

22MnB5 钢板热冲压工艺数值模拟及试验

巩子天纵, 李凌风, 李萍, 梁辰, 薛克敏, 李君
(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: **目的** 研究热冲压过程中板料的温度变化及相变情况。**方法** 采用 Abaqus 软件建立了热力耦合模型,对 U 形件热冲压成形及冷却淬火过程进行了数值模拟,分析了板料及模具的温度分布变化,并研究了板料不同区域的冷却速率,最后进行了热冲压试验。**结果** 研究表明,板料经冷却淬火后,温度分布均匀,且冷却速率均大于临界冷却速率,板料可以发生完全马氏体相变。**结论** 板料的底部冷却速率最快,淬火后为分布均匀的、细小的马氏体组织,最终通过热冲压试验验证了模拟结果的准确性。

关键词: 22MnB5; 热冲压; 马氏体相变

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.004

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)04-0019-05

Numerical Simulation and Experiment of Hot Stamping Process with 22MnB5 Steel

GONG Zi-tian-zong, LI Ling-feng, LI Ping, LIANG Chen, XUE Ke-min, LI Jun
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: Objective To study the temperature distribution and phase transformation of blank in hot stamping process. **Methods** The thermo-mechanical model was established in Abaqus software to simulate the U-shaped part forming and quench cooling process. The temperature distribution of blank and die and cooling rate were analyzed in this study. The hot stamping experiment was conducted to validate the simulation. **Results** The results showed that the temperature of blank was uniformly distributed after the quench cooling process. The cooling rate of blank was greater than the critical cooling rate and the martensitic phase transformation occurred completely in the blank. **Conclusion** The microstructure was all fine martensite and distributed uniformly at the bottom owing to its fastest cooling rate among the three areas of the blank. The accuracy of simulation was verified with the hot stamping experiment.

KEY WORDS: 22MnB5; hot stamping; martensitic phase transformation

汽车工业的快速发展在改变人们生活的同时,也给环境带来了很大的威胁。能源短缺、环境污染、全球变暖等环境问题已日趋严重。在当今汽车工业可持续发展的前提下,如何做到节能减耗及避免环

境恶化,是当今社会亟待解决的问题。研究表明,汽车轻量化对节能减排的效果最为明显,汽车的重量减少 10%,汽车的耗油量将降低 8%^[1-2]。

将超高强钢应用于汽车零件上,不仅可以降低

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 安徽省优秀青年科技基金滚动支持项目(1308085JGD02)

作者简介: 巩子天纵(1988—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为精密塑性成形及组织性能研究。

汽车的重量,减少油耗,还可以改善汽车的安全性和舒适性^[3]。超高强钢具有大的屈服强度和相对较低的塑性,传统的冷冲压工艺无法解决难成形、易破裂和回弹大的问题,导致零件尺寸及形状稳定性变差^[4]。热冲压工艺是解决这一问题的最有效的工艺之一。近几年国内热冲压工艺迅速发展,并成功将热冲压零件应用到了汽车关键结构件上,如B柱、防撞梁、保险杠等,应用前景广阔^[5-9]。热冲压工艺的原理是:将超高强钢加热到奥氏体化温度,并保温一定时间,使板料充分奥氏体化,然后迅速将板料转移到模具上进行热冲压成形,在成形结束后通冷却水,使板料在模具中冷却淬火,冷却淬火后板料的抗拉强度可达到1500 MPa以上,大大提高了钢板的强度^[10-11]。文中以22MnB5超高强钢作为研究对象,采用Abaqus软件对热冲压过程进行数值模拟,研究了板料及模具在成形及冷却淬火阶段的温度变化情况,最后进行了热冲压试验。

