

DOI:10.11918/202501062

2A12 铝合金拉杆非等温热挤压成形工艺优化

董 楹¹, 刘勇达¹, 王 亮¹, 云庆文¹, 黄 旭¹, 徐 杰²

(1. 哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 工程技术部, 哈尔滨 150066;

2. 微系统与微结构制造教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150080)

摘要: 为降低铝合金拉杆缩径增厚挤压成形的失稳起皱风险、提高拉杆生产效率, 提出一种“夹具夹持管坯非变形区、仅预热模具、无需冷却管坯”的非等温热挤压成形工艺。首先, 采用有限元仿真分析直径 $\varnothing 65$ mm、厚度 5 mm、目标增厚比 1.6 的 2A12 铝合金拉杆非等温热挤压成形工艺, 研究挤压工艺参数对拉杆成形质量的影响规律; 其次, 在仿真确定的较佳工艺参数下进行拉杆非等温热挤压成形实验, 验证模拟的有效性。研究表明, 仿真与实验结果高度吻合, 非等温热挤压工艺不仅避免了管坯尾端屈曲变形, 而且管坯首端沿挤压方向梯度递减的温度分布, 有利于维持管坯非变形区材料强度, 降低管坯首端失稳起皱风险。在摩擦系数 0.05~0.3、挤压速度 1.6~7.6 mm/s、模具温度 410~470 °C 的参数范围内, 摩擦系数对拉杆成形质量影响显著, 而挤压速度和模具温度影响较小。不过, 这 3 类参数对拉杆增厚区壁厚均匀性均无显著影响。随着摩擦系数减小, 拉杆失稳起皱风险降低, 增厚区壁厚增加, 最大壁厚增幅可达 56.5%。研究成果为提高铝合金拉杆挤压成形质量提供了一种新思路。

关键词: 铝合金; 拉杆; 缩径增厚工艺; 非等温热挤压; 成形质量

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)03-0164-09

Optimization of non-isothermal hot extrusion process for 2A12 aluminum alloy pull rod

DONG Ying¹, LIU Yongda¹, WANG Liang¹, YUN Qingwen¹, HUANG Xu¹, XU Jie²

(1. Engineering and Technology Department, Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China;

2. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing, Ministry of Education

(Harbin Institute of Technology), Harbin 150080, China)

Abstract: To reduce the risk of instability and wrinkling in the reducing and thickening extrusion process for aluminum alloy pull rod, and improve the production efficiency of the pull rod, a non-isothermal hot extrusion forming process was proposed, in which the fixture clamps the non-deformation zone of the tube blank, with only the extrusion die preheated and no cooling required for the tube blank. Firstly, the non-isothermal hot extrusion forming process of 2A12 aluminum alloy pull rod with diameter of $\varnothing 65$ mm, thickness of 5 mm and target thickening ratio of 1.6 was analyzed based on finite element simulation, and then the effects of extrusion process parameters on forming quality were investigated. Secondly, under the optimized process parameters determined by simulation, the non-isothermal hot extrusion experiment of the pull rod was conducted, validating the effectiveness of the numerical simulation. The study demonstrated excellent agreement between simulation results and experimental data. The non-isothermal hot extrusion process eliminated bending deformation at the tube ends. Furthermore, the gradient-decreasing temperature distribution at the leading end of the tube along the extrusion direction helped maintain the material strength in the non-deformation zone, thereby reducing the risk of instability and wrinkling. Under the extrusion process parameters of friction coefficient of 0.05~0.3, extrusion speed of 1.6~7.6 mm/s and die temperature of 410~470 °C, the friction coefficient exhibited a significant influence on the forming quality of the pull rod, while the extrusion speed and die temperature had relatively minor effects. However, none of these parameters showed a notable impact on the wall thickness uniformity in the thickened zone of the pull rod. As the friction coefficient decreased, the risk of wrinkling of the pull rod decreased, and the wall thickness of the thickened zone increased with a maximum increase of 56.5%. The findings of the study offer an innovative methodology for enhancing the extrusion forming quality of aluminum alloy pull rod.

