

板料成形

某发动机罩外板网孔覆膜结构冲压工艺分析

裴永生^{1,2}, 李亮亮^{1,2}, 李志明³, 刘选太^{1,2}, 赵彩艳^{1,2}

(1. 燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 071000; 2. 燕山大学 河北省特种运载装备重点实验室, 河北 秦皇岛 071000;
3. 河北兴林车身制造集团有限公司 技术中心, 河北 沧州 061000)

摘要: 针对目前汽车发动机罩外板与行人碰撞时会对行人头部造成较大伤害的问题, 分析了某发动机罩外板与行人头部碰撞概率较高的区域, 对其进行了均布网孔设计, 降低了其刚度, 在一定程度上实现了对行人头部的保护。同时, 考虑发动机罩外板外覆盖件密封的需求, 利用橡胶薄膜对开孔部位进行粘贴, 保证其实际使用需求。首先, 利用金属板料拉伸性能试验确定网孔设计的初步方案; 然后, 对原实体板料的冲压模具的模面进行修改, 使带孔板料冲压后产品满足设计要求; 最后, 使用 Autoform 软件进行回弹补偿与迭代优化, 并利用 Think-design 软件对补偿后的工具体模面进行了曲面拟合, 保证了带孔板料冲压后产品满足设计要求, 以及最终产品可以满足其在检测工装上的精度要求。

关键词: 发动机罩外板; 网孔覆膜; 冲压工艺; 回弹补偿; 头部保护

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.006

中图分类号: TG386.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 02-0040-06

Stamping process analysis on mesh coating structure for an engine hood outer plate

Pei Yongsheng^{1,2}, Li Liangliang^{1,2}, Li Zhiming³, Liu Xuantai^{1,2}, Zhao Caiyan^{1,2}

(1. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 071000, China;
2. Hebei Key Laboratory of Special Carrier Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 071000, China;
3. Technology Center, Hebei Xinglin Automobile Body Making Co., Ltd., Cangzhou 061000, China)

Abstract: For the problem that the severe head injuries to the pedestrians are caused by collisions between car engine hood outer plate and pedestrian, the area with high probability of collision between a certain engine hood outer plate and pedestrian head was analyzed, and a uniform distributed mesh design was implemented to reduce its stiffness and achieve the protection for the pedestrian head to a certain extent. At the same time, considering the sealing need for the outer cover of engine hood outer plates, a rubber film was applied to stick the opening parts to ensure their actual usage needs. Firstly, the preliminary scheme for mesh design was established by tensile performance test of sheet metal. Then, the die surface of stamping die for the original solid sheet metal was modified to ensure that the stamped products with perforated sheet metal could meet the design requirements. Finally, software Autoform was used for springback compensation and iterative optimization, and the die surface of compensated tool body was fitted by software Think-design to realize that the stamped products with perforated sheet metal could meet the design requirements and the final product could meet its accuracy requirements on the inspection fixture.

Key words: engine hood outer plate; mesh coating; stamping process; springback compensation; head protection

车身作为汽车的重要组成部分, 在设计阶段需要考虑材料和结构合适性, 并兼顾碰撞安全性, 这对提高整车性能具有重要意义。目前, 针对发动机罩外板对行人头部保护的研究主要集中在材料和结构的设计方面, 实现了与行人头部碰撞时的能量吸收^[1]。但发动机罩外板网孔覆膜结构可以进一步提

升汽车与行人碰撞时对行人头部的保护效果。

网状板结构可以在冲压过程中实现拉伸和变形的分散, 从而降低材料的内部应力和异常变形程度, 提高材料的成形性和可加工性^[2]。此外, 通过覆膜技术对网状板进行处理, 可以实现更特殊的外观设计, 以满足实际生产需求。深入研究网孔覆膜结构的轻量化方法, 对于提高钣金件的成形性能、减少材料消耗具有重要意义。因此, 本文将探索网孔覆膜结构在轻量化设计中的应用潜力, 并提出创新的设计方法, 为钣金制造行业的进一步发展提供理论指导和实践参考。