1 热力耦合模型的建立

1.1 有限元模型的建立

如图1所示,建立的热力耦合有限元模型分为5个部分:凸模、压边圈、板料、凹模及冷却水道。采用CPE4RT四节点热力耦合网格单元对模具和坯料进行网格划分,模具视为刚性体,即不产生塑性变形。为提高计算精度,将接触区特别是圆角区域进行了网格细化。模拟步骤为:(1)将加热后板料放置在凹模上进行热冲压成形;(2)热冲压成形后开始进入冷却淬火阶段,模具保持保压状态,在冷却水道中通20℃的冷却水进行冷却淬火模拟。

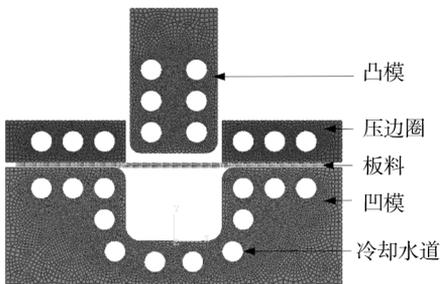


图1 热力耦合有限元模型

Fig. 1 Coupled thermo-mechanical finite element model

文献[12]给出了22MnB5的最佳奥氏体化温度区间为880~910℃,因此将板料的初始温度设置为900℃。具体的关键技术参数:板料初始温度为900℃,模具初始温度为20℃,单位压边力为2 MPa,冲压速度为0.02 m/s,摩擦因数为0.2,冷却淬火时间为12 s,模具与板料换热系数为3000 W/(m²·℃),水流速度为0.5 m/s。

1.2 模具与冷却水之间热交换条件

模具与冷却水之间主要的热传递方式为热对流,若在模型中加入流体模型,将导致模型建立困难,同时会大大增加数值模拟的时间,使得效率明显降低。为此,以热力学第3类边界条件为基础,将模具与冷却水之间的热交换系数施加在冷却水道的内壁,以实现通水过程。通过Sleicher和Rouse模型^[13]可以计算出不同水流速度下,模具与冷却水之间的热交换系数,如式1所示。通过计算,当水流速度为0.5 m/s时,模具与冷却水之间的热交换系数为2500 W/(m²·℃)。

$$\begin{cases} h_f = (5 + 0.015 R_e^a P_r^b) \kappa / d \\ a = 0.88 - 0.24 / (4 + P_r) \\ b = 0.33 + 0.5 \exp(-0.6 P_r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: h_f 为热交换系数; R_e 为雷诺数; P_r 为普朗特数; κ 为冷却水道中冷却介质的导热系数; d 为冷却水道直径。

2 热冲压过程模拟结果

2.1 板料温度场分布

图2给出了热冲压过程中板料的温度场分布。从图2a,b中可以看出,板料在成形阶段温度分布非常不均匀,板料法兰区域的温度最低,板料的底部中心区域的温度最高。这是由于板料的法兰最先与模具接触,且是双面接触,接触时间较长,板料向模具间传递的热量较多,导致温度下降速度最快;而板料底部中心区域仅与凸模单面接触,另一面与空气接触,板料向模具传递的热量较少,所以温度下降速度最慢。从图2c,d中可以看出,在冷却淬火阶段,板料的温度分布趋于均匀,从最大温差430℃降到27℃,且冷却淬火后板料的整体温度在100℃左右。

板料上圆角的温度最高,这是由于在冷却淬火阶段,仅有板料上圆角与模具单面接触,另一面与空气接触,所以温度下降较慢。分析结果显示,板料经冷却淬火阶段后,温度分布均匀,冷却效果较好。

2.2 模具温度场分布

图3为热冲压过程中模具的温度分布。从图

3a,b中可以看出,在成形阶段,模具与板料接触的区域温度迅速上升,这与板料与模具间的热传递有关,模具与板料之间的温度差别较大,接触状态良好,所以板料的温度迅速向模具传递。由于成形时间较短,温度还来不及向模具其他区域传递,所以模具的热量主要分布在模具的工作表面。从图3c,d中可以看出,在冷却淬火阶段,模具中开始通冷却水,

