

后防撞梁外板的超高强钢热成形工艺

李蕙宇^{1,2}, 刘子知^{1,2}, 张泉达^{1,2}, 孙福臻^{1,2,3}, 吉日格勒^{1,2}, 李 军^{1,2}

(1. 中国机械科学研究总院集团有限公司 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044;

2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 101407; 3. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对汽车后防撞梁外板, 采用数值模拟与零件试制相结合的方法, 验证超高强钢热成形工艺的合理性和有效性。首先制定超高强钢的热成形工艺路线, 据此采用有限元软件进行数值模拟, 进行后防撞梁外板有限元模型的设计及优化, 使得模拟结果满足成形要求。然后进行零件试制, 试制成功后进行尺寸型面检测和拉伸试验检测, 确保试制零件的尺寸精度、抗拉强度和屈服强度满足要求。数值模拟和零件试制结果显示: 模拟的零件最大减薄率为 12.9%, 最大起皱为 9.6%, 符合主机厂通用要求; 试制零件检测偏差值满足公差要求, 零件的抗拉强度实测值均超过 1450 MPa, 屈服强度实测值均超过 950 MPa, 达到零件的性能要求。依据热成形工艺和模拟方案进行零件加工, 能够获得优质产品, 为汽车超高强钢零件的批量化生产提供了设计参考。

关键词: 超高强钢; 热成形工艺; 后防撞梁外板; 减薄; 起皱

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.012

中图分类号: TG316.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0090-06

Thermoforming process on ultra-high strength steel for outer panel of rear anti-collision beam

Li Huiyu^{1,2}, Liu Zizhi^{1,2}, Zhang Quanda^{1,2}, Sun Fuzhen^{1,2,3}, Ji Rigele^{1,2}, Li Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology

Group, Beijing 100044, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 101407, China;

3. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: For automobile outer panel of rear anti-collision beam, the rationality and validity of the thermoforming process for ultra-high strength steel were verified by combining numerical simulation with trial-production of parts. Firstly, the thermoforming process route of ultra-high strength steel was formulated, which was numerically simulated by the finite element software, and the finite element model of outer panel for rear anti-collision beam was designed and optimized so that the simulation results met the forming requirements. Then, the parts were trial-produced, and after successful trial-production, the dimension profile testing and the tensile test testing were carried out to ensure the dimensional accuracy, tensile strength and yield strength of the trial-production parts to meet the requirements. The results of numerical simulation and part trial-production show that the maximum thinning rate and wrinkling rate of the simulated part are 12.9% and 9.6%, respectively, which meet the general requirements of the main engine factory, and the test deviation values of the trial-produced parts meet the tolerance requirements. The measured values of tensile strength and yield strength of the parts exceed 1450 MPa and 950 MPa, respectively, which meet the performance requirements of the parts. Thus, according to the thermoforming process and simulation scheme to process the parts, the high-quality products can be obtained, which can provide design reference for the mass production of automobile ultra-high strength steel parts.

Key words: ultra-high strength steel; thermoforming process; outer panel of rear anti-collision beam; thinning; wrinkling

汽车轻量化是当今汽车工业可持续发展的主要

趋势, 是汽车节能减排的重要措施, 能够有效地减少汽车碳排放, 节能环保^[1]。汽车用钢凭借其价格低廉、比强度和比刚度高的优势, 在白车身上应用广泛^[2-3], 而随着汽车轻量化要求的进一步提高, 超高强钢开始应用于汽车车身中, 在减轻车身重量的同时, 可提高汽车的碰撞安全性能^[4]。

高强度钢板由于具有高强度等材料特性, 常温下的成形性能较差, 对成形设备要求较高, 冲压后容

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 山东半岛国家自主创新示范区发展建设基金项目 (ZCQ19109)

作者简介: 李蕙宇 (1997-), 女, 学士

E-mail: 1044457416@qq.com

通信作者: 张泉达 (1986-), 男, 博士, 工程师

E-mail: zhangquandagu@163.com

易出现起皱、开裂、大回弹等缺陷^[5],为解决上述问题,同时为了进一步提升高强钢板性能,超高强钢热成形工艺应运而生,逐渐成为提升热冲压钢板强度和成形性的重要工艺方法。超高强钢热成形工艺能够使高强度钢板获得超高强度的力学性能,其典型工艺过程是将板料加热至特定温度范围,使其完全奥氏体化,再送入水冷模具内进行冲压成形及淬火,最终实现钢板微观组织的转变和强度的提升^[6-7]。

