980 MPa 先进高强钢材料在门槛加强梁上的辊压应用

张骥超[1,2]，张骁杰[3,4]，石磊[1,2]，肖华[1,2]

（1.宝山钢铁股份有限公司中央研究院，上海 201900；2.汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室(宝钢)，上海 201900；3.长城汽车股份有限公司技术中心，河北 保定 071000；4.河北省汽车工程技术研究中心，河北 保定 071000）

摘要：目的 为获得 980 MPa 级别不同先进高强钢材料在辊压零件上应用时的差异，研究典型 980 MPa 先进高强钢的辊压成形特性。**方法** 采用调研和统计方法获得门槛辊压用材的主流强度与钢种，基于三点弯曲的实验方法，获得了 980 MPa 先进高强钢材料在指定角度和弯曲半径下的回弹特性，针对典型的门槛加强梁零件，采用 CAE 方法评估材料应用的可行性。**结果** 门槛零件 980 MPa 级别所采用的主要先进刚强钢钢种为双相钢(DP)和马氏体钢(MS)，在相对弯曲半径比 *R*/*t*=2.5 的情况下，980DP 回弹角度最小，980QP 次之，980MS 最大；早期模具回弹补偿设计时对于 90° 圆角可给予 11°~14° 的回弹过弯角度；成形过程中有可能出现边波缺陷，需优化辊压成形变形过程。**结论** 980 MPa 先进高强钢材料在应用于辊压零件时，应在设计阶段充分考虑材料回弹特性，同时变形过程应合理，避免产生边波等质量缺陷。

关键词：先进高强钢；辊压；门槛加强梁

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.009

中图分类号：TH142.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)06-0042-05

Application of 980 MPa AHSS in Rocker Profile Roll-forming Process

ZHANG Ji-chao[1,2], *ZHANG Xiao-jie*[3,4], *SHI Lei*[1,2], *XIAO Hua*[1,2]

(1.Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;
2.State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels (Baosteel), Shanghai 201900, China;
3.R&D Center of Great Wall Motor Company, Baoding 071000, China;
4.Automotive Engineering Technical Center of Hebei, Baoding 071000, China)

ABSTRACT: This paper aims to study application differences of different 980 MPa AHSS in rocker profile roll-forming process and roll-forming characteristics of 980 MPa AHSS. Main strength and steel types for material used in the roll-formed rocker were obtained by investigation and statistics. Springback characteristics under specified bending angle and radius, which were obtained through 3-point bending test, were further used to assess the application feasibility of material for typical rocker profiles with CAE method. Dual-phase steel and martensitic steel were mainly used in 980 MPa rocker profile. Under the relative bending radius ratio of *R*/*t*=2.5, 980DP followed by 980QP had smallest springback angle. 980MS had the largest spring back angle. In early springback compensation design of die, fillet of 90ocould be supplied with 11^{o}~14^{o} excessive springback bending. Defect of side wave might appear in forming, the roll-forming process should be optimized. In application of 980 MPa AHSS in rolling parts, it is required to give full consideration to springback characteristics of materials. Meanwhile, the deforming should be reasonal, so as to avoid quality defects such as side wave.

收稿日期：2017-09-15

作者简介：张骥超（1988—），男，硕士，研究员，主要研究方向为汽车板使用技术。

KEY WORDS: AHSS; roll-forming; rocker

近年来，随着安全及节能减排法规相关要求的不断提高，如何在安全性能与制造成本的约束下，实现车身轻量化设计与制造，是汽车开发过程中面临的关键挑战之一。先进高强钢材料作为一种使用成本可控的轻量化手段，近年来在车身上得到了广泛应用[1]。辊压成形是一种特别适宜于高强钢梁类零件加工的工艺方法，采用先进高强钢的辊压工艺，近年来在门槛加强梁等汽车车身关键结构件上得到了广泛的应用[2]。

先进高强钢主要包括双相钢(DP)、相变诱导塑性钢(TRIP)、复相钢(CP)、马氏体钢(MS)及淬火延性钢(QP)等[3]，不同钢种在应用于辊压成形工艺时，其材料特性、成形特性及零件使用特性之间存在差异。如何针对具体的辊压零件，选用最适合的钢种材料，是目前先进高强钢材料辊压成形应用的迫切任务。

