

装备与成套技术

## 铝合金板材热冲压成形装备的合理性探讨

高景洲, 赵升吨, 杜威, 蒋飞, 郑臻皓

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对可热处理铝合金板材的热成形工艺窗口窄, 以及固溶处理、专用模具及其成形装备等方面的诸多问题, 通过对高强度钢板热冲压成形技术的借鉴和对比, 并结合铝合金热冲压成形的塑性成形性能, 从铝合金材料与成形工艺、热冲压生产线及主要冲压装备等方面, 对铝合金热冲压成形技术进行了合理性探讨, 提出目前铝合金热冲压成形技术所存在的问题及其所需专用热冲压模具的核心技术要求。此外, 对国内外热冲压成形装备的发展状况进行了讨论和分析, 并列举了其代表机型。通过对铝合金板材热冲压成形工艺和装备的合理性探讨, 提出了铝合金热冲压技术的发展趋势, 有助于该技术在我国的推广和应用。

**关键词:** 铝合金; 热冲压技术; 热冲压装备; 伺服压力机; 液压压力机

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.025

**中图分类号:** TH112      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0168-06

## Discussion on rationality of hot stamping equipment for aluminum alloy sheet

Gao Jingzhou, Zhao Shengdun, Du Wei, Jiang Fei, Zheng Zhenhao

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** For many problems of narrow hot forming process window, solution treatment, special die and forming equipment for heat-treatable aluminum alloy sheet, through the reference and comparison of hot stamping forming technology of high strength steel plate and combined with the plastic forming properties of hot stamping for aluminum alloy, the rationality of the hot stamping technology for aluminum alloy from the aspects of aluminum alloy material and forming process, hot stamping production line and main stamping equipment were discussed. The problems existing in the current hot stamping technology for aluminum alloy and the core technical requirements for its special hot stamping die were pointed out. In addition, the development statuses of hot stamping equipment at home and abroad were discussed and analyzed, and the main representative machines were listed. Through the discussion on the rationality of the hot stamping forming process and equipment for aluminum alloy sheet, the development trends of the hot stamping technology for aluminum alloy were put forward, which was helpful to the popularization and application of this technology in our country.

**Key words:** aluminum alloy; hot stamping technology; hot stamping equipment; servo press; hydraulic press

高性能铝合金构件是航空航天、国防军工等高端装备运行支撑和安全防护的关键构件, 拥有不可替代的作用和地位, 也是装备轻量化发展中不可或缺的部分。然而, 在常温条件下, 铝合金板材的成形性能较差, 金属流动性不足, 使得铝合金构件成形制造困难, 并且存在容易出现裂纹以及回弹大等

缺陷。因此, 采用传统的成形方法难以获得形状复杂的高性能铝合金构件, 限制了铝合金板材的进一步应用。但是, 在高温条件下, 铝合金材料的塑性性能良好、金属流动性好、材料的变形抗力降低, 显著降低了铝合金板材制造高性能铝合金构件的难度。因此, 可通过提高成形过程中加热温度的方法来实现高强度的铝合金构件的成形制造, 即铝合金板材的热冲压成形技术。

铝合金板材的热冲压成形技术主要依赖成形压机。但由于铝合金成形的工艺窗口窄, 工艺环节多、过程控制难, 常规的成形压机不能够满足铝合金板材的热冲压成形的要求, 因此, 这种成形技术对热冲压装备具有严格的要求。

**收稿日期:** 2021-09-02; **修订日期:** 2021-12-05

**基金项目:** 国家自然科学基金航空联合基金项目资助项目 (U1937203); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (xzd012020003)

**作者简介:** 高景洲 (1995-), 男, 博士研究生

**E-mail:** 904416827@qq.com

**通信作者:** 赵升吨 (1962-), 男, 博士, 二级教授

**E-mail:** sdzhao@mail.xjtu.edu.cn

当前,热冲压装备主要被德国舒勒和瑞典 AP&T 等公司垄断,并且国外的成形制造企业、科研单位对中国的热冲压成形技术及其成形装备实施技术封锁和禁售。而中国这一领域的研究尚处于初始阶段,仍在积极探索铝合金热冲压成形技术,但相关的技术发展和装备均较为落后,文献资料也明显不足,这些都影响了该新兴技术相关知识的推广和应用。为此,本文主要从热冲压成形工艺技术、热冲压成形装备和应用 3 个方面开展铝合金热冲压成形技术的探讨。

