

2A12 铝合金大曲率半径钣金件热变形-淬火复合成形回弹规律

吴鹏程¹, 金晓月¹, 陈 维¹, 黄 莹¹, 李 强¹, 凡晓波²

(1. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324; 2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 航空航天领域存在一批种类多、批量小的大曲率半径铝合金钣金件, 其常温成形时回弹大、成形精度差。为此, 提出通过热变形-淬火复合成形来实现大曲率半径钣金件的回弹控制。首先, 以大曲率半径带状构件为研究对象, 揭示热变形-淬火复合成形回弹规律, 并结合仿真进行回弹机制分析; 然后, 采用仿真得到的最佳工艺参数, 进行复杂口框件成形。结果表明: 较高温度利于抑制回弹, 当温度达到 490 ℃ 时, 试件完全贴模; 而常温成形时, 试件几乎恢复平板形状。高温下切向应力显著降低, 弹性变形较小, 且模内淬火大幅限制了热畸变, 进一步抑制了回弹。抑制 2A12 铝合金大曲率半径钣金件热变形-淬火复合成形回弹的最优成形温度为 490 ℃, 在该温度下成功地成形了高精度口框件, 证实了热变形-淬火复合成形可用于大曲率半径铝合金钣金件的精密成形。

关键词: 2A12 铝合金; 热变形-淬火复合成形; 大曲率半径钣金件; 回弹; 成形温度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.026

中图分类号: TG394

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0188-05

Springback law of 2A12 aluminum alloy sheet metal part with a large curvature radius in hot forming-quenching integrated process

Wu Pengcheng¹, Jin Xiaoyue¹, Chen Wei¹, Huang Ying¹, Li Qiang¹, Fan Xiaobo²

(1. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the field of aerospace, there are a large number of large curvature radius aluminum alloy sheet metal parts with many kinds and small batches. When forming at room temperature, the springback is large and the forming accuracy is poor. Therefore, the springback control of sheet metal part with a large curvature radius was achieved by hot forming-quenching integrated process. Firstly, for banded part with a large curvature radius, the springback law in the hot forming-quenching integrated process was revealed, and the springback mechanism was analyzed by the simulation. Then, the forming of a complex buccal frame part was carried out by the optimal process parameters obtained by simulation. The results show that higher temperature is beneficial to inhibit springback. When the temperature reaches 490 ℃, the specimen is completely attached to the die, while formed at room temperature, the specimen almost returns to the shape of a flat plate. A higher temperature can cause the significant reduction of tangential stress, and the elastic deformation is small. In addition, in-die quenching greatly limits thermal distortion and further inhibits springback. The optimal forming temperature for hot forming-quenching integrated process springback inhibition of 2A12 aluminum alloy sheet metal part with a large curvature radius is 490 ℃. At this temperature, the high-precision buccal frame part is formed successfully, which proves that the hot forming-quenching integrated process can be used for precision forming of aluminum alloy sheet metal part with a large curvature radius.

Key words: 2A12 aluminum alloy; hot forming-quenching integrated process; sheet metal part with a large curvature radius; springback; forming temperature

2A12 铝合金钣金件由于具有高比强度和优越的抗腐蚀性能而被大量运用于航空航天领域, 如飞机蒙皮、翼型结构件等, 成为重要的结构轻量化材料

[1-3]。在航空航天领域, 存在一大批种类多、批量小的大曲率半径 2A12 铝合金钣金件, 如口框构件, 此类构件常温成形时回弹大、精度低[4-5]。如何在损失铝合金性能的前提下实现回弹控制始终是钣金塑性成形的难点。现有的方法主要是在退火态下热成形, 然后固溶淬火以实现强化, 在此期间容易出现加热不均、淬火畸变现象[6-7]。对不太复杂的构件, 可以直接采用 T4 态或 T6 态成形[8], 然而回弹较大。因此, 常需要模具优化设计来进行回弹补偿。

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-05-13

作者简介: 吴鹏程 (1983-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: wupengcheng@comac.cc

通信作者: 凡晓波 (1987-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: xbfan@dlut.edu.cn