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: 2024-04-29

作者简介: 裴永生 (1973-), 男, 博士, 副教授

E-mail: 39568353@qq.com

通信作者: 李志明 (1981-), 男, 学士

E-mail: 18534792564@163.com

1 技术路线

以某国产汽车发动机罩外板的冲压加工为例，设计的技术路线如图 1 所示。

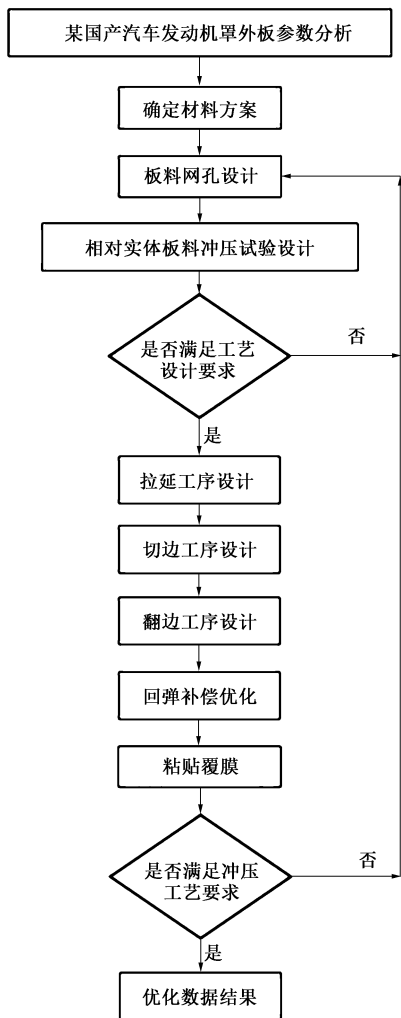


图 1 汽车发动机罩外板冲压工艺技术路线

Fig. 1 Technical route of stamping process for car engine hood outer plate

(1) 材料特性分析：汽车发动机罩外板材料的特性分析包括力学性能、热学性能、耐腐蚀性能等方面的测试和评估。通过文献研究和试验数据，选择合适的材料，可考虑轻质高强度材料，如高强度钢、铝合金等。

(2) 结构设计和优化：基于选定的材料，进行汽车发动机罩外板的网孔覆膜结构设计，通过减少材料使用量、优化材料分布等方式，实现发动机罩外板的轻量化设计。并使用计算机辅助设计软件和仿真工具，进行结构优化和性能评估，需考虑强度、刚度及被动安全等因素^[3]。

(3) 试验验证：对汽车发动机罩外板材料进行试验验证，通过力学性能测试和分析，确定了材料的性能参数。然后进行成形试验，使用冲压、折弯等工艺，制备了轻量化设计的发动机罩外板，测试其成形质量，并对成形工艺进行评估。通过可靠性和稳定性试验，评估和验证了设计方案的可行性和实用性，确定基于网孔覆膜结构的发动机罩外板的性能和可靠性。

通过以上的技术路线和实施方法，可以系统地开展汽车发动机罩外板的轻量化设计工作。结合数值模拟和试验验证，可以获取准确的数据和评估结果，为发动机罩外板的轻量化设计提供可靠的依据。

2 板料网孔与间距的确定

为了确定合理的网孔设计，需要考虑其冲孔后板料的冲压成形性能。因此，可以利用目前已有的 Swift 试验、V 形拉伸试验和 U 形拉伸试验来验证同等条件下板料的加工性能，如图 2~图 4 所示，利用 Autotform 软件进行仿真，以确定最终的网孔设计方案^[4]。网孔的形状、大小及间距需要考虑设计需求与实际加工的可行性。初始确定 6 种方案（板料的长度为 2000 mm，宽度为 1000 mm，厚度为 0.65 mm），见表 1。