## 1 铝合金热冲压成形技术

### 1.1 铝合金材料

根据铝合金材料的化学组成的不同,其可分为 1、2、3、4、5、6、7 等系列的牌号。进一步根据合金状态及能否进行热处理的特点对铝合金材料进行细分,其中 1、3、4、5 系为不可热处理铝合金,这类铝合金材料的延展性较好,但是强度较低,所成形的零件的机械性能较差,因此更适于冷冲压成形。2、6、7 系为可热处理铝合金,该类铝合金材料的强度较高,常温下成形性能较差,难以采用冷冲压工艺技术成形高性能的铝合金构件,但是,这类材料在高温下具有良好的塑性,在零件成形后进行淬火、时效等一系列后处理,使得零件材料能够恢复到初始的强度甚至获得更高的强度<sup>[1]</sup>。此外,在可热处理铝合金材料中,7 系铝合金与目前最成功的热成形钢相比具有突出的轻量化优势<sup>[2]</sup>。

### 1.2 热冲压成形工艺

铝合金热冲压技术与高强钢板热冲压技术在成形原理和实际的成形工艺上均较为相近,因此,在铝合金热冲压技术的研究和应用过程中,可以借鉴高强钢板热冲压的思路、方法和技术。

这里,高强度钢板热冲压技术又可称为“冲压硬化”技术。即,这种技术首先需要对初始强度为 500~600 MPa 的高强度钢板进行加热,使其温度达到 880~950 ℃ 左右,随后对加热后的高强度钢板进行冷却,即,将其放置在带有冷却循环系统的模具内,进行冲压成形,并且保持保压状态(保压工作)。这里,模具内的冷却循环系统使得加热成形后的高强度钢板以 20~300 ℃·s<sup>-1</sup> 的冷却速度完成快速淬火冷却工艺。在加热与冷却淬火的过程中,高强度钢板中的奥氏体晶体转变为了马氏体晶体,这使得热冲压成形后的零件强度大幅提高,甚至能

够生产出零件强度高达 1500 MPa 的冲压件<sup>[3]</sup>。

铝合金热冲压成形技术与上述高强度钢材热冲压成形技术相似,也是采用形变和相变相结合的制造工艺。铝合金热冲压成形技术主要是利用高温下铝合金板材的材料伸长率和材料断面收缩率均较大幅度提高的材料特点。此外,铝合金热冲压成形技术与冷冲压成形技术相比,在以下几个方面具有明显的技术优势<sup>[4]</sup>:

(1) 热冲压成形技术的成形性相对较好,能够实现大型、薄壁、形状复杂构件的加工;

(2) 热冲压成形技术所获得的零件的尺寸精度高,零件的表面硬度、抗凹性和刚度特性好,能够满足表面质量要求高的铝合金构件的制造;

(3) 热冲压成形技术所需要的成形设备的吨位均较小,例如,一台公称压力为 8000 kN 的高速液压机经过热冲压装备改造就能够满足车身上大部分零件的工作需要。

### 1.3 铝合金热冲压成形技术所存在的问题

铝合金板材热冲压成形技术也有自身的缺点,主要为<sup>[1,4-5]</sup>:

(1) 铝合金热冲压成形的加工节奏相对较慢,工序多、周期长、效率低(固溶时间为 20~40 min,成形淬火约为 1 min,人工时效时间为 12 h 以上)<sup>[4]</sup>;

(2) 需要的生产设备众多,要求高,各生产设备之间的运动互联互通和高效有序协调运动的要求严格,热冲压生产线的固定投资较大;

(3) 由于铝板热处理中液相扩散较慢、温度窗口窄等原因,铝合金构件的组织性能难控制,且热冲压模具要求高,价格昂贵;

(4) 铝合金材料的伸长率与钢板材料的伸长率相比较小(仅为钢板的 2/3),并且铝合金材料的硬度较低(仅为钢板的 1/3)。可以看出,铝合金板材的材料属性与钢板材料属性有着极大的不同,因此,在铝合金热冲压中不能简单地套用钢板热冲压所使用的模具。需要对模具型面粗糙度、凸凹模间隙、压料力设定、冲裁刃口形状间隙和废料刀分布等方面开展研究,以获得适合于铝合金板材热冲压成形工艺的模具<sup>[6]</sup>;