文中以一典型辊压门槛加强梁零件为例，调研并统计其用材情况，并针对其中的主流先进高强钢材料，研究其材料回弹特性、零件成形特性之间的差异，为先进高强钢辊压零件选材设计提供参考。

1　门槛零件辊压用材统计

对国内外多款车型的公开资料进行调研统计，最终获得了 29 款车型辊压门槛加强梁用材。从统计结果来看，目前门槛加强梁零件的主流用材强度为 980 MPa 级别，所采用的主要先进高强钢钢种为双相钢(DP)和马氏体钢(MS)，见图 1。此外，淬火延性钢(QP)作为近年来开发的新钢种，在后续的车身上具有广泛的应用前景，因此，文中选定了 HC700/980DP, HC700/980MS 及 HC600/980QP 三种 980 MPa 级别的先进高强钢材料作为研究对象，材料厚度均为 1.4 mm，其中 HC700/980DP 的屈服强度为 824 MPa，抗拉强度为 1084 MPa，断裂伸长率为 11%；HC700/980MS 的屈服强度为 889 MPa，抗拉强度为 1075 MPa，断裂伸长率为 7%；HC600/980QP 的屈服强度为 808 MPa，抗拉强度为 990 MPa，断裂伸长率为 22%。

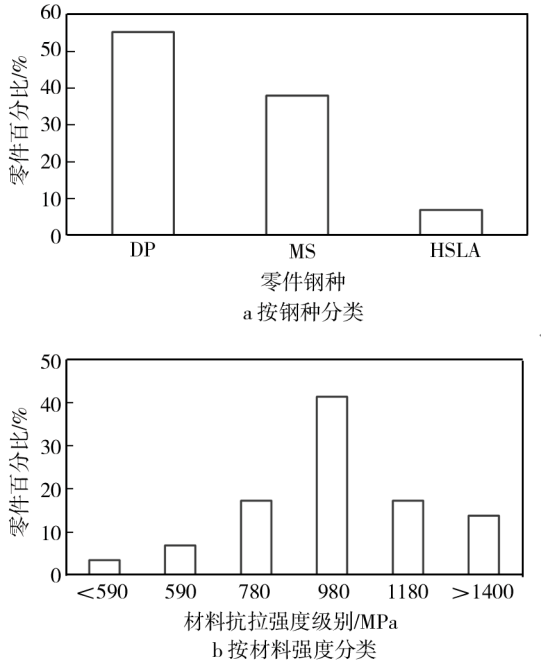


图 1　门槛零件辊压用材统计

Fig.1 Material statistical data of roll-formed rocker

2　材料弯曲回弹特性实验

材料弯曲回弹特性是先进高强钢辊压成形工艺回弹补偿设计的重要依据。文中采用的三点弯曲实验装置见图 2，在板料下方布置有一对水平滚轮，通过控制上模的运动行程，即可以实现指定角度的弯曲[4]。

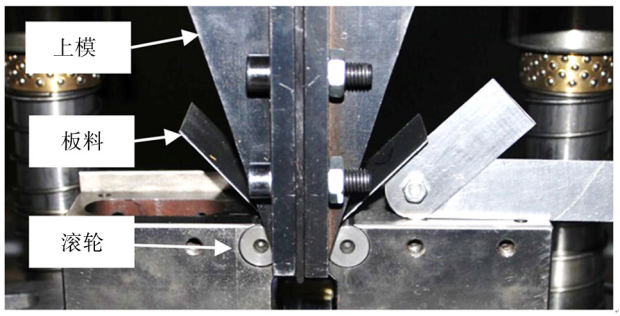


图 2　三点弯曲实验装置

Fig.2 Device of 3-point bending experiment

材料厚度与弯曲半径对于圆角辊压回弹有显著影响[5]。为接近实际产品弯曲圆角半径，上模模具半径 R=3.5 mm，实验材料厚度 t=1.4 mm，相对弯曲半径比 R/t=2.5。采用上述的实验装置，将厚度 1.4 mm 的三种牌号材料分别弯曲至 90°并进行重复实验。卸载后将试样取出，使用分辨率 0.1°的角度尺测量试样回弹之后的角度。三种 980 MPa 先进高强钢平均回弹角度见图 3。

