

高强铝合金热冲压冷模具复合成型

蔡晶琦¹ 王悦¹ 陈桂才² 王礼良³

(1 中国运载火箭技术研究院研究发展中心,北京 100076)

(2 中国航天科技集团公司,北京 100048)

(3 帝国理工大学,伦敦 SW7 2AZ)

文 摘 介绍了关于铝合金板材的一种热冲压冷模具淬火复合成型工艺。该工艺在铝合金板材的成型过程中,同步完成铝合金板材的淬火,随后进行人工时效,极大地提高了铝合金板材的成型极限和强度。因此,成型件具有更轻的质量,更高的强度和更复杂的几何形状。最后讨论了使用该成型工艺的成型件在航天领域应用前景。通过对铝合金板材复合成型工艺和应用的介绍,可为我国铝合金板材成型工艺发展和工业化提供参考。

关键词 铝合金,复合成型,高强度

中图分类号: TG3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.06.020

Hybrid Forming of Aluminum Alloys

CAI Jingqi¹ WANG Yue¹ CHEN Guicai² WANG Liliang³

(1 China Academy of Launch Vehicle Technology R&D Center, Beijing 100076)

(2 China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048)

(3 Imperial College, London SW7 2AZ)

Abstract A new forming process, the hybrid forming of aluminum alloys is introduced in this paper. This forming process has been applied in high-class vehicles. In this process, the aluminum alloy sheet is formed and quenched simultaneously followed by a second stage precipitation period. By using this forming process, the formability and strength of aluminum alloys has greatly improved. A much lighter and stronger component, with more complex geometry can be obtained. The potential application of hybrid formed aluminum alloys components in aircrafts is discussed. This paper provides references for forming and processing of aluminum alloys, as well as the industrialization of HFQ in China.

Key words Aluminum alloys, Hybrid forming, High strength

0 引言

航天领域中对减重的需求日益增长,以达到增大飞行器或火箭运载能力的目的。这就要求在飞行器或者火箭的结构件中尽量使用可以一体化成型的高强轻质合金。铝合金热冲压冷模具复合成型(HFQ)技术就是在这种需求背景下应运而生,用以成型高强轻质铝合金结构件,并且适用于成型复杂形状的各种结构、机构等零部件。HFQ是一项创新性技术,该技术的研发已有10年左右的历史^[1-8]。该成型工艺已成功应用于高端汽车领域,例如莲花汽车^[9]。莲花

汽车技术团队的模拟仿真结果表明,对于同一构件,相比较于传统的玻璃纤维加强塑料件,应用该技术成型出的结构件可以显著减重。航天领域中,很多大尺寸复杂铝合金结构件是锻造或者由铸件切削成型,成本高、成型效率低。与这些传统的成型工艺相比较, HFQ具有显著的优点,因此在航天领域拥有广阔的应用前景。本文对铝合金热冲压复合成型工艺和应用进行介绍。

1 HFQ技术和工艺参数选择

以AA6082板材为例,对铝合金热冲压复合成型

收稿日期:2014-02-17;修回日期:2014-08-06

作者简介:蔡晶琦,1982年出生,工程师,主要从事飞行器设计和金属材料板材成型工艺研究。E-mail:surprising@163.com

过程和工艺参数进行介绍。AA6082 板材主要合金成分见表 1。

表 1 AA6082 板材主要化学成分

Tab. 1 Chemical composition of the AA6082 sheet

Si	Fe	Cu	Cr	Mg	Zn	Ti	其他		Al
							单个	合计	
0.5~1.2	0~0.5	0.2~0.6	0.15~0.35	0.45~0.9	0~0.2	0~0.15	0~0.05	0~0.1	余量

采用 HFQ 技术时,首先根据成型件及模具尺寸对板料进行预切割。预切割板料尺寸对成型件质量有显著影响,如果板料初始尺寸过大,成型时易发生破坏;如果板料初始尺寸过小,成型件不完整。可采用线切割以保证预切割板料尺寸的精确度。

HFQ 工艺可分为四个工步,其技术原理如图 1 所示。板料先被加热到固溶处理温度,然后被迅速放入模具,并用冷模具进行快速成型、淬火并保压。这样的快速成型过程可以保证铝合金板材的微观组织成为过饱和固溶体状态。成型前要对模具涂抹润滑剂。如果 HFQ 中采用的是可热处理的铝合金,对 HFQ 零件进行后续人工时效可以显著提高成型零件的强度。AA6082 的 HFQ 主要工艺参数参考值如表 2 所示^[6]。