为实现铝合金异形曲面件的高性能、高精度制造, 热变形-淬火复合成形已经发展起来^[9]。该工艺将热成形和淬火集成在同一工序, 通过加热提高铝合金的塑性, 通过模内淬火限制热畸变, 以提高成形精度^[10]。目前, 国内外学者对热变形-淬火复合成形有大量研究, 主要涉及热变形行为、强化行为和回弹规律 3 个方面^[5,11-13]。其中, 回弹研究主要聚焦于 V 形、U 形等简单试件。而口框类大曲率半径试件与这些试件的结构特征存在很大区别, 其回弹行为更为复杂。目前, 对大曲率半径铝合金钣金件热变形-淬火复合成形回弹的研究很少, 回弹规律不清晰。

为实现口框类大曲率半径钣金件的精密成形, 本文首先以大曲率半径带状试件作为研究对象, 分析温度对热变形-淬火复合成形精度的影响; 并通过有限元仿真进行回弹机制分析, 获得大曲率半径钣金件热变形-淬火复合成形的最佳工艺参数; 然后采用最佳工艺参数进行口框件的实际成形。研究结果为铝合金大曲率半径钣金件的精密成形提供了重要指导。

1 实验方案

1.1 实验材料及构件

实验材料为退火态 2A12 铝合金板材, 初始壁厚为 2.0 mm。不同温度下的真实应力-真实应变曲线如图 1 所示。可以看出, 随着温度的升高, 变形抗力逐渐减小, 伸长率得到显著提高。相同应变水平下, 较低的变形抗力有利于抑制回弹, 而优越的高温塑性有利于成形复杂特征。

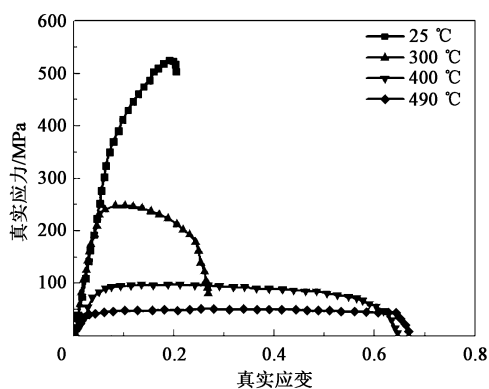


图 1 不同温度下 2A12 铝合金的真实应力-真实应变曲线
Fig. 1 True stress-true strain curves of 2A12 aluminum alloy at different temperatures

为了研究大曲率半径铝合金钣金件在热变形-淬火复合成形时的回弹规律, 本文选择形状较简单的大曲率半径带状构件作为研究对象, 来定量分析

热变形-淬火复合成形大曲率半径铝合金钣金件的回弹规律, 获得最佳回弹控制参数。然后, 基于最佳工艺参数, 成形大曲率半径口框复杂构件。图 2 为两种成形试件的形状及尺寸。

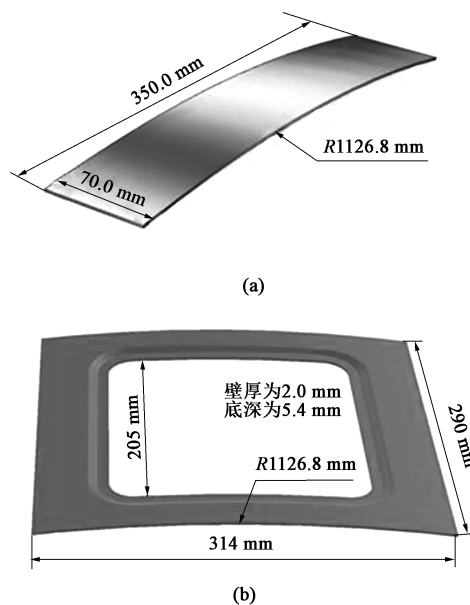


图 2 大曲率半径试件形状与尺寸

(a) 带状构件 (b) 口框构件

Fig. 2 Shapes and sizes of parts with a large curvature radius

(a) Banded part (b) Buccal frame part

1.2 实验进程

图 3 为铝合金热变形-淬火复合成形工艺流程。首先, 铝合金板坯在固溶温度 $T_{\text{SHT}} = 490\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下固溶 35 min, 确保第二相完全溶解在基体中, 使板坯获得优越的塑性变形能力。之后, 将固溶处理后的铝合金板坯在 3 s 内快速转移至模具中, 通过快速合模成形为目标形状构件。然后, 将成形后的试件在冷模内保压以实现模具淬火, 避免传统水淬或油淬时引起的热畸变, 同时获得过饱和固溶体。最终再通过时效处理使构件强化。