实验结果表明，在相对弯曲半径比 R/t=2.5 的情况下，所研究的三种材料中，980DP 回弹角度最小，980QP 次之，980MS 最大；弯曲至 90°时，980DP、980QP、980MS 材料的平均回弹角度分别为 12.3°, 12.7°, 13.0°。在辊压工艺设计过程中，早期模具回弹补偿设计时，可给予 11°~14°的回弹过弯角度。

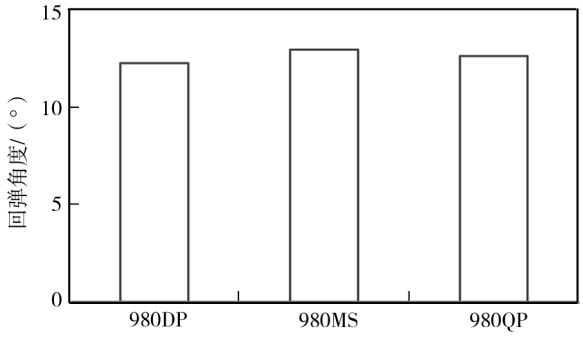
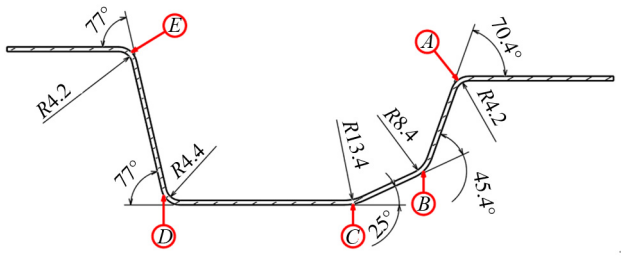


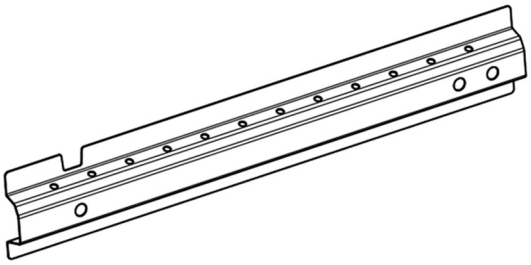
图 3 三种 980 MPa 先进高强钢材料的角度回弹均值
Fig.3 Average springback angle of 980 MPa AHSS

3 门槛零件辊压成形工艺分析

研究的门槛加强梁截面尺寸及零件几何模型见图 4，该零件截面为非对称形式，共计有 *A*—*E* 共 5 个圆角特征，其设计角度、圆角半径及整体特征见图 4，零件设计厚度为 1.4 mm。针对该零件，设计了 16 道次的辊压成形工艺，辊压成形工艺的辊花设计见图 5。基于三点弯曲回弹实验结果，对圆角特征 *A*, *D* 补偿 10°，对圆角特征 *B*, *C* 补偿 7°，对圆角特征 *E* 补偿 12°。



a 门槛零件截面尺寸



b 门槛零件整体特征

图 4 辊压门槛加强梁零件
Fig.4 Roll-formed rocker profile

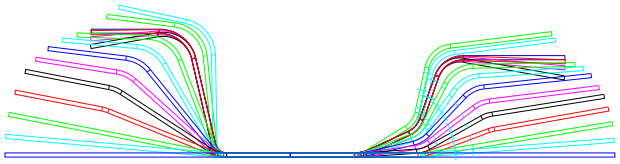


图 5 门槛加强梁零件辊压工艺辊花设计
Fig.5 Roll-forming flower design of rocker profile

由于辊压成形工艺本身的复杂性，目前多采用有限元方法对成形过程进行模拟[6—8]，其中采用基于 MSC. MARC 求解器的 COPRA 软件，在工程中得到了较广泛的应用[9]。根据该工艺设计相应的轧辊模具，并将模具 CAD 导入到 COPRA RF/FEA 仿真模块中，建立有限元仿真分析模型，见图 6。

