

综述

## 铝合金热冲压技术研究进展

胡志力<sup>1,2,3,4</sup>, 芦俊杰<sup>1,2,3,4</sup>, 华 林<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉理工大学 湖北省新能源与智能网联车工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070; 4. 武汉理工大学 材料绿色精密成形技术与装备湖北省工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 航空航天与汽车领域高性能、轻量化发展趋势下, 铝合金应用越来越广泛, 材料强度越来越高、构件形状越来越复杂, 对先进的成形制造技术提出了更高的挑战。热冲压技术利用材料高温状态下良好的塑性, 可一次整体成形出薄壁异型复杂结构, 同时可进一步调控构件性能, 成为了学术界和工程界研究的热点。对铝合金热冲压成形技术的研究成果和现状进行综述, 重点介绍了近年来铝合金热冲压成形技术原理、典型工艺方法、变形强化机制和技术工程应用等四方面的研究进展, 对以 7 系高强铝合金为代表的铝合金热冲压成形技术的研究现状与发展趋势进行了探讨和展望, 旨在为铝合金热冲压成形技术的发展方向提供借鉴。

**关键词:** 铝合金; 轻质高强材料; 力学性能; 加工工艺; 热成形; 热冲压

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.001

**中图分类号:** TG166      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0001-11

## Review of hot stamping technology for aluminum alloy

Hu Zhili<sup>1,2,3,4</sup>, Lu Junjie<sup>1,2,3,4</sup>, Hua Lin<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Research Center for New Energy & Intelligent Connected Vehicle, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 4. Hubei Engineering Research Center for Green Precision Material Forming, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Under the development trend of high performance and light weight in the aerospace and automotive fields, aluminum alloys are more and more widely used, the strength of material is getting higher and higher, and the shape of components is becoming more and more complex, a higher challenge is presented to advanced forming manufacturing technology. Hot stamping technology utilizes the good plasticity of the material at high temperature to form a thin-walled and special-shaped complex structure at one time. Meanwhile, it can further control the performance of components, which has become a research hotspot in the academic and engineering circles. Therefore, the research achievements and present situation of the hot stamping technology for aluminum alloy were reviewed, mainly introduced the research progresses of aluminum alloy hot stamping technology principle, typical process method, deformation strengthening mechanism and technical engineering application in recent years. The research status and development trend of hot stamping technology for aluminum alloy represented by 7 series high strength aluminum alloy were discussed and prospected, aiming to provide reference for the development of hot stamping technology for aluminum alloy.

**Key words:** aluminum alloy; lightweight and high strength materials; mechanical property; processing technology; hot forming; hot stamping

随着能源的短缺和环境的恶化, 汽车行业正在

经历着重大的产业升级与转换。研究表明, 如果车辆的总质量减轻 10%, 那么燃油效率可提高 6%~8%, 尾气排放量亦可降低 4%<sup>[1-3]</sup>。汽车轻量化技术已成为美国、德国和日本等世界汽车强国研究的热点。目前, 实现汽车轻量化的方法主要有以下 3 种: 采用轻质高强材料、结构优化设计和先进的成形工艺<sup>[4]</sup>。

铝合金作为一种典型的轻量化材料, 目前已广泛应用于航空、航天领域, 以满足其苛刻的减重目标<sup>[5]</sup>。随着材料成本的降低, 良好的减重效果使得

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775397); 新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地 (B17034); 教育部创新团队发展计划 (IRT\_17R83); 湖北省重点研发计划项目 (2020BAB140); 武汉市科技成果转化专项 (2019030703011511)

作者简介: 胡志力 (1983-), 男, 博士, 教授

E-mail: zhilihuhit@163.com

通信作者: 华 林 (1962-), 男, 博士, 教授

E-mail: hualin@whut.edu.cn

铝合金已经成为中、高端传统燃油动力汽车和新能源汽车电动汽车车身应用中增长最快的轻量化材料<sup>[6]</sup>。铝合金的成形工艺可以分为冷成形 (Cold Forming) 和热成形 (Hot Forming)<sup>[7]</sup>。由于铝合金冷成形工

艺存在一定缺点, 张文沛等<sup>[8]</sup>通过对铝合金汽车发动机罩内板作如图 1 所示的模具型面优化, 改善了冷成形工艺缺陷, 提高了冷成形产品质量, 使铝合金冷冲压发动机罩内板进一步推广使用。

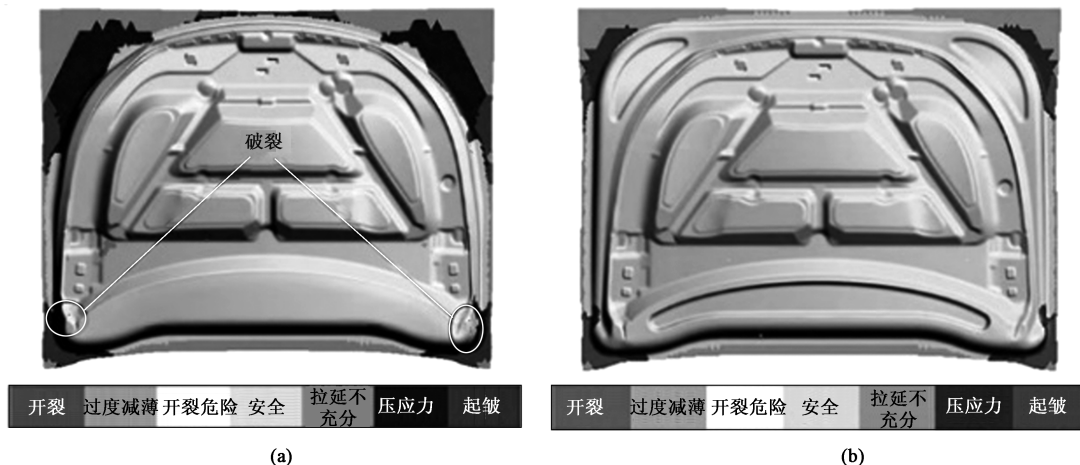


图 1 发动机罩型面成形性分析

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 1 Formability analysis of die face for engine hood

(a) Before optimization (b) After optimization

虽然铝合金在室温下冷成形的塑性差、成形性能低、回弹难以控制、尺寸精度不易掌握, 但在较高的温度范围内 (一般在 200~450 ℃ 之间), 铝合金板材的成形性会随着温度的增加而提高, 有利于构件的成形。因此, 对于形状复杂、高强度、高精度的构件多采用热成形的工艺方式。近年来, 铝合金热冲压成形技术已成为学术界和工程界的研究热点。

