊弯成形有限元模型

Fig. 5 FEM of ERW pipes in whole process of cage forming

材料模型:板带的材料为管线钢 L245,通过 MTS NEW 810 型万能材料试验机进行了单向拉伸试验,经过对实验数据的处理,得到的应力应变关系为 $\sigma = 829.91 \times (0.0274 + \epsilon_p)^{0.2542}$ 。同时通过实验可以得出,L245 钢具有明显的屈服平台,具有较好的塑性。

边界条件处理:在实际加工过程中,所有轧辊均存在可以绕自身的轴线转动的自由度,而在驱动辊带动下的板带沿着成形方向的速度一般不超过 0.3m/s。但是在仿真过程中,需要对实际的物理模型进行适当的等效简化,约束所有轧辊在空间的 6 个自由度,而假定沿着成形方向带钢前端节点受恒定的指定速度。为了加快计算速度,一方面利用对称性,只建立板带的 1/2 模型;另一方面适当增加板带牵引速度,板带前端节点的指定速度取为 4m/s。

5 结果与讨论

图 6、图 7 分别为预成型段采用各向同性硬化模型与运动硬化模型时,等效塑性应变的对比分析。图 6 为带钢边部纤维等效塑性应变沿成型方向距离的变化曲线,从图 6 可以看出,两种硬化模型对等效塑性应变的影响基本不大,仅在夹送辊附近影响较为明显,在带钢进入夹送辊之前,采用运动硬化模型得到的等效塑性应变,要高于采用各向同性的硬化模型,带钢向前过夹送辊但还没进入弯边辊时,采用各向同性硬化模型得到的等效塑性应变要明显

高于采用运动硬化模型得到的等效塑性应变,之后带钢继续前行,但两种硬化模型对带钢的等效塑性应变的影响就很小了。图 7 为带钢中部纤维等效塑性应变沿成型方向距离的变化曲线,从图 6、图 7 对比可以看出,两种硬化模型对等效塑性应变的影响相差很大,在带钢进入夹送辊之前,采用运动硬化模型得到的等效塑性应变,要高于采用各向同性的硬化模型,但在进入夹送辊之后,采用各向同性硬化模型得到的等效塑性应变,要明显高于采用运动硬化模型得到的等效塑性应变。