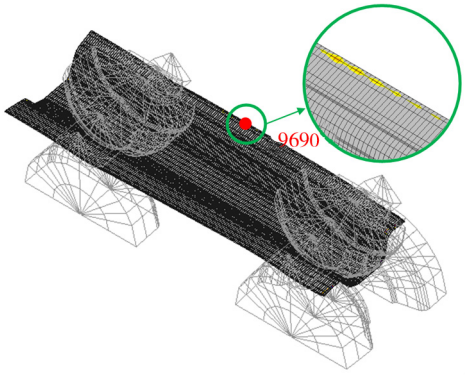


图 6 门槛加强梁零件辊压成形有限元模型
Fig.6 FEA model of rocker profile roll-forming process

3.1 角度回弹结果分析

辊压零件在成形过程中，其特征圆角的角度回弹是产品的主要尺寸缺陷之一。三种 980 MPa 先进高强钢材料辊压成形后截面回弹预测结果见图 7，其回弹趋势基本一致，各圆角的回弹偏差值模拟结果见表 2。

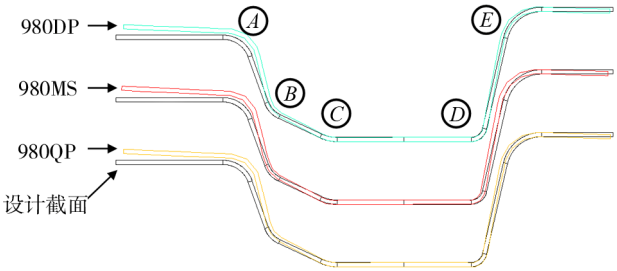


图 7 三种不同材料辊压成形后截面回弹预测
Fig.7 Prediction of section springback for different AHSS

表 2 门槛加强梁零件各角度回弹偏差值模拟结果
Tab.2 Simulation result for angular deviation of rocker profile after springback

	角*A*/(°)	角*B*/(°)	角*C*/(°)	角*D*/(°)	角*E*/(°)
980DP	1.3	2.7	2.9	2.2	−1.6
980MS	0.3	2.9	3.2	1.3	−1.0
980QP	0.2	2.9	3.0	1.0	−0.5

对比各圆角回弹模拟结果可见，对于 *A*, *D*, *E* 三个圆角，其补偿后的最终角度与设计值较为接近，弯曲实验的材料回弹特性数据对于回弹补偿设计有很好的参考意义，后续调试过程中，通过调整关键道次间隙可进一步提高圆角精度；*B*, *C* 圆角的回弹值与弯曲实验值有一定的差异，其主要原因是实际产品相对弯曲半径比 *R*/*t* 分别为 6 和 9.6，而实验弯曲半径比

R/t=2.5，大的弯曲半径比会导致成形后圆角角度回弹增大，需要对回弹补偿角度进行修正。

3.2　边部成形质量分析

对于截面高度较大的辊压零件，其法兰边上的边波是一类较常见的产品缺陷[10]。Tehrani[12]、罗晓亮[13]等人认为，边波与板料的纵向应变反复变化相关。在辊压成形过程中，由于机架间距、变形顺序、弯曲角度等工艺因素设计不合理，在板带边部产生了较大的纵向应变，纵向应变超过了材料屈服点，在宏观上体现为边波。

截面法兰外侧节点在变形过程中的纵向应最大[13]。取门槛加强梁产品截面高度较大的一侧边部节点 9690 作为分析对象，其位置见图 8。该节点在第 9, 10, 11 机架的压缩应变较大，其纵向应变峰值超过−0.6%，存在边波的风险，增加成形道次和调整弯曲角度可降低边波产生的风险[14—15]。

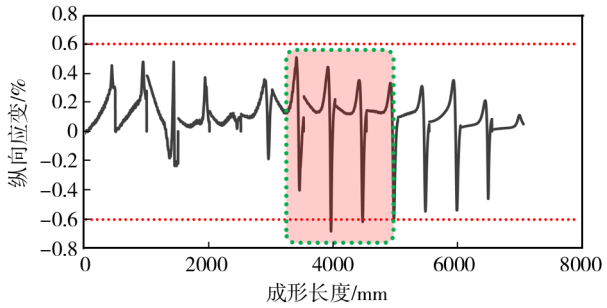


图 8　门槛零件边部节点纵向应变历程模拟结果
Fig.8 Simulation result for longitudinal strain history of flange area in rocker profile

