

汽车防撞梁超高强钢热成形工艺研究

庄百亮 单忠德 姜超 戎文娟

机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室,北京,100083

摘要:采用数值模拟与试验相结合的方法研究了防撞梁热冲压成形工艺。根据 BR1500HS 材料特性,通过数值模拟优化工艺参数,建立了冲压力与初始成形温度和冲压速度的关系模型,指出了冲压力变化趋势,并通过防撞梁热冲压试验验证了冲压力模型的可靠性。零件性能测试结果显示,热冲压件的厚度和硬度分布较为均匀;平均硬度为 47.6HRC,最大减薄率为 17%,零件抗拉强度达到 1545MPa,最大残余应力只有抗拉强度的 20%左右,回弹较小,组织为均匀板条状马氏体。

关键词:热成形;防撞梁;数值模拟;模型

中图分类号:TH16

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.022

Research on Ultra-high-strength-steel Hot Stamping Process of Automotive Anti-collision Beam

Zhuang Bailiang Shan Zhongde Jiang Chao Rong Wenjuan

State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment,

China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing, 100083

Abstract: Ultra-high-strength-steel hot stamping process of automotive anti-collision beam combining with numerical simulation and experiments were completed. Through analyzing the properties of the material BR1500HS, process parameters were optimized and a relational model among forming force, initial deformation temperature and pressing speed was built with the help of computer simulation as example of door beam, and the variation trend of forming force was also shown clearly. The mechanical property testing shows that the hardness and thickness distribution of formed parts are uniformity; the average hardness is 47.6HRC and the largest thinning ratio is 17%, tensile strength of formed parts achieves 1545MPa which is 5 times as the maximum residual stress with little spring-back, and that microstructure of lath martensite is homogenous.

Key words: hot stamping; anti-collision beam; numerical simulation; model

0 引言

热冲压成形技术是一项专门用于成形超高强度钢板的新技术。热冲压件的抗拉强度可超过 1500MPa,且成形精度高,基本无回弹。这种方式能够充分利用材料的塑性性能来冲压零件,用于汽车结构件制造时,可提高汽车的安全性能,减轻车身重量。目前只有少数几家单位对热冲压技术进行研究,在模具设计、工艺试验及模拟方面获得了相应成果^[1-4],但对工艺参数之间的关系未作深入探讨。

热冲压成形工艺难以把握,利用模拟技术可以优化工艺参数^[5]。本文以车门防撞梁为例,通过数值模拟和热冲压试验相结合的方法研究超高强度钢板的热成形工艺特征,建立冲压力与冲压速度和初始成形温度的关系模型,并通过试验验证

了模型的正确性。

1 材料特性

试验钢板为宝钢产 22MnB5 热轧板,牌号为 BR1500HS,厚度为 2mm,密度为 7850kg/m³,临界冷却速度为 15℃/s,化学组分如表 1 所示。

表 1 BR1500HS 的化学组分 %

元素 质量 分数	C	Mn	B	Si	Cr	S	P
	0.21	1.35	0.0033	0.28	0.23	0.004	0.0055

热轧状态下,材料的硬度约为 193HV,抗拉强度在 500~600MPa 之间,微观组织成分为铁素体和珠光体,经过热冲压后,材料强度提高 2.5 倍以上,组织转变为板条状马氏体。

热冲压成形属于准静态过程^[6],成形过程中,钢板产生机械变形的同时,温度急剧下降,故接触处理是板料热冲压成形有限元分析的关键技术,板料与模具之间的摩擦力与传热系数的确定至关重要。热冲压过程中,摩擦力对成形件质量的影

收稿日期:2011-02-23

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX04014-072);国际科技合作项目(2011DFA50810)

响很大,它不仅与压力有关,还与接触面的温度有关^[7]。在板料与模具的接触过程中,热交换包括热传导、热对流和热辐射三部分。传热系数是影响温度场的重要因素;在板料与模具接触前,传热系数与接触间隙关系密切;紧密接触后,传热系数主要受到压力的影响。

2 防撞梁热冲压成形数值模拟分析

文献^[8]详细介绍了防撞梁的热冲压成形过程中冲压速度、初始成形温度的影响规律,并指出,对于 2mm 厚的热轧硼钢 HR1500HS,最佳冲压速度区间为 50~100mm/s,最佳初始成形温度区间为 750~850℃。本文在此基础上利用冲压软件 PamStamp 2G 研究防撞梁热冲压工艺参数之