Keywords: aluminum alloy; pull rod; necking and thickening process; non-isothermal hot extrusion; forming quality

收稿日期: 2025-01-26 录用日期: 2025-04-07 网络首发日期: 2025-11-14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251114.0955.002>

作者简介: 董 楹(1985—), 男, 本科, 高级工程师; 刘勇达(1991—), 男, 博士, 工程师

通信作者: 刘勇达, 13s009128@hit.edu.cn

拉杆是一种管端经过缩径和增厚成形的变截面、变厚度中空承载构件,主要材料为 Al-Cu-Mg 系铝合金^[1],广泛应用于飞机操纵系统^[2-3]。拉杆主要采用热挤压^[4]和冷旋锻^[5-6]等方法制造。不过,冷旋锻需要多套模具和多次旋锻成形,存在工序多、流程长等问题;而热挤压可以实现单道次短流程制造。与型材热挤压^[7-8]类似,拉杆热挤压^[9]也是利用金属在再结晶温度以上塑性提高和变形抗力降低的特性,通过轴向挤压力推动管材在模具内发生缩径和增厚成形。拉杆热挤压工艺包括仅预热管坯,以及同时预热管坯和模具两种方式。前者比较适合用于钢拉杆^[10-11],而后者更适合铝合金,这是由于铝合金传热性能好,管坯温度降速过快。失稳起皱是拉杆热挤压成形的主要缺陷之一,而管坯温度梯度分布能够抑制这类缺陷的产生。郭永强等^[12]报道了 20Mn2 钢管在缩径成形过程中,当管坯存在温度梯度分布时未出现起皱。为保证管坯沿轴向形成温度梯度,Li 等^[13]设计了一种冷却管坯非变形区的主动式差温缩径增厚挤压装置,成功制造了直径 22 mm 的 5A02 铝合金缩径增厚管材。李晓冬等^[14]结合 Deform 仿真和挤压实验发现,管坯壁厚或挤压

速度越大,增厚区平均壁厚越大,而较大或较小的模具锥角和管坯直径均不利于管材增厚。尽管差温热挤压在管材缩径和增厚成形方面取得了一定效果,但是主动冷却装置不仅会增加设备复杂度和能耗,而且需要预热管坯,降低了生产效率。

为实现拉杆的高质高效制造,本文提出了一种仅预热模具的非等温热挤压成形工艺。该工艺在挤压过程中无需冷却管坯,即可实现管坯温度梯度分布。为探明拉杆非等温热挤压成形工艺特点以及挤压工艺参数的影响规律,结合 Deform-3D 仿真和挤压实验开展了 2A12 铝合金拉杆非等温热挤压成形工艺研究,阐明了摩擦系数、模具温度和挤压速度等工艺参数对拉杆成形质量的影响规律。

1 研究方法

以大直径、厚壁 2A12 铝合金拉杆为研究对象,其 3D 模型和关键尺寸如图 1 所示。拉杆在缩径和增厚成形过程的变形程度分别用缩径比和增厚比来表征。其中缩径比为管坯缩径成形前后外径之比,增厚比为管坯增厚后与增厚前的壁厚之比。经计算,图 1 所示的拉杆缩径比和增厚比分别约为 0.6 和 1.6。

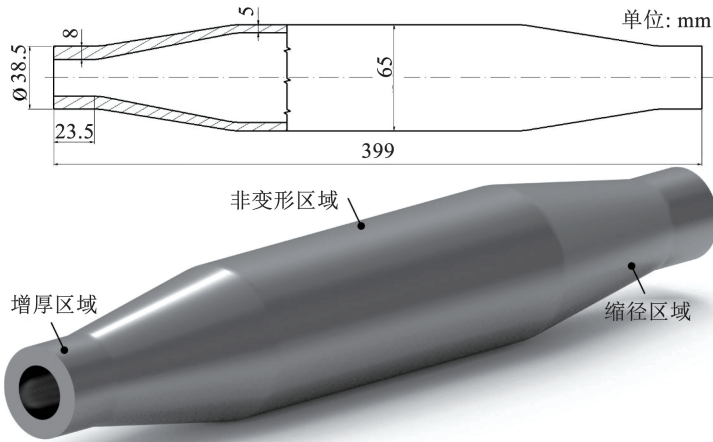


图 1 大直径 2A12 铝合金拉杆 3D 模型和尺寸

Fig. 1 3D model and geometric dimensions of 2A12 aluminum alloy pull rod with large diameter