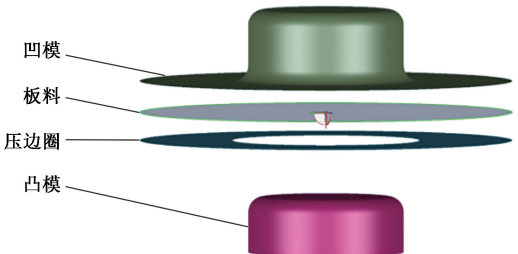


图 2 Swift 试验的仿真模型

Fig. 2 Simulation model for Swift test

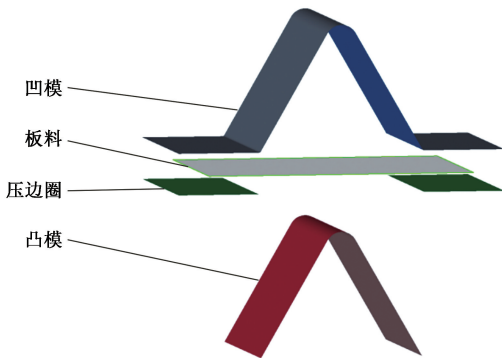


图 3 V 形拉伸试验的仿真模型

Fig. 3 Simulation model for V-shaped stretching test

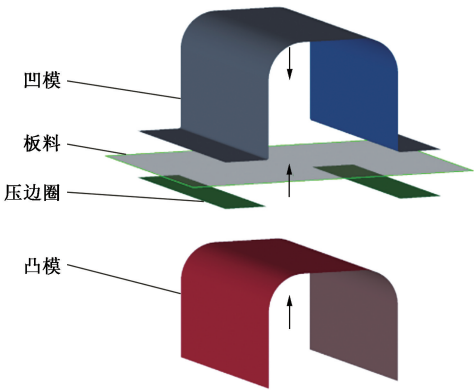


图 4 U 形拉伸试验的仿真模型
Fig. 4 Simulation model for U-shaped stretching test

表 1 板料网孔设计方案
Table 1 Mesh design schemes for plate

| 方案 | 网孔特征参数 | 尺寸/mm | 横向间距/mm | 纵向间距/mm |
|----|--------|-----------|---------|---------|
| 1 | 直径 | $\Phi 20$ | 50 | 50 |
| 2 | | $\Phi 30$ | 50 | 50 |
| 3 | | $\Phi 20$ | 80 | 50 |
| 4 | | $\Phi 20$ | 80 | 80 |
| 5 | 边长（圆角） | 20（R3） | 50 | 50 |
| 6 | | 20（R5） | 80 | 80 |

其中，方案 1~方案 4 为圆形网孔，方案 5~方案 6 为带圆角的正方形网孔。通过目前已有的冲压成形效果试验中，利用同等配置参数在 Autoform 软件中进行冲压仿真，得到初始分析结果，确定初始网孔设计方案。其中，方案 5 的成形性、减薄均匀性和最大失效相对于其他方案，仿真结果最好，可以确定方案 5 的成形结果最好，因此，选定方案 5 为目前最佳方案。

3 发动机罩外板冲压工艺优化

3.1 工艺件参数

首先，根据某国产汽车发动机罩外板的参数进行分析，外板为钢制材料（DC06），其杨氏模量为 210 GPa，密度为 $7.82 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ ，泊松比为 0.3，屈服应力为 168 MPa，外板厚度为 0.65 mm，质量为 $10 \text{ kg}^{[5]}$ 。

3.2 发动机罩外板加工工艺设计

由于本设计采用均布网孔板设计，其轴向受拉，相较于未使用均布网孔设计的实体板更容易失效，

可以进一步减小其阻力值，同时在合适位置设计拉延筋，保证其充分拉伸。考虑水槽两侧需要装配及另外的设计需求，在图 5 所示的区域进行优化设计，在中间位置设计孔洞。进一步，需考虑压边力和冲压速度的调整，优化冲压工艺。

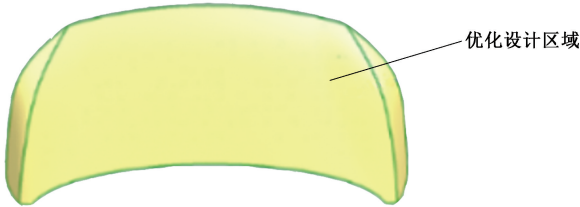


图 5 发动机罩外板优化设计区域
Fig. 5 Optimization design area of engine hood outer plate

如表 2 所示，依据发动机罩外板的试制设计要求进行仿真模拟，分为 TR10、OP20、TR30 和 F40 这 4 道工序，之后按此工艺方案进行回弹补偿仿真^[6]。图 6 为最终的发动机罩外板的成形性分析图，可以发现结果满足设计需求。