3.3　辊压工艺优化设计

根据上述的回弹分析结果，针对 HC700/980DP 材料圆角回弹偏差值，对圆角 *A*—*E* 补偿值进行修正，修正结果见表 3。同时，根据边部成形质量的分析结果，在原辊花设计第 9 机架与第 10 机架间增加 1 道成形道次，并对原方案第 8—16 成形道次弯曲角度进行调整。采用 COPRA FEA 软件，对优化后的工艺方案进行仿真分析，各圆角的回弹角度模拟结果见表 3，门槛零件边部 9690 节点纵向应变模拟结果见图 9。

表 3　修正后门槛零件各角度回弹偏差值模拟结果
Tab.3 Simulation result for angular deviation of rocker profile after springback

	角*A*	角*B*	角*C*	角*D*	角*E*
初始补偿值/(°)	+10	+7	+7	+10	+12
修正补偿值/(°)	+11	+10	+10	+12	+11
角度偏差值/(°)	0.7	0.5	0.9	0.6	−1.0

有限元模拟结果表明，辊压工艺回弹补偿值修正后，各圆角回弹偏差值得到改进；成形道次数增加后，边部纵向应变得到降低，最大压缩应变控制在−0.6%以内，降低了法兰边产生边波的风险。基于上述的工艺分析基础，最终试制的 HC700/980DP 门槛加强梁零件见图 10，经现场调试后尺寸精度达到设计要求。

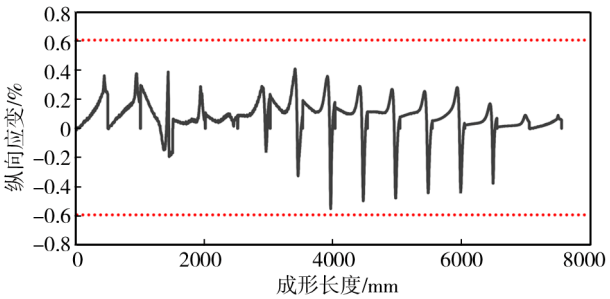


图 9　优化后门槛边部纵向应变历程模拟结果
Fig.9 Simulation result for longitudinal strain history of flange area in rocker profile after optimizing

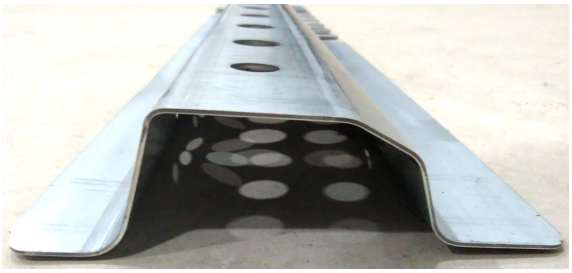


图 10　HC700/980DP 门槛加强件辊压工艺试验样件
Fig.10 Tryout sample of HC700/980DP rocker profile

4　结论

针对典型辊压门槛零件的用材进行调研分析，在此基础上开展材料弯曲回弹特性实验，基于实验数据进行辊压工艺回弹补偿设计，主要结论如下。

1) 门槛零件的主流用材强度为 980 MPa 级别，所采用的主要先进刚强钢钢种为双相钢(DP)和马氏体钢(MS)。

2) 实验数据表明，在相对弯曲半径比 R/t=2.5 的情况下，所研究三种材料中，980DP 回弹角度最小，980QP 次之，980MS 最大；辊压工艺早期模具回弹补偿设计时对于 90°圆角可给予 11°~14°的回弹过弯角度。

3) 采用有限元分析方法可以有效的模拟材料辊压成形后圆角角度回弹与法兰边部的边波现象；通过对回弹补偿值进行修正，优化关键道次弯曲成形过程，提高了门槛零件辊压成形产品质量。

参考文献：

[1]　康永林. 汽车轻量化先进高强钢与节能减排[J]. 钢铁, 2008, 43(6): 1—7.
KANG Yong-lin. Lightweight Vehicle, Advanced High Strength Steel and Energy-Saving and Emission Reduc-

tion[J]. Iron & Steel, 2008, 43(6): 1—7.

