

基于 S 型皮卡纵梁起皱扭曲回弹的工艺优化及模具设计

支明远, 刘振兴, 艾卫东, 胡小军

(江铃汽车股份有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 重点围绕 S 型皮卡纵梁的起皱、扭曲、回弹难点, 进行前期制件分析, 并结合冲压 CAE 仿真分析, 从材料优化、采用压料翻边一次成形、压料翻边空开设计、过弯成形、采用合理的成形凸凹模间隙以及设计弹性感应检测器和浮料顶升 6 个方面进行解决。研究表明: 采用压料翻边一次成形工艺可以很好地控制成形过程中的材料流动, 产品不再起皱和扭曲。同时采取过弯成形, 可减少成形过程中的回弹量。在模具设计方面, 对压边进行空开设计可避免顶坏产品; 设计合理的凸凹模间隙不仅可以提高镶块的使用寿命, 也可对产品回弹做进一步控制。该工艺实践结果良好, 满足预期要求, 不仅提高了产品质量, 也降低了生产成本。

关键词: 皮卡纵梁; 压料翻边; 过弯成形; 空开设计; 感应检测

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.027

中图分类号: TG306; U266

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0210-06

Process optimization and die design based on wrinkling, twisting and springback of S-shape pickup longitudinal beam

Zhi Mingyuan, Liu Zhenxing, Ai Weidong, Hu Xiaojun

(JMC Motor Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: Focusing on the difficulties of wrinkling, twisting and springback for S-shape pickup longitudinal beam, preliminary part analysis was conducted, and combining with CAE simulation analysis of stamping, the problems were solved from six aspects, namely, material optimization, one-time forming of pressing and flanging, open design in pressing and flanging, over bending, using reasonable forming clearance between punch and die, and designing elastic sensing detection and float lifting. The results show that the one-time forming process of pressing and flanging effectively controls the material flow during the forming process, and the product does no longer wrinkles or twists. Simultaneously, over bending reduces the springback amount during the forming process. In terms of die design, open design in pressing avoids damaging the product, and designing a reasonable clearance between punch and die not only improves the service life of insert, but also further controls the springback of product. The practical results of this process are good and meet the expected requirements, which not only improves the product quality but also reduces the production costs.

Key words: pickup longitudinal beam; pressing and flanging; over bending; open design; inductive detection

皮卡纵梁由于要起到承载作用, 所以板材相对较厚, 同时纵梁长度长、质量重, 形状为 S 形、截面为 U 形。正因为纵梁质量重, 其也成为了实现车辆轻量化的关键。近年来, 各大车企均致力于提高板材强度、实现整车减重, 不仅可以降低原材料成本, 对整车的节能降耗也有很大的促进作用。但是, 纵梁强度越高, 材料的成形性能越低, 带来的扭曲回弹也会越大^[1-2]。本文基于纵梁的起皱、扭曲、回弹控制问题, 进行某款车型皮卡纵梁的工艺开发

及模具设计, 并从成本控制方面创新纵梁工艺及模具设计, 从而实现低成本投入、高性价比的纵梁产品。

1 皮卡纵梁制件分析

皮卡纵梁长度方向类似 S 形、截面呈 U 形, 具有多孔、前后高度存在落差、变截面和高强度等特点, 属长骨架类结构件。在长度方向上有明显的不对称弯曲, 且在纵梁左端存在两组不同拐角, 纵梁长度为 1627 mm, 前后端落差为 138 mm, 局部还存在加强筋、冲孔、翻孔、侧修、修端头等特征 (图 1, h1~h34 为孔编号)。为实现车辆轻量化, 本文

收稿日期: 2023-08-18; 修订日期: 2023-11-23

作者简介: 支明远 (1977-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: mzhi@jmc.com.cn

纵梁采用了更高强度的 QStE420TM 钢, 相对传统皮卡纵梁 B420L 牌号材料, 抗拉强度提高了 12%, 具体的材料性能参数见表 1, 其中 D 为弯曲压头直径, a 为试样厚度, L_0 为试样初始长度, b 为试样宽度, S_0 为试样初始横截面积, 公称厚度小于 3.0 mm 时, $L_0 = 80\text{ mm}$, $b = 20\text{ mm}$, 公称厚度大于或等于 3.0 mm 时, $L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$ 。根据载荷的不同, 前后