表 2 发动机罩外板冲压工艺设计方案
Table 2 Design scheme of stamping process for engine hood outer plate

| 工序 | 内容 |
|------|------|
| TR10 | 料带冲孔 |
| OP20 | 拉延 |
| TR30 | 修边 |
| F40 | 翻边 |

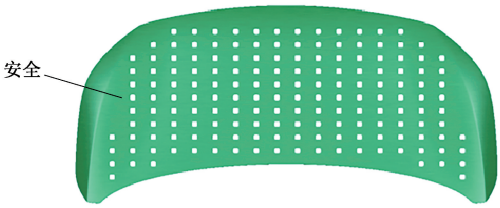


图 6 发动机罩外板的成形效果图
Fig. 6 Forming effect diagram of engine hood outer plate

根据成形极限图（图 7）可以看出，板料在网孔边缘出现应力集中，在受拉后会减少材料流动，这就需要调整其间距和形状，通过增大圆角和减小间距以实现更好的成形效果。网孔由原来的横纵向间距为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 调整为 $50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ，可以实现更好的拉伸效果，满足设计要求。

通过图 7 还可以发现，成形后发动机罩外板的表面无开裂和起皱风险，主应变在 $\pm 3\%$ 之外，变形

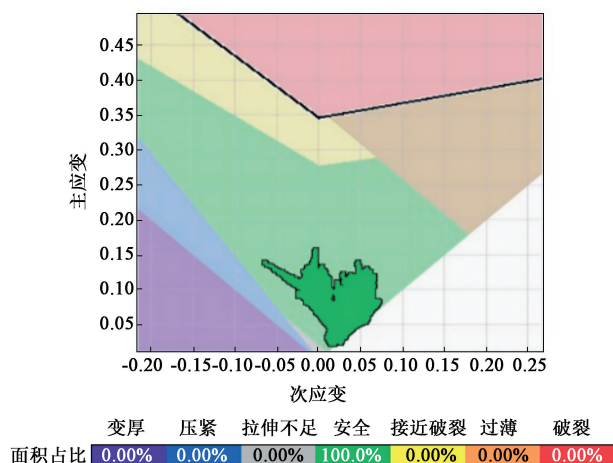


图7 发动机罩外板的成形极限图

Fig. 7 Forming limit diagram for engine hood outer plate

充分。其最小减薄率大于-3%，满足外板类减薄率的设计要求^[7]。

4 回弹补偿方案

一般来说，模具的回弹补偿是一个迭代的过程，如式(1)所示。

$$C^i = C^{i-1} + \alpha(S^{i-1} - F) \quad (1)$$

式中： C^i 为第*i*次的补偿型面， $i \in \mathbf{N}^+$ （正整数集），根据经验值可知，一般自动回弹补偿次数不超过4次，故本文中 $i \leq 4$ ； C^{i-1} 为第(*i*-1)次的补偿型面； S^{i-1} 为第(*i*-1)次回弹后的零件型面； F 为产品的设计型面； α 为回弹补偿系数，用于调整模具设计时，针对材料成形过程中的回弹量进行补偿的一个参数。

回弹补偿系数 α 的值决定了模具型面相对于实际产品尺寸的偏置量。回弹补偿系数即为补偿量与实际仿真回弹量的比值，通过调整补偿系数可以减少回弹补偿的次数，实现更快满足补偿精度的需求^[8]。

最理想的结果是经过一次回弹补偿后便可得到符合要求的零件形状，而对于复杂的零件，往往需要进行多次迭代，但是产生的迭代误差在进行多次迭代并累积之后可能会导致回弹后的零件表面不光滑，零件形状与产品形状也会有所差异，因此，需要尽量减少迭代次数，在尽可能少的迭代次数之内得到符合要求的零件^[9]。通过观察式(1)可知，通过调整回弹补偿系数的值可以使得补偿量的大小与板件回弹量的大小相当，从而使回弹后的形状满足要求。