## 1 铝合金热冲压成形技术原理

研究表明: 在较高的温度范围内, 温度升高可以使铝合金板材的成形性显著提高, 有利于零件的成形<sup>[9]</sup>, 传统冷成形工艺中需多道工序成形的复杂零件也可以一次成形。因此, 对于形状复杂、尺寸精度高的车身构件多采用热成形的工艺方式。热成形工艺不仅可以显著地降低由于异质高强铝合金拼焊板强度差所带来的不均匀变形, 同时还可较好地抑制铝合金室温成形回弹所带来的精度问题。目前, 铝合金板材主要有以下 3 种热成形工艺: 超塑性成形 SPF (Super Plastic Forming, SPF)、快速塑性成形 QPF (Quick Plastic Forming, QPF) 和热冲压成形 HS (Hot Stamping, HS)<sup>[10-11]</sup>。

由于 QPF 技术以及 SPF 技术需要较细的晶粒组织材料, 尤其是 SPF 技术, 在材料中通常会加入 Sc、Zr 等昂贵的元素, 经过复杂的工艺路线才能制

成构件<sup>[12]</sup>。所以, 这两种技术成本较高且生产效率低, 使得热冲压成为铝合金板材热成形中最具前景的工艺, 3 种工艺的比较见表 1<sup>[13-14]</sup>。

表 1 SPF、QPF、HS 工艺比较

Table 1 Comparison of SPF、QPF and HS processes

工艺	特点	生产方式	产品特性	产品费用
SPF	最优化延展性	自动化程度低, 小批量生产	用于航空、航天领域, 极复杂外形	高
QPF	最优化生产效率	自动化程度较高, 较大批量生产	用于汽车工业, 中等复杂外形	中
HS	最优化经济效益及生产效率	自动化程度最高, 大批量生产	用于航空、航天及汽车工业, 各种复杂外形	低

目前, 对于高强铝合金的热冲压技术共有以下 3 种工艺: 温成形 (Warm Forming)、W 态冲压成形 (W-temper Forming) 和热冲压成形 (Hot Stamping)<sup>[15]</sup>。温成形需要同时对坯料和模具加热 (通常为 100~300 ℃), 随后进行冲压, 虽然此方法能够提高板料的成形性, 但是对模具加热不仅增加了能源的消耗<sup>[16]</sup>, 还加速了模具的磨损; W 态冲压成形则是在板材固溶处理、淬火之后, 时效处理之前

进行冲压, 此方法相对于热冲压技术工序更多, 生产效率低<sup>[17]</sup>; 热冲压技术在高强度钢中已广泛使用, 也是成形低塑性材料构件的一种有效手段<sup>[18]</sup>。

### 1.1 传统热冲压成形技术

瑞典的 Hard-Tech 公司于 1977 年首次公开发表

应用于高强度钢的热冲压技术<sup>[19]</sup>。随着近年来高强铝合金的广泛应用, 汽车行业使用热冲压技术生产的构件所占比重逐年升高, 如图 2 所示<sup>[20]</sup>, 使得铝合金热冲压技术成为铝合金板材热成形最具研究价值的工艺。

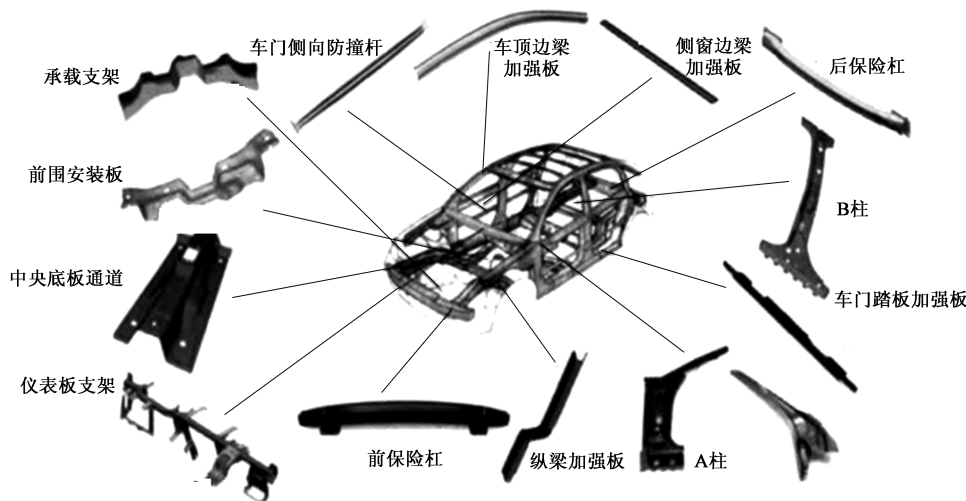


图 2 热冲压零件在车身上的应用

Fig. 2 Application of hot stamping parts in car body

Garrett R P 等<sup>[21]</sup>首次将热冲压技术应用于铝合金热成形工艺中, 传统热冲压工艺流程如图 3 所示<sup>[5,21]</sup>。其中,  $T_1$  为固溶温度,  $T_{\text{Die}}$  为热成形温度。

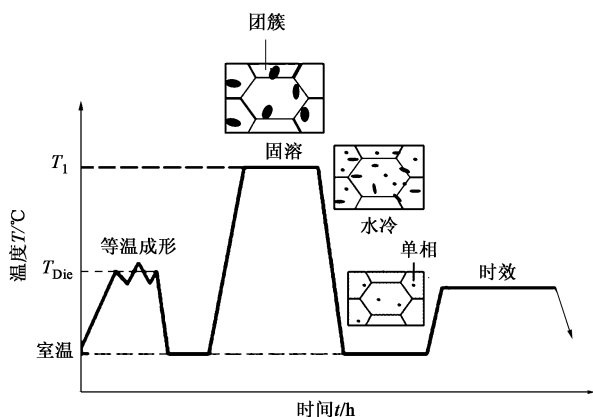


图 3 传统铝合金热冲压工艺流程

Fig. 3 Traditional hot stamping process of aluminum alloy

首先将板料、模具共同加热至成形温度, 然后等温冲压后进行固溶处理、淬火以及时效处理。热冲压技术主要通过对铝合金进行固溶、淬火、时效等热处理工艺来改善构件的组织、性能。