超高强钢热成形作为一项新兴工艺,工艺的流程、设备和参数设定等均存在优化和提升空间,故国内外针对该工艺开展了大量研究。Han S 等^[8]研究了镁合金和超高强钢的异种材料成形连接工艺,通过数值模型预测热辅助冲孔过程,证明了热辅助铆接工艺适用于两种材料的连接成形。Liang J X 等^[9]研究了 Cr-Ni-W-Mo 钢的热处理工艺,通过优化热机械控制加工流程和冷却介质,结合低温回火工艺,使钢的屈服强度和抗拉强度分别提高了 32 和 251 MPa。Ghosh S 等^[10]设计了一种包括热机械轧制和直接淬火和分配 (Direct Quenching and Partitioning, DQ&P) 的新型工艺路线,能够获得屈服强度和抗拉强度分别为 1025 和 2137 MPa 的超高强钢。胡健等^[11]采用 DYNAFORM 进行车门防撞梁热成形工艺的优化仿真,建立热-力-相耦合模型,优化工艺方案,并通过成形试制获得了符合超高强钢热冲压零件性能标准的试制件。北京科技大学的梁江涛^[12]研究了 2000 MPa 级超高强度热成形钢的轧制工艺、退火工艺以及热成形的关键工艺参数,对超高强钢的热成形强韧化机制进行研究。

本文基于汽车后防撞梁外板进行超高强钢热成形工艺的研究,通过数值模拟与零件试制相结合的方法,验证热成形工艺的合理性和有效性,为超高强钢零件热成形工艺的设计提供参考和建议。

1 热成形工艺路线及数值模拟

1.1 热成形工艺路线

本文研究对象为某汽车后防撞梁外板,零件整体尺寸为 1260 mm×135 mm×102 mm,如图 1 所示。零件材料选用 22MnB5 超高强度硼合金钢板,常温下抗拉强度为 450~600 MPa,板料厚度为 1 mm,以满足零件轻量化要求。

