

引文格式: 岳毓挺, 冯伟骏, 杨兵, 等. AA7055 高强铝合金板预冷热冲压成形研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(17): 61-68.

YUE Yuting, FENG Weijun, YANG Bing, et al. Hot stamping with pre-cooling treatment for AA7055 high-strength aluminum alloy sheets[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(17): 61-68.

# AA7055 高强铝合金板预冷 热冲压成形研究\*

岳毓挺<sup>1,2</sup>, 冯伟骏<sup>3</sup>, 杨兵<sup>3</sup>, 李永丰<sup>1,2</sup>, 何霁<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240;

3. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院宝武铝业技术中心, 上海 201900)

**[摘要]** 高强铝合金板材在传统热冲压冷模淬火工艺(Heat treatment, forming and in-die quenching, HFQ)中, 直接在固溶温度进行成形难以实现板材最佳成形性能, 容易产生开裂等成形缺陷。针对这一问题, 在板材固溶后引入预冷处理, 即通过使固溶板材降温到设计目标温度再进行塑性成形, 旨在实现铝合金高强薄壁零件的成形性。针对一种改进 AA7055 高强铝合金板材, 在其淬火敏感温度区间内, 进行了固溶后不同预冷温度条件下的力学性能测试, 结果表明, 在 350℃ 预冷温度下板材延伸率最大, 成形性最好。以典型特征结构件为对象, 对该材料进行了预冷条件下的 HFQ 工艺成形试验, 获得了不同预冷条件及原始板料成形的影响规律。发现该种铝合金的 F 态(自由加工态)板料比 O 态板料表面质量更好, 在相同预冷 HFQ 工艺下成形性更高, 进一步对 F 态坯料进行传统 HFQ 对比成形试验后发现, 在无预冷时 F 态板料成形破裂严重。对成形零件典型位置进行取样和性能测试, 试验结果表明, 由于 350℃ 预冷温度在材料鼻尖温度附近, 成形件抗拉强度恶化最为严重。为兼顾成形性与强度, 预冷温度选择 400℃ 为宜。

**关键词:** AA7055; 预冷 HFQ; 接触加热; 成形性; 淬火敏感性

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2021.17.061



岳毓挺

硕士研究生, 主要从事金属薄板塑性成形研究。

高强度铝合金板材(如 7000 系)具有较高的强度, 是理想的轻质高强高性能零件用材。但高强度铝合金在常温下成形性差、回弹大, 在后期热处理时还有热变形等问题<sup>[1]</sup>, 限制了其在零件制造上的大规模应用。针对此问题, 帝国理工大学 Lin 等<sup>[2]</sup>提出了铝合金 HFQ (Heat treatment, forming and in-die quenching) 成形工艺, 利用铝合金在高温下成形性好的特点, 在固溶后进行热冲压成形, 成形的同时进行冷模淬火, 而后进行

人工时效以提高强度, 兼顾了成形性与强度。

但根据 Wang 等<sup>[3]</sup>对 AA2024 的研究, 在固溶热处理温度下, AA2024 内部发生的溶质原子富集造成的晶界软化, 以及基体软化的问题, 会造成材料的延展性能下降, 对成形不利。Gao 等<sup>[4]</sup>研究 AA2060 也发现了类似的结果, 材料延展性最强的温度要低于其固溶温度。上述研究表明, 对于高强铝合金, 直接在固溶温度进行成形可能难以实现板材最佳成形性

\* 基金项目: 航空科学基金项目(201936057001); 上海市自然科学基金面上项目(19ZR1425800); 国家自然科学基金面上项目(51975364)。

能。为了使高强铝合金在 HFQ 工艺中获得更好的成形性,在其固溶阶段后增加一步预冷工艺,设计高强铝合金在其最佳成形温度成形,成为解决问题的一种新思路,其工艺流程对比如图 1 所示。在传统 HFQ 工艺流程中,板料在固溶后就直接转运至冷模成形,成形时温度接近固溶温度,成形性较差,可能造成开裂等缺陷;而预冷 HFQ 工艺则在固溶后先将板料预冷至成形性好的较低温度,能在冷模成形时获得更好的成形性。Li 等<sup>[5]</sup>基于 AA7075 铝合金,针对预冷工艺对热成形的影响进行了试验,开发了材料在热成形增加预冷工序下的宏观耦合材料模型,证明了较低的预冷速率(5℃/s)会造成沉淀物粗大,对成形不利,但未进行零件级别的工艺测试。因此,如何设计预冷温度,保证板材在成形中获得最好的成形性能,不产生开裂、颈缩等成形缺陷,同时满足高性能薄壁零件不同位置材料的高强度和零件整体的服役性能