在热变形-淬火复合成形工艺中, 温度是影响回弹的主要因素。为此, 研究了大曲率半径带状构件在不同温度下的回弹规律, 实验温度为 25、300、400 和 490 $^{\circ}\text{C}$ 。通过对比带状构件成形轮廓来直接定量揭示回弹规律。对于口框试件, 由于成形特征复杂, 不易定量比较回弹量, 因此, 通过构件的畸变程度来反映回弹量。

1.3 有限元仿真

通过有限元分析了大曲率半径铝合金钣金件的弯曲回弹机制。仿真温度选择 25 和 490 $^{\circ}\text{C}$ 。使用 Abaqus 6.14 动态显式求解器进行成形过程的数值模

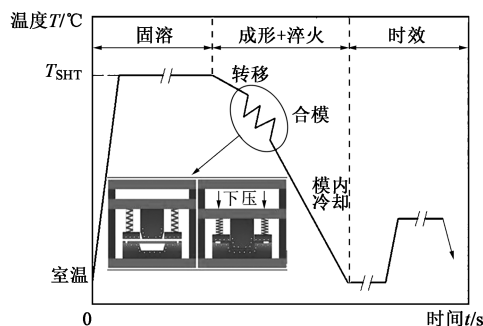


图 3 铝合金构件热变形-淬火复合成形过程

Fig. 3 Hot forming-quenching integrated process for aluminum alloy parts

拟, 有限元模型如图 4 所示。凸模和凹模定义为离散刚体。板坯定义为可变形体, 采用结构网格划分策略, 并定义为 C3D8R 单元。在厚度方向分配 6 层网格, 网格尺寸为 3 mm, 网格总数量约为 38000。模型几何尺寸与实验保持一致。基于面-面接触, 板坯和模具之间的摩擦因数设置为 0.12。弯曲成形后, 将应力场传递至隐式求解器中, 进行卸载回弹计算。

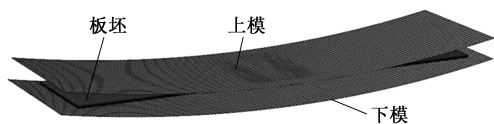


图 4 大曲率半径带状构件弯曲有限元模型

Fig. 4 Bending finite element model of banded part with a large curvature radius

2 结果与讨论

2.1 温度对回弹的影响

图 5 为热变形-淬火复合成形的铝合金大曲率

半径带状试件的轮廓分布。可以看出, 常温下带状试件卸载后的回弹量非常大, 几乎完全恢复为初始板坯。这主要是由于此类构件的塑性变形量小, 常温成形时大部分变形处于弹性阶段。当温度升高至 300 °C 时, 回弹量大幅降低, 试件轮廓已接近目标轮廓。随着温度的继续升高, 试件的回弹量逐渐降低, 贴模精度越来越高。当温度为 490 °C 时, 试件完全贴模。图 6 为不同温度下成形的 2A12 铝合金弯曲试件, 可以看到, 常温直接成形时试件几乎完全不贴模, 温度增加至 300 °C 时, 试件的回弹量非常小, 贴模精度显著提高。结果表明, 热变形-淬火复合成形可用于大曲率半径钣金件的精密成形, 2A12 铝合金大曲率半径钣金件热变形-淬火复合成形中回弹抑制的最优温度为 490 °C。

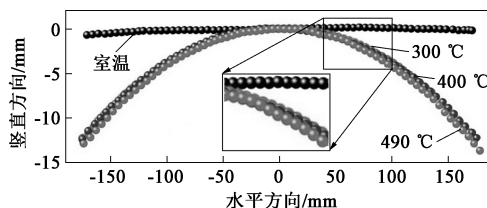


图 5 不同温度下大曲率半径带状构件的轮廓分布

Fig. 5 Profile distribution of banded part with a large curvature radius at different temperatures