采用本地企业生产的直径、厚度和长度规格分别为 $\varnothing 65$ mm、5 mm 和 530 mm 的 2A12-T4 铝合金

圆形管材作为拉杆非等温热挤压成形研究的管坯,其名义化学成分如表 1 所示。

表 1 2A12 铝合金化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of 2A12 Al alloy (wt%)

元素	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ni	Zn	Ti	Al
含量	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	≤0.5	≤0.5	≤0.1	≤0.1	≤0.15	余量

非等温热挤压是指挤压开始前,不将坯料和模具预热至相近温度的塑性成形方法,例如仅预热管坯的钢管缩径增厚热挤压工艺^[15-16]。图 2 为拉杆非等温热挤压成形装置示意图。为了降低拉杆挤压

过程中的起皱缺陷风险,本文提出了一种采用夹具夹持管坯非变形区的非等温挤压成形方法。拉杆非等温热挤压成形过程中管坯无需预热,其工艺流程可以描述为:模具预热→润滑剂涂覆→管坯夹持→

模具进给→缩径增厚成形→二次增厚成形→卸料空冷。根据生产经验,热挤压拉杆增厚区壁厚通常是沿图 2 所示的挤压方向逐渐减小的。为了保证拉杆增厚区有效使用长度,将模具增厚区长度设计为拉杆增厚区长度的 2 倍,即 47 mm。

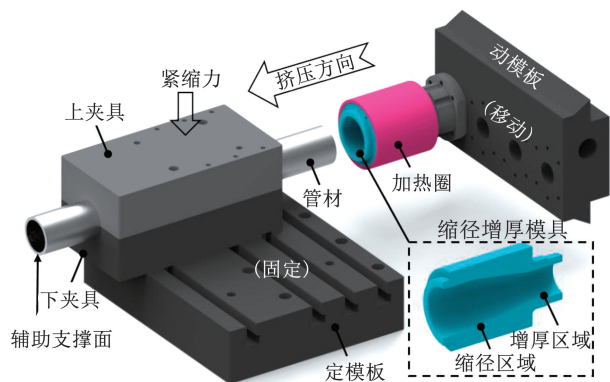


图 2 拉杆非等温热挤压成形装置示意图

Fig. 2 Schematic of hot extrusion setup of the pull rod

在数值仿真研究方面,采用 Deform-3D 有限元分析软件研究了拉杆非等温热挤压工艺特点以及工艺参数对成形质量的影响规律。其前处理步骤包括:(1)几何建模。利用 CATIA 三维建模软件完成拉杆热挤压成形装置和管坯建模。为了减少不必要的计算量和提高求解速度,简化了热挤压成形装置的几何模型,并采取 1/4 轴对称模型。(2)网格划分。如图 3 所示,使用四面体网格将几何模型离散划分为有限元模型,其中管坯、模具和上夹具网格数量分别为 120 000、24 000 和 20 000,最小网格单元长度为 1.2 mm。(3)材料属性赋予。在完成网格划分后,需要进行材料属性输入。虽然不乏针对 2A12 铝合金材料的本构方程建模的研究^[17-18],但这些模型均基于 300~500 °C 的变形温度条件建立,而拉杆非等温热挤压成形过程中,管坯在室温到热变形温度范围内发生塑性变形,因此上述模型并不适用。不过,2A12 铝合金对应的美国牌号是 2024 铝合金,因此其材料模型选择 Deform-3D 软件材料库中的 ALUMINUM-2024[70-930 °F(20-500 °C)]^[19]。夹具和模具材料直接选用软件材料库中的 AISI H13 热作模具钢。(4)边界条件设置。主要包括摩擦、传热、成形温度和挤压速度等必要边界条件的设置。夹具与管坯设置为无相对移动,管坯与模具之间摩擦模型为库仑摩擦,摩擦系数(代号为 f)、模具温度和挤压速度见表 2,管坯与模具间的界面热传递系数为 $11\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,自然对流换热系数为 $20\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,仿真中最大挤压行程设置为 180 mm。(5)求解控制。采用 Newton-Raphson 迭代算法和 Sparse 求解器,求解时间步长为 0.2 s/步。