是实现高强铝合金板预冷热冲压成形所面临的主要挑战。

本文基于一种改进 AA7055 高强铝合金板材进行预冷热冲压淬火工艺研究,所采用材料的合金元素如表 1 所示,新材料提高了合金元素 Mg 和 Zn 的含量,其 T6 态峰值强度达到 650MPa。根据现有对 AA7055 铝合金温热成形的研究<sup>[6-8]</sup>,其低应变率下最佳成形温度在 400℃左右,但由于预冷工艺对材料性能的影响与合金的淬火敏感性有关,而根据对 AA7055 淬火敏感性的研究<sup>[9]</sup>,其鼻尖温度在 355℃左右,因此本文选择 300℃、350℃以及 400℃ 3 种预冷温度进行研究,并定量分析不同预冷温度下的成形性能。以此为依据,设计不同时效态、不同预冷温度下板材的预冷热冲压淬火成形工艺试验。对实现成形的零件,进行取样和性能测试,分析确定获得高强度性能的工艺因素,为未来的工程应用提供依据和参考。

## 试验及方法

### 1 板料力学性能试验

由于该种材料预先经过轧制处理,获得板料为 F 态(自由加工态),试验前将部分 F 态板材按照标准热处理工艺进行固溶处理,在 475℃加热炉中保持 30min,而后随炉冷却 12h,退火处理为 O 态板材,然后模拟预冷 HFQ 工艺中的固溶和预冷流程,对 O 态板材进行力学性能试验。

板材力学性能试验基于接触加热测试平台<sup>[10]</sup>进行(图 2),该平台可实现对板材固溶后实施不同预冷温度并在恒定温度下完成力学性能测试。该平台主要由加热铜块、夹具框架、滑轨、加热棒、K 型热电偶和温控箱组成,其中铜块将紧密贴合到测试试样上,完成预冷温度的施加,然后配合 Zwick/Roll Z100 型材料试验机进行拉伸试验。测试首先通过温控箱配合热电偶对铜块内加热棒进行反馈控制,使得铜块加热保温至预先设置温度。然后将试样夹持在试验机上,材料测试试样尺寸如图 3 所示,释放高温弹簧使得固溶加热铜块与试样保持夹紧。由于接触加热导热速率很快,试样很快升温至预定温度,保温一定时间待试样标距段区域固溶后,通过滑轨移动夹具,使得设定为不同预冷温度的成形加热铜块紧贴试样。此时试样标距段两端凸起部分正好在观察变形开孔位置,利用全场应变测量系统(Digital image correlation, DIC)获取试样标距段的位移数据,计算得到应变信息。最后,将同步加载力数据与 DIC 测试的应变数据相匹配,得到该预冷温度条件

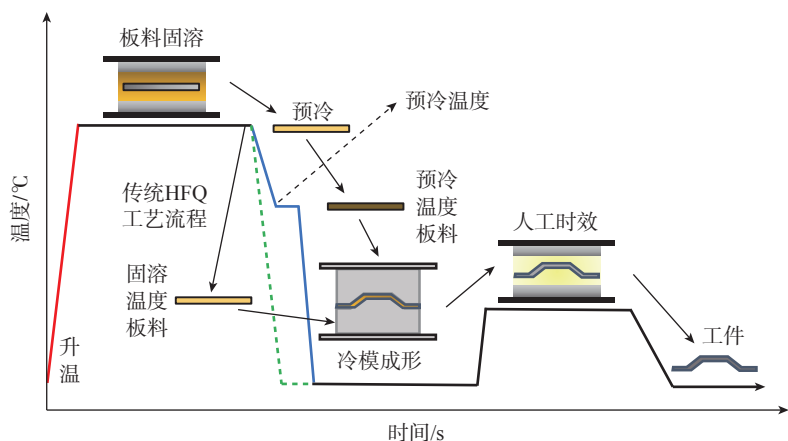


图 1 两种工艺流程对比  
Fig.1 Comparison of two processes

表 1 改进 AA7055 合金元素组成(质量分数)

Table 1 Improved AA7055 alloy element compent (mass fraction)

AA7055	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
标准值	0.10	0.15	2.0~2.6	0.05	1.8~2.3	0.04	7.6~8.4	0.06	0.08~0.25	余量
实际值	<0.05	<0.07	2.3~2.4	0.01	2.1~2.2	<0.01	8.2~8.4	0.05	0.15	余量

下的材料高温拉伸力学性能。

由于接触加热可以提供更快的升温速度,大幅减少了升温时间,且有利于避免生成较大中间相以减少合金溶解时间<sup>[1]</sup>。根据 Zhang 等<sup>[11]</sup>对 AA7075 铝合金接触加热固溶的研究,在加热速度为 15.8℃/s 时,固溶时间已经可以减少到 40s。本文所用试验平台采用铜块接触加热的方式,利用高温弹簧提供一定的接触压力,传热速度大大增加。根据本课题组前期试验,该平台对板材加热速度能达到 50℃/s,冷却速度能够达到 -8℃/s。所以铝板在该平台上利