2.2 回弹机制分析

通过卸载前后应力分布来进行回弹机制分析。图 7 为 25 和 490 °C 下成形试件卸载前后的应力、应变分布。可以发现, 卸载前, 常温成形构件沿弯曲方向的切向应力显著大于热成形构件。在 25 °C 时, 弯曲件两侧区域具有最大切向应力, 为 91.3 MPa。当温度上升至 490 °C 时, 最大切向应力区域向外偏移, 最大

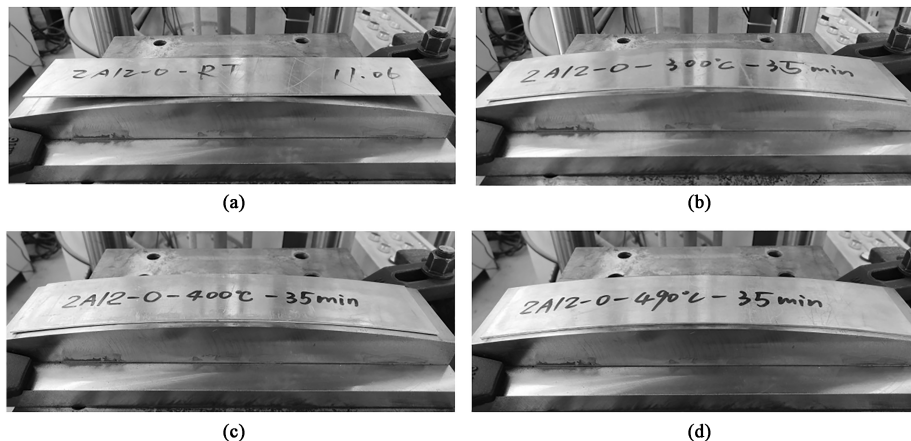


图 6 不同温度下成形的大曲率半径带状试件

(a) 25 °C (b) 300 °C (c) 400 °C (d) 490 °C

Fig. 6 Banded parts with a large curvature radius formed at different temperatures

切向应力降低至 40.2 MPa; 中部区域内最大切向应力降低至 6.8 MPa, 相比常温时降低了 88.9%。等效应力与切向应力的分布趋势一致, 均表现为高温有利于降低弯曲试件的应力。应力分布决定了应变分布, 常温成形试件的塑性应变几乎为 0, 而 490 ℃ 成形试件的中部区域由于保留了相对较大的塑性变形, 确保了大曲率半径弯曲件的高贴模精度。卸载后, 常温成形试件几乎完全恢复为平板, 应力得到大幅释放; 而 490 ℃ 成形试件保持了较好的曲面弯曲轮廓, 同时试件的中央区域由于塑性变形较大而保留了较大的残余应力, 最大残余应力为 19.8 MPa。

热变形-淬火复合成形可大幅降低大曲率半径构件的回弹。主要原因为: (1) 热成形试件的应力水平较低, 导致卸载过程中回复的弹性变形量较小, 保留了较多的塑性变形; (2) 在较高加热温度下弯曲时, 材料的弹性模量降低, 作用于弯曲件的弯矩

显著减小, 有利于降低回弹。同时, 热变形-淬火复合成形采用模内淬火, 大幅限制了热畸变, 进一步降低了回弹量。

2.3 大曲率半径口框试件成形

在 490 ℃ 条件下, 成形了大曲率半径口框钣金件, 同时与常温成形结果进行了对比。图 8 为不同温度下成形的口框试件。从图 8 中可以明显看出, 常温成形卸载后, 口框试件中部区域的贴模精度很差, 整体上翘, 回弹较大。由于常温成形时试件往往需要通过热处理强化来保证试件的服役强度, 因此, 经过固溶淬火后回弹将进一步大幅增加, 难以达到目标尺寸和形状精度要求。490 ℃ 条件下, 热变形-淬火复合成形的口框试件几乎完全实现贴模, 回弹量小于 0.2 mm。高成形精度源于热变形和模具淬火可同时抑制回弹。对于复合成形后的试件, 由于已经在完全固溶温度下成形并模内淬火, 因此,