段设计为不同料厚, 前段内外板的厚度为 2.6 mm, 后段内板的厚度为 2.3 mm, 后段第 1 段外板的厚度为 2.5 mm, 后段第 2 段外板的厚度为 2.3 mm。相比传统纵梁厚度, 板材厚度平均可减少 0.6 mm, 不仅可以减小整车重量、实现整车节能降耗、提高整车性价比, 同时也可以大大减少原材料的使用成本。

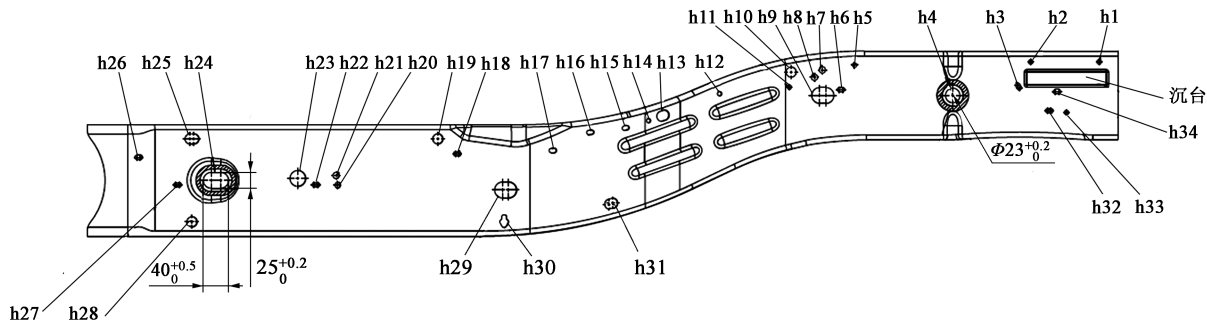


图 1 某纵梁前段外板部分示意图
Fig. 1 Schematic diagram of front outer plate part for a certain longitudinal beam

表 1 材料性能参数
Table 1 Material performance parameters

牌 号	拉伸试验		断后伸长率/%		180°弯曲试验
	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	公称厚度/mm		
			<3.0	≥3.0	
B420L	≥305	420~520	≥20	≥25	$D=0.5a$
QStE420TM	≥420	480~620	≥16	≥21	

2 创新纵梁成形工艺与优化模具设计

由于传统工艺成形纵梁存在起皱、扭曲、回弹缺陷, 不仅影响了热扩散法碳化物覆层处理 (Thermal Diffusion Carbide Coating Process, 简称 TD) 镶块的使用寿命, 影响了生产效率, 同时由于聚料也影响了纵梁此区域的开口尺寸, 直接影响纵梁内外板的合扣, 导致纵梁装配困难。且纵梁总成均为满焊, 采用机器人进行焊接, 开口尺寸不稳定会造成偏弧, 形成烧缺、烧穿等焊接缺陷, 导致生产效率低下, 造成人工成本、能耗成本、原材料使用成本、模具投入成本及模具维护成本等的增加, 因此, 需创新纵梁成形工艺, 并优化模具设计^[3-5]。

2.1 采用压料翻边一次成形

纵梁传统成形工艺为预成形+翻边成形, 预成形是先成形底部 R 角型面, 然后再翻边成形, 此翻边成形工艺不进行压料, 最大的缺陷为产品放边段成形过程

中易聚料起皱、拉伤、扭曲回弹、成形不稳定。成形起皱会造成凹模镶块 TD 层损坏, 不仅影响产品质量, 也影响生产效率, 导致能耗成本、人工成本及模具维护成本过高^[6-7]。为了彻底解决上述问题, 此款皮卡纵梁采用全新工艺, 取消传统工艺中的预成形, 采用压料翻边一次成形, 成形工艺模型见图 2。通过 Autoform 分析可知, 由于是厚板, 表面质量低, 相应的摩擦因数较大, 摩擦因数设定为 0.15。两种工艺的 CAE 分析结果如图 3 和图 4 所示, 通过 CAE 分析结果可知, 压料成形可以很好地对走料进行控制, 不会导致聚料起皱。此外,