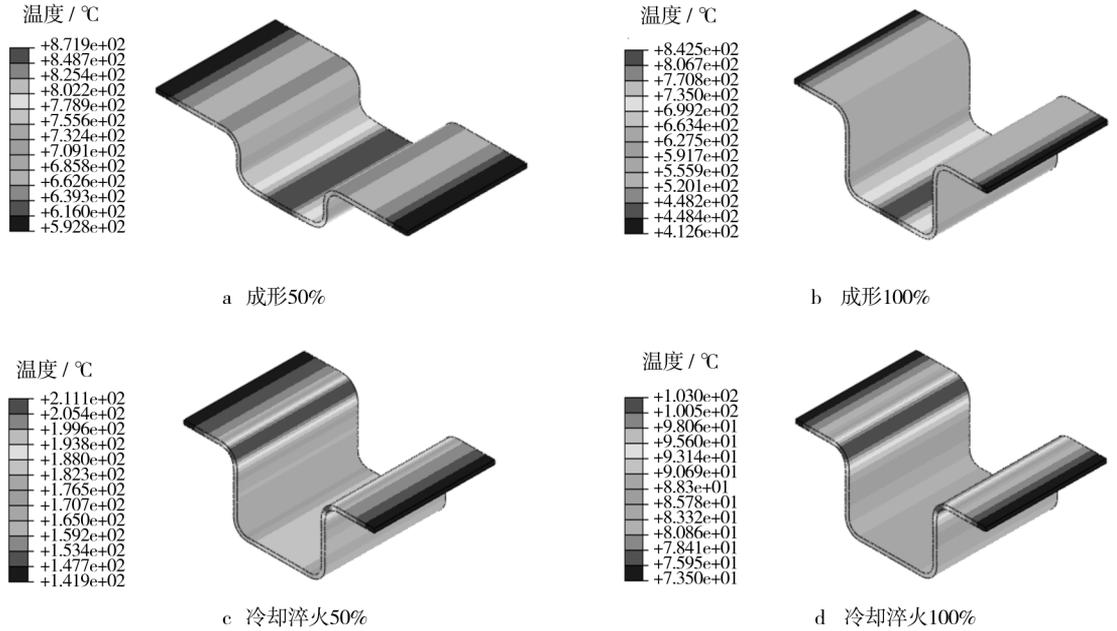


图2 热冲压过程中板料的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of the blank in the hot stamping process