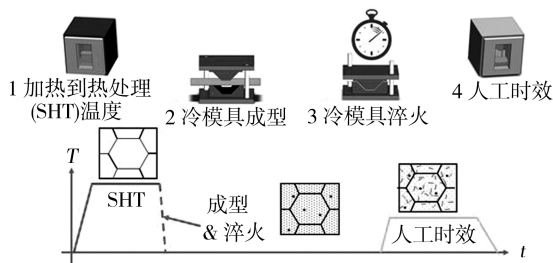


图 1 HFQ 技术过程示意图

Fig. 1 Schematic of four stages in a typical HFQ process

表 2 HFQ 技术主要工艺参数

Tab. 2 Key processing parameters of HFQ

预热温度 / $^{\circ}\text{C}$	成型速度 / $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	模具温度 / $^{\circ}\text{C}$	模具保压 时间/s	人工时效 温度/ $^{\circ}\text{C}$	人工时效 时长/h
510~540	350~450	20~30	10~15	180~200	2~9

2 HFQ 技术材料性能变化

2.1 硬度

板材初始状态下,维氏硬度约为 114。经过 HFQ 后,人工时效前,成型构件的维氏硬度显著下降,约为 56。此时构件强度较低表明构件已经被完全淬火,成为过饱和固溶态。

研究表明,人工时效时长对 HFQ 构件具有显著影响(图 2)。经过 HFQ 后的铝合金板材,在人工时效 2 h 以后,材料强度提高约 75%。当人工时效时间

为 2.5~3.75 h,成型件强度变化不明显。这表明成型件强度在人工时效 2.5 h 以后达到峰值。如果采用该铝合金标准的人工时效时间(9 h),与 2~3.75 h 短人工时效相比构件强度由于过时效而降低 10%。因此,可以得出结论,在 190 $^{\circ}\text{C}$ 进行人工时效 2.5 h,可以达到最大强度。

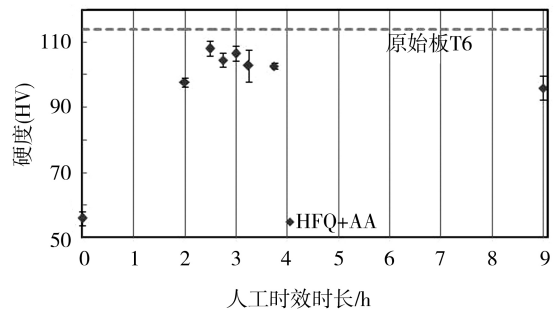


图 2 人工时效(AA)与 HFQ 件硬度关系

Fig. 2 Effects of artificial ageing (AA) on the post-form strength of HFQ formed parts

2.2 拉伸性能

通过拉伸试验,在该种成型工艺下的板材屈服、极限强度和延伸率进行了测试。拉伸试样在 190 $^{\circ}\text{C}$ 进行人工时效 2.5 h 后,材料单向拉伸的应力—延伸率曲线如图 3 所示。图中曲线为 3 次重复试验得到的应力—延伸率曲线。从图 3 上可见,材料的屈服强度约 304 MPa,极限拉伸强度约为 325 MPa,延伸率约为 7.5%,HFQ 的零件强度只比原始材料(T6 状态)强度低 6%。相比之下,AA5754 热冲压成型件强度只有 121 MPa。

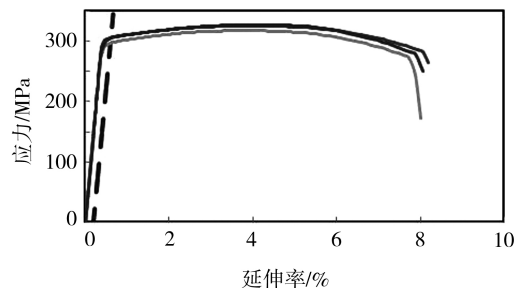


图 3 应力—延伸率关系曲线

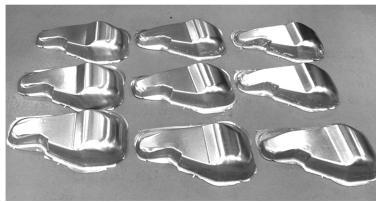
Fig. 3 Stress-elongation curves

3 HFQ 技术的应用

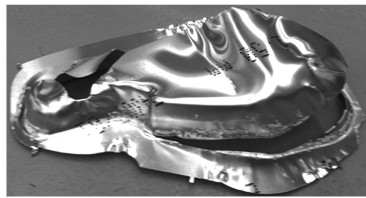
HFQ 技术可应用于不同系列铝合金板材成型。该成型工艺克服了传统铝合金板材热成型后材料性能严重下降的缺点,与冷成型相比显著提高了铝合金成型极限,因此该成型工艺很快在汽车乃至航空工业得到了应用。以某型号汽车发动机后盖为例[图 4(a)],传统成型工艺无法一次性成型本构件[图 4(b)]。冷成型时,成型初期便发生了破坏。利用 HFQ 技术,通过高温成型及利用材料的黏塑性特性显著提高了成型