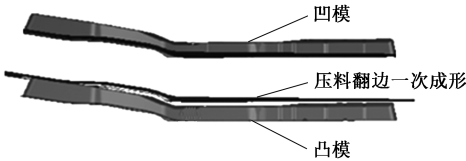


图 2 压料翻边一次成形模型
Fig. 2 One-time forming model of pressing and flanging

最大回弹仅有 2.575 mm，压料翻边一次成形很稳定（图 5）。这样既可以确保纵梁成形开口稳定，也可以彻底解决纵梁 S 拐角放边段聚料起皱拉伤的问题。但是，压料翻边一次成形的缺陷为在纵梁翻边根部出现卷边，而这个卷边缺陷通过侧整难以消除，卷边缺陷形成的机理见图 6，因此，必须要在压料翻边一次成形过程中考虑如何消除卷边。

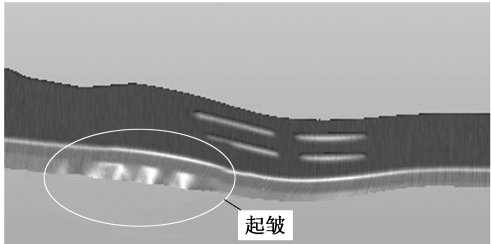


图 3 传统工艺中放边段起皱
Fig. 3 Wrinkles of section in traditional process

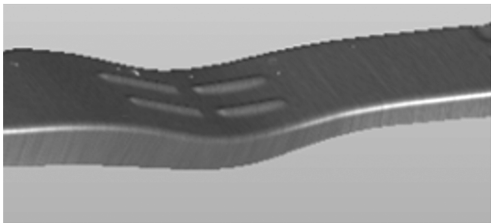


图 4 压料翻边一次成形工艺中放边段不皱
Fig. 4 No wrinkles in one-time forming process of pressing and flanging

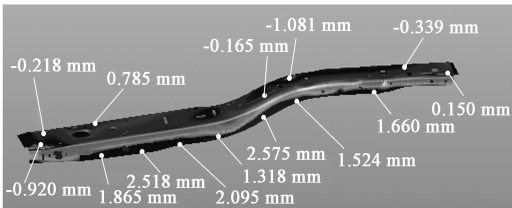


图 5 压料翻边一次成形工艺回弹结果
Fig. 5 Springback result in one-time forming process of pressing and flanging

2.2 优化纵梁成形模具

2.2.1 压料翻边成形空开设计消除卷边

针对压料翻边一次成形中产生的卷边缺陷，采取在压料翻边一次成形工序对压边进行空开的解决方法，见图 7，空开间隙单边定为 10 mm，则纵梁侧壁翻边根部不会出现卷边。同时，纵梁成形后侧壁会有一定的回弹，空开间隙较大时（10 mm），不会导致成形完成后顶坏产品的现象出现。此外，纵梁为窄长型的 S 形件，且截面呈 U 形，在确保压边不聚料的情况下，适当放大压料空开间隙，不会发生出料干涉，可以确保机器人顺利取料。

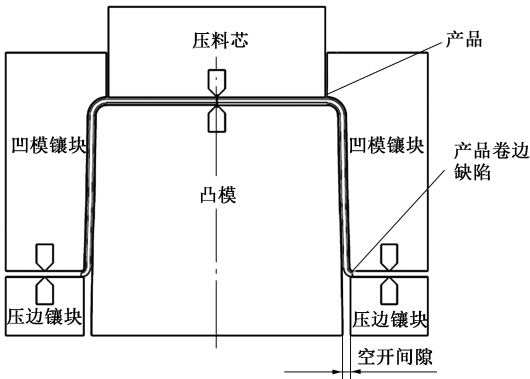


图 6 压料翻边一次成形工艺中卷边缺陷形成机理
Fig. 6 Formation mechanism of curling defect in one-time forming process of pressing and flanging