### 1.2 热冲压成形技术变形机理

对于可热处理强化的铝合金 (2XXX 系、6XXX 系和 7XXX 系), 热冲压技术的变形机理主要是沉淀强化 (或时效强化)。时效强化是合金中第二相从单相区进入两相区时以沉淀方式析出<sup>[22]</sup>。Ho K C 等<sup>[23]</sup>详细地阐述了 7000 铝合金时效强化的机理, 如图 4 所示。首先, 在铝合金进行固溶处理后快速淬火, 得到阶段 I 中 SSSS (过饱和固溶体); 阶段 II 中过饱和固溶体析出 GP 区, GP 区是有序的富溶质团簇, 强化了合金的硬度; 阶段 III 中析出过度相  $\eta'$  (晶粒尺寸一般为 1~10 nm); 最后阶段 IV 中

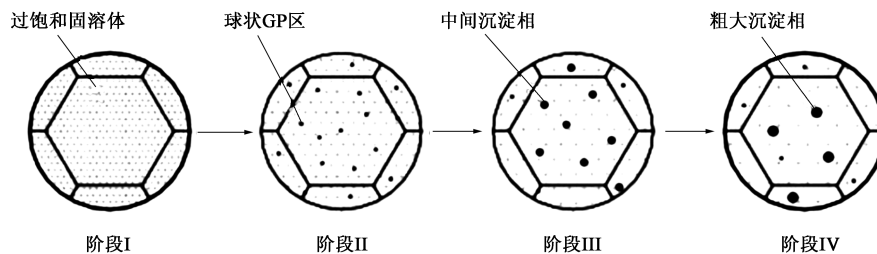


图 4 7000 铝合金时效组织演变示意图

Fig. 4 Schematic diagram of aging microstructure evolution for 7000 aluminum alloy

析出粗大的沉淀稳定相  $\eta$  (过时效状态)。

## 2 热成形-淬火一体化成形技术

虽然传统铝合金热冲压技术能够提升零件成形性,减少构件在室温下成形回弹以及尺寸精度低的问题,但在构件成形后进行固溶、淬火、时效处理会产生热变形<sup>[24]</sup>,导致构件的精度、表面质量降低,等温成形过程与温成形类似,会加速模具的磨损。

为了解决传统热冲压技术存在的问题,Dean T A 等<sup>[25]</sup>提出了 HFQ (Solution Heat Treatment, Forming and Cold-die Quenching) 技术,即热成形-淬火一体

化技术。与传统热冲压技术相比, HFQ 技术将热成形与热处理相结合,减少成形工序、缩短成形时间、提高生产效率,而且有效减少了传统热冲压存在的热变形,提高构件精度和表面质量。该技术的工艺流程图及相应的组织状态如图 5 及图 6<sup>[26]</sup>所示。该技术首先将铝合金板料加热至固溶状态 (Solution Heat Treatment, SHT),再由机器人将高温板料迅速转移到冷模中,在冲压的同时进行淬火,保压一段时间后进行人工时效。

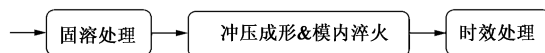


图 5 铝合金 HFQ 技术工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of HFQ technology for aluminum alloy

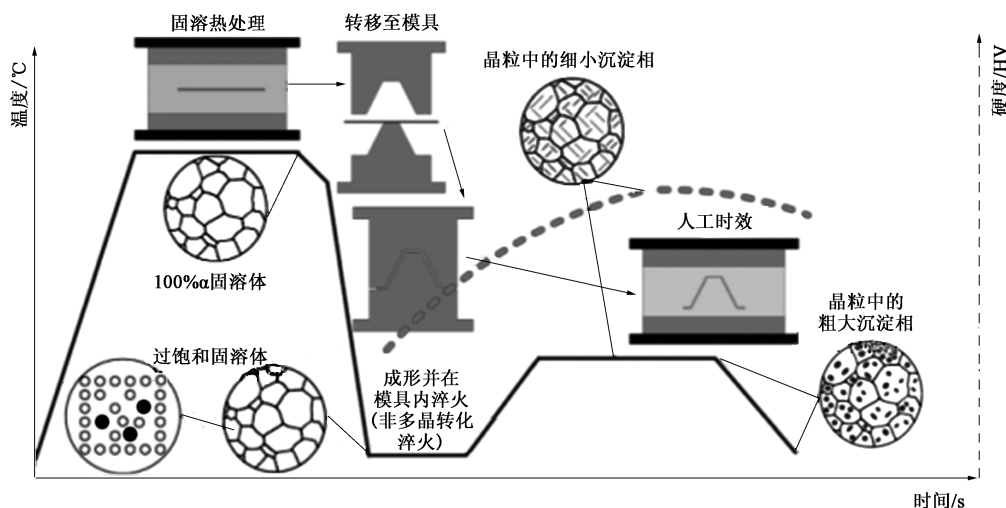


图 6 铝合金 HFQ 技术的工艺温度、组织变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of process temperature and microstructure change in HFQ technology for aluminum alloy

HFQ 技术虽然能够明显提高铝合金的延展性,改善构件质量,但工艺中固溶与时效处理时间过长,导致生产效率低,难以适应冲压车间快速的工序节拍。针对 HFQ 技术固溶与时效处理时间过长的问題,国内外众多学者提出了新工艺以实现铝合金的高效热冲压。

## 3 铝合金高效热冲压技术

### 3.1 铝合金快速固溶技术

传统铝合金板料的成形加热方式主要是辐射加热,但铝板对热辐射的吸收率非常低<sup>[27]</sup>,使得固溶时间过长。铝合金的快速固溶技术在于使用新型加热方式。

#### (1) 接触加热

王子健等<sup>[28]</sup>提出了铝合金接触固溶的方法,并

设计了类似于图 7 的接触固溶装置<sup>[29]</sup>。相比于传统加热炉利用热辐射加热,接触固溶采用两块高温板夹持板料,通过热传导使板料快速升温固溶。接触固溶不仅可以提高板料的温度均匀性,还能减少铝合金固溶时间。