对于复杂的三维板料成形，可以通过简单板料

回弹补偿系数的计算公式(式(1))，分析截面的回弹补偿系数及其影响因素，为三维零件的整体回弹系数的确定提供一定的理论依据。为此，设计了如图8所示的回弹补偿方案，其中，在TR10冲孔工序、OP20拉延工序、TR30修边工序和F40翻边整形工序分别进行一次自由回弹检查，计算经4道工序加工后的样件相对于目标样件的自由回弹尺寸偏差(M50)，并结合式(1)计算回弹量，进行回弹补偿，共进行3次回弹补偿，最终使样件在自由回弹后达到预期尺寸位置。如图9所示，将补偿区域分为固定区、过渡区和补偿区，将原始工艺件的工艺补充面设为固定区，将最终工件的目标区域作为补偿区，将其工艺补充面作为过渡区，这样可以实现更为精确的控制和快速补偿^[6]。

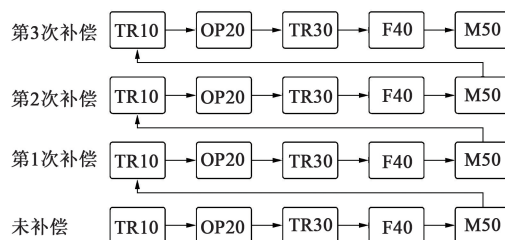


图8 回弹补偿方案

Fig. 8 Springback compensation scheme

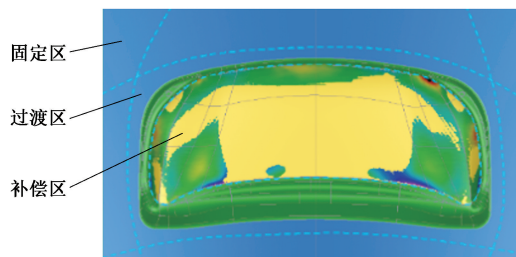


图9 工具体的回弹补偿设置

Fig. 9 Springback compensation setting of tools

如图10所示，迭代补偿后，可以将发动机罩外板的外表面最大回弹量控制在 ± 0.5 mm之内，实现了更好的成形效果，满足设计要求^[10]。

相较于实体板料，通过此均布网孔板设计方案成形的发动机罩外板的整体回弹效果会进一步减小，在成形效果上，其实际的板料在型面成形效果上也有一定的提升。

目前，可以利用 Think-design 设计完成回弹补偿，并将结果应用至设计数模，优化工序 D20 工具体的工艺面设计，即凸模、凹模和压边圈回弹后的方案导出至实体模型图。相较于原实体板料，本研究设计的均布网孔板的整体回弹减小，且型面成形

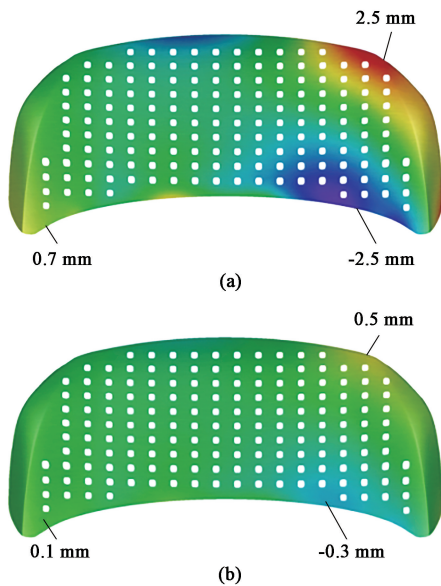


图 10 回弹补偿前后发动机罩外板的外表面回弹量
(a) 补偿前 (b) 补偿后

Fig. 10 Springback amounts of engine hood outer plate before and after springback compensation

(a) Before compensation (b) After compensation

效果也得到提升。

5 实际冲压试验

通过实际冲压试验得到样件, 见图 11, 发现其表面未出现明显划伤及褶皱。在对其覆膜后, 可以满足实际的车身外覆盖件工艺要求。这不仅满足了车辆最后的实际需求, 还实现了轻量化和对行人头部的保护作用。