(5) 铝合金板材热冲压成形技术作为一个新兴的技术,目前,可搜集到的有关铝合金板材热冲压的科研文献以及产品资料均比较少,并且国外率先开展相关研究的企业和科研单位均对铝合金热冲压成形技术实施着技术封锁,市场中存在垄断现象。

## 2 铝合金热冲压主要装备

### 2.1 热冲压生产线

铝合金热冲压工艺过程包括固溶处理、热冲压+模内淬火和时效处理 3 个主要步骤,热冲压核心工艺的衔接流程在于加热、冲压、保压与冷却<sup>[1,7-8]</sup>。

铝合金热冲压工艺的流程一般可分为板材开卷、板材落料、零件初始形状剪裁、零件加热、热冲压、时效处理等几个流程<sup>[1]</sup>。并且,在生产实践中,根据所需要热成形零件的具体情况(如构形、强度等),有时会在热冲压工艺流程中再增加一些工艺步骤。但是,无论铝合金热冲压生产线中工艺步骤的多与少、复杂与否,在热冲压生产线中所使用的设备主要有:板材-拆垛开卷设备、板材落料冲裁设备、零件加热设备、工步件的搬运设备、热冲压设备以及时效热处理设备等<sup>[1]</sup>。

### 2.2 热冲压的主要设备

铝合金热冲压技术的关键设备,主要有加热设备、搬运设备、冲压设备以及时效热处理设备。其中,加热设备将铝合金板材快速加热至工艺要求所需的固溶温度;搬运设备保证热冲压工艺流程中每个工序间零件的快速转移,使零件的温度损失降到最低,同时保证加热后的零件在转移过程中对操作人员的安全性<sup>[1]</sup>。

热成形压机(冲压设备)是铝合金热冲压技术的核心装备。它需要具备快速合模以进行冲压的能力,还需要有保压的能力。此外,在热成形压机中还需要配备快速冷却系统。因此,热成形压机的技术复杂程度要远远超过常见的冷冲压压机。很显然,应用于冷冲压技术的成形压机不能直接应用到铝合金板材热冲压工艺中,需要对热成形压机量身定做,开展特种设备研究。例如,传统的液压成形压机不具备快速合模、冲压的能力;传统的机械压机又不具备保压功能。而热成形压机需要同时具有这两种特点(快速合模、冲压和保压)。

最为关键的是,热成形压机在完成热成形过程中,所使用的模具还要能够对待加工的铝合金零件起到重要的冷却淬火作用,图 1 为瑞典 AP&T 公司所研制的热冲压模具,对各方面要求非常高,是整套热成形设备中的关键。此外,由于可热处理铝合金材料在高温下的塑性性能与不可热处理铝合金材料以及普通碳钢不同,因此,铝合金的热冲压模具

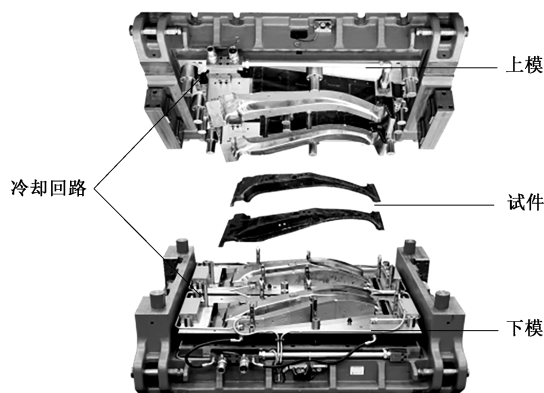


图 1 瑞典 AP&T 公司的热成形模具

Fig. 1 Hot forming die from AP&T company in Sweden

与冷冲压模具及传统意义上的热冲压模具有很大的不同,所需的模具核心技术要求体现在以下几个方面:

(1) 铝合金热冲压模具。在设计模具的型面时要考虑铝合金的热胀冷缩效应,并采取有效的补偿方案;同时,模具型面不能设计冷冲压模具中常用的拉伸筋。

(2) 铝合金热冲压模具内部冷却回路的设计,以达到工艺要求的冷却速度。冷却回路的设计要素包括冷却孔径的大小、冷却孔的间距和布置方式、冷却孔中心位置、冷却水的流动方式等。