用高温加热铜块进行接触加热固溶,10min 便可以达到完全固溶的效果,而预冷阶段,在成形铜块处夹持 20s 时间便能保证板材均匀降温到铜块设定温度。因此试验方案定为:O 态试样在 475℃ 加热铜块固溶处理 10min,然后转移至成形加热铜块预冷,分别在 300℃、350℃、400℃ 的预冷温度下保温 20s 后,迅速进行拉伸试验,拉伸速度设置为 0.5mm/s,设置应变率为 0.02s<sup>-1</sup>。

## 2 特征件工艺试验

基于长度缩比后的防撞梁件模具进行典型结构件试制,其目标零件

尺寸如图 4 所示,目标零件截面为 W 形特征截面,实际成形时零件两侧还有约 30mm 的法兰部分。由于成形时外侧壁部分材料流动阻力小,外侧壁位置主要为弯曲变形,而内侧壁部分材料流动阻力大,为拉伸成形,与顶面过渡区交界位置为应变最大位置,最容易发生开裂。基于该模具对材料进行增加预冷工序的 HFQ 成形测试,同样采用接触控温平台对零件坯料进行预冷控温,以模拟增加预冷工艺的 HFQ 工艺流程。

根据传统 HFQ 的工艺流程,首先将尺寸为 250mm×200mm×1.6mm 的铝合金零件坯料放置于保温 475℃ 的高温加热炉中 30min 进行固溶处理。固溶完成后,将铝合金零件坯料置于铜块接触控温平台上进行预冷保温,预冷温度分别设置为 300℃、350℃ 以及 400℃,在接触控温平台上保压保温 10s,将坯料温度由固溶温度降温到设定预冷温度。预冷完成后,将板料迅速转移冷模上进行合模冲压成形,冲压速度 276mm/s,获得成形件。最后将工件转移至 185℃ 炉子中烘烤 20min,进行人工时效处理,提升零件强度。

试验过程中零件坯料的温度变化曲线如图 5 所示。

同时进行空冷条件下的成形测试,将固溶后坯料放置于冷模上空冷预冷 15~20s 后进行冷模成形。试验中发现,若铝合金坯料经过 F 态退

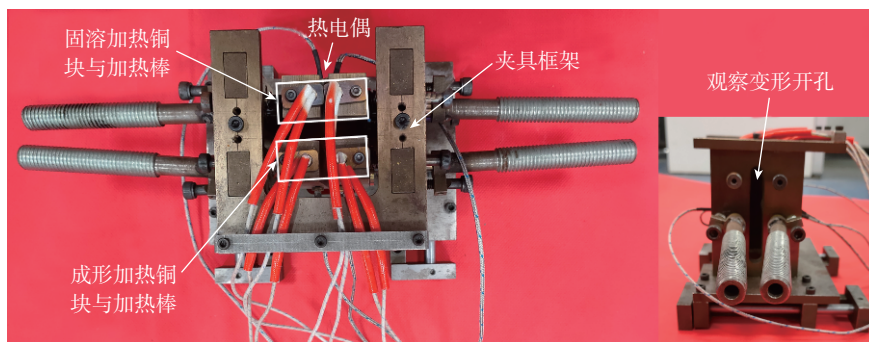


图 2 接触加热高温测试平台

Fig.2 High temperature test platform with contact heating device

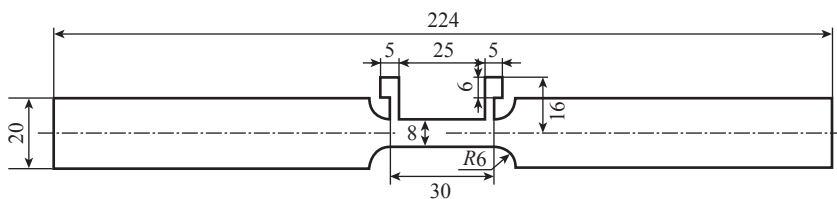
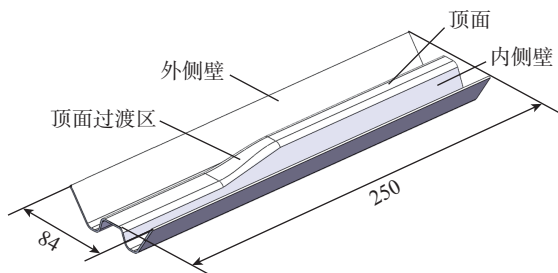
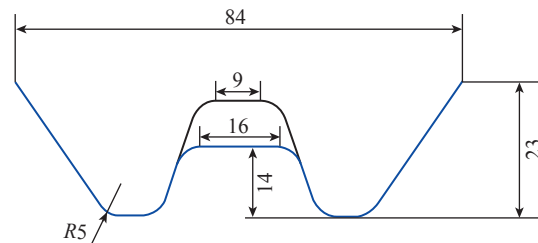