[2] 刘继英, 李强. 辊压成形在汽车轻量化中应用的关键技术及发展[J]. 汽车工艺与材料, 2010(2): 18—21.
LIU Ji-ying, LI Qiang. Key Technologies of Roll Forming Applied in Automotive Lightweight and Development[J]. Automobile Technology & Material, 2010(2): 18—21.

[3] 王利, 陆匠心. 汽车轻量化及其材料的经济选用[J]. 汽车工艺与材料, 2013(1): 1—6.
WANG Li, LU Jiang-xin. Automobile Lightweight and Economy of Materials Strategy[J]. Automobile Technology & Material, 2013(1): 1—6.

[4] 韩非, 肖华, 石磊, 等. 基于三点弯曲的马氏体超高强钢弯曲性能试验[J]. 锻压技术, 2014, 39(5): 116—120.
HAN Fei, XIAO Hua, SHI Lei, et al. Experimental Investigation on Bending Property of Martensitic Ultra High Strength Steel Based on Three-point Bending Test[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(5): 116—120.

[5] 刘成, 景作军. 高强度钢辊弯成型回弹分析[J]. 新技术新工艺, 2008(10): 24—26.
LIU Cheng, JING Zuo-jun. Analysis on Advanced High-Strength Steels for Springback in Roll Forming[J]. New Technology & New Process, 2008(10): 24—26.

[6] 艾正青, 刘继英, STEFAN Freitag. 高精度厚壁小边腿截面成型的 FEA 仿真[J]. 北方工业大学学报, 2008(3): 27—32.
AI Zheng-qing, LIU Ji-ying, STEFAN Freitag. FEA Simulation on Roll Forming of High-Precision Sections with Thick Wall and Short Legs[J]. Journal of North China University of Technology Beijing China, 2008(3): 27—32.

[7] 王在林, 韩飞, 刘继英, 等. 韧性断裂准则在超高强钢辊弯成形工艺中的应用[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(4): 16—20.
WANG Zai-lin, HAN Fei, LIU Ji-ying, et al. Research on Application of Ductile Fracture Criteria in Roll Forming Process of Ultra-high Strength Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(4): 16—20.

[8] 范琦. 超薄镀锌板辊弯成形回弹工艺分析[J]. 机械工程与自动化, 2012(6): 42—47.
FAN Qi. Springback Analysis of a High Strength Steel Thin-plate in Roll Forming[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012(6): 42—47.

[9] SHI Lei, XU Dong-kai, HAN Fei, et al. Forming Process and Product Development of Roll Formed 1500MS Rear Bumper[C]. IDDRG Conference Proceedings, 2016.

[10] 韩非, 石磊, 肖华, 等. 应用先进高强钢的典型汽车零件辊压成形关键技术及开发[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(3): 65—69.
HAN Fei, SHI Lei, XIAO Hua, et al. Development and Key Technologies on Roll-formed Automobile Profiles with AHSS[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(3): 65—69.

[11] TEHRANI M S, HARTLEY P, NAEINI H M, et al. Localized Edge Buckling in Cold Roll-forming of Symmetric Channel Section[J]. Thin Walled Structures, 2006, 44(2): 184—196.

[12] 罗晓亮, 曾国, 李淑慧, 等. 材料参数对高强钢辊弯成形边波影响的有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 744—747.
LUO Xiao-liang, ZENG Guo, LI Shu-hui, et al. Finite Element Analysis of the Effect of Material Properties on Wavy Flange in High Strength Steel Roll Forming[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(5): 744—747.

[13] HAN Fei, SHI Lei, XIAO Hua, et al. Key Technologies of Roll Forming Automobile Components with AHSS[J]. Baosteel Technical Research, 2013(1): 49—53.

[14] HALMOS G T. Roll Forming Handbook[M]. Toronto Canada: Taylor & Francis Group, CRC Press, 2005.

[15] 小奈弘, 刘继英. 冷弯成形技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
HIROSHI Ona, LIU Ji-ying. Roll Forming Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press (CIP), 2008.