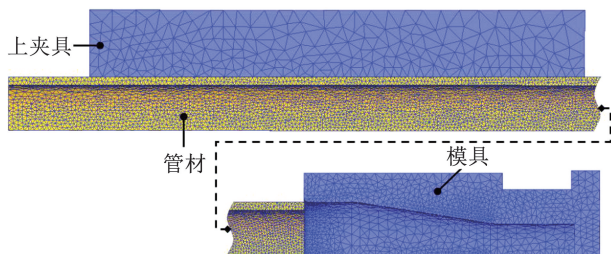


图 3 拉杆热挤压有限元模型

Fig. 3 Finite element model for hot extrusion of the pull rod

表 2 数值仿真工艺参数

Tab. 2 Process parameters for numerical simulation

工艺参数	摩擦系数	模具温度/°C	挤压速度/(mm·s ⁻¹)
水平 1	0.05	410	1.6
水平 2	0.1	430	3.6
水平 3	0.2	450	5.6
水平 4	0.3	470	7.6

为验证数值仿真结果的可靠性,在基于模拟仿真确定的最佳成形工艺参数条件下,依托现有工业级 20 吨卧式压力机进行拉杆热挤压成形实验验证。图 4 为拉杆非等温热挤压成形装置实物照片。挤压实验采用的模具温度和挤压速度分别为 430 °C 和 3.6 mm/s。将涂覆水基石墨润滑剂的管坯装入夹具形成可靠夹持后,挤压机驱动模具沿着挤压方向进行缩径和增厚成形,挤压行程为 162 mm,成形结束后立即取出工件,竖直放置进行空冷。此外,为便于描述,将靠近辅助支撑板侧的管坯简称为管坯尾端,将靠近缩径增厚模具侧的管坯简称为管坯首端。

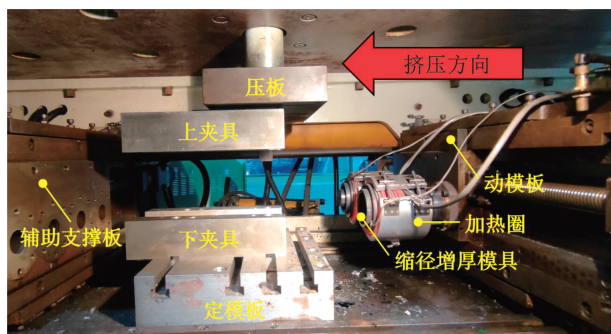


图 4 拉杆非等温热挤压成形装置

Fig. 4 Non-isothermal hot extrusion setup of the pull rod

2 非等温热挤压有限元模拟结果分析

2.1 拉杆非等温热挤压工艺特点

虽然拉杆挤压过程中采用夹具夹持管坯非变形区的技术方案能够有效避免管坯尾端发生屈曲变形,但是无法彻底消除管坯首端的失稳起皱现象,如图 5 所示。因此,本节重点讨论 2A12 铝合金拉杆非等温热挤压成形的工艺特点。

图 5 为在摩擦系数 0.3、模具温度 430 °C 和挤

压速度 3.6 mm/s 的工艺参数下,拉杆非等温热挤压过程中的成形载荷-时间曲线。当挤压时间(代号为 t) 达到 30 s 时,挤压成形载荷从 0 kN 增至 50 kN,管坯首端实现缩径成形。然而,继续挤压时,仅少量管坯材料进入增厚区,管坯金属难以持续向增厚区内流动,导致成形载荷从 61 kN 骤升至 500 kN 以上,管坯首端出现失稳起皱缺陷。为了分析上述成形缺陷的产生原因,结合拉杆非等温热挤压过程中的应力场和温度场分布,讨论拉杆失稳起皱的形成机制。