(3) 铝合金热冲压模具的冷却水泄漏的有效解决方案。

## 3 国内外热冲压成形装备的发展状况

目前,市面上铝合金板材热冲压所使用的装备系统,其主体上是基于钢板热冲压装备,并且根据铝合金板材热成形的工艺特殊性进行调整。例如,为了保证铝合金热冲压过程的零件温度,需要研制适用于铝合金热冲压的专用冷却淬火模具和相应的配套保温型快速取/送料机构。此外,还涉及大尺寸板材和零件的连续加热炉等专用设备的研制。除上述铝合金板材热冲压成形工艺的特殊性要求外,其核心装备——热成形压机与高强度碳钢中所用设备类似,即,成形压机需要达到低速冲压、快速回程的特点,即要能够在空行程时快速下行和快速回程,在成形阶段缓行。此外,在材料成形中,成形压机要具备在下死点处保压的成形能力。

机械式伺服压力机和液压肘杆式压力机是成形压机中应用最为普遍的机型,特别是机械式伺服压力机。机械式伺服压力机采用交流伺服电机为压机



提供驱动力。先进的伺服控制系统使得压机既保持了原有的机械驱动的优点, 又改变了传统机械压力机中滑块工作特性不可调的特点, 这使得机械式伺服压力机具有超高柔性的加工特点。因此, 伺服压力机可进行材料成形速度和加工曲线的定制化, 使得材料在热冲压过程中在下死点处能够完成保压工作, 这对提高热冲压成形性能具有重要意义。

### 3.1 国外热冲压成形装备的发展状况

国外公司在成形装备领域的起步早、基础厚, 科研实力强劲, 造成当前高效伺服热冲压成形装备及生产线长期垄断的局面, 主要代表公司有德国 Schuler (舒勒) 和瑞典 AP&T。

最具有代表性的机型如德国舒勒 PAL400 型号压力机<sup>[9]</sup>, 如图 2 所示, 这是一台公称能力为 400 kN 的压机, 是适用于铝合金板材热冲压成形技术的一款冲压设备。当前, 尽管铝合金板材热冲压成形技术未进行大面积市场推广, 但德国舒勒公司却早已着手规划新型专用化的成形装备的研发工作, 如图 3 所示的德国舒勒的热冲压中心, 以及如图 4 所示的德国舒勒的 PCH 热冲压工艺的新型铝合金板材热冲压成形装备。这代表了当前可用于铝合金板材热冲压成形工艺的先进机型与技术。



图2 德国舒勒公司热冲压生产线中的 PAL400 热成形压机  
Fig. 2 Hot forming press PAL400 in hot stamping production line of Schuler company in Germany

除了德国舒勒, 瑞典 AP&T 公司也早已瞄准铝合金板材成形及其装备的市场, 投入了大量的科研经费, 开展铝合金板材成形装备的研发, 促进铝合金热冲压成形技术的发展。

如图 5 所示, 瑞典 AP&T 公司推出了世界上首台新型伺服液压压力机, 所采用的伺服液压机的性能



图3 德国舒勒公司的热冲压技术中心  
Fig. 3 Hot stamping technology center of Schuler company in Germany



图4 德国舒勒公司采用 PCH 热冲压工艺技术的成形装备  
Fig. 4 Forming equipment using PCH hot stamping process technology of Schuler company in Germany

卓越, 其标准压力机的力值范围为 1000~500000 kN, 结合了世界上两种最佳压力机的优点, 即液压机稳定的高压及伺服机械压力机高效能和卓越的速度控制能力<sup>[10]</sup>。由此, 新型压力机可以非常精准地控制整个冲压过程, 并且实现压机台面与滑块之间的高平行度。在整个冲压周期内始终保持高压, 即使在较小的表面上也可实现压力的高度精确分布。在性能方面, 这款伺服液压机的效率非常高, 其加速力和减速力较传统液压机高出 250%, 大大提高了生产能力。

图 6 为瑞典 AP&T 公司所研发的 ODEN-FT 型液压压力机, 可满足更大吨位以及更大台面的压力机操作。该型号压力机尤其适用于热成形工艺。该款压力机采用预紧拉杆的形式, 这项设计使得运输更为方便。其最大压力可达到 50000 kN, 最大标准的压机床身的尺寸为 5000 mm×2500 mm。