间的关系,并给出冲压力计算方法。

冲压力是零件成形时重要的工艺参数,热冲压过程中,在材料确定后,冲压力的大小主要受板料厚度、初始成形温度、成形速度以及冲压件大小和冲压深度等影响。对于本文所研究的防撞梁,主要考虑初始成形温度和冲压速度两个因素。根据牛顿静力学理论,作用力与反作用力大小相等,本文依据模具在冲压过程中的受力情况,反算成形件所需要的成形力。

为研究冲压力与冲压速度以及初始成形温度之间的关系(以便建立相关模型),在冲压速度 20~200mm/s,成形温度 700~900℃ 范围内,对防撞梁热成形进行数值模拟,得到所需成形力如表 2 所示。

表 2 不同冲压速度与初始成形温度对应的冲压力

kN

成形温度 (℃)	冲压速度(mm/s)										
	20	30	35	50	75	100	120	135	150	170	200
700	821	796	780	741	709	681	647	633	612	578	533
730	805	778	762	717	679	650	633	612	606	561	521
750	780	764	750	708	661	634	613	598	581	557	512
770	764	740	725	683	640	610	596	580	573	545	498
790	744	725	702	661	616	587	576	557	547	524	484
800	716	695	686	645	605	584	563	551	540	516	472
820	693	681	664	628	580	560	552	541	527	492	467
830	672	657	642	608	567	550	546	528	515	483	455
850	655	638	617	579	541	523	507	498	488	464	439
870	632	603	585	539	512	501	490	479	471	454	417
900	611	586	564	522	497	484	478	465	456	439	409

首先分析冲压速度与冲压力的关系——同一初始温度下,不同冲压速度对板料成形力的影响。如表 2 所示,在成形温度范围内(700~900℃),同一初始成形温度下,随着冲压速度的增大,板料成形所需冲压力减小,板料成形较快。板料的平均变形温度增加时,塑性相对较好,所需变形抗力相对较小。

进而分析初始成形温度与冲压力的关系——在同一冲压速度下,不同初始成形温度对板材成形力的影响。表 2 表明,在同一成形速度下,冲压力随着初始成形温度的增加而减小,即板料塑性越好,变形抗力越小。

图 1 是热冲压过程中模具受力曲线图,工艺参数如下:初始成形温度为 850℃,冲压速度为 50mm/s。由图 1 可知:板料在冲压深度小于 20mm 时,受力较小,因为这时模具与板料接触面

较小,板料温度相对较高,板料变形抗力较小;冲压深度超高 25mm 后,板料受力才开始明显上升,当接近完全成形时,冲压力急剧上升。因为此时模具与板材的接触越来越紧密,板料变形速率增加,温降也加快,变形抗力增大,故所需成形力快速增大。

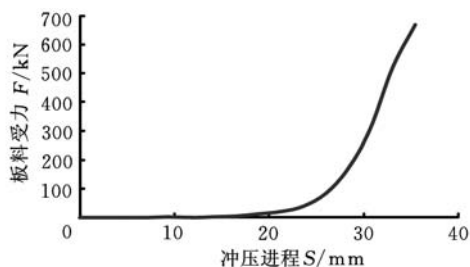


图 1 模具受力曲线

根据数值模拟数据,分析冲压力与冲压速度和成形温度之间的关系模型,通过软件合成不同

的计算公式,最终根据公式的复杂程度与相关系数选择的公式如下:

$$F = a + bt + c \ln v + dt^2 + f \ln v \quad (1)$$

式中, t 为初始成形温度, $^{\circ}\text{C}$; v 为冲压速度, mm/s ; a, b, c, d, f 为模型参数系数, $a = 1534.98, b = -0.3236, c = -109.54, d = -7.789 \times 10^{-4}, f = 0.1357$ 。

式(1)的相关系数 $R^2 = 0.976$, BR1500HS 钢的成形条件如下: 初始成形温度为 $700 \sim 900^{\circ}\text{C}$, 冲压速度为 $20 \sim 200 \text{mm/s}$ 。式(1)针对的是 1/2 防撞梁, 即对整个防撞梁来说, 式(1) 计算所得的成形力需加倍。图 2 为冲压力与冲压速度和成形温度之间的空间关系图。由图 2 容易看出: 冲压速度相同时, 冲压力随着初始成形温度的降低而不断增大; 在同一初始成形温度下, 冲压力随着冲压速度的增加而减小。