图 7 压料翻边成形空开设计
Fig. 7 Open design in pressing and flanging

2.2.2 压料翻边采取过弯成形设计

针对纵梁大弯曲半径成形且回弹量较大的特点，采用过弯法对纵梁进行回弹控制。过弯法是使纵梁在弯曲过程中产生过量弯曲，使弯曲区域进行充分的塑性变形，依据回弹规律，使纵梁卸载后的形状与期望形状相符的一种过弯回弹补偿方法^[8-9]。如纵梁前段外板侧壁的翻边高度为 37.8550 mm（图 8），从理论上讲，只要凹模翻下去 37.8550 mm 即可。压料翻边一次成形工艺参数见表 2，通过 CAE 模拟分析可知，过弯成形至 65 mm，见图 9。压料翻边

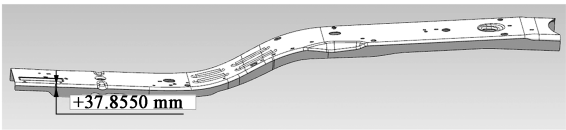


图 8 纵梁前段外板侧壁翻边高度
Fig. 8 Flange height of sidewall of front outer plate for longitudinal beam

表 2 压料翻边一次成形工艺参数
Table 2 Process parameters in one-time forming process of pressing and flanging

参数	压边行程/ mm	成形速度/ (次·min ⁻¹)	摩擦 因数	压边力/ kN	模具单边间隙与 料厚比
数值	65	16	0.15	300	1.05

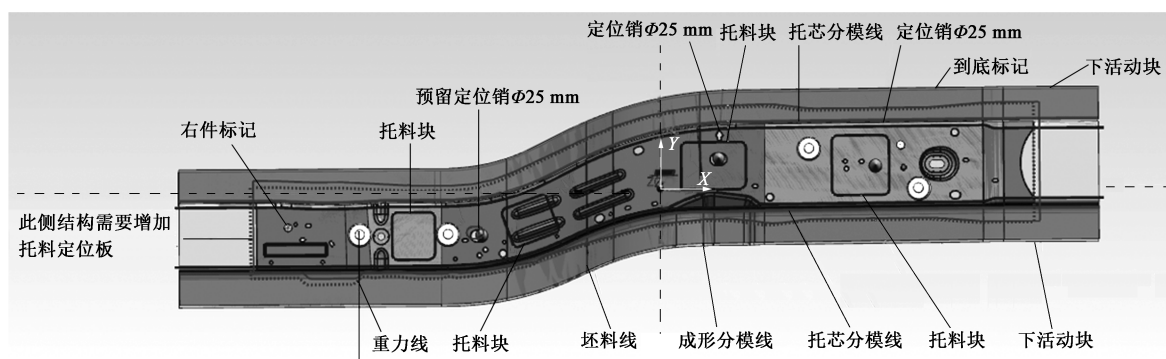


图 9 模具过弯成形设计

Fig. 9 Overbending design of die

采取过弯成形有两个好处：(1) 可以很好地控制纵梁的回弹；(2) 可以进一步减小由于压料翻边带来的卷边影响。

2.2.3 翻边成形设计合理的凸凹模间隙

凸凹模间隙是高强度钢板成形中需要考虑的一个重要因素，它影响着板料与模具的接触状态，可以控制板料的流动状态。凸凹模间隙的设置较小时，能增加侧面凸、凹模对板料的侧向压力，增加塑性变形的区域，对回弹的控制比较有利；但当凸凹模间隙小于一个材料厚度时，模具和板料的摩擦力会比较大，同时发生挤压变形，对模具和板材的表面质量均有较大影响，镶块 TD 层易损坏，模具的使用寿命会大大降低^[10-11]。根据工程应用中的凸凹模间隙，取凸凹模间隙值为 $0.95t$ 、 $1.00t$ 、 $1.05t$ 、 $1.10t$ 、 $1.15t$ 和 $1.20t$ (t 为板料厚度) 进行分析，不设拉延筋，其回弹结果如图 10 所示。随着凸凹模间隙的增加，回弹值为先减小后增大的趋势，凸凹模间隙设计为 $1.05t$ 时，回弹量最小。