根据零件的材料、预期性能及设备要求,初步制定超高强钢热成形工艺路线,如图 2 所示。钢板

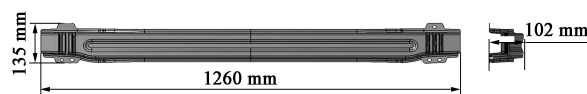


图1 后防撞梁外板三维模型

Fig. 1 3D model for outer panel of rear anti-collision beam

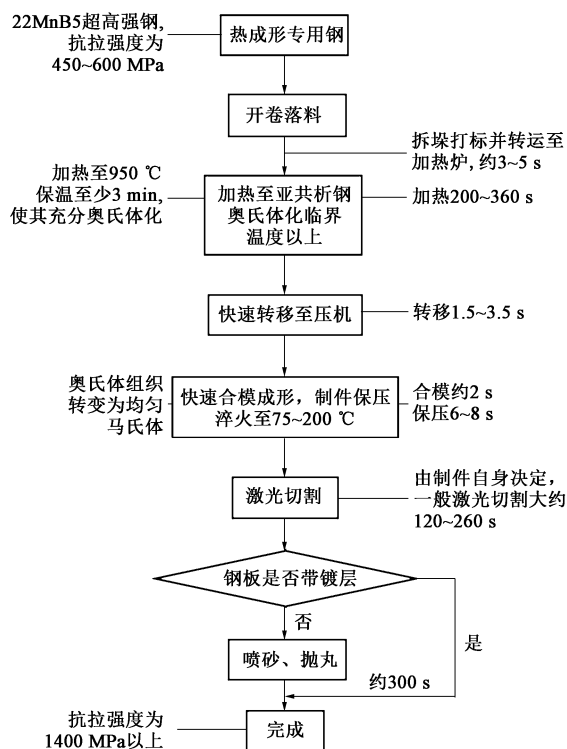


图2 超高强钢热成形工艺路线

Fig. 2 Thermoforming process route of ultra-high strength steel

开卷落料后打标并转运至加热炉, 加热温度需高于亚共析钢奥氏体化临界温度, 使板料充分奥氏体化, 故设置加热温度为 950 °C。加热完成后, 将钢板快速转移至压机冲压位置, 根据初始成形温度对热成形件力学性能的影响, 板料初始成形温度为 750~850 °C 时, 钢板的抗拉强度和硬度会明显提高, 故转移时间应控制在 1.5~3.5 s 内, 以保持板料处于较高温度, 并保证板料温度不低于亚共析钢的冷却上临界点, 防止奥氏体向铁素体的转变。同时, 钢板的热成形也应在亚共析钢冷却上临界点以上的温度进行, 以保证钢板的热成形性, 由于加热后的板料与模具制件接触时会发生热传递, 造成板料冷却不均, 故压机滑块需快速下降以减小板料热量散失, 合模时间控制在 2 s 左右。随后通过模具制件型面内部的冷却管路系统进行保压淬火, 保压时间根据零件形状及冷却速率决定, 冷却时保证板料冷却至马氏体转变起始温度 (约 200 °C) 以下^[13-16]。最后进行激光切割, 若钢板无镀层再进行喷砂和抛丸处理, 制得超高强钢

零件的目标抗拉强度为 1400 MPa 以上。

1.2 有限元模型建立

将零件的三维模型导入成形分析软件中,按照加热→拉延→冷却的顺序设置工艺流程,然后进行零件型面设计。根据零件自身的结构特征,将压料面设置于零件本身凸缘的延伸面上,进行工艺补充,以节省毛坯材料,提高材料利用率,如图 3 所示。

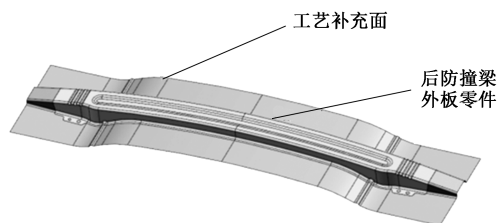


图3 零件型面设计

Fig.3 Profile design of part

进行模具工具体设计,工具体包括上模、下模、压板及定位销^[17]。采用上下模一次成形时,模拟结果显示,零件中间凹陷部位存在严重的减薄现象,故需进行工具体优化设计。在零件中部上方设置压板,采用两步成形的热成形方案,即先成形零件中间凹陷部位,中间部位成形完后再对零件两侧进行成形,如图 4 所示。

明确热成形工艺流程及成形方案后,进行热成形工艺参数设置。根据制定的超高强钢热成形工艺路线以及多次模拟结果的对比,进行热成形工艺参数优化,最终设置加热温度为 950 ℃、冲压速度为 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、料片转移时间为 3 s、冲压前的滑块运动时间为 2 s、保压淬火时间为 10 s、板料摩擦因数为 0.45、压板与上模的间距为 65 mm,进行求解。

1.3 数值模拟结果分析

求解结束后,为保证零件的成形精度,观察拉延过程中板料与模具的最终贴合情况,发现二者贴合情况良好,最大间隙小于 0.300 mm,零件的尺寸精度良好,如图 5 所示。

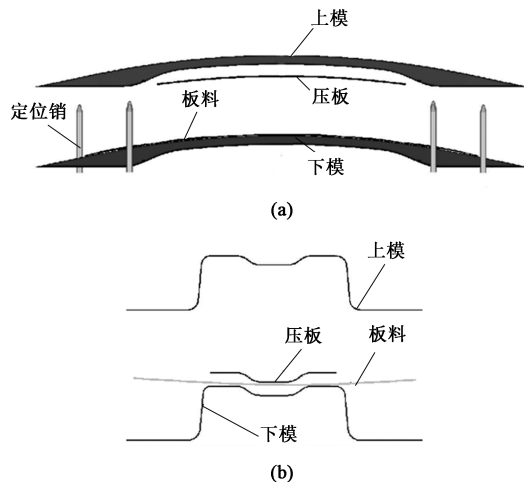


图4 模具工具体设计

(a) 模具工具体 (b) 工具体截面

Fig.4 Design of mold tool bodies

(a) Mold tool bodies (b) Tool body section

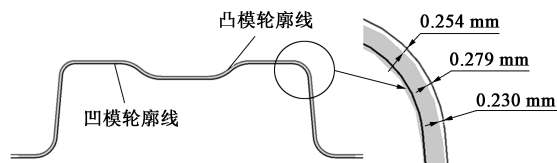


图5 板料与模具贴合情况

Fig.5 Bonding condition between sheet and mold

板料的成形极限图如图 6 所示,由图 6 可知,成形后的板料不存在过度减薄区,但增厚区仍然存在,需对零件的减薄率和起皱等参数进行定量分析。

零件的减薄率分布云图和起皱分布云图如图 7 所示。由图 7 可知,零件的最大减薄率为 12.9%,位于零件法兰边与侧边的过渡圆角处,未出现板料开裂现象;最大起皱为 9.6%,位于零件侧边处,数值较低,无起皱风险。