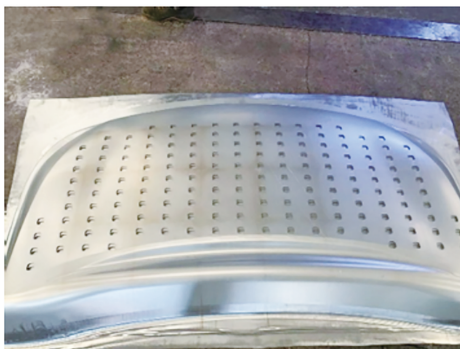


图 11 样品照片

Fig. 11 Photo of sample

一般而言, 行人的头部损伤通常源于其与汽车发动机罩外板或挡风玻璃的碰撞, 这种碰撞往往导致头皮损伤、颅骨骨折和颅脑损伤等常见损害。头部加速度成为评估人体头部损伤的主要参考指标之

一。损伤的限值主要参考韦恩州耐冲击曲线 (Wayne State Tolerance Curve, WSTC), 其中加速度的大小和作用时间均会影响行人头部损伤的程度^[8]。为了量化仿真模型中头部损伤的程度, 并确保绘制的 WSTC 适用于各种头部加速度波形, 对 WSTC 进行改进。引入头部损伤指标 HIC (Head Injury Criterion), 即头部损伤准则, 其计算公式见式 (2)。

$$HIC = \max \left[\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{\text{head}} dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right] \quad (2)$$

式中: t 为时间; t_1 为碰撞过程中的初始时刻; t_2 为相对于 t_1 时刻 HIC 达到最大值的时刻; a_{head} 为头部合成加速度。

参照碰撞安全相关标准即 C-NCAP 测评规则^[11], 一般来讲, 要求头部 3 ms 合成加速度 $\leq 80g$ (g 为重力加速度), $HIC \leq 1000$ 。

行人头部的损伤程度受到多个因素的综合影响, 包括碰撞速度、碰撞角度、碰撞位置、车辆前端高度、发动机罩倾角、风挡玻璃倾角、保险杠高度、保险杠伸出量、行人体重、车头长度以及行人身高等^[12]。值得注意的是, 碰撞速度和碰撞位置对头部损伤的影响尤为显著。为了最大程度减小头部损伤, 研发主动式发动机罩成为一种缓冲头部冲击的可行手段。因此, 本研究采用了基于头部碰撞区域的均布网孔设计, 通过降低发动机罩外板的局部刚度以更好地吸收行人头部碰撞时的冲击能量, 满足对行人头部的保护需求。最终验证结果表明, 该设计在一定程度上能够有效地保护行人头部。

相较于原始板料的孔洞, 本研究设计的孔板在发生碰撞时可以实现一定程度的形变, 这种形变可以弱化孔板的局部刚度, 以满足对行人头部的保护要求。

6 结论与展望

(1) 通过均布网孔板的设计, 实现了汽车发动机罩外板的轻量化设计。并通过优化设计和结构模拟分析, 创新设计发动机罩外板的网孔覆膜结构。该结构综合考虑了轻量化和强度要求, 实现在保持结构强度的同时减轻整体重量。

(2) 具有网孔结构的钣金冲压件比较柔韧, 可以实现降低刚度的设计要求。通过合理设计和布置这些网孔结构, 实现对行人碰撞时能量的吸收和分

散,可以有效减少碰撞时对行人头部的冲击力,提高整车的被动安全性能。

(3) 通过研究和分析冲压工艺,可以优化发动机罩外板的结构设计,提高材料的成形性能和可加工性,冲孔技术改进和回弹预测方法可以减少冲压过程中的缺陷和回弹变形。此外,覆膜技术的应用可以实现更合理和特殊的外观设计,满足实际生产需求。

(4) 通过本论文的研究,期望为钣金制造技术的进步和汽车工业的可持续发展贡献力量。在未来,将进一步深入探索发动机罩外板网孔覆膜结构的设计方法,为提高钣金件的成形性能、减少材料消耗和满足设计要求提供理论支持和实践参考。同时,通过创新设计方法的不断完善,努力适应汽车工业未来发展的多样化需求。