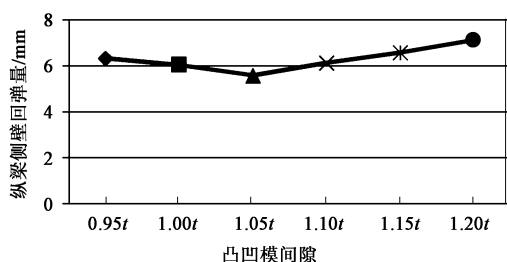


图 10 侧壁回弹分析结果

Fig. 10 Analysis results of springback for side edges

2.2.4 设计更稳定的感应检测及更优的浮料顶升

纵梁冲压自动化生产过程中，因制件细长，容易出现制件定位稳定性差、传感器不能稳定感应制件、制件卡在下模及废料排出困难等问题。这些问题严重制约生产，因此，在模具设计过程中

必须做好充分的考虑和评估。本文通过设计感应检测器的浮动机构、定位活动机构及顶升块来解决此类问题，见图 11。

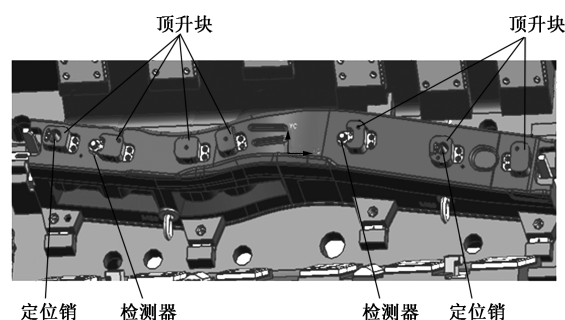


图 11 纵梁顶升块、定位及感应检测设计

Fig. 11 Design of longitudinal beam lifting block, positioning and inductive detection

顶升块应尽量居中且尽量多地布置，以确保力量均衡，顶升块的行程设计也是关键，需确保顶出整个型面。纵梁前段外板的翻边高度为 37.8550 mm ，氮气缸的顶升行程即需设计为 37.8550 mm ，确保产品 U 形侧壁全部脱离。每个氮气缸为 320 kg 的顶升力，顶升块上下活动，为了确保生产过程中顶升块不拉伤（一旦拉伤会导致顶不起料），对所有顶升块导向部分的光洁度进行提高，同时进行物理气相沉积处理（Physical Vapor Deposition, PVD）以提高表面硬度，PVD 处理温度较低，在提高表面硬度的情况下不会影响基体硬度，且 PVD 处理后也不会产生变形。由于纵梁成形力比较大，定位销在成形过程中易拉伤，一旦定位销拉伤就会拉孔，为避免拉孔问题，也需对所有成形定位销进行 PVD 处理。纵梁板材的强度高、窄长并呈 S 形，成形过程中出现扭曲翘变是很难避免的，因此，感应检测器设计为弹性感应检测器，以确保生产过程中板料检测稳定^[12-13]。

3 实施效果

压料翻边一次成形可以很好地对走料进行控制, 成形更稳定, 不仅可以彻底解决纵梁 S 拐角放边段聚料起皱及成形扭曲回弹的问题, 且过弯成形也进一步确保了纵梁成形开口尺寸的稳定性, 产品尺寸相对之前 (预成形+翻边成形) 的设计也有了明显改善, 见图 12 和图 13。在提升产品尺寸合格率的同时, 也彻底解决了纵梁成形放边段因为聚料起皱带来的镶块 TD 层磨损导致产品拉伤的问题, 见图 14。