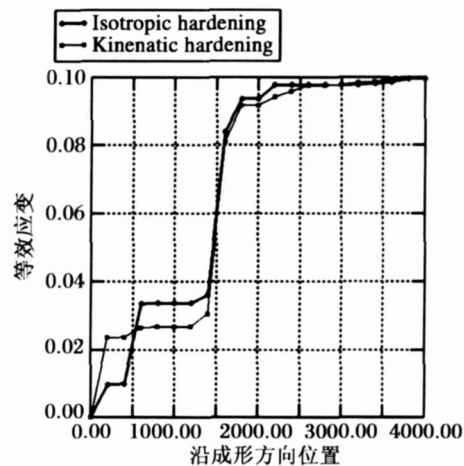


图 6 带钢边部纤维等效塑性应变沿成型方向距离的变化曲线

Fig. 6 Chart of effective strain of strip edge along forming direction

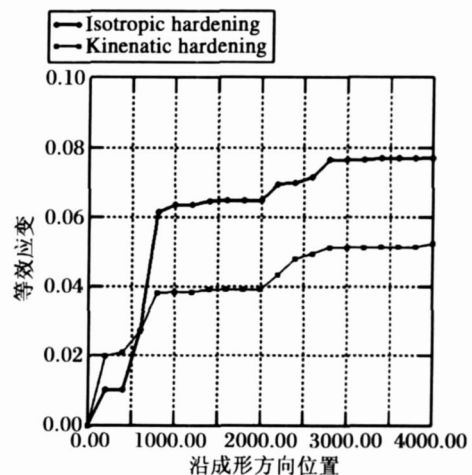


图 7 带钢中部纤维等效塑性应变沿成型方向距离的变化曲线

Fig. 7 Chart of effective strain of strip middle part along forming direction

图 8、图 9 分别为预成型段采用各向同性硬化模型与运动硬化模型时,等效应力的对比分析。

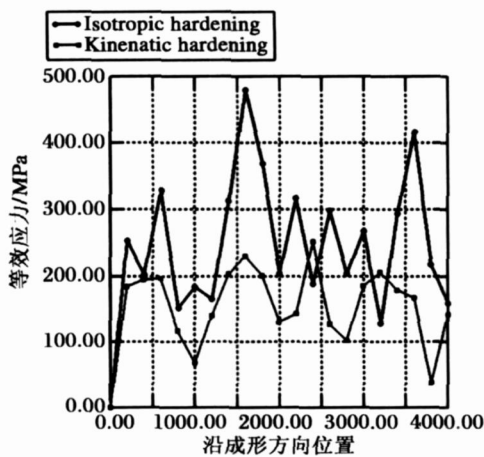


图 8 带钢边部纤维等效应力沿成型方向距离的变化曲线
Fig. 8 Chart of Von Mises stress of strip edge along forming direction

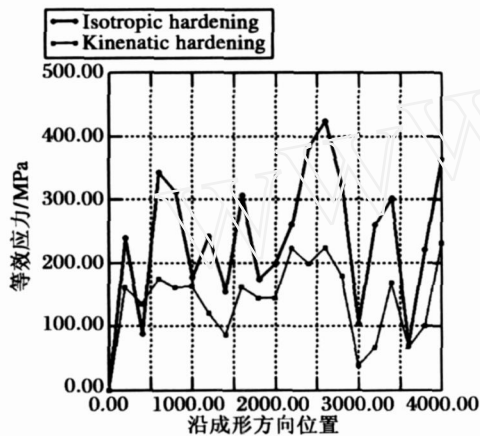


图 9 带钢中部纤维等效应力沿成型方向距离的变化曲线
Fig. 9 Chart of Von Mises stress of strip middle part along forming direction

图 8 为带钢边部纤维等效应力沿成型方向距离的变化曲线，图 9 为带钢中部纤维等效应力沿成型方向距离的变化曲线，两图皆显示采用各向同性硬化模型得到的等效应力要明显高于采用运动硬化模型得到的等效应力。

图 10、图 11 分别为预成型段采用混合硬化模型时，等向强化系数对等效应力的影响规律。图 10 为等向强化系数对带钢边部纤维成型等效应力的影响规律，从图 10 可以看出，随着等向强化系数 C 的依次增大，带钢边部的等效也有依次增大的趋势，图 11 为等向强化系数对带钢中部纤维成型等效应力的影响规律，同样是随着等向强化系数 C 的依次增大，带钢中部纤维的等效应力依次增大。