零件的马氏体转变率分布云图和抗拉强度(数值单位为 MPa)分布云图如图 8 所示。由图 8 可知,

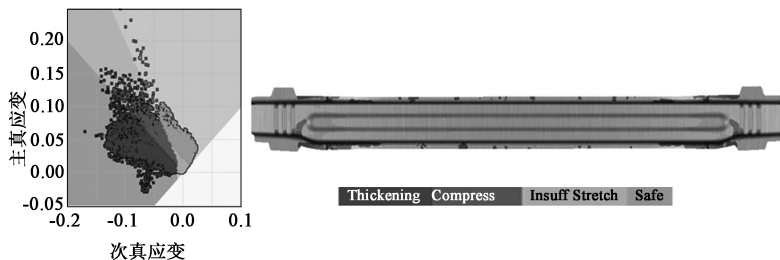


图6 板料的成形极限图

Fig.6 Forming limit diagram of sheet metal

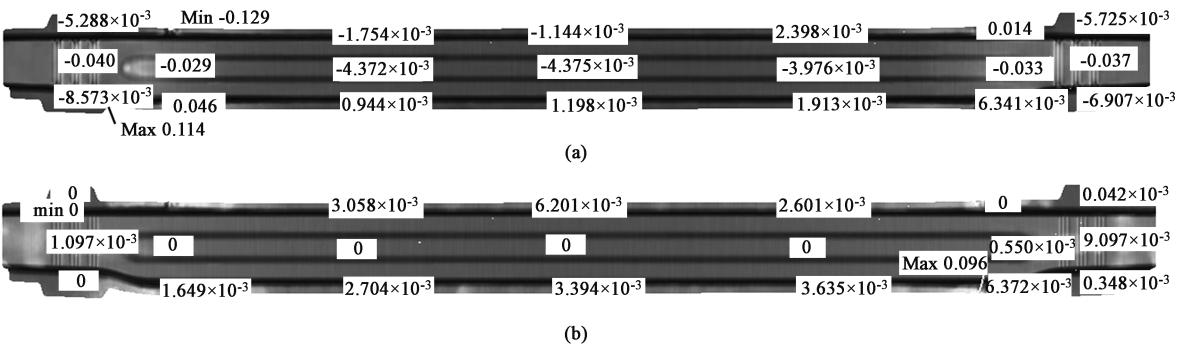


图 7 零件的减薄率和起皱分布云图
(a) 减薄率 (b) 起皱

Fig. 7 Distribution cloud maps of thinning rate and wrinkle for part
(a) Thinning rate (b) Wrinkle

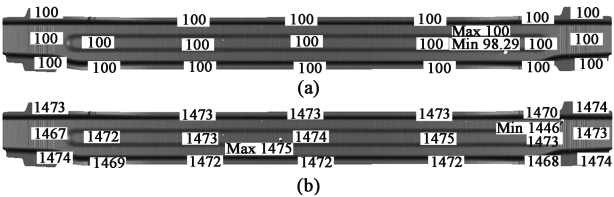


图 8 零件的马氏体转变率 (a) 和抗拉强度 (b) 分布云图
Fig. 8 Distribution cloud maps of martensite conversion rate (a) and tensile strength (b) of part

成形后零件的马氏体转变率平均达到 98% 以上，最低抗拉强度为 1446 MPa，符合 GB/T 36961—2018^[18] 要求。

由数值模拟结果可知，零件模拟成形情况良好，无起皱和开裂缺陷，最大减薄率和起皱均小于 17%，符合主机厂通用要求，零件最低抗拉强度超过 1400 MPa，满足超高强钢抗拉强度要求。