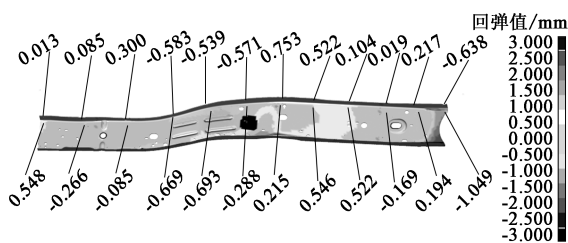


图 12 改善前 (预成形+翻边成形) 纵梁实物回弹值

Fig. 12 Springback values of physical longitudinal beam before improvement (Preforming+flanging)

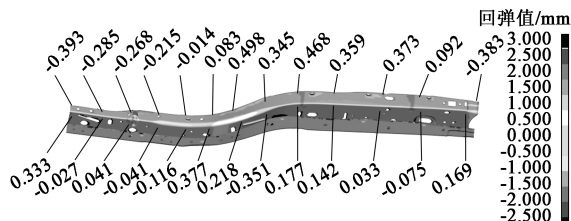


图 13 改善后 (压料翻边一次成形) 纵梁实物回弹值

Fig. 13 Springback values of physical longitudinal beam after improvement (One-time forming of pressing and flanging)

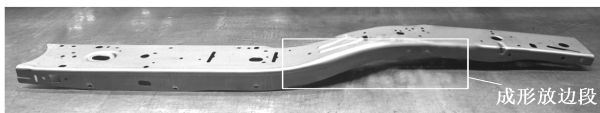


图 14 纵梁成形放边段无起皱拉伤

Fig. 14 No wrinkle or injury in longitudinal beam forming section

4 结语

压料翻边一次成形工艺相对传统工艺, 节省了一道工序, 不仅提高了产品质量及生产效率, 也可以大大降低前期模具投入成本, 降低生产中的能耗

成本、人工成本及模具维护成本; 同时启用更高强度的钢, 实现车辆轻量化, 可进一步降低整车能耗, 也可以大大降低原材料成本。上述纵梁新工艺及其关键技术已在某款皮卡纵梁上做了成功应用, 每年可为企业节省约一千万元的生产成本, 在汽车市场竞争日益激烈的今天, 只有不断降低生产成本才能为企业创造出更大的利润, 也只有这样才能在激烈的车企竞争中赢得发展。

参考文献:

- [1] 唐敏, 许素强, 李乐, 等. CAE 在纵梁模具开发中的应用 [J]. 金属加工: 冷加工, 2022, (12): 70-72.
Tang M, Xu S Q, Li L, et al. Application of CAE in the development of longitudinal beam die [J]. Metal Working: Metal Cutting, 2022, (12): 70-72.
- [2] Wang D F, Li S H. Material selection decision-making method for multi-material lightweight automotive body driven by performance [J]. Journal Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2022, 236 (4): 30-746.
- [3] 孙占坤, 李涛. 中厚板 U 形冲压成形有限元模拟分析及回弹预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 81-88.
Sun Z K, Li T. Simulation analysis and springback prediction on U-shaped stamping of medium-thickness plate based on finite element simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 81-88.
- [4] 魏东, 王平科, 赵彦博, 等. 关于纵梁腹面翘曲问题的研究 [J]. 模具工业, 2023, 49 (1): 20-22.
Wei D, Wang P K, Zhao Y B, et al. Research on the warping problem of side member [J]. Die & Mould Industry, 2023, 49 (1): 20-22.
- [5] Wu Y J, Luo A H, Wang C L. Experimental research and application of cold cutting to hot stamping parts based on multiphase microstructure [J]. Baosteel Technical Research, 2023, 17 (3): 1-8.
- [6] 刘智彬, 彭金明, 李海全, 等. QStE650TM 高强钢的变截面纵梁冲压可行性研究 [J]. 模具工业, 2023, 49 (1): 9-13.
Liu Z B, Peng J M, Li H Q, et al. Study on stamping feasibility of variable section side member of QStE650TM high strength steel [J]. Die & Mould Industry, 2023, 49 (1): 9-13.
- [7] 吴秀桃, 周小钢, 雷玉霞, 等. 汽车左右后纵梁前段冲压成形分析及工艺优化 [J]. 装备制造技术, 2022, (5): 262-266.
Wu X T, Zhou X G, Lei Y X, et al. Analysis and process optimi-

zation of stamping forming for the front section of the left and right rear side member of automobiles [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022, (5): 262-266.