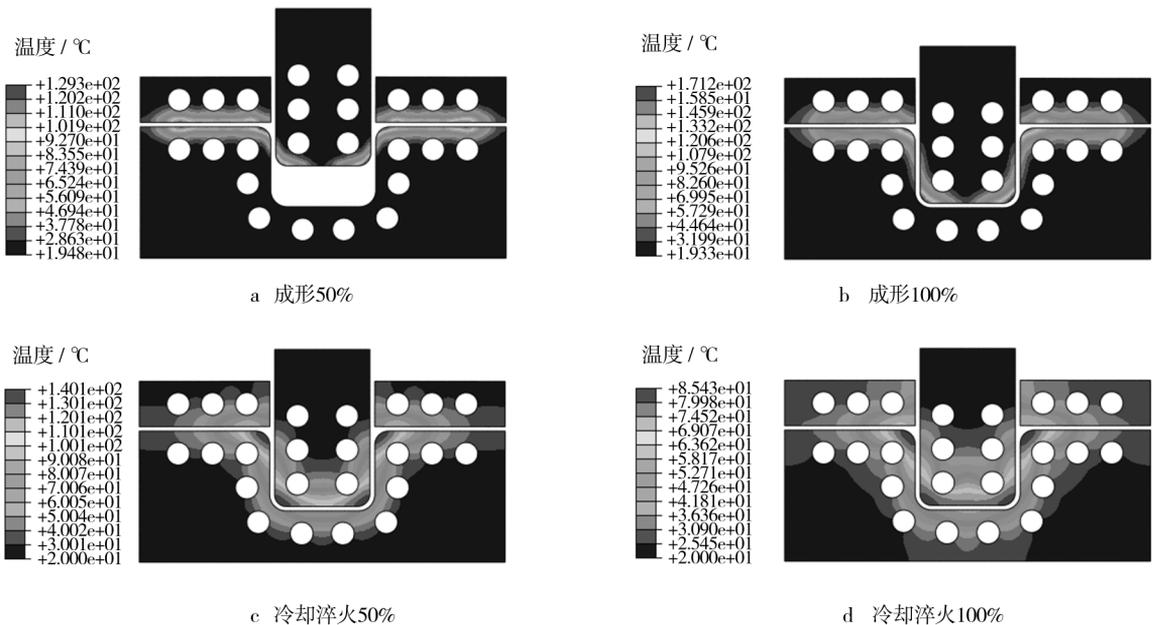


图3 热冲压过程中模具的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the die in the hot stamping process

冷却水带走模具中一定的热量,模具的温度开始缓慢降低;在冷却结束时,模具的温度分布均匀,最高温度为85℃,冷却效果良好。由于冷却淬火时间较长,模具的温度扩散到工作表面以下区域。从图3中可以看出,模具的最高温度分布在模具圆角区域,这是由于板料的圆角处为主要变形区域,模具圆角处与板料之间的接触应力较大,产生一定的机械热内能,最终导致温度的升高。这说明在实际热冲压过程中,模具的圆角处温度最高,导致模具热疲劳性能降低,可采用在模具圆角处增大冷却水道直径的方法,解决模具温度分布的不均匀性。

3 热冲压过程板料冷却速率的变化

板料在淬火过程中的冷却速率大小将决定板料能否发生马氏体相变,直接决定了热冲压零件的质量,因此在实际生产过程中,板料的冷却速率为控制零件质量的一个关键工艺参数。研究表明,22MnB5材料发生马氏体相变的温度区间为:425℃(M_s)~280℃(M_f)^[14]。在马氏体相变温度区间内,板料的冷却速率应大于临界冷却速率(30℃/s)才会发生马氏体相变^[15]。

图4给出了热冲压过程中板料平均温度的变化曲线,其中0~2s阶段为成形阶段,2~14s时间阶段为冷却淬火阶段。从图4中可以看出,板料在成形阶段,整体温度下降趋势明显,在冷却淬火阶段,整体温度下降趋势逐渐趋于平缓。在马氏体相变温度区间内,板料的冷却速率最大值为110℃/s,冷却速率最小值为65℃/s,均大于马氏体相变临界冷却

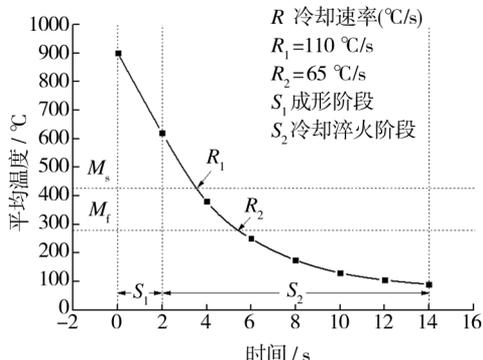


图4 热冲压过程中板料平均温度变化曲线

Fig.4 Average temperature variation of the blank in the hot stamping process

速率(30℃/s)。模拟结果显示,板料可以发生马氏体相变。

由于成形后板料的温度分布不均匀,板料的法兰、直壁及底部的温差较大,冷却淬火后各区域的冷却速率存在差异,因此选取了板料在不同区域的温度变化进行分析。图5给出了板料在法兰、直壁及底部的平均温度变化。从图5中可以看出,在成形阶段,板料的底部与模具为单面接触,热量流失最少,因此在冷却淬火阶段为最后进入马氏体相变的区域。板料发生马氏体相变的先后顺序为:法兰>直壁>底部。在马氏体相变温度区间内,板料3个区域的冷却速率均大于30℃/s,可以发生完全马氏体相变。在3个区域中,板料底部的冷却速率最快,远大于临界冷却速率,因此冷却淬火效果最好,马氏体相变最充分。