### 3.2 国内热冲压成形装备的发展状况

国际上对热冲压成形装备采取技术封锁的措施,

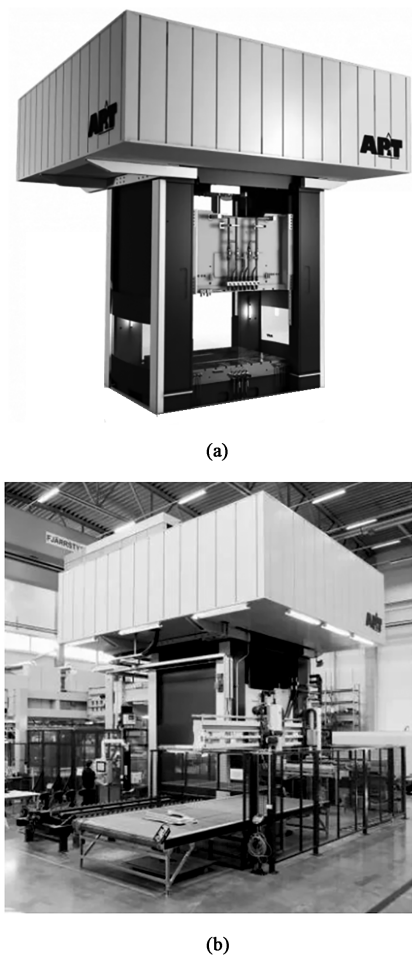


图 5 瑞典 AP&T 公司采用伺服液压机组成的热成形装备  
(a) 新型伺服液压压力机 (b) 由新型伺服液压压力机所组成的热冲压生产线

Fig. 5 Hot forming equipment composed of servo hydraulic press by AP&T company in Sweden  
(a) New type servo hydraulic press (b) Hot stamping production line composed of new servo hydraulic press



图 6 瑞典 AP&T 公司的 ODEN-FT 液压机

Fig. 6 ODEN-FT hydraulic press made by AP&T company in Sweden

但是，在国家科技重大专项课题的支持下，目前热冲压成形专用高速液压机已实现国产化，打破了国

外垄断，图 7 为所研发的高速热冲压液压机，表 1 为此高速热冲压液压机的技术参数。所研发的高速热冲压液压机的滑块冲压速度可达到  $1000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  以上，滑块的冲压速度远远高于我国引进外企设备的冲压速度 ( $600\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )，压机的台面尺寸为  $3000\text{ mm}\times 2500\text{ mm}$ <sup>[11-12]</sup>。研发的高速热冲压液压机，涉及到的合作厂家有合肥合锻机床有限公司、天锻压力机有限公司、徐州锻压机床厂有限公司、重庆江东机有限公司等多所国内知名的锻压设备厂商，体现出国内厂商对这一新兴技术发展的前瞻性和雄厚的技术研发能力。



图 7 国产高速热冲压液压机

Fig. 7 Domestic high-speed hot stamping hydraulic press

表 1 高速热冲压液压机的技术参数

Table 1 Technical parameters of high-speed hot stamping hydraulic press

参数	数值	备注
最大压力/kN	8000	—
滑块行程/mm	1200	—
闭合速度/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	700	滑块的最大运行速度不小于该速度
工作台面/( $\text{mm}\times\text{mm}$ )	3200×2200	不小于该尺寸
装模高度/mm	1000~2200	—

注：实际生产线中，需配备与加热炉进行热处理的坯料生产节拍相匹配的高速智能控制送料机构。

此外，扬州精善达有限公司与国内关键设备厂家共同协作，开发了热冲压成形生产线，如图 8 所示<sup>[13]</sup>。该生产线占地面积小、柔性好。该生产线的总体性能为：

- (1) 生产高强度钢板、高强铝合金板的热冲压成形结构件；
- (2) 热冲件的尺寸规格 (长度×宽度)  $\leq 2200\text{ mm}\times 1800\text{ mm}$ ，尺寸形状精度  $\leq \pm 0.5\text{ mm}$ ；

(3) 整线生产节拍小于等于每分钟 45 次 (含保压时间 8 s, 不包含加热保温时间);