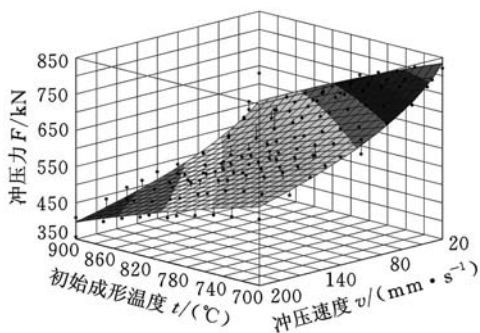


图 2 冲压力与冲压速度和成形温度之间的空间关系

3 防撞梁热冲压成形工艺试验与分析

文献[8]与文献[9]从数值模拟及试验方面研究了防撞梁热冲压成形工艺, 工艺参数优选结果如下: 加热温度为 930°C , 保温时间为 270s , 压机冲压速度为 75mm/s , 成形后保压 15s , 水流速度为 1.1m/s 。根据上述结果进行热冲压试验, 红外测温显示板料冲压前的温度为 $810 \sim 830^{\circ}\text{C}$, 由式(1)计算得到的冲压力为 $564 \sim 593 \text{kN}$, 进而计算所得的压力为 $5.8 \sim 6 \text{MPa}$, 试验设定的冲压力为 6MPa , 从热成形件成形效果判断, 防撞梁完全成形, 无破裂起皱等缺陷产生, 说明利用式(1)计算的冲压力与防撞梁热成形试验所需的成形力相一致, 即式(1)可以作为防撞梁热冲压成形的经验公式使用。

3.1 防撞梁热冲压件厚度

根据要求, 所研究防撞梁的减薄率应控制在 25% 之内, 且厚度较均匀。试验测得成形件各点厚度分布见表 3。

表 3 零件不同位置的厚度 mm

点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
厚度	1.86	1.92	1.94	1.66	2.18	1.9	1.85	1.7	1.88	1.86	1.92

由测试结果可知, 零件的最厚处在图 3 的 5 处, 最薄处在 4 的位置, 测试结果验证了模拟结果的正确性[8]。根据表 3 比较零件端部边缘位置的点 1 和点 2 厚度, 点 6 与点 7 厚度及点 8 与点 9 厚度可知, 热冲压零件两端, 越靠近边缘, 减薄越多; 点 8 与点 9 在斜面与平面的圆弧过渡位置, 属于应力集中地区, 故变薄较为明显; 比较 6 点、7 点与 1 点、2 点可知, 零件中间的拉伸较边缘稍明显; 比较零件中心位置的点 3、侧壁位置的点 10 与边缘位置的点 11 可知, 零件侧壁的变薄率较为明显, 约 7% ; 热成形零件的最大减薄率为 17% , 厚度最大值为 2.18mm , 厚度区间分布较窄, 即满足防撞梁厚度要求。

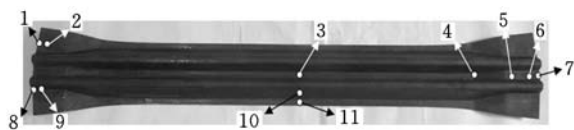


图 3 零件的厚度测量点分布

3.2 防撞梁热冲压件力学性能

零件的硬度分布如表 4 所示, 热冲压件的硬度分布较为均匀, 极差为 2.7HRC , 均值为 47.6HRC 。硬度测试点和拉伸试样在零件上的位置见图 4, 拉伸试样采用 50 标距(国际上对热冲压零件的评价方法), 抗拉强度平均值为 1545MPa 。

表 4 零件不同位置的硬度值

点	1	2	3	4	5
硬度	HRC 48.5	HRC 48.6	HRC 47	HRC 46	HRC 48.7
点	6	7	8	9	10
硬度	HRC 47.5	HRC 48.5	HRC 48	HRC 46	HRC 47

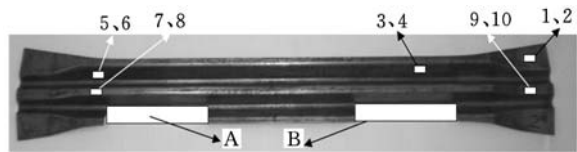


图 4 零件硬度测点位置

本文通过 STRAINFLEX MSF-2M 型 X 射线残余应力分析仪对热冲压防撞梁表面进行测试与分析, 为说明工件表面质量提供实验依据。根据文献[8]的数值模拟结论, 热成形件的最大应力发生在图 5 标记的位置处, 测试结果见表 5。数据表明, 拉伸深度越大, 残余应力越大, 即点 3 位置处残余应力最大, 因为此位置最后成形, 是整个零件最大拉伸处, 此部位在成形中的温度差较大, 处在机械力与热力的双重影响下, 内应力相对较大。

表 5 残余应力各点数值 MPa

点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
残余应力	244	272	306	183	277	294	174	172	202