图 3 力学性能测试试样尺寸 (mm)

Fig.3 Specimen size of mechanical properties test (mm)



(a) 防撞梁件整体视图



(b) 防撞梁件截面尺寸

图 4 防撞梁件尺寸 (mm)

Fig.4 Size of anti-collision beam (mm)

火处理成 O 态后进行预冷 HFQ 成形,坯料经过退火处理后表面会变粗糙,改变了成形时的摩擦条件,而 F 态坯料直接进行预冷 HFQ 成形时表面更加光滑。因此选择了 F 态和 O 态两种初始状态的坯料进行成形试验对比,同时为了验证预冷工艺的必要性,对 F 态坯料进行传统 HFQ 工艺试验,坯料固溶后无预冷直接放在冷模上进行冲压,冲压速度保持不变,并与增加预冷工艺下的试制件进行对比。

## 结果与讨论

### 1 不同预冷温度下板料力学性能结果

试验获得的 O 态材料固溶后预冷至不同温度下的真应力-真应变曲线见图 6,根据式(1)选取材料均匀变形段数据进行 Hollomon 本构方程参数计算,将应力  $\sigma$  与应变  $\varepsilon$  数据取以 10 为底对数后进行线性拟合,获得拟合线条的斜率与截距,转换后得到不同温度下的  $K$  与  $n$  值。同时计算材料断裂时总位移量  $\Delta L$ ,按照式(2)除以标距段  $L$  计算其最大延伸率  $\Delta\delta$ 。统计计算结果如表 2 所示,根据计算结果,材料在预冷至 350℃ 时  $n$  值最大,且延伸率最高,因此可预见其在 350℃ 预冷温度下成形性最好。

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

$$\Delta\delta = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

### 2 成形工艺试验结果与分析

根据表 3 预冷 HFQ 工艺的试验结果, F 态坯料在 300℃、350℃、400℃ 以及冷模上空冷预冷 15s 条件下均能完好成形。而 O 态坯料在试验中预冷至 300℃、400℃ 以及冷模上空冷预冷 20s 条件下都无法成形,成形件过渡区与内侧壁交界处都已经有了裂缝产生,在成形性最好的 350℃ 预冷温度下,工件相同位置也已经发生颈缩。O 态坯料与 F 态坯料成形性差异巨大的原因可能有两

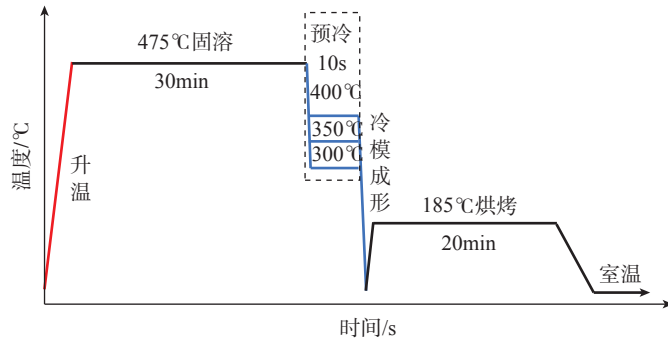
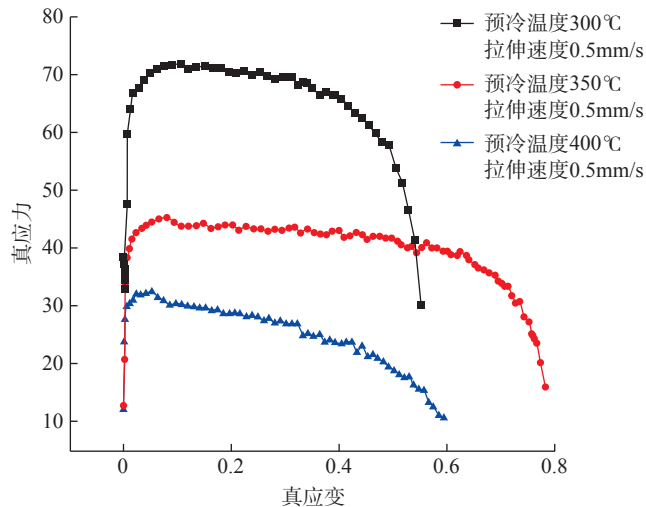
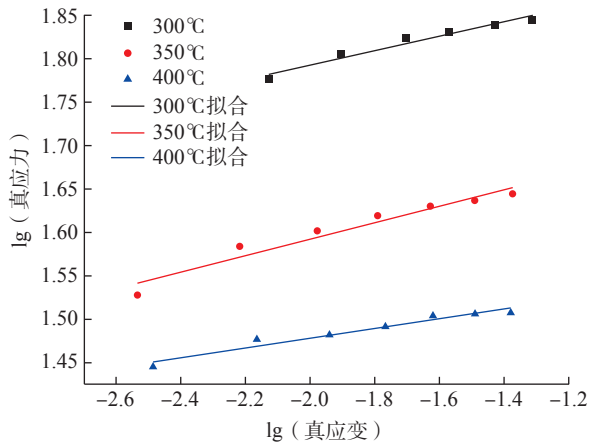