[8] 黄宠, 李朕. 关于纵梁翘曲问题的研究 [J]. 锻造与冲压, 2022, (6): 48-50.

Huang C, Li Z. Research on the problem of side member's warping [J]. Forging & Metalforming, 2022, (6): 48-50.

[9] 高飞, 张晔, 王帆. 纵梁前端加强板成形仿真及缺陷处理 [J]. 模具制造, 2022, 22 (7): 9-12.

Gao F, Zhang Y, Wang F. Forming simulation and defect treatment of front end stiffening plate of longitudinal beam [J]. Die & Mould Manufacture, 2022, 22 (7): 9-12.

[10] 彭文虎, 陆静易, 韦毅, 等. 浅析纵梁冲压模具自动化设计 [J]. 模具制造, 2022, 22 (6): 1-5.

Peng W H, Lu J Y, Wei Y, et al. Analysis automatic design of longitudinal beam stamping die [J]. Die & Mould Manufacture, 2022, 22 (6): 1-5.

[11] 吴转萍. 加长纵梁工艺开发及模具结构设计 [J]. 模具制造, 2021, 21 (12): 10-14.

Wu Z P. Process development and die structure design of longitudinal beam [J]. Die & Mould Manufacture, 2021, 21 (12): 10-14.

[12] 黄能会, 高成慧. 基于 CAE 的高强度钢 U 型件冲压回弹研究 [J]. 时代汽车, 2020, (11): 111-112.

Huang N H, Gao C H. Research on stamping rebound of high strength steel U-shaped parts based on CAE [J]. Auto Time, 2020, (11): 111-112.

[13] 张恒, 江庆顺, 张玉成. 某车型高强板纵梁回弹问题及整改措施 [J]. 模具工业, 2020, 46 (3): 29-33.

Zhang H, Jiang Q S, Zhang Y C. Springback of high-strength plate longitudinal beam of a certain vehicle and rectification measures [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (3): 29-33.

(上接第 209 页)

中国机械工程学会塑性工程分会 2024 年活动计划 (续)

序号	活动类别	活动名称	活动组织者	时间	地点
11	技术培训	锻压技术与装备培训班——挤压工艺与装备	中国机械工程学会塑性工程分会	3 月	池州
12	技术培训	锻压技术与装备培训班——自由锻、模锻工艺与装备	中国机械工程学会塑性工程分会	4 月	泰安
13	技术培训	锻压技术与装备培训班——有色金属锻造工艺与装备	中国机械工程学会塑性工程分会	9 月	无锡
14	技术培训	锻压技术与装备培训班——板材成形工艺与装备	中国机械工程学会塑性工程分会	待定	待定
15	技术培训	管材液压成形技术培训	中国机械工程学会塑性工程分会 (管材成形技术论坛)、哈尔滨工业大学	8 月	哈尔滨
16	技术培训	管材弯曲链接成形技术培训	中国机械工程学会塑性工程分会 (管材成形技术论坛)、西北工业大学	8 月	西安
17	国际交流	第二十届国际金属成形会议 (Metal Forming 2024)	中国机械工程学会塑性工程分会组团参会	9 月	波兰
18	国际交流	第 21 届国际制造研究会议 (ICMR 2024)	协办: 中国机械工程学会塑性工程分会	8 月	英国
19	期刊出版	《锻压技术》 《塑性工程学报》	中国机械工程学会、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司	全年	—
20	成果鉴定	成果鉴定	中国机械工程学会塑性工程分会	全年	—
21	工作会议	十三届一次理事长办公会	中国机械工程学会塑性工程分会	1 月	北京
22	工作会议	十三届一次常务理事会议	中国机械工程学会塑性工程分会	待定	待定
23	工作会议	十三届二次理事 (扩大) 会议	中国机械工程学会塑性工程分会	10 月	待定