图 7 接触加热原理图

Fig. 7 Principle diagram of contact heating

#### (2) 板料涂层

文献 [30] 将涂层应用到铝合金热冲压中,对 6061 以及 7075 两种铝合金板料进行对比实验,结果如

图8所示。证实铝合金表面涂敷BN或者石墨烯涂层有利于减少铝合金热冲压的固溶时间, 缩短生产周期; 此外, 板料表面涂层具有润滑作用, 可以减少模具磨损。

### (3) T4 板料自阻加热

Wang L 等<sup>[31]</sup>通过研究发现, HFQ 技术虽然能够很好地应用于 6XXX 系铝合金中, 但应用于

2XXX 系铝合金得到的构件会存在缺陷; 对于航空、航天构件在成形过程中也不适合应用固溶处理。Maeno T 等<sup>[32]</sup>提出了一种应用于飞行器零部件的高强铝合金快速热冲压成形方法, 其工艺流程如图9所示。此方法板材为 T4 态, 将板材进行电流加热(自阻加热), 随后进行冲压成形, 最后进行人工时效。

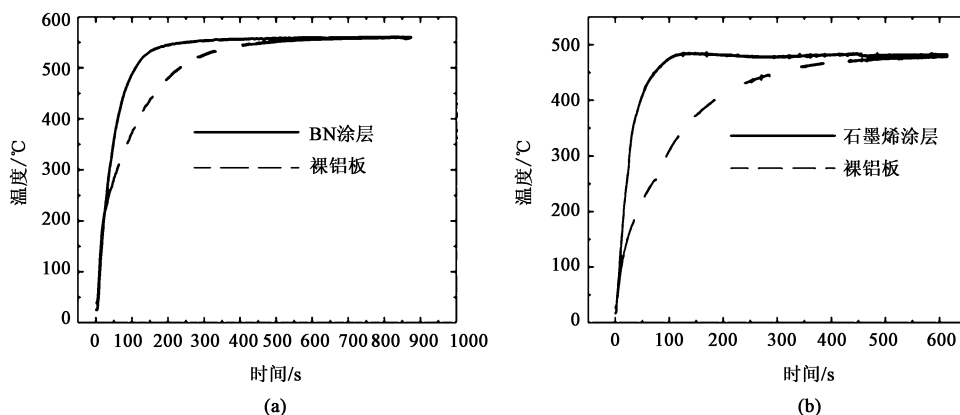


图8 铝合金固溶实验结果

(a) 6061 铝合金 (b) 7075 铝合金

Fig. 8 Results of solution treatment experiment for aluminum alloy

(a) 6061 aluminum alloy (b) 7075 aluminum alloy

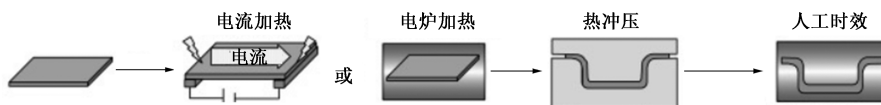


图9 铝合金快速热冲压成形方法的工艺流程图

Fig. 9 Flow chart of rapid hot stamping method for aluminum alloy

此工艺的优点为: 加热温度较低(固溶温度以下), 可避免构件固溶, 降低了能耗; 采用了新颖的电流加热方法, 加快了加热速率, 提高了成形效率, 节约了能源。但电流加热会导致板料温度分布不均匀, 并且只能适用于小型矩形件, 对于形状不规则的大件板料, 则需要结合其他加热方式对板料进行加热。

### (4) 辅助加热

冲压成形时, 高温铝合金板料与模具、空气接触会使得板料温度显著下降, 不利于板料塑性成形, 所以, 在成形过程中提出对坯料进行辅助加热。文献[33]提出铝合金锻粗成形中使用电磁感应辅助加热, 并建立了图10所示的有限元模型, 模拟结果表明, 电磁感应辅助加热对成形中热补偿效果明显, 能够补偿温度损失导致的热变形。

## 3.2 铝合金快速时效技术

文献[34]结合铝合金接触固溶方法, 提出一种铝合金快速时效的高效热冲压工艺, 其工艺流程

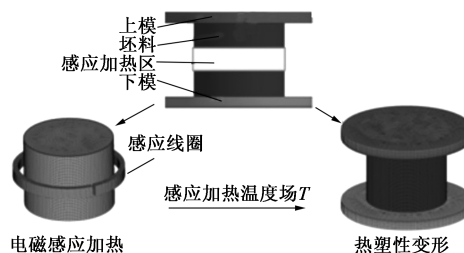


图10 电磁辅助加热有限元模型

Fig. 10 Finite element model of electromagnetic assisted heating

如图11所示。此工艺在 HFQ 技术的基础上, 参照回归再时效技术(Retrogression and Re-Aging, RRA), 提出了预时效+烘烤时效二级时效的工艺路线, 改善了铝合金热成形的停放效应, 不仅利用接触固溶缩短固溶时间, 而且利用两级时效缩短时效时间。文献[35]进行了图12所示的多个不同时效处理组合的对比实验, 实验结果揭示了预时效对缩短时效时间的可行性, 特别是结合冷模淬火以及高温下预时效的工艺路线。