图 5 试验温度曲线

Fig.5 Temperature curve in experiment



(a) 材料测试真应力-真应变曲线



(b) 均匀变形段数据拟合

图 6 材料测试与参数拟合

Fig.6 Material test and parameter fitting

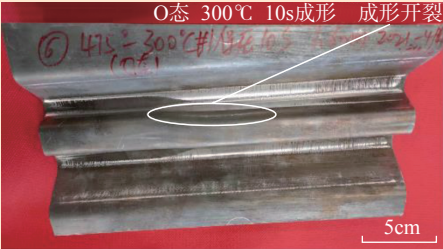
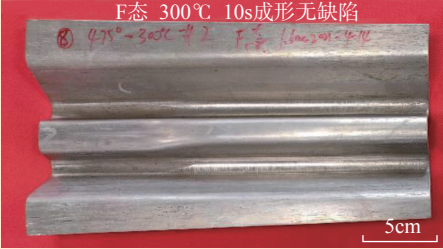
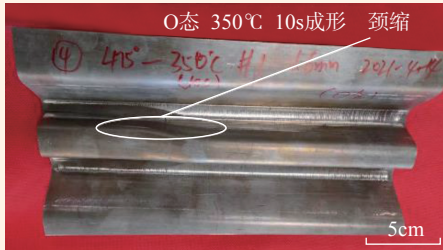
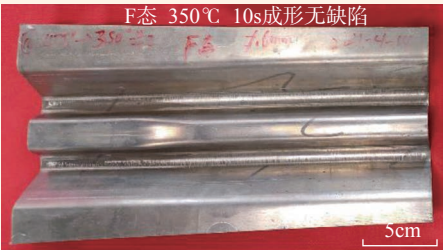

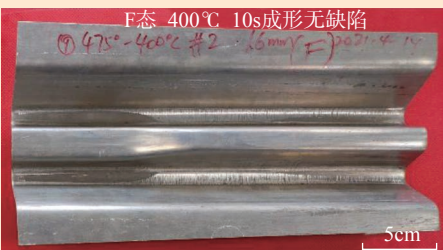
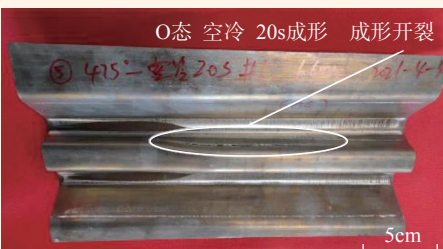
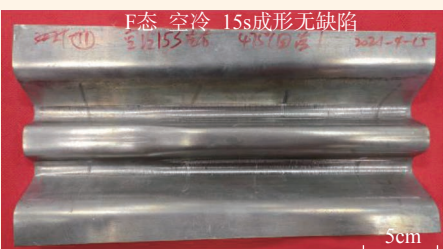
表 2 拟合参数与最大延伸率

Table 2 Fitting parameters and maximum elongation

成形温度	$K$	$n$	最大延伸率 $\Delta\delta/\%$
300℃	90.8	0.082	73.7
350℃	60.6	0.095	118.6
400℃	38.9	0.056	80.9

表3 特征件成形试验结果

Table 3 Results of forming experiment of the characteristic parts

预冷条件	O 态坯料	F 态坯料
300℃ 保温 10s		
350℃ 保温 10s		
400℃ 保温 10s		
空冷		

点:(1)由于O态坯料是经过退火处理获得,成形时其表面质量较差,改变了摩擦条件;(2)该新材料热处理流程的不同造成成形时的内部组织有差异。

根据如图7所示的结果,在传统HFQ工艺流程下,F态坯料在固溶后直接冲压时,整体碎裂根本无法成

形。对比预冷HFQ工艺试验结果,固溶温度坯料成形性在预冷后得到了巨大提升,证明了对于高强铝合金材料,在传统HFQ工艺中增加一步预冷工艺能够避免其在固溶温度附近成形性差造成的成形困难。