极限,可以实现一次整体成型。通过有限元分析结果

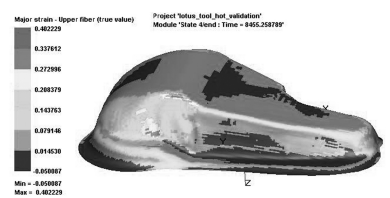
显示,该零件局部最大真实应变达 0.4^[9]。



(a) HFQ 件



(b) 冷成型件



(c) 有限元分析

图 4 某汽车用 HFQ 件与冷成型件比较

Fig. 4 HFQ formed and cold formed automotive panels

图 5(a) 是欧洲某民用客机上的一个结构件,采用 2xxx 系列铝合金成型。该零件的传统成型方法是对铝合金锻件进行机加工,材料利用率小于 10%。冷成型无法成型该结构件,如图 5(b) 所示。如果使用 HFQ 技术,可以实现该零件的热冲压冷模具复合成型,如图 5(c) 所示。材料利用率达 95% 以上,成

型速度快。如果进行批量生产,可以显著降低零件制造成本,提高生产效率。

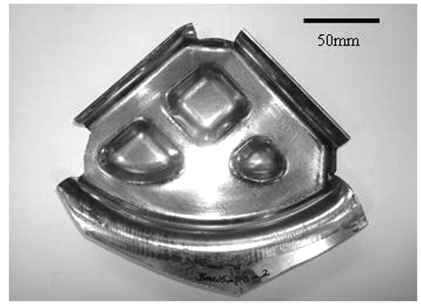
欧洲的铝合金热冲压板材复合成型件已实现工业化生产。图 6 是瑞典 AP & T 公司的热冲压生产线示意图^[10]。该生产线完成了铝合金板材 HFQ 的全自动化,显著提高了生产效率和产品质量的稳定性。



(a) 零件示意图



(b) 冷成型件



(c) HFQ 件

图 5 某航空结构件的 HFQ 件与冷成型件比较

Fig. 5 HFQ formed and cold formed structure component of an airplane

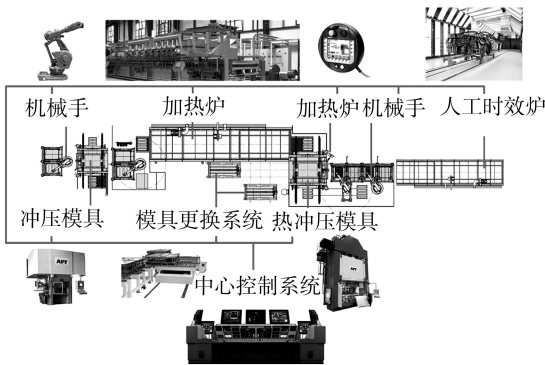


图 6 AP&T 公司铝合金热冲压生产线

Fig. 6 Commercial HFQ line of AP&T

4 结语

使用 HFQ 技术可以提高薄壁板件的成型极限,实现对复杂构件进行整体成型,从而达到对铝合金结构件进行最大限度减重的目的,用以成型高性能的铝合金构件。该技术将为结构设计人员提供更大的发挥空间,甚至新的设计理念,可以成型复杂截面的构件,有助于提高构件的刚度,达到减重的效果。通过 HFQ 技术,它可以完成对大尺寸铝合金板筋件的单

次作用成型,并且实现板筋件一体化的成型。该成型技术非常适用于对航空航天领域蒙皮加筋结构的成型,提高飞行器中蒙皮加筋结构件的强度、刚度、稳定性和整体性,减少连接件数量,减轻结构质量,从而增加飞行器、火箭等的有效载荷,并通过优化设计增加飞行器舱内可利用空间。

由于 HFQ 技术可应用于不同铝合金系列,该技术将有助于解决回收再生铝合金的低成型性问题,在汽车、航天、航空等领域采用回收再生铝合金有助于降低生产成本,减少生产铝合金带来的环境污染。综上所述, HFQ 技术优点显著,在未来将具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] Cai J, Wang Y, Wu D, et al. Potential applications of hybrid forming of aluminum alloys in aircraft [C]. Proceedings of the 64th International Astronautical Congress, 2013

[2] Garrett R P, Lin J, Dean T A. Solution Heat Treatment and cold die quenching in forming AA 6xxx sheet components: Feasibility study [M]. Geiger M, Dufflou J, Kals H J J, eds. Erlangen, GERMANY: Trans Tech Publications Ltd, 2005: 673-80

(下转第 90 页)