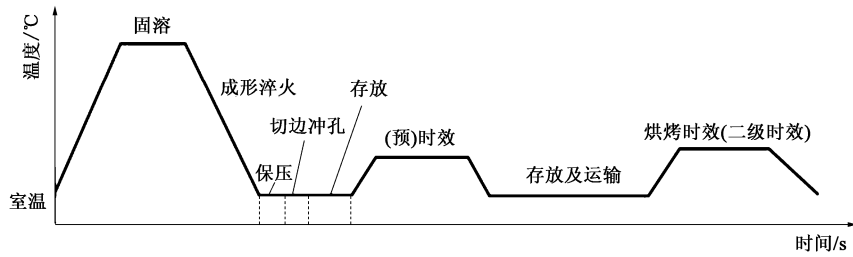


图 11 高效铝合金热冲压示意图

Fig. 11 Schematic diagram of high efficiency hot stamping for aluminum alloy

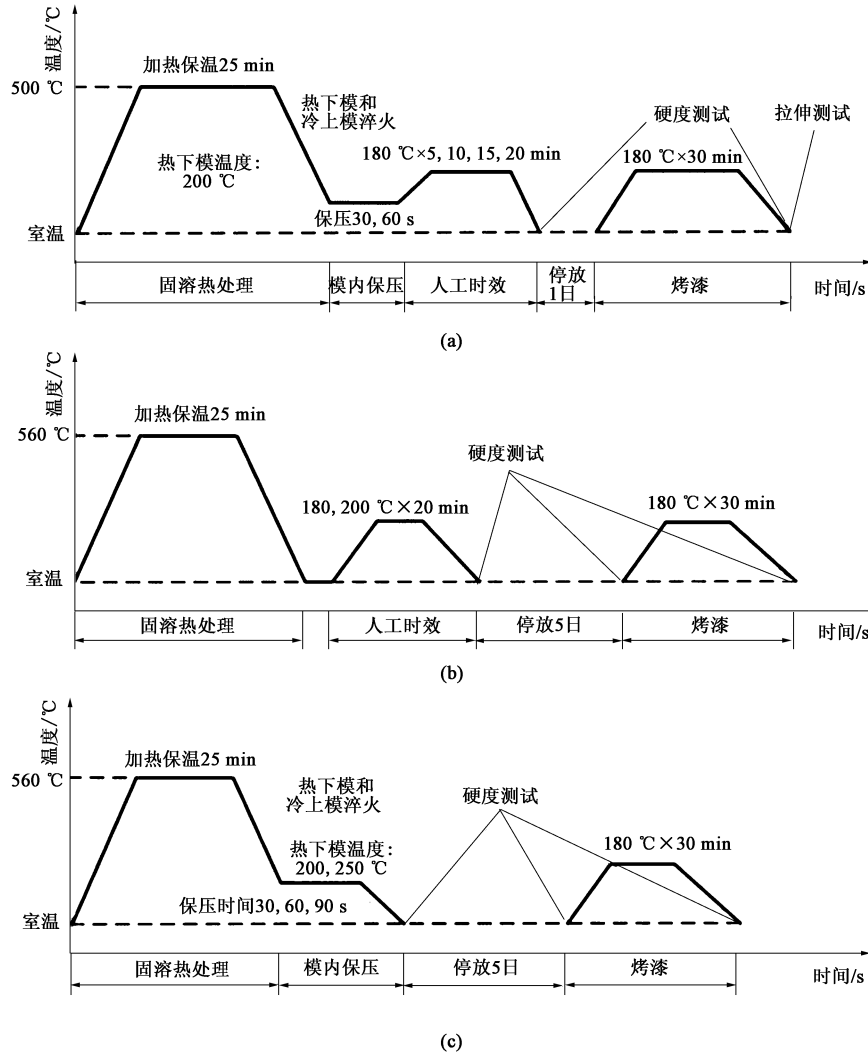


图 12 铝合金热冲压预时效实验方案对比图

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

Fig. 12 Comparison diagrams of pre-aging hot stamping experiment schemes for aluminum alloy

(a) Scheme one (b) Scheme two (c) Scheme three

### 3.3 高效热冲压技术新进展

#### 3.3.1 预强化热成形技术

近期，武汉理工大学<sup>[36]</sup>提出了一种新型高效热冲压成形技术：预强化热成形（Pre-hardened Hot Forming, PHF）。PHF 技术的工艺流程图及相应的组织状态如图 13 及图 14<sup>[37]</sup> 所示。该技术采用预

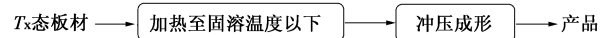


图 13 铝合金 PHF 技术工艺流程图

Fig. 13 Flow chart of PHF technology for aluminum alloy

时效强化态 ( $T_x$ ) 原始板料，将板料快速加热

至固溶温度以下，随后迅速转移至冷模具上进行冲压成形，保持一定时间的压力，获得不需要时效处理的成形件。此方法不仅减少加热时

间、降低加热温度、且无需后续的时效处理，使得生产周期显著缩短，有利于大规模生产构件。

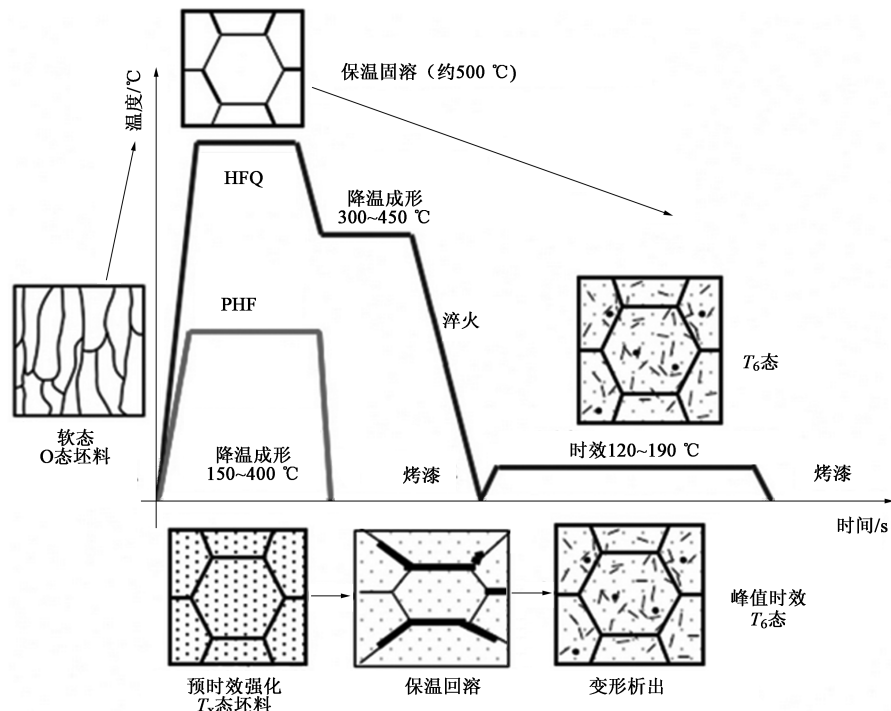


图 14 铝合金 PHF 技术工艺温度、组织变化示意图

Fig. 14 Schematic diagram of temperature and microstructure change in PHF technology processes for aluminum alloy

武汉理工大学<sup>[36]</sup>通过对 AA7075-T6 铝板材进行热冲压实验以验证 PHF 技术的可行性，结果证实使用 PHF 技术能够成功得到汽车 B 柱（图 15），