### 3 特征件局部强度性能测试结果

由于成形件不同位置在冷模成

形时的冷却温度路线不同,为了测试成形件不同位置的材料力学性能,选用尺寸为120mm×200mm×1.6mm的F态坯料,在同一模具上、相同预冷HFQ工艺参数下对其进行成形试验,在每个成形件上对位于法兰、外侧壁、内侧壁以及中间顶面上等7个典型位置进行单拉试样切割,典型

位置为特征件上的平面或斜面位置以保证厚度均匀,单拉试样采用美标 ASTM-E8/E8M-11<sup>[12]</sup> 的尺寸要求,具体尺寸如图 8 所示,成形件与试样切割位置示意如图 9 所示。测量并记录每根切割试样厚度数据,发现试样上厚度变化不大,然后在 Zwick 万能试验机上配合 DIC 全场应变测试系统进行单拉试验,拉伸速度设置为 1.5mm/min,计算获取试样应力、应变数据,计算获得每根试样的最大抗拉强度如图 10 所示。

观察不同预冷条件下成形件的 7 个典型位置抗拉强度,在冷模上空冷 15s 条件下与 300℃ 预冷条件下的抗拉强度比较接近,是由于坯料

在冷模上空冷时法兰部分与冷模接触,传热速度比较快,坯料温度下降较快,成形时已经接近 300℃。比较不同预冷条件成形件上试样 2、试样 3、试样 5 及试样 6 的抗拉强度与该材料 T6 态强度差值,统计其与峰值强度的差值如表 4 所示,发现在 350℃ 预冷条件下,强度恶化最为严重,最大抗拉强度差值达到 242.78MPa。且试样 2、试样 6 所在外侧壁位置的抗拉强度要大于试样 3、试样 5 所在的内侧壁位置。

根据 AA7055 淬火敏感性数据<sup>[9]</sup>,其材料硬度降低到最大硬度 90% 时的温度时间曲线如图 11 所示。由于其淬火敏感鼻尖温度在 355℃ 附

近,因此在预冷 HFQ 工艺中,将预冷温度设定至 350℃ 并保持 10s 时,恰好在鼻尖温度附近停留保温,溶质原子脱溶速度最快,成形时温度曲线最先越过硬度 90% 转化曲线,导致成形后在人工时效阶段强化相析出不足,造成其强度恶化最为严重。强度恶化的原因也与时效时间有关,工件试制时人工时效选择 20 min 的时效时间可能太短,造成强化相未完全析出。由于在不同预冷温度下保温时间越长,溶质原子脱溶越多,在成形时工件内侧壁要晚于外侧壁接触冷模,在预冷温度附近停留时间更长,所以其强度要低于外侧壁位置。

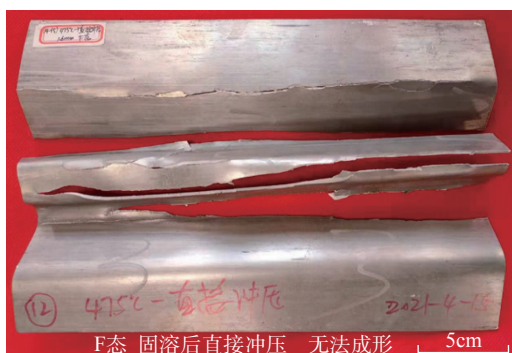


图 7 无预冷直接冲压件

Fig.7 Workpieces directly stamped without pre-cooling

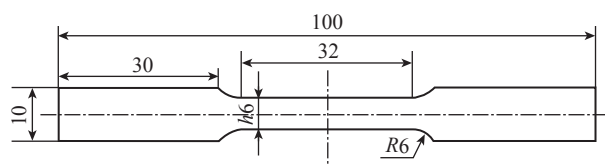


图 8 单拉试样尺寸 (mm)

Fig.8 Specimen size of uniaxial tensile test (mm)