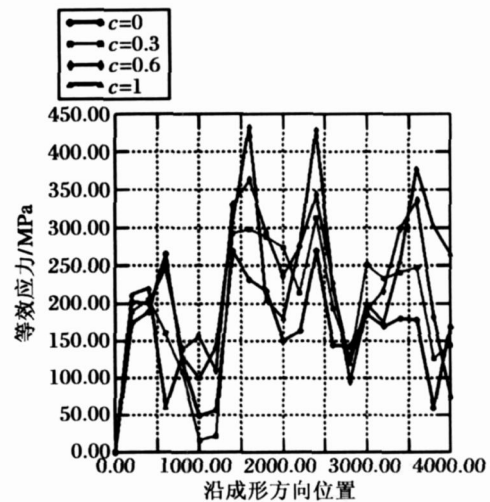


图 10 等向强化系数对带钢边部纤维等效应力变化曲线

Fig. 10 Chart of Von Mises stress of strip edge along forming direction

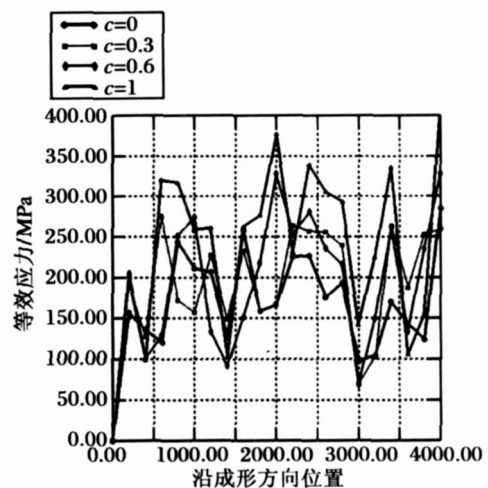


图 11 等向强化系数对带钢中部纤维等效应力变化曲线

Fig. 11 Effect of isotropic hardening coefficient on Von mises stress in strip

6 结 论

- 1) 本文建立的混合硬化模型能够很好地体现 ERW 焊管排辊成形反复加载、卸载的成形工艺特点，提高了数值模拟精度，适合实际生产情况；
- 2) 等向硬化模型和运动硬化模型对带钢边部纤维等效塑性应变的影响基本不大；而对带钢中部纤维等效塑性应变的影响相差很大，在带钢进入夹送辊之前，采用运动硬化模型得到的等效塑性应变要高于采用各向同性的硬化模型，但在进入夹送辊之

后采用各向同性硬化模型得到的等效塑性应变, 要明显高于采用运动硬化模型得到的等效塑性应变。

3) 不同的材料硬化模型对辊弯成型过程中板料的应力与应变会产生很大的影响: 对于采用混合硬化本构模型的 ERW 排辊成型过程, 随着等向强化系数的依次增大, 板料内部的应力均有明显增大的趋势。

参考文献

- [1] 王先进. 冷弯型钢生产及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- [2] 李宏伟, 杨合, 郭玲, 李兰云等. 混合硬化弹塑性本构关系及其在环件冷碾扩模拟中的应用[J]. 机械工程学报, 2005. 41(7): 119-125
- [3] 康国政. 循环硬化材料本构模型的隐式应力积分和有限元实现[J]. 计算力学学报, 2005. 22(5): 579-584
- [4] Zhi-Wu Han, Cai Liu, Wei-Ping Lu, Lu-Quan Ren. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2004. 145: 311-316
- [5] Hiroshi Ona. Cold roll forming for high tensile strength steel sheet proposition on forming of thin spring steel sheet pipe[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2004. 153-154: 247-252
- [6] 陈森灿. 金属塑性加工原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991

· 会 讯 ·

第九届全国冲压学术会议纪要

第九届全国冲压学术年会于 2008 年 9 月 19 日~22 日在湖南长沙市召开。来自全国冲压行业 20 个单位的 41 位代表参会。

大会由中国机械工程学会塑性工程学会冲压学术委员会主任委员李春峰教授主持。冲压学术委员会副主任委员杨合教授向大会报告了于 2008 年 9 月初在韩国召开的第九届国际塑性加工学术会议(ICTP)的情况。

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室主任李光耀教授向大会作了题为《汽车覆盖件冲压成形数值模拟的关键问题与思考》的专题报告。随后, 与会代表进行学术交流。本次会议的学术交流气氛浓厚、代表发言踊跃, 为同行间的切磋、共进提供了一个良好平台。会后, 与会代表参观了汽车车身先进设计制造国家重点实验室。

本次年会受到全国冲压界的广泛支持和关注, 共收到会议论文 52 篇, 具有新作者多、新工艺新技术多、计算机技术应用多等特点, 反映了我国冲压界思想活跃、生机勃勃的大好学术氛围。会议编辑了论文集, 分为冲压工艺及模具设计、冲压新工艺及理论和冲压中计算机技术应用等 3 个专题, 优秀论文被推荐到《材料科学与工艺》、《塑性工程学报》和《锻压技术》上发表。

中国机械工程学会塑性工程分会冲压学术委员会
汽车车身先进设计制造国家重点实验室
2008 年 9 月 22 日