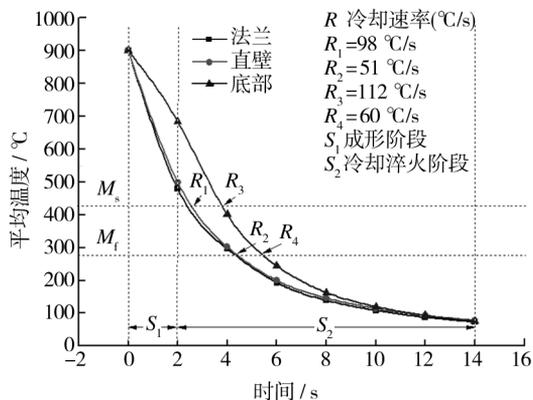


图5 热冲压过程中板料不同区域平均温度变化曲线

Fig.5 Average temperature variation at different areas of the blank in the hot stamping process

4 热冲压试验验证

将22MnB5钢板下料成150mm×60mm×2mm的板料,进行热冲压试验。试验步骤为:(1)将板料放入加热炉中,以15℃/s的加热速度加热到900℃,可采用真空加热,以防止高温氧化皮的产生;(2)板料加热到900℃后保温5min左右,以保证材料发生完全奥氏体化,提高板料后续冷却淬火的效果;(3)采用机械手将板料迅速转移到热冲压模具上进行热冲压试验;(4)模具保持保压状态,开启冷却系统进行冷却淬火工艺;(4)冷却淬火后取件,清除氧化皮,得到热冲压零件。

分别选取热冲压零件的3个区域进行金相观察,如图6所示。从图6a中可以看出,热冲压零件成形效果良好,没有产生破裂、回弹等缺陷。从图6b,c,d中可以看出,冷却淬火后零件组织均为马氏体,其中零件的底部由于冷却速率最快,淬火后的组织为细小的均匀的马氏体组织,冷却效果最好。试验结果验证了模拟结果的准确性。

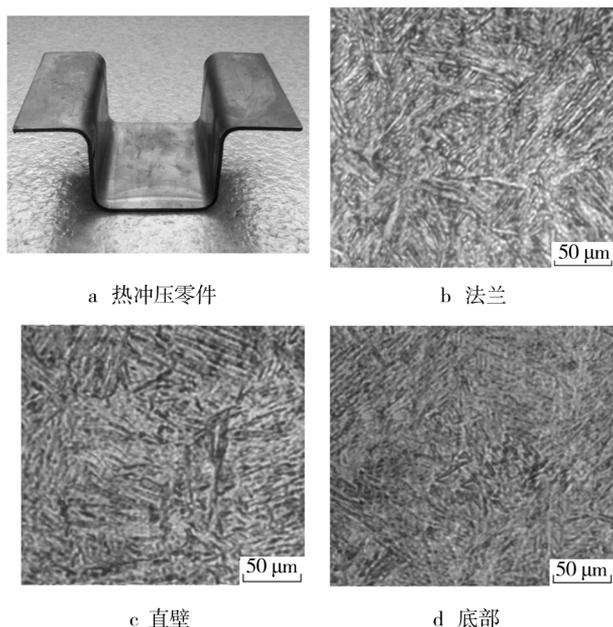


图6 试验结果
Fig.6 Experiment results

5 结论

采用数值模拟与试验相结合的方法,对U形件热冲压工艺进行了研究,研究结果表明:

1) 板料在成形结束时温度分布不均匀,法兰区域的温度最低,底部区域的温度最高。经冷却淬火后,板料的温度分布相对均匀。模具的热量主要集中于工作表面,模具在圆角处的温度最高,会降低模具的热疲劳性能。