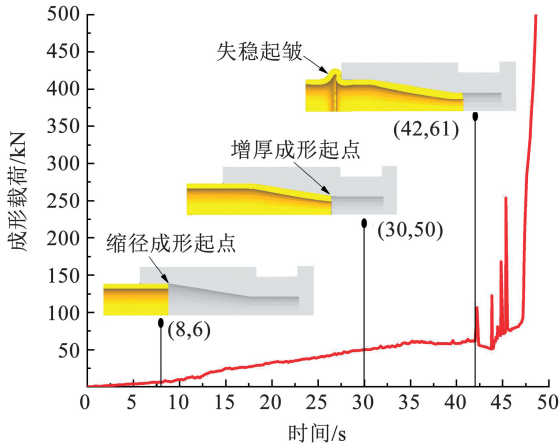


图5 拉杆非等温热挤压过程成形载荷-时间曲线 ($f=0.3$)

Fig. 5 Forming load-time curve during the non-isothermal hot extrusion of the pull rod ($f=0.3$)

图6为拉杆非等温热挤压过程的等效应力分布云图。整体来看,在保证管坯可靠夹持的前提下,管坯尾端几乎不受力,不会发生屈曲变形。处于模具入口左侧的管坯首端失稳区域所承受的应力最大,所以失稳起皱主要集中在该区域。当管坯到达增厚成形起点时($t=30$ s),失稳区域的最大等效应力增至约 246 MPa,但尚未发生明显的失稳变形。不过,当挤压时间达到 42 s 时,最大等效应力增至 296 MPa,产生明显的失稳起皱缺陷。继续挤压时,等效应力进一步增加,甚至发生金属堆叠,导致管坯无法完成增厚成形。研究表明,铝合金拉杆热挤压成形温度过低容易诱发管坯失稳起皱。为了判断这种失稳起皱是否源于不合理的管坯温度分布,下文分析拉杆热挤压成形过程的温度分布特点。

如图7所示,虽然拉杆未经预热,但其管端成形部位在挤压成形过程中的模具加热和变形热作用下,能够达到 2A12 铝合金的热变形温度。模具内管坯温度区间为 96 ~ 425 °C,呈现出沿挤压方向递减的非等温分布态势。当管坯到达缩径成形起点时($t=8$ s),管坯首端被加热至约 176 °C;当管坯到达增厚成形起点时($t=30$ s),管坯首端温度最高,可达约 425 °C。不过,随着管坯挤压时间延长,管坯首

端温度开始逐渐下降,挤压结束时($t=49.7$ s),管坯最高温度已经降至约 383 °C。相较于差温热挤压,本文提出的非等温热挤压工艺不仅无需预热管坯和额外的冷却装置,缩短成形周期,而且管坯首端梯度递减的温度分布有利于保持管坯非变形区的材料强度,降低失稳起皱的风险。因此,结合图6和图7可以断定,拉杆非等温热挤压过程中的失稳起皱并非因管坯成形区域不合理的温度分布所致,而是源于管坯与模具间摩擦阻力过大($f=0.3$)。当管端金属从模具缩径区向增厚区流动时,成形载荷急剧增大,导致管坯失稳区域所承受的应力骤升。随着挤压的继续,该区域金属承受的应力超过其所处温度下的材料屈服强度,在压应力作用下发生失稳起皱塑性变形。

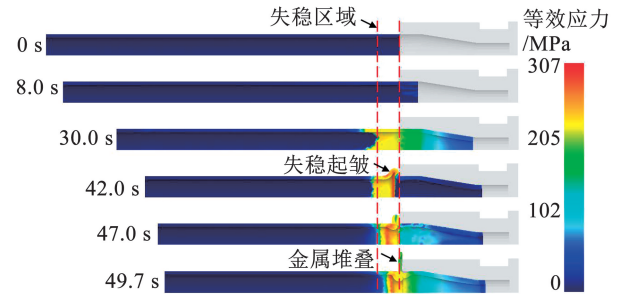


图6 拉杆非等温热挤压过程等效应力分布 ($f=0.3$)