(4) 主机采用全机械式伺服压力机, 其良好的动态品质可长期、稳定地满足客户对成形承力件的工艺及产品的质量要求。



图 8 国内公司研制的热冲压生产线

Fig. 8 Hot stamping production line developed by domestic company

尽管目前国内所研发的热冲压成形装备大多以适用于高强度板材热冲压成形为目的, 但可以看出国内对于热冲压成形装备的研究实力也逐渐增强, 并且国内有众多企业也已开展了适用于铝合金板材热冲压成形装备与模具的研发, 追赶国际热冲压成形领先水平。

## 4 结论

(1) 对于铝合金板材成形, 传统的冷冲压成形方式会造成构件产生裂纹及回弹的问题, 且成形难度大, 而铝合金板材热冲压成形可解决这些问题, 并且成形零件的质量好、精度高。

(2) 热冲压压机主要有机械式伺服压力机和液压肘杆式压力机。由于伺服电机的特性, 机械式伺服压力机可在下死点保压, 更易完成快速合模、冲压与保压的工作。

(3) 为了更好地推广铝合金板材热冲压成形技术, 未来的研究可从如下几个方面开展: 研究一种新型的铝合金材料; 缩短铝合金材料的固溶处理时间; 开发高效的用于热冲压成形工艺的冷却淬火模具; 改变铝合金热冲压零件的时效处理技术和要求。通过这些方法以达到缩短铝合金板材热冲压零件成形周期的目的, 提高生产效率。

### 参考文献:

[1] 吴文凯, 朱明清, 王云龙, 等. 热冲压成形技术研究汽车

轻量化应用现状 [J]. 黑龙江科学, 2019, 10 (18): 4-7.

Wu W K, Zhu M Q, Wang Y L, et al. Status of research on hot stamping forming technology and application of automobile light-weight [J]. Heilongjiang Science, 2019, 10 (18): 4-7.

[2] Sławomir Polak, Paweł Kaczyński, Zbigniew Gronostajski, et al. Warm forming of 7075 aluminum alloys [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 2399-2404.

[3] 徐柏鸿. 高强板车身零件热冲压成形技术 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2015, (6): 93-96.

Xu B H. Hot stamping technology for high strength sheet body parts [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2015, (6): 93-96.

[4] Liu Y, Zhu Z J, Wang Z J, et al. Formability and lubrication of a B-pillar in hot stamping with 6061 and 7075 aluminum alloy sheets [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 723-728.

[5] 徐伟力, 管曙荣, 艾健, 等. 钢板热冲压新技术关键装备和核心技术 [J]. 世界钢铁, 2009, 9 (2): 30-33.

Xu W L, Guan S R, Ai J, et al. Key equipment and core technology of new steel hot stamping technology [J]. World Iron & Steel, 2009, 9 (2): 30-33.

[6] 孙大字, 王金友. 铝合金车身覆盖件制造装备现状及发展趋势 [J]. 汽车工艺师, 2012, (9): 78-81.

Sun D Y, Wang J Y. Status and development trend of manufacturing equipment for aluminum alloy body panels [J]. Auto Manufacturing Engineer, 2012, (9): 78-81.

[7] 王义林, 刘勇, 耿会程, 等. 高强铝合金热冲压成形技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (16): 22-35.

Wang Y L, Liu Y, Geng H C, et al. Research progresses of hot stamping technology for high strength aluminum alloy sheet [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (16): 22-35.

[8] Shao Z T, Jiang J, Lin J G. Feasibility study on direct flame impingement heating applied for the solution heat treatment, forming and cold die quenching technique [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 398-404.

[9] Schuler. <https://www.schulergroup.com/>.

[10] AP&T. <https://www.aptgroup.com/>.

[11] 曹玉, 时佩林, 李贵闪, 等. 汽车高强度结构件热冲压生产线 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2017, (6): 55-57.

Cao Y, Shi P L, Li G S, et al. Hot stamping production line for automotive high strength structure parts [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2017, (6): 55-57.

[12] 任晓琪. 热冲压成形技术与设备的发展趋势 [J]. 锻造与冲压, 2020, (2): 39-41.

Ren X Q. Development trend of hot stamping technology and equipment [J]. Forging & Metalforming, 2020, (2): 39-41.

[13] 孙林, 冯翔, 高智杰, 等. 高强板热成形技术及其主要装备 [J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55 (5): 20-24.

Sun L, Feng X, Gao Z J, et al. Hot forming technology and its main equipment of high-strength plate [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2020, 55 (5): 20-24.