有效地解决了室温冲压的拉裂问题，构件的力学性能（图 16）满足使用标准，PHF 技术是一个极具前景的研究方向。

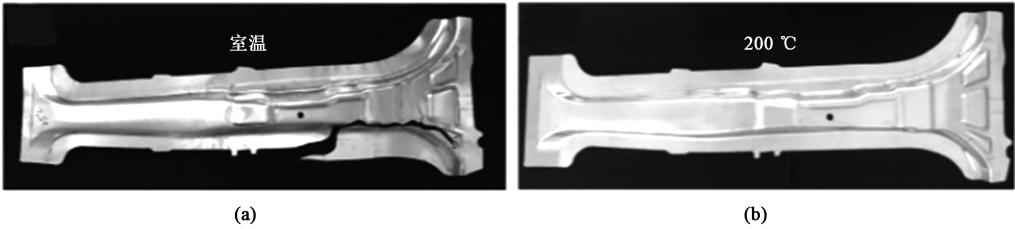


图 15 B 柱冲压实验结果  
(a) 冷冲压 (b) 200 °C 预强化热成形

Fig. 15 Results of stamping experiment for B-pillar  
(a) Cold stamping (b) PHF at 200 °C

Hua L 等<sup>[38]</sup>以 Al-Zn-Mg-Cu 合金为研究对象，对预强化  $T_x$  态的该合金进行单轴拉伸实验和 Erichsen 实验，研究其拉伸成形过程中的流动行为及拉伸成形性能；并对帽形梁构件进行冲压实验，验证 PHF 技术的可行性。此外，采用光学显微镜（Optical Microscopy, OM）及透射电镜（Transmission Electron Microscopy, TEM）表征了 PHF 工艺过程中的

微观组织演变，从理论上解释了 PHF 技术的组织-性能关系。

### 3.3.2 预冷热冲压成形技术

为了提高热冲压过程中板料的均匀变形能力，改善热冲压成形件表面精度，Zhu L J 等<sup>[39]</sup>提出了一种预冷热冲压成形工艺（Hot Stamping Process with Pre-Cooling, HSPC），其工艺流程如图 17 所

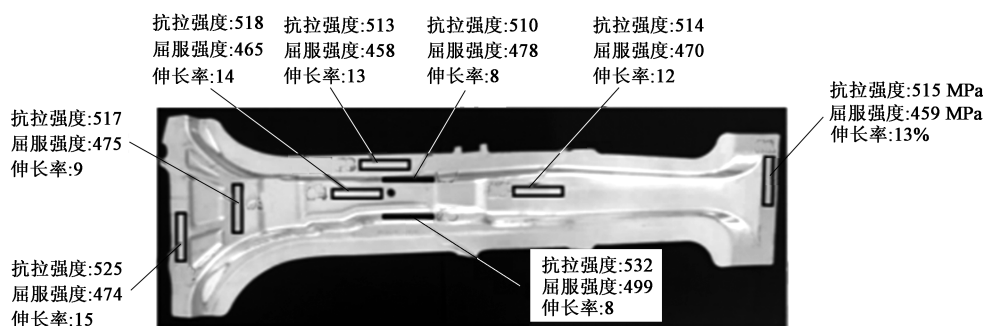


图 16 200 °C PHF 成形 B 柱的力学性能

Fig. 16 Mechanical properties of B-pillar by PHF at 200 °C

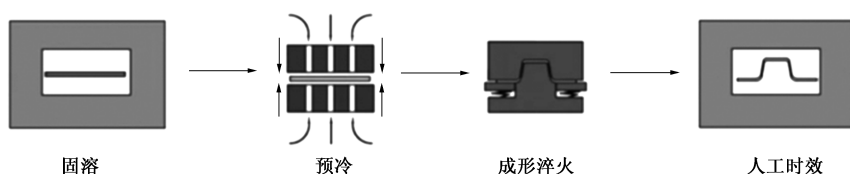


图 17 预冷热冲压成形工艺流程图

Fig. 17 Flow chart of hot stamping process with pre-cooling

示。该工艺旨在提高热冲压成形过程中的应变硬化指数  $m$ ，提高构件板厚均匀性。与 HFQ 技术区别在于在固溶处理之后、冲压之前增加了一道深冷处理工序。深冷处理一般在温度为  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时进行<sup>[40]</sup>。

文献 [41] 对 7050 铝合金进行了深冷处理，研究表明，深冷处理可以减小铝合金构件的残余应力，提高铝合金成形零部件的断裂韧性以及表面质量，保证零部件尺寸稳定。文献 [42] 提出将深冷处理提前至固溶处理之前，并以 7050 铝合金为材料进行实验，结果表明，此工艺流程可以提高铝合金成形件的强度和硬度。

深冷处理虽然能够提高铝合金构件的质量，提高构件的安全性，但不仅增加了一道工序，延长了生产周期，而且增加了成本，因此，应用预冷热冲压成形技术需要综合判断其应用于实际生产所能获

得的效益。

## 4 工程应用

铝合金作为实现轻量化最理想的材料之一，在航空、航天以及汽车等领域中的关注度越来越高，通过使用高强铝合金新型材料，研发先进的铝合金成形工艺以优化构件结构，不仅综合利用了实现轻量化的 3 个方法，且满足严苛的使用要求<sup>[43]</sup>。目前，铝合金热冲压构件已代替了一部分传统钢构件，广泛用于车身的 A 柱、B 柱和引擎盖等关键部位。奥地利金属股份公司采用热冲压技术，以 AA7075 铝合金为原材料生产了宝马 i8 的防撞梁<sup>[29]</sup>；路虎 (Land Rover) 的 L405 车型使用 6XXX 系铝合金结合热冲压技术制造出截止 2015 年最大的一款一体式车身侧围 (图 18)<sup>[44]</sup>；阿斯顿马丁 (Aston Martin)



图 18 路虎 L405 铝合金一体式车身侧围

(a) 冲压后成形件 (b) 切边整形后成形件

Fig. 18 One-piece body side of aluminum alloy for Land Rover L405

(a) Forming part after stamping (b) Forming part after trimming and shaping



使用 HFQ 技术制造出其 DB11 车型上复杂 A 柱加强构件 (图 19)<sup>[45]</sup>; 摩根 (Morgan) 在其 Aero 8 车型上应用了第 1 款使用 HFQ 技术成形的引擎盖 (图 20)<sup>[45]</sup>; 武汉理工大学对经过搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 的拼焊板进行热冲压成形, 得到成形精度高、力学性能好的汽车 B 柱 (图 21)<sup>[46]</sup>。