Fig. 6 Effective stress distribution during the non-isothermal hot extrusion of the pull rod ($f=0.3$)

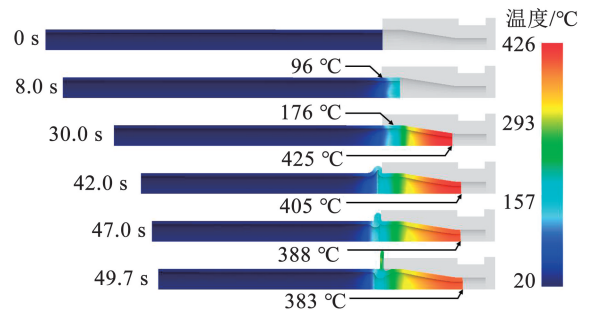


图7 拉杆非等温热挤压过程温度分布 ($f=0.3$)

Fig. 7 Temperature distribution during the non-isothermal hot extrusion of the pull rod ($f=0.3$)

为了验证上述结论并进一步讨论拉杆非等温热挤压工艺特点,在更小的摩擦系数($f=0.1$)、模具温度 430 °C 和挤压速度 3.6 mm/s 的工艺参数下,分析了拉杆非等温热挤压过程的成形载荷、应力分布和温度分布。如图8所示,当摩擦系数减小后,挤压成形载荷显著降低,管坯并未出现失稳起皱缺陷。例如,在缩径成形起点($t=8$ s)、增厚成形起点($t=30$ s)和二次增厚成形起点($t=42$ s),挤压成形载荷分别降低了约 53%、46% 和 31%。在拉杆非等温热挤压过程中,成形载荷逐渐提高,而二次增厚成形时,管坯墩粗导致成形载荷骤升,随后趋于平稳。

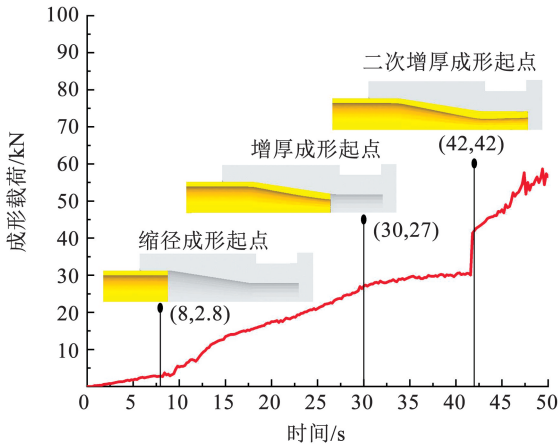


图 8 拉杆非等温热挤压过程成形载荷-时间曲线 ($f=0.1$)
 Fig. 8 Forming load-time curve during the non-isothermal hot extrusion of the pull rod ($f=0.1$)

如图 9 所示,当摩擦系数减小后,拉杆挤压过程中管坯承受的应力呈现出沿挤压方向递增的趋势,管坯易失稳区域承受的最大等效应力显著降低(例如,在二次增厚起点 $t=42\text{ s}$ 时,降幅约为 20%),而且管坯高应力易失稳区域明显减少并向模具侧偏移,所以有效地降低了管坯失稳起皱的风险。

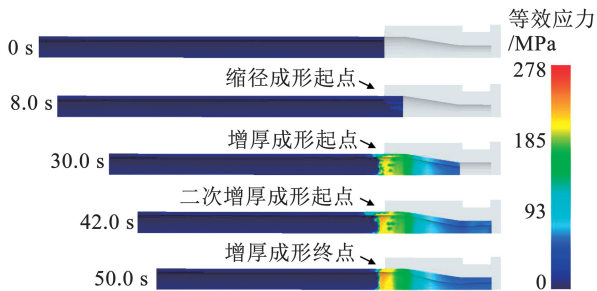


图 9 拉杆非等温热挤压过程应力分布 ($f=0.1$)
 Fig. 9 Stress distribution during the non-isothermal hot extrusion of the pull rod ($f=0.1$)