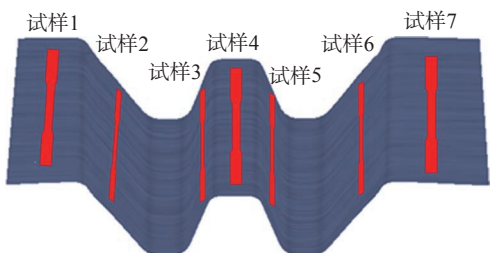


图 9 试样切割位置

Fig.9 Position of wire-cut specimens

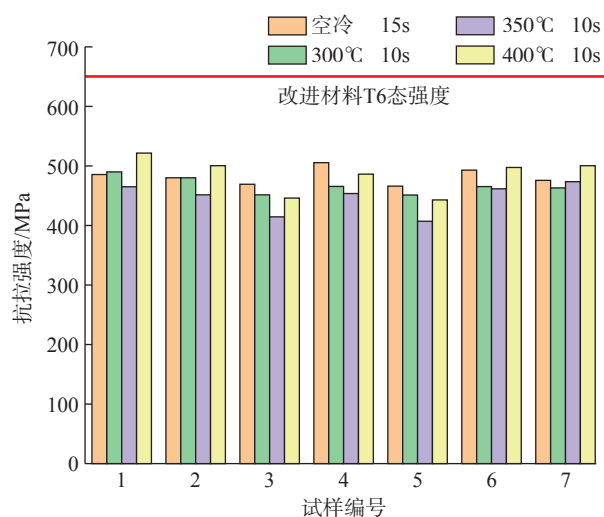


图 10 不同位置试样抗拉强度柱状图

Fig.10 Histogram of tensile strength of specimens at different locations

表 4 强度与峰值强度差值

Table 4 Difference between strength and peak strength

试样编号	空冷/MPa	300℃/MPa	350℃/MPa	400℃/MPa
2	-169.94	-169.32	-198.75	-149.44
3	-181.43	-198.20	-236.02	-204.78
5	-183.87	-199.46	-242.78	-208.85
6	-157.39	-185.33	-187.58	-153.47

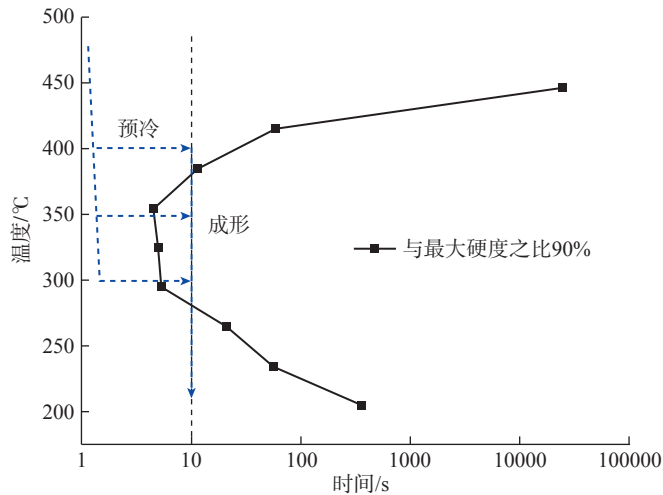


图 11 AA7055 淬火敏感性  
Fig.11 AA7055 quenching sensitivity

## 结论

(1) 对改进 AA7055 铝合金进行固溶后不同预冷温度的单拉性能测试, O 态板料在 350 °C 预冷温度下保温 20s 时, 材料最大延伸率与硬化指数最大, 在该预冷温度下成形性最好。

(2) 在预冷 HFQ 工艺试验中, O 态坯料与 F 态坯料相比成形性较差, 在所有预冷条件下均有成形缺陷, 原因可能在于表面质量差增大了摩擦以及材料内部组织差异; 而 F 态坯料在预冷时能够完好成形, 不预冷时成形件破裂, 无法成形。

(3) 预冷 HFQ 工艺成形件与该材料 T6 态相比, 抗拉强度恶化较为严重, 原因可能有两点: 一是不同预冷温度下保温时间过长, 在淬火敏感温度区域内造成溶质原子脱溶过多; 二是后期人工时效时间过短, 造成强化不足。

(4) 该改进 AA7055 材料在 350 °C 预冷温度下成形性较好, 但强度恶化最为严重, 为了兼顾强度与成形性, 预冷方式可以选择空冷至 400 °C, 避免进入鼻尖温度区域, 且实际应用中能比较简单地实现。后期可对随空

冷时间板材温度下降曲线进行测试, 并调整预冷温度下的保温时间等, 优化工艺参数。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] LIU Yong, GENG Huicheng, ZHU Bin, et al. Research progress on high efficiency hot stamping process for high strength aluminum alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(7): 1-12.
- [3] LIN J, DEAN T A, GARRETT R P, et al. Process for forming metal alloy sheet components, WO2008059242 [P/OL]. (2007-11-13)[2008-5-22]. <https://www.freepatentsonline.com/WO2008059242.html>.
- [4] 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.
- [5] GAO H, WENG T, LIU J, et al. Hot stamping of an Al-Li alloy: A feasibility study[C]//Internation Conference on New Forming Technology. Glogow: The Haworth Press, 2015.
- [6] LI Y, YU L, ZHENG J H, et al. A physical-based unified constitutive model of AA7075 for a novel hot forming condition with

pre-cooling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 876: 160142.

[6] 黄继武. 7055 高强铝合金热加工工艺基础研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.

HUANG Jiwu. Basic research on hot working process of 7055 high strength aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2004.

[7] 马玉峰, 李忠华, 朱令状. 喷射成形 7055 铝合金的热加工图 [J]. 热加工工艺, 2017(23): 22-25, 29.