2 零件试制与检测

2.1 后防撞梁外板试制

结合零件的形状和尺寸、制定热成形工艺路线、

数值模拟结果及实际的设备情况，进行热成形模具设计，开展后防撞梁外板的小批量试制，如图 9 所示。

初次试制时，实际生产零件出现的问题及解决方法如下。

(1) 零件表面擦伤严重，尤其是圆角过渡区面破坏严重，导致造型丢失。经检查，造成该问题的原因为：镶块硬度偏低，导致凹模圆角磨损，光洁度差，弯曲毛坯表面质量差（有锈蚀、结疤等）。针对该问题采用的解决方法为：重新对镶块表面进行高频淬火处理，提高镶块硬度，并用油石对磨损面进行打磨修复，提高型面光洁度。问题解决前后成形零件情况如图 10 所示。

(2) 零件型面拉毛，导致零件表面镀层被破坏，厚度不均。经检查，造成该问题的原因为：模具间隙不均，导致边缘位置的间隙太小，制件拉毛严重。针对该问题采用的解决方法为：对拉毛部分的镶块进行研合，并用砂纸和油石对间隙较小的部位进行打磨，保证模具型面间隙的均匀性^[19]。问题解决前后成形零件情况如图 11 所示。

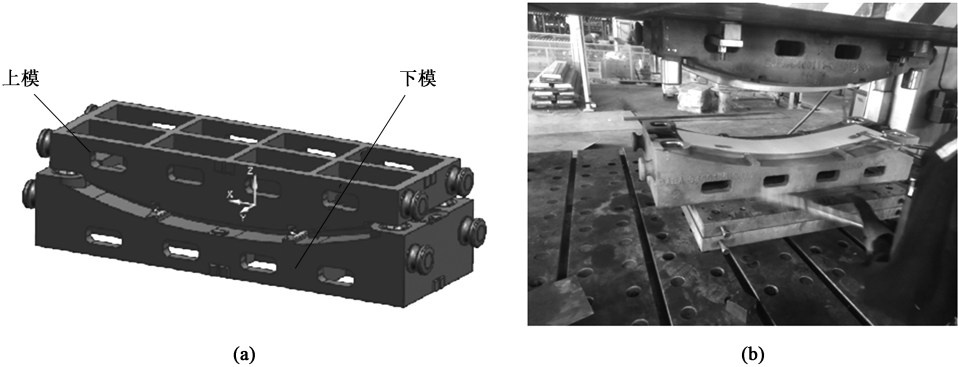


图 9 模具设计 (a) 及零件试制 (b)
Fig. 9 Mold design (a) and part trial production (b)