参考文献:

- [1] 钟佳彬. 基于行人头部保护与轻量化设计的汽车发动机罩系统优化研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Zhong J B. Research on Optimization of Automotive Hood System Based on Pedestrian Head Protection and Lightweight Design [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [2] Hamada S, Zhang J W, Zhang K J, et al. Ductile-to-brittle transition in tensile failure due to shear-affected zone with a stress-concentration source: A comparative study on punched-plate tensile-failure characteristics of precipitation-hardened and dual-phase steels [J]. International Journal of Fracture, 2018, 212: 237-248.
- [3] 王立新, 袁峰. 汽车发动机轻量化解决方案研究 [J]. 中国汽车, 2022 (3): 4-10.
- Wang L X, Yuan F. Study on automobile engine lightweight solution [J]. China Auto, 2022 (3): 4-10.
- [4] 谢延敏, 刘光帅, 何朝明. 冲压成形工艺参数优化设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- Xie Y M, Liu G S, He C M. Stamping Forming Process Parameter Optimization Design Graduate Teaching Book [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [5] 王腾, 唐荣, 刁建兵. 某车型侧围外板 DC06+ZE 切换 CR5-UC 后模具调试 [J]. 锻造与冲压, 2022 (16): 62-64.
- Wang T, Tang R, Diao J B. Debugging of the die when changing from DC06+ZE to CR5-UC of the side outer panel of a vehicle [J]. Forging & Metalforming, 2022 (16): 62-64.
- [6] 冉奥阳, 龚熙, 王大鹏, 等. 基于 Autoform 的机罩内板稳健性工艺优化与回弹补偿 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (6): 61-68.
- Ran A Y, Gong X, Wang D P, et al. Robustness process optimi-

zation and springback compensation of hood inner plate based on Autoform [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6): 61-68.

- [7] 蒋磊, 王龙, 谢蛟龙, 等. 发动机盖外板全工序成形仿真及回弹补偿研究 [J]. 汽车工程师, 2021 (7): 18-22.
- Jiang L, Wang L, Xie J L, et al. Research on full process stamping simulation and springback compensation for automotive hood outer [J]. Automotive Engineer, 2021 (7): 18-22.
- [8] 段锦程. 汽车发动机罩的轻量化设计 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.
- Duan J C. Lightweight Design of Automobile Engine Hood [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2021.
- [9] 武永强, 庄琰, 刘满莉. 车辆与行人碰撞试验工况中行人保护研究 [J]. 中国汽车, 2023 (2): 56-63.
- Wu Y Q, Zhuang Y, Liu M L. Research on pedestrian protection based on vehicle-pedestrian crash test [J]. China Auto, 2023 (2): 56-63.
- [10] 刘晓立, 张建邦, 黄素霞, 等. 超高强度钢辊压成形中预冲孔对回弹影响的实验与数值预测 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 71-81.
- Liu X L, Zhang J B, Huang S X, et al. Experimental and numerical prediction on influence of pre-punched hole on springback in roll forming for ultra-high strength steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 71-81.
- [11] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP 管理规则 (2024 年版) [EB/OL]. <https://www.c-ncap.org.cn/article-detail/1747900203303780353>, 2024-07-01.
- China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd. C-NCAP management rules (2024 edition) [EB/OL]. <https://www.c-ncap.org.cn/article-detail/1747900203303780353>, 2024-07-01.
- [12] 吕孟宽, 杨欣, 许述财, 等. 儿童安全座椅侧面碰撞头部保护研究 [J]. 汽车工程, 2021, 43 (9): 1360-1366.
- Lyu M K, Yang X, Xu S C, et al. Research on head protection of child on safety seat in side collision [J]. Automotive Engineering, 2021, 43 (9): 1360-1366.

更 正

《锻压技术》2024 年第 49 卷第 12 期: “奥氏体不锈钢超低温变形诱导强化机制” 一文中 (页码为 208-216) 文章标题“奥氏体不锈钢超低温变形诱导强化机制”修改为“奥氏体不锈钢超低温变形诱导强化机制的研究进展”。

《锻压技术》编辑部