2) 板料在马氏体相变温度区间内的冷却速率均大于临界冷却速率,可以发生完全马氏体相变,但板料在不同区域的冷却速率存在差异,其中板料底部的冷却速率最大,冷却效果最好。

3) 通过U形件热冲压试验,零件没有产生成形缺陷,且零件发生完全马氏体相变,底部的冷却速率最快,淬火后为细小的且分布均匀的马氏体组织,试

验结果验证了模拟结果的准确性。

参考文献:

- [1] 鲁春艳. 汽车轻量化技术的发展现状及其实施途径[J]. 轻型汽车技术,2007(6):22—25.
LU Chun-yan. Development Status and Approaches of Automotive Lightweight Technology[J]. Lightweight Automotive Technology,2007(6):22—25.
- [2] OSEPH C, BENEDYK K. Light Metals in Automotive Applications[J]. Light Metal Age,2000:34—35.
- [3] 朱铮. 汽车用高强度钢板的开发应用和发展前景[J]. 钢铁,2000,35(11):66—70.
ZHU Zheng. Development Application and Perspective of High Strength Steel Sheets for Automobiles[J]. Iron and Steel,2000,35(11):66—70.
- [4] 王立影,王芝斌. 热冲压成形零件质量控制因素分析[J]. 锻压技术,2010,35(2):117—119.
WANG Li-ying, WANG Zhi-bin. Hot Stamping Parts Quality Control Factors Analysis[J]. Forming & Stamping Technology,2010,35(2):117—119.
- [5] 马宁,胡平,郭威. 高强度钢板热冲压成形成套技术及装备[J]. 汽车与配件,2009,45:28—30.
MA Ning, HU Ping, GUO Wei. Technology and Equipment of Hot Forming for Ultra High Strength Steel[J]. Automotive and Parts,2009,45:28—30.
- [6] 徐虹,沈永波,孟佳,等. 热冲压成形车门防撞梁组织和性能研究[J]. 锻压技术,2011,36(6):24—27.
XU Hong, SHEN Yong-bo, MENG Jia, et al. Study on Microstructure and Properties of Hot Stamping Door Anti-impact Beam[J]. Forming & Stamping Technology,2011,36(6):24—27.
- [7] 马宁,申国哲,张宗华,等. 高强度钢板热冲压材料性能研究及在车身设计中的应用[J]. 机械工程学报,2011,47(8):60—65.
MA Ning, SHEN Guo-zhe, ZHANG Zong-hua, et al. Material Performance of Hot-forming High Strength Steel and Its Application in Vehicle Body[J]. Journal of Mechanical Engineering,2011,47(8):60—65.
- [8] 郭怡晖,马鸣图,张宜生,等. 汽车前防撞梁的热冲压成形数值模拟与试验[J]. 锻压技术,2013,38(3):46—50.
GUO Yi-hui, MA Ming-tu, ZHANG Yi-sheng, et al. Numerical Simulation and Experimental of Hot Stamping for Front Bumper of Automobile[J]. Forming & Stamping Technology,2013,38(3):46—50.