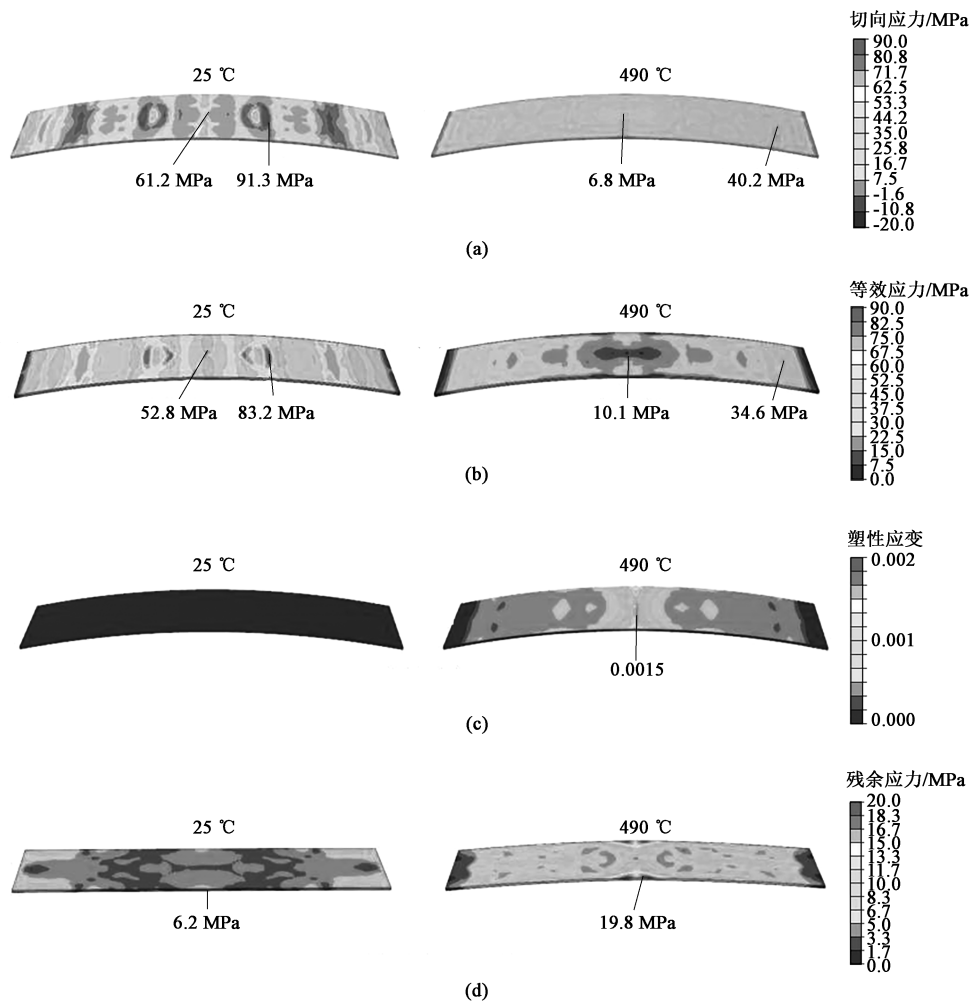


图 7 不同温度下卸载前后带状试件的应力、应变分布

(a) 卸载前的切向应力 (b) 卸载前的等效应力 (c) 卸载前的塑性应变 (d) 卸载后的残余应力

Fig. 7 Stress and strain distributions of banded parts before and after unloading at different temperatures

(a) Tangential stress before unloading (b) Effective stress before unloading (c) Plastic strain before unloading (d) Residual stress after unloading