图 19 阿斯顿马丁 DB11 车型 A 柱加强件

Fig. 19 A-pillar reinforcement pressing in DB11 motorcycle type of Aston Martin



图 20 摩根 Aero 8 车型引擎盖

Fig. 20 Engine hood of Morgan Aero 8 motorcycle type



图 21 拼焊板热冲压 B 柱

Fig. 21 B-pillar of tailor welded plate with hot stamping

## 5 总结与展望

本文详细地综述了铝合金热冲压成形技术的研究进展, 针对热冲压技术的发展现状、工艺流程、变形机理、应用等方面进行了讨论。通过本文的综述可以得到:

(1) 热冲压技术能够制造出形状复杂的零部件, 保持高的力学性能, 改善室温冷冲压回弹、尺寸不稳定的缺点; 相对于 SPF 技术, 对原材料没有

特别的要求, 成本相对较低, 可适用于大批量制造, 是航空、航天和汽车产业实现轻量化的前景方向。

(2) 铝合金热冲压属于高温成形, 得到的构件强度较低、尺寸稳定性不高。并且成形时的模具需要有淬火的冷却水通道, 加大了模具制造难度和成本; 在大批量生产时, 固溶时间与时效时间过长, 导致生产效率低。

(3) 目前, 高效热冲压技术主要是研发减少固溶、时效时间的工艺。对于固溶时间的减少, 本质上是改善加热方式; 对于时效时间的缩短, 有多级时效等方法的提出, 值得一提的是, 二级时效可以在后续的烤漆工艺中实现, 因此, 综合烤漆工艺来改善铝合金性能也是值得研究的方向。鉴于目前成熟的高强度钢热冲压技术, 可以充分参考钢热冲压技术, 选择合适的工艺引用到铝合金热冲压技术中。

对于铝合金热冲压技术未来的发展趋势, 主要有以下几个方面:

(1) 适用于大批量制造的高强铝合金热冲压工艺研发, 减少铝合金热冲压的固溶、时效时间, 提高生产效率, 降低铝合金热冲压工艺成本。

(2) 热成形工艺不仅要考虑铝合金成形性能, 同时要考虑后续铝合金热冲压构件的强度、韧性、耐腐蚀性能和疲劳性能等。

### 参考文献:

- [1] Li H H, Hu Z L, Hua L, et al. Optimization of hot forming-quenching integrated process parameters for complex aluminum alloy automotive components [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48 (4): 1029-1035.
- [2] Hu Z L, Wang X S, Pang Q, et al. Experimental and numerical study on hydroforming characteristics of friction stir welded aluminum alloy tubes [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80 (9): 959-969.
- [3] 李光霁, 刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 47-61.  
Li G J, Liu X L. Literature review on research and development of automotive lightweight technology [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 47-61.
- [4] 万心勇, 胡志力, 戴明亮, 等. 铝合金 FSW 拼焊板塑性变形规律研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46 (11): 3357-3365.  
Wan X Y, Hu Z L, Dai M L, et al. Plastic deformation behavior of friction stir welded tailor-welded blanks of aluminum alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46 (11): 3357-3365.
- [5] 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.

- [6] 刘文辉, 罗号, 谭永胜, 等. 横轧对 6016 铝合金组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (3): 242-248.  
Liu W H, Luo H, Tan Y S, et al. Effects of cross-rolling on microstructure and mechanical properties of 6016 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (3): 242-248.
- [7] Zheng K L, Politis D J, Wang L L, et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminum panel components [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1 (2): 55-80.
- [8] 张文沛, 胡志力, 华林, 等. 铝合金汽车发动机罩内板成形性能研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (1): 26-32.  
Zhang W P, Hu Z L, Hua L, et al. Study on forming property of aluminum alloy automotive inner panel of engine hood [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (1): 26-32.
- [9] 张文沛, 李欢欢, 胡志力, 等. 车用轻量化铝合金材料本构关系研究进展 [J]. 材料导报, 2017, 31 (13): 85-89, 112.  
Zhang W P, Li H H, Hu Z L, et al. Progress in constitutive relationship research of aluminum alloy for automobile lightweighting [J]. Materials Reports, 2017, 31 (13): 85-89, 112.
- [10] 李垚坤, 余万铨, 贺东方, 等. 纯电动汽车电池箱体结构分析与轻量化设计 [J]. 塑料工业, 2020, 48 (8): 91-95.  
Li Y K, Yu W Q, He D F, et al. Structural analysis and lightweight design of battery box for pure electric vehicles [J]. China Plastics Industry, 2020, 48 (8): 91-95.
- [11] Hu Z L, Wang X S, Yuan S J. Quantitative investigation of the tensile plastic deformation characteristic and microstructure for friction stir welded 2024 aluminum alloy [J]. Materials Characterization, 2012, 73 (11): 114-123.
- [12] Jin H, Amirkhiz B S, Lloyd D J. Improvement of superplasticity in high-Mg aluminum alloys by sacrifice of some room temperature formability [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49 (5): 1962-1979.
- [13] Schroth J G, Brueggeman H M, Grewal N P. Quick plastically formed aluminum doors: design and performance [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2007, 16 (3): 339-348.
- [14] 张艳蓉, 韩玉杰, 查苏娜, 等. 6061T6 铝合金流动摩擦挤压成形性能及微观组织 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (8): 800-806.  
Zhang Y L, Han Y J, Cha S N, et al. Formability and microstructure of 6061T6 aluminum alloy by flow friction extrusion [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (8): 800-806.
- [15] Xu Z H, Chen R, Shan D B. Combined effect of pre-strain at elevated temperature and pre-aging on aging strength and microstructures of AA6082 [J]. Materials Transactions, 2020, 61 (2): 272-275.
- [16] Ilinich A M, Luckey S G. On Modeling the Hot Stamping of High Strength Aluminum Sheet [R]. SAE Technical Paper, 2014.
- [17] Mendiguren J, Argandona E S D, Galdos L. Hot stamping of AA7075 aluminum sheets [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 159 (1): 012026.
- [18] Jin J S, Wang X Y, Deng L, et al. A single-step hot stamping-forging process for aluminum alloy shell parts with nonuniform thickness [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 228: 170-178.
- [19] Norrbottens J A B. Manufacturing a hardened steel article [P]. The United Kingdom: GB19740048077, 1977-11-02.
- [20] 李宁宁, 吕贻旬, 刘慎. 浅谈汽车车身轻量化问题 [J]. 有色金属加工, 2020, 49 (5): 14-16.  
Li N N, Lyu Y X, Liu S. Discussion on lightweight of automobile body [J]. Nonferrous Metals Processing, 2020, 49 (5): 14-16.
- [21] Garrett R P, Lin J, Dean T A. Solution heat treatment and cold die quenching in forming AA 6xxx sheet components: Feasibility study [J]. Advanced Materials Research, 2005, 6-8: 673-680.
- [22] 李茂军, 刘光磊, 蒋文辉, 等. 深冷+固溶+时效复合处理对 A356 合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (1): 100-106.  
Li M J, Liu G L, Jiang W H, et al. Effect of cryogenic+solid solution+ageing composite treatment on microstructure and mechanical properties of A356 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (1): 100-106.
- [23] Ho K C, Lin J, Dean T A. Constitutive modelling of primary creep for age forming an aluminium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 122-127.
- [24] Li D M, Ghosh A K. Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145 (3): 281-293.
- [25] Dean T A, Foster A D, Garrett R P, et al. Process for forming metal alloy sheet components [P]. WO2008059242 A3, 2008-10-23.
- [26] Liu Y, Zhu Z J, Wang Z J, et al. Flow and friction behaviors of 6061 aluminum alloy at elevated temperatures and hot stamping of a B-pillar [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (9-12): 4063-4083.
- [27] 林楷, 尤彬波, 谢国文, 等. 高强铝合金热冲压工艺技术与数值模拟研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2020, (9): 1-5.  
Lin K, You B B, Xie G W, et al. High-strength aluminum alloy hot stamping process & numerical simulation [J]. Automobile Technology & Material, 2020, (9): 1-5.
- [28] 王子健, 耿会程, 王义林, 等. 高强铝合金接触加热技术研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 178-181.  
Wang Z J, Geng H C, Wang Y L, et al. Research on contact heating technology for high strength aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 178-181.
- [29] Fan X B, He Z B, Yuan S J, et al. Investigation on strengthening of 6A02 aluminum alloy sheet in hot forming-quenching integrated process with warm forming-dies [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 587: 221-227.
- [30] Liu Y, Zhu B, Wang Y L, et al. Fast solution heat treatment of high strength aluminum alloy sheets in radiant heating furnace during hot stamping [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2020, 3 (1): 20-25.
- [31] Wang L, Strangwood M, Balint D, et al. Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (6): 2648-2656.
- [32] Maeno T, Mori K I, Yachi R. Hot stamping of high-strength aluminium alloy aircraft parts using quick heating [J]. CIRP Annals, 2017, 66 (1): 269-272.
- [33] 顾明光. 铝合金电磁感应辅助加热墩粗成形多场耦合分析 [J]. 数字制造科学, 2018, 16 (1): 26-28.  
Gu M G. Multi field coupling analysis of aluminum alloy upsetting