如图 10 所示,当拉杆非等温热挤压过程未出现失稳起皱时,管坯温度场的特点与出现失稳起皱时相似。主要区别在于,增厚成形阶段的温度降低程度有所减弱。例如,摩擦系数 $f=0.3$ 和 $f=0.1$ 时,挤压结束时管坯最高温度分别 $383\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $409\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于失稳起皱出现后,挤压变形热减少和管坯与模具间的换热面积增大所致。

综上所述,在拉杆非等温热挤压成形过程中,管坯首端容易发生失稳起皱,其失稳区域处于模具入口附近。管坯所承受应力和温度分别沿挤压方向递增和递减分布,高应力区域与失稳区域重合,高温区域则位于模具内的管端部位。接下来,将系统地研究摩擦系数、模具温度和挤压速度等工艺参数对 2A12 铝合金拉杆非等温热挤压过程中失稳起皱和壁厚等成形质量指标的影响。

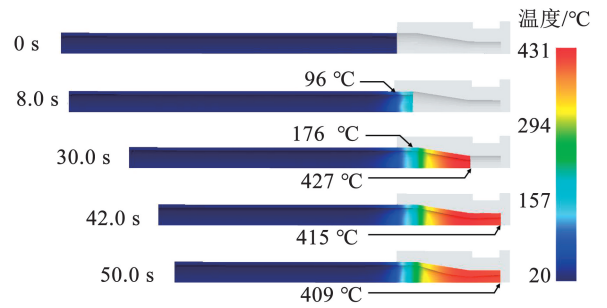


图 10 拉杆非等温热挤压过程温度分布 ($f=0.1$)
 Fig. 10 Temperature distribution during the non-isothermal hot extrusion of the pull rod ($f=0.1$)

2.2 摩擦系数对拉杆挤压成形质量的影响

减小摩擦系数能显著提高非等温热挤压拉杆的成形质量。在模具温度 $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和挤压速度 3.6 mm/s 的条件下,挤压 180 mm 后结束挤压,分析了摩擦系数对非等温热挤压拉杆成形载荷和成形质量的影响。随着管坯与模具间摩擦系数减小,拉杆挤压成形载荷降低,最大挤压成形载荷依次为 990 kN 、 72 kN 、 57 kN 和 53 kN 。如图 11 所示,随着摩擦系数减小,拉杆成形质量明显提高,其演变过程为:管坯失稳起皱、金属堆叠和填充不足 ($f=0.3$) → 管坯内凸缺陷和填充不足 ($f=0.2$) → 管坯轻微内凸缺陷 ($f=0.1$) → 无缺陷 ($f=0.05$)。上述成形质量演变源于摩擦系数减小后,挤压成形载荷降低,模具入口附近管坯容易发生失稳起皱的高应力区域面积减少,且该区域管坯承受的应力降低,最大等效应力降幅可达 22.8%。

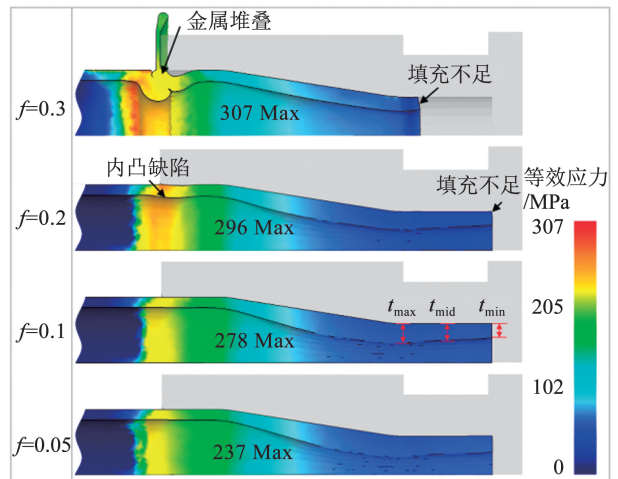


图 11 不同摩擦系数下挤压结束时拉杆等效应力分布
 Fig. 11 Effective stress distribution at the end of the extrusion of the pull rod under different friction coefficients