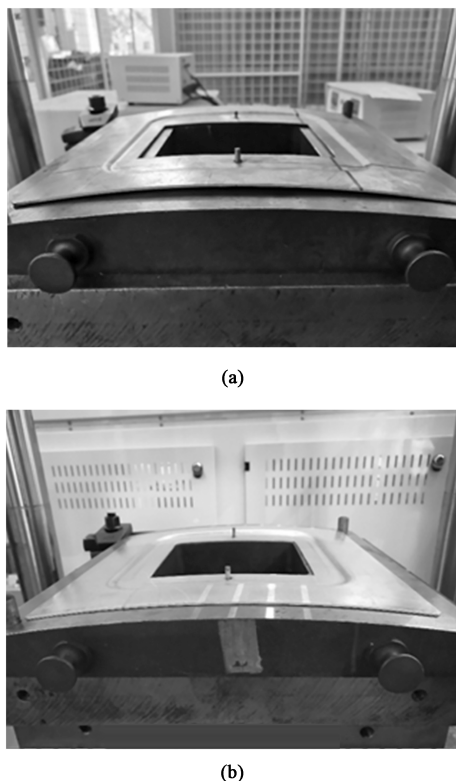


图 8 不同温度下成形的口框试件
(a) 25 °C (b) 490 °C

Fig. 8 Buccal frame parts formed at different temperatures

避免了常温直接成形后热处理强化时的淬火畸变问题。研究表明, 热变形-淬火复合成形工艺可用于大曲率半径铝合金钣金件的精密成形。

3 结论

(1) 获得了温度对热变形-淬火复合成形大曲率半径铝合金钣金件回弹的影响规律。随着温度的升高, 回弹量逐渐减小, 贴模精度逐渐提高。在常温成形时, 卸载后弯曲试件几乎完全恢复为平板; 当温度上升至 300 °C 时, 试件轮廓已接近目标成形轮廓; 当温度达到 490 °C 时, 试件完全贴模。

(2) 结合有限元分析, 揭示了大曲率半径铝合金钣金件热变形-淬火复合成形回弹的抑制机制, 提高温度有利于降低构件应力。常温成形时, 试件中部区域的切向应力为 61.2 MPa; 当温度上升至 490 °C 时, 切向应力降低至 6.8 MPa, 相比常温成形降低了 88.9%。较小的切向应力将导致卸载过程中回复的弹性变形量较小, 因此, 保留了较多的塑性变形。同时, 高温下弹性模量降低, 加上模内淬火大幅限制了热畸变, 使回弹被显著抑制。

(3) 在 490 °C 最优成形温度下, 通过热变形-淬火复合成形工艺成功地成形了高精度大曲率半径口框钣金件。口框试件几乎完全实现贴模, 试件回弹小于 0.2 mm。研究证实了热变形-淬火复合成形工艺可用于大曲率半径铝合金钣金件的精密成形。

参考文献:

- [1] Zhang D H, Bai D P, Liu J B, et al. Formability behaviors of 2A12 thin-wall part based on DYNAFORM and stamping experiment [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 55: 591-598.
- [2] Jiang J F, Zhang Y, Wang Y, et al. Microstructure and mechanical properties of thixoforged complex box-type component of 2A12 aluminum alloy [J]. Materials & Design, 2020, 193: 108859.
- [3] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望 [J]. 材料导报, 2005, 19 (2): 76-80.
Yang S J, Dai S L. A glimpse at the development and application of aluminum alloys in aviation industry [J]. Materials Review, 2005, 19 (2): 76-80.
- [4] Mahabunphachai S, Koç M. Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures [J]. Materials & Design, 2010, 31 (5): 2422-2434.
- [5] Fan X B, Wang X G, Lin Y L, et al. Deformation and strengthening behaviors of Al-Cu-Mg alloy thick plate during hot forming-quenching integrated process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1231-1242.
- [6] Zheng J H, Dong Y C, Zheng K L, et al. Experimental investigation of novel fast-ageing treatments for AA6082 in supersaturated solid solution state [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 810: 151934.
- [7] Li Z X, Zhan M, Fan X G, et al. Multi-mode distortion behavior of aluminum alloy thin sheets in immersion quenching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 279: 116576.
- [8] Kumar M, Sotirov N, Chimani C M. Investigations on warm forming of AW-7020-T6 alloy sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (8): 1769-1776.
- [9] Lin J G, Dean T A, Garrett R P. A process in forming high strength and complex-shaped Al-alloy sheet components [P]. British Patent: WO2008059242A2, 2008-05-22.
- [10] Fan X B, Wang X G, Lin Y L, et al. Biaxial formability and microstructure of an Al-Mg-Si alloy sheet post solution heat treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 902: 163753.
- [11] Shao Z T, Lee J Y, Wang J L, et al. A study of various heating effects on the microstructure and mechanical properties of AA6082 using EBSD and CPFE [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 818: 152921.
- [12] Bariani P F, Bruschi S, Ghiotti A, et al. Deformation of AA6016 aluminum alloy sheets at high temperature and strain rate [J]. Materials Science Forum, 2014, 783-786: 114-119.
- [13] Fan X B, He Z B, Yuan S J, et al. Experimental investigation on hot forming-quenching integrated process of 6A02 aluminum alloy sheet [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 573: 154-160.