- forming process with auxiliary electromagnetic induction heating [J]. Digital Manufacture Science, 2018, 16 (1): 26-28.
- [34] 刘勇, 耿会程, 朱彬, 等. 高强铝合金高效热冲压工艺研究进展 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 1-12.
- Liu Y, Geng H C, Zhu B, et al. Research progress on high efficiency hot stamping process for high strength aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 1-12.
- [35] Liu Y, Zhu Z J, Wang Z J, et al. Investigation on short time aging of Al-Mg-Si alloy sheet under hot stamping conditions [A]. Proceedings of 6th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Atlanta, GA, USA, 2017.
- [36] Zhang W P, Li H H, Hu Z L, et al. Investigation on the deformation behavior and post-formed microstructure/properties of AA7075-T6 alloy under pre-hardened hot forming process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 792: 139749.
- [37] 华林, 魏鹏飞, 胡志力. 高强轻质材料绿色智能成形技术与应用 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (22): 2753-2762, 2771.
- Hua L, Wei P F, Hu Z L. Green and intelligent forming technology and its applications for high strength lightweight materials [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (22): 2753-2762, 2771.
- [38] Hua L, Zhang W P, Ma H J, et al. Investigation of formability, microstructures and post-forming mechanical properties of heat-treatable aluminum alloys subjected to pre-aged hardening warm forming [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 169: 103799.
- [39] Zhu L J, Liu Z X, Zhang Z Q. Investigation on strengthening of 7075 aluminum alloy sheet in a new hot stamping process with pre-cooling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103 (9-12): 4739-4746.
- [40] 蔡惠坤, 翁泽钜, 顾开选, 等. 硬质合金深冷处理研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (1): 175-182.
- Cai H K, Weng Z J, Gu K X, et al. Advances in deep cryogenic treatment of cemented carbide [J]. Materials Reports, 2019, 33 (1): 175-182.
- [41] 刘轩之, 翁泽钜, 王凯凯, 等. 深冷处理对 7050 铝合金尺寸稳定性及断裂韧性的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (9): 103-107.
- Liu X Z, Weng Z J, Wang K K, et al. Effect of cryogenic treatment on dimensional stability and fracture toughness of 7050 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (9): 103-107.
- [42] 王磊, 易幼平, 黄始全, 等. 固溶前深冷变形处理对 7050 铝合金组织和性能的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33 (20): 3467-3471.
- Wang L, Yi Y P, Huang S Q, et al. Effect of cryogenic deformation treatment before solid solution on microstructure and properties of 7050 aluminum alloy [J]. Materials Reports, 2019, 33 (20): 3467-3471.
- [43] 李建军, 徐佳辉, 黄亮, 等. 铝锂合金形变热处理工艺研究进展 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 1-10.
- Li J J, Xu J H, Huang L, et al. Research progress on thermomechanical treatment process for Al-Li alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 1-10.
- [44] Zhou J, Wan X M, Li Y. Advanced aluminum products and manufacturing technologies applied on vehicles presented at the EuroCarBody conference [J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2 (10): 5015-5022.
- [45] Brown L. The evolution of lightweighting: GALM vehicle manufacturing summit 2017 [J]. Light Metal Age, 2017, 75 (2): 22-27.
- [46] 胡志力, 范新欣, 华林. 高强铝合金 FSW 拼焊板变形规律与成形技术 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (6): 206-212.
- Hu Z L, Fan X X, Hua L. Forming theory and technology of aluminum alloy FSW tailor welded blank [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (6): 206-212.

## 《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2022 年广告征集工作已经开始。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

### (1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

### (2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst\_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