MA Yufeng, LI Zhonghua, ZHU Lingzhuang. Hot processing map of spray forming 7055 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2017(23): 22-25, 29.

[8] 杨纯梅, 王燕, 曹海龙, 等. 7055 铝合金的热变形行为及挤压工艺研究 [J]. 铝加工, 2020(3): 52-57.

YANG Chunmei, WANG Yan, CAO Hailong, et al. Study on hot deformation behavior and extrusion process of 7055 aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2020(3): 52-57.

[9] 刘胜胆, 张新明, 黄振宝, 等. 7055 铝合金的淬火敏感性研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2006(5): 846-849.

LIU Shengdan, ZHANG Xinming, HUANG Zhenbao, et al. Quench sensitivity of 7055 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2006(5): 846-849.

[10] 李永丰, 张云光, 李淑慧. 一种铝合金片测试系统及测试方法: CN111855435A[P]. 2020-10-30.

LI Yongfeng, ZHANG Yunguang, LI Shuhui. A testing system and test method for aluminum alloy sheet: CN111855435A[P]. 2020-10-30.

[11] ZHANG Z, YU J, HE D. Influence of contact solid-solution treatment on microstructures and mechanical properties of 7075 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 500-503.

[12] VANGHELUWE R, POSTMA L, TUSSCHER M T, et al. Standard test method for tension testing of metallic materials[J]. European Journal of Case Reports in Internal Medicine, 2014, 8(4): 29-33.

通讯作者: 何霖, 副教授, 博士, 主要从事金属薄板塑性成形研究。

## Hot Stamping With Pre-Cooling Treatment for AA7055 High-Strength Aluminum Alloy Sheets

YUE Yuting<sup>1,2</sup>, FENG Weijun<sup>3</sup>, YANG Bing<sup>3</sup>, LI Yongfeng<sup>1,2</sup>, HE Ji<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Baowu Aluminum Technical Center, Baosteel Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

**[ABSTRACT]** For high-strength aluminum alloys at the solution temperature, it is difficult to achieve the best formability during the hot stamping and cold die quenching process (heat treatment, forming and in-die quenching, HFQ), and forming defects such as cracks would occur easily. To solve this problem, this paper introduces a pre-cooling treatment, which could cool the solid solution sheet to target temperature. In the quenching sensitivity temperature range, the mechanical properties of an AA7055 high-strength aluminum alloy sheet were tested under different pre-cooling temperatures after solid solution. It is found that the largest elongation and the best formability are obtained at pre-cooling temperature of 350°C. Taking structural parts with typical characteristics as an example, the HFQ process tests with different pre-cooling conditions and original sheet materials were carried out. It is found that the surface quality of the F-state sheet is better than that of the O-state one, and F-state sheet has better formability under the same process flow. The traditional HFQ comparative forming experiment was carried out on the F-state sheet, and the F-state sheet was severely broken without pre-cooling treatment. The uniaxial tensile tests were carried out on the typical positions of the well-formed parts. And it proves that the strength of the formed part is the lowest at the pre-cooling temperature of 350°C, which is near the nose tip temperature for quenching sensitivity. Taking into account the formability and strength, the pre-cooling temperature should be 400°C.

**Keywords:** AA7055; HFQ with pre-cooling; Contact heating; Formability; Quench sensitivity

(责编 七七)

(上接第 60 页)

## Numerical Simulation and Optimization of Shot Peen Forming of Saddle-Shaped Integrally-Stiffened Panel

TIAN Shuo<sup>1</sup>, GAO Guoqiang<sup>2</sup>, ZHONG Lixin<sup>2</sup>, CHEN Fulong<sup>1</sup>, ZENG Yuansong<sup>1</sup>,  
YANG Hui<sup>2</sup>, SHANG Jianqin<sup>1</sup>

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**[ABSTRACT]** A simulation model for stress peen forming of saddle-shaped integrally-stiffened panels was established. Through a numerical simulation-based shot peen forming parameter planning process, the typical panel process plan was simulated and analyzed and an optimized process plan was obtained. The research results show that with the optimized process plan, the simulated deformation of the typical panel is basically consistent with the theoretical deformation. The maximum difference located at the 13th rib of the rear beam is only 3.7mm, which is 8.1mm less than the initial plan. The optimized test plan is used for the test. Compared with the simulated deformation, the differences of ribs 11–17 are less than 4mm. Compared with the theoretical deformation, the differences of ribs 11–17 are not more than 2.5mm, and the differences of ribs 12–16 are not more than 0.5mm. Therefore, the shot peening deformation simulation method is more accurate and the optimization plan is reasonable and feasible.

**Keywords:** Saddle shape; Integrally-stiffened panel; Shot peen forming; Numerical simulation; Process optimization

(责编 七七)