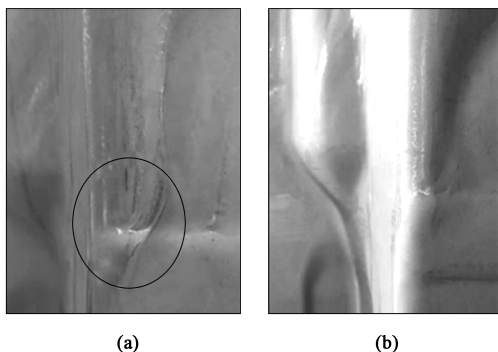


图 10 表面擦伤问题解决前后对比

(a) 零件问题点 (b) 问题解决后的零件表面

Fig. 10 Comparison before and after surface scratches problem solving

(a) Problem point of part (b) Part surface after problem solving

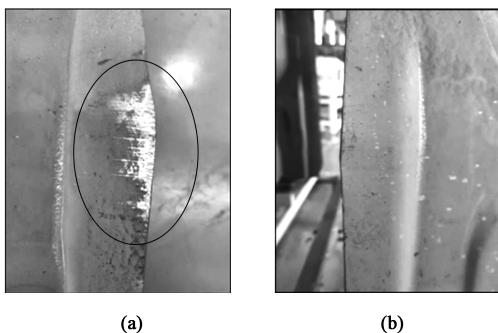


图 11 型面拉毛问题解决前后对比

(a) 零件问题点 (b) 问题解决后的零件表面

Fig. 11 Comparison before and after profile burr problem solving

(a) Problem point of part (b) Part surface after problem solving

表面擦伤和型面拉毛问题解决后, 试制零件表面质量良好, 未出现起皱、开裂、大回弹等缺陷, 如图 12 所示。

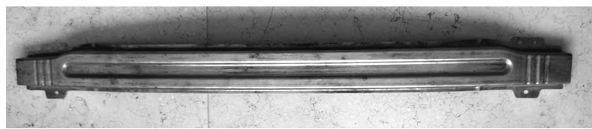


图 12 后防撞梁外板试制零件

Fig. 12 Rear anti-collision beam outer panel trial part

2.2 后防撞梁外板检测

为进一步验证试制零件具备优异的尺寸及力学性能, 对试制成功的后防撞梁外板进行尺寸型面检测和拉伸试验检测。采用三坐标测量仪, 在零件回弹较大的过渡圆角处及重要位置选取 8 个检测点, 如图 13 所示, 测量其 X 、 Y 、 Z 轴 (其中 X 轴平行于零件长度方向, Y 轴垂直于零件长度方向, Z 轴位于零件上表面的法线方向) 上实测坐标值与目标

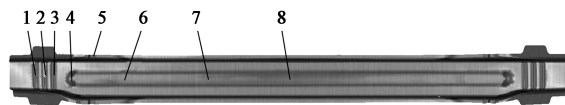


图 13 零件检测点示意图

Fig. 13 Schematic diagram of inspection points of part

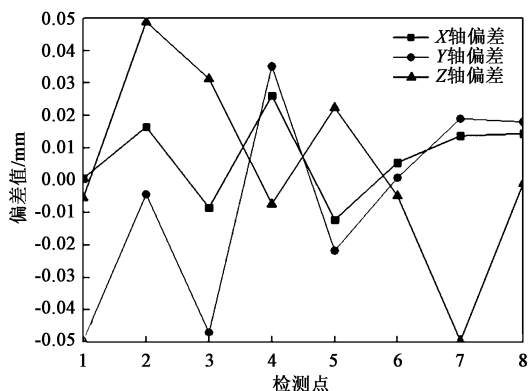


图 14 尺寸型面检测偏差值曲线

Fig. 14 Deviation value curves of dimension profile detection

零件对应位置坐标值的偏差值, 结果如图 14 所示, 检测点的偏差值均在 ± 0.05 mm 内, 均位于零件公差范围内, 尺寸精度高, 符合产品尺寸要求。

从试制零件上切取试样, 进行拉伸试验, 测得试样的抗拉强度和屈服强度值如表 1 所示。由表 1 可知, 试样的抗拉强度实测值均超过 1450 MPa, 平均值为 1455 MPa, 屈服强度实测值均超过 950 MPa, 平均值为 960 MPa, 符合超高强钢零件的强度要求。

表 1 拉伸试验试样的强度 (MPa)

Table 1 Strength of tensile test specimens (MPa)

试样编号	抗拉强度	屈服强度
1	1454	957
2	1458	963
3	1453	960

由检测结果可知, 零件的尺寸精度和力学性能均满足超高强钢零件的生产要求, 验证了采用的超高强钢热成形工艺具备一定的合理性与可行性。

3 结论

(1) 通过制定汽车后防撞梁外板的超高强钢热成形工艺路线, 依据该工艺路线进行有限元数值模拟分析及优化, 获得的成形零件贴模状况良好, 最大起皱和最大减薄率小于 17%, 马氏体转化率高,

零件最低抗拉强度达到 1446 MPa, 符合超高强钢热成形零件的成形要求。

(2) 依据超高强钢热成形工艺路线及数值模拟结果进行后防撞梁外板零件试制, 通过对成形设备进行调试, 解决了实际生产过程中出现的零件表面擦伤、型面拉毛等缺陷, 最终获得了无起皱、开裂、大回弹等缺陷的试制零件。

(3) 对试制成功的后防撞梁外板进行尺寸及力学性能检测, 检测结果表明, 零件各检测点的检测结果与目标零件的偏差值均在 ± 0.05 mm 范围内, 满足零件公差要求, 通过拉伸试验获得的试样抗拉强度均超过 1450 MPa, 屈服强度均超过 950 MPa, 满足超高强钢热成形零件的生产要求。

参考文献:

- [1] 王存宇, 杨洁, 常颖, 等. 先进高强度汽车钢的发展趋势与挑战 [J]. 钢铁, 2019, 54 (2): 1-6.
Wang C Y, Yang J, Chang Y, et al. Development trend and challenge of advanced high strength automobile steels [J]. Iron & Steel, 2019, 54 (2): 1-6.
- [2] 马廷涛, 庄厚川, 金科, 等. 高强钢材料车身轻量化研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2019, (5): 1-5, 11.
Ma T T, Zhuang H C, Jin K, et al. Research on lightweight of high-strength steel body [J]. AT&M, 2019, (5): 1-5, 11.
- [3] 李扬, 刘汉武, 杜云慧, 等. 汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向 [J]. 材料导报, 2011, 25 (13): 101-104, 109.
Li Y, Liu H W, Du Y H, et al. Application and development of AHSS in automobile industry [J]. Materials Review, 2011, (13): 101-104, 109.
- [4] 程威. 车身超高强钢热成形件冲压工艺及模具结构可靠性优化设计研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Cheng W. Research on Process and Structure of Car Body Ultra High Strength Steel Hot-stamped Part and Hot-stamping Die Based on Reliability Optimization Method [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [5] Karbasian H, Tekkaya A E. A review on hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (15): 2103-2118.
- [6] Mori K, Bariani P F, Behrens B A, et al. Hot stamping of ultra-high strength steel parts [J]. CIRP Annals, 2017, 66 (2): 755-777.
- [7] Li N, Lin J, Balint D S, et al. Modelling of austenite formation during heating in boron steel hot stamping processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 394-401.
- [8] Han S, Wang Z, Wang Z, et al. Heat-assisted hole-clinching process for joining magnesium alloy and ultra-high-strength steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115 (1): 551-561.
- [9] Liang J X, Wang Y C, Cheng X W, et al. Microstructure and mechanical properties of a Cr-Ni-W-Mo steel processed by thermo-mechanical controlled processing [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28 (6): 713-721.
- [10] Ghosh S, Miettinen N I, Somani M C, et al. Nanolath martensite-austenite structures engineered through DQ&P processing for developing tough, ultrahigh strength steels [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46 (P6): 2131-2134.
- [11] 胡健, 陈泽中, 刘涛, 等. 车门防撞梁热成形工艺优化仿真与试验 [J]. 中国机械工程, 2021, 32 (1): 92-100.
Hu J, Chen Z Z, Liu T, et al. Simulation and tests on hot forming process optimization for door anti-collision beams [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (1): 92-100.
- [12] 梁江涛. 2000 MPa 级热成形钢的强韧化机制及应用技术研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
Liang J T. Strengthen-toughening Mechanism and Application Technology of 2000 MPa Grade Hot Stamping Steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [13] Billur E, Cetin B, Gurleyik M. New generation advanced high strength steels: Developments, trends and constraints [J]. International Journal of Scientific and Technological Research, 2016, 1 (2): 50-62.
- [14] Lechler J, Merklein M, Geiger M. Determination of thermal and mechanical material properties of ultra-high strength steels for hot stamping [J]. Steel Research International, 2008, 79 (2): 98-104.
- [15] Linke B M, Gerber T, Hatscher A, et al. Impact of Si on microstructure and mechanical properties of 22MnB5 hot stamping steel treated by Quenching & Partitioning (Q&P) [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2018, 49 (1): 54-65.
- [16] 张三, 唐桂华, 沈建冬, 等. 成形温度对镁合金温态渐进成形微观组织及断面形貌的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 84-91.
Zhang S, Tang G H, Shen J D, et al. Effect of forming temperature on microstructure and fracture morphology of magnesium alloy during warm incremental forming [J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28 (3): 84-91.
- [17] 孙浩博, 陈响军, 徐斌, 等. 大型锥形筒件热成形数值模拟与工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 192-201.
Sun H B, Chen X J, Xu B, et al. Numerical simulation and process optimization of hot forming of large conical cylinder [J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28 (5): 192-201.
- [18] GB/T 36961—2018, 超高强钢热冲压工艺通用技术 [S].
GB/T 36961—2018, General technology for hot stamping process of ultra high strength steel [S].
- [19] 刘慎, 吕贻旬, 刘鸿. 高强板结构件拉毛原因分析与解决方法 [J]. 锻造与冲压, 2020, (8): 28-30.
Liu S, Lyu Y X, Liu H. Analysis of the burr during high strength sheet forming [J]. Forging & Metalforming, 2020, (8): 28-30.