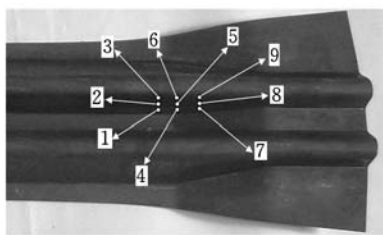


图 5 残余应力测试点

热成形件最大残余应力为 306MPa, 不到抗拉强度数值的 20%, 故对于成形件来说, 不需要消除残余应力。热处理或时效处理在消除残余应力的同时也降低了热冲压件的抗拉强度, 这对于以安全性为重的防撞梁来说是没有必要的。

3.3 防撞梁热冲压件精度与微观组织

回弹是影响冲压件形状精度的主要因素, 比较防撞梁数学模型与热冲压件中间截面回弹量, 并将其与冷冲压件中间截面回弹量对比, 结果如表 6 所示, 图 6 为防撞梁数学模型的中间截面图, θ_1 、 θ_2 为回弹精度角, 是表征防撞梁回弹量的重要参数, 其中 $\theta_1 = 32^\circ$, $\theta_2 = 16^\circ$ 。由表 6 可以看出, 热成形件的回弹很小, 只有冷冲压件的一半, 而冷冲压件的抗拉强度约为 600MPa, 不到热成形件抗拉强度的一半。图 7 为防撞梁金相照片, 可见组织都比较均匀, 呈现大量板条状马氏体。

表 6 冷、热冲压件的回弹角度对比

类型	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ_1 与数学模型的差值 (°)	θ_1 的回弹百分比 (%)
热成形件	32.5	16.2	0.5	1.56
冷冲压件	32.9	16.4	0.9°	2.81

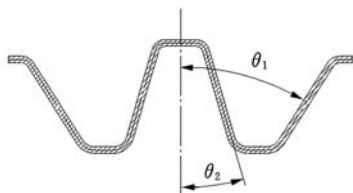


图 6 防撞梁对称面上二维图

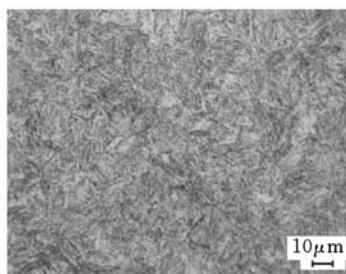


图 7 防撞梁金相组织

以上测试结果表明: 防撞梁热冲压件比较理想, 本文所使用的研究方法可行。

4 结语

防撞梁热冲压工艺试验结果表明: 成形件的厚度和硬度分布较为均匀, 抗拉强度达到 1545MPa, 最大残余应力只有抗拉强度数值的 20% 左右, 不需要消除; 热成形件精度较高, 回弹量较小; 组织为均匀板条状马氏体, 这说明热冲压工艺较为合理。

参考文献:

- [1] 谷净巍, 单忠德, 徐虹, 等. 汽车高强度钢板冲压件热成形技术研究[J]. 模具工业, 2009, 35(4): 27-29.
- [2] 马宁, 胡平, 闫康康, 等. 高强度硼钢热成形技术研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 68-72.
- [3] Mori K, Maki S, Tanaka Y. Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating[J]. Cirp Annals—Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 209-212.
- [4] Turetta A, Bruschi S. Investigation of 22MnB5 Formability in Hot Stamping Operations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1): 396-400.
- [5] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 卿晏清, 欧阳可居. 覆盖件有限元模拟技术及应用[J]. 汽车工艺与材料, 2003(6): 28-32
- [7] Merklein M, Lechler J. Investigation of the Thermo Mechanical Properties of Hot Stamping Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1): 452-455.
- [8] Zhuang Bailiang, Shan Zhongde, Jiang Chao, et al. Numerical Simulation of Hot Stamping Technology for Automotive Structural Parts[C]//Proceedings of the International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture, Beijing, 2010: 190-194.
- [9] Jiang Chao, Shan Zhongde, Zhuang Bailiang, et al. Research on Process Parameters of Ultra-high Strength Steel Hot Forming Technology[C]//The 5th CAM-KITECH Symposium of the Advanced Manufacturing Technology Cooperation, Changzhou, 2011: 114-118.

(编辑 张洋)

作者简介: 庄百亮, 男, 1984 年生。机械科学研究总院先进制造技术研究中心硕士研究生。研究方向为先进成形技术。发表论文 4 篇。单忠德, 男, 1970 年生。机械科学研究总院先进制造技术研究中心研究员、博士研究生导师。姜超, 男, 1979 年生。机械科学研究总院先进制造技术研究中心高级工程师。武文娟, 女, 1979 年生。机械科学研究总院先进制造技术研究中心工程师。