- on the Stress-strain Curve of Plain Carbon Steel Q235 [J]. *Shandong Metallurgy*, 2007, 129(1): 41—42.
- [9] 计云萍,金自力,李伟,等. Fe-3%Si 钢 CSP 工艺轧制的热模拟试验[J]. *钢铁钒钛*, 2011, 32(4): 67—70.
JI Yun-ping, JIN Zi-li, LI Wei, et al. Study on Thermal Simulation Experiment of CSP Hot Rolling of Fe-3% Si Steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2011, 32(4): 67—70.
- [10] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
CUI Zhong-qi, QIN Yao-chun. *Metal Materials and Heat-treatment* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 胡诗超,张恒华,吴晓春,等. 30Cr3MoV 钢热压缩流变应力行为研究[J]. *上海金属*, 2011, 33(3): 1—5.
HU Shi-chao, ZHANG Heng-hua, WU Xiao-chun, et al. Flow Stress Behaviour of 30Cr3MoV Steel During Hot Compression[J]. *Shanghai Metals*, 2011, 33(3): 1—5.
- [12] 舒滢,曾卫东,周军,等. BT20 合金高温变形行为的研究[J]. *材料科学与工艺*, 2005, 13(1): 76—79.
FU Ying, ZENG Wei-dong, ZHOU Jun, et al. A Study of Hot Deformation Behavior for BT20 Alloy [J]. *Material Science and Technology*, 2005, 13(1): 76—79.
- [13] 肖远伦,赵军,李祖荣,等. 挤压态 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金热变形行为研究[J]. *精密成形工程*, 2014, 6(1): 49—53.
XIAO Yuan-lun, ZHAO Jun, LI Zu-rong, et al. Hot Deformation Behaviour of Extruded Mg-Gd-Zn-Zr Alloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2014, 6(1): 49—53.
- [14] 王艳彬,门海豹,陈强,等. MB15-RE 镁合金铸坯在半固态温度下的应力-应变曲线测试与特征分析[J]. *精密成形工程*, 2012, 4(3): 5—9.
WANG Yan-bin, MEN Hai-bao, CHEN Qiang, et al. Experimental Study and Analysis of Stress-strain Curves for the MB15-RE Magnesium Alloy Casting Billet under the Semisolid Conditions [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2012, 4(3): 5—9.
- [15] 上官姝哲,李鑫,鲁世强,等. Ti3Al 基金属高温变形行为及其流动应力模型[J]. *精密成形工程*, 2012, 4(6): 41—44.
SHANGGUAN Shu-zhe, LI Xin, LU Shi-qiang, et al. High Temperature Deformation Behavior and Flow Stress Model of Ti3Al Based Alloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2012, 4(6): 41—44.

(上接第 23 页)

- [9] 谭海林,张宜生,桂中祥,等. 奥迪 B 柱热冲压成形热-力-相变耦合仿真分析[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(1): 67—69.
TAN Hai-lin, ZHANG Yi-sheng, GUI Zhong-xiang, et al. Simulation Analysis on Thermo-mechanical Metallurgical Coupling of Hot Stamping Audi B-pillar Punching Forming [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(1): 67—69.
- [10] 林建平,孔庆华,徐洲,等. 22MnB5 钢板不等温拉深成形的影响因素研究[J]. *同济大学学报*, 2011, 39(4): 567—571.
LIN Jian-ping, KONG Qing-hua, XU Zhou, et al. Study on Factors of 22MnB5 Steel Isothermal Drawability [J]. *Journal of Tongji University*, 2011, 39(4): 567—571.
- [11] 刘红生,包军,刑忠文. 高强度钢板热冲压成形热力耦合数值模拟[J]. *材料科学与工艺*, 2010, 39(11): 103—105.
LIU Hong-sheng, BAO Jun, XING Zhong-wen. Numerical Simulation on Channel Shape Hot Stamping of 22MnB5 High-strength Sheet Metal Based on Thermo-mechanical Coupled Method [J]. *Material Science & Technology*, 2010, 39(11): 103—105.
- [12] HE L F, ZHAO G Q, LI H P. et al. Research on Mechanical Properties of 22MnB5 Steel Quenched in a Steel Die [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2011, 16(2): 129—132.
- [13] SLEICHER C A, ROUSE M W. A Convenient Correlation for Heat Transfer to Contact and Variable Property Fluids in Turbulent Pipe Flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1975, 18(5): 677—683.
- [14] SOMANI M C, KARJALAINEN L P, ERIKSSON M, et al. Dimensional Changes and Microstructural Evolution in a B-bearing Steel in the Simulated Forming and Quenching Process [C] // *ISI International* 4, 2001, 361—367.
- [15] URETTA A, BRUSCHI S, GHIOTTI A. Investigation of 22MnB5 Formability in Hot Stamping Operations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1): 396—400.