图 12 统计了摩擦系数对挤压成形后拉杆增厚区最大壁厚 (t_{\max})、中位壁厚 (t_{mid}) 和最小壁厚 (t_{\min}) 的影响规律,壁厚测量位置见图 11。由于摩擦系数为 0.3 时,拉杆的增厚区无法完整成形,所以不存在最小壁厚和中位壁厚。随着摩擦系数减小,拉杆增

厚区最大壁厚、中位壁厚和最小壁厚均显著增加。例如,相较于摩擦系数为0.3的情况,将摩擦系数减小至0.05时,拉杆增厚区最大壁厚提升了56.5%。

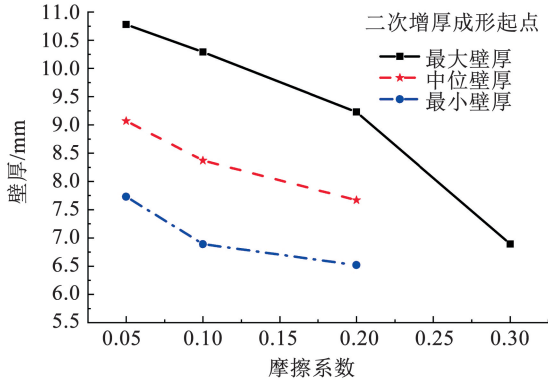


图 12 摩擦系数对挤压结束时拉杆增厚区壁厚的影响

Fig. 12 Effect of friction factor on the thickness of the thickened region of the pull rod at the end of the extrusion

2.3 挤压速度对拉杆挤压成形质量的影响

在较小的摩擦系数和所研究的挤压速度条件下,降低挤压速度在一定程度上会降低非等温热挤压拉杆的成形质量。本节在模具温度 430 °C 和摩擦系数 0.1 的条件下,挤压 180 mm 后结束挤压,分析挤压速度对非等温热挤压拉杆成形载荷和成形质量的影响。当挤压速度处于 1.6 ~ 7.6 mm/s 时,挤压速度对拉杆挤压成形载荷影响不大;随着挤压速度降低,最大挤压成形载荷依次为 69 kN、62 kN、57 kN 和 62 kN;当挤压速度为 7.6 mm/s 时,挤压成形载荷最大;其余挤压速度下的载荷值比较接近。如图 13 所示,所有挤压速度下管坯均未出现失稳起皱缺陷,但当挤压速度为 1.6 mm/s 时,易失稳区产生轻微内凸缺陷。

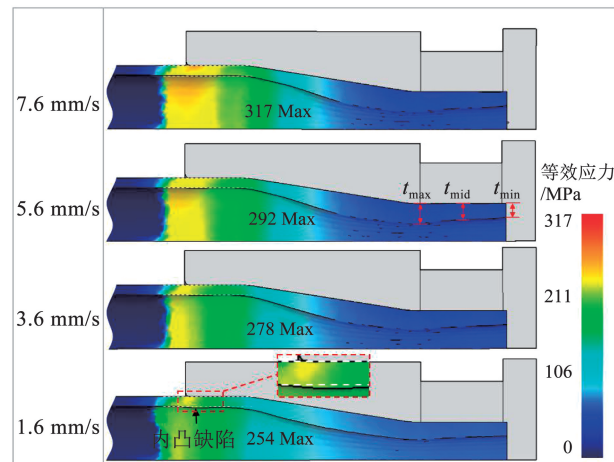


图 13 不同挤压速度下挤压结束时拉杆等效应力分布

Fig. 13 Effective stress distribution at the end of the extrusion of the pull rod under different extrusion speeds

为了阐明低速挤压时管坯内凸缺陷的产生原因,结合挤压结束时拉杆的等效应力和温度分布进行分析,主要包括两方面:一方面,由于应变速率强

化效应^[20],随着应变速率增加,材料强度均会增大,所以管坯易失稳区所承受应力随挤压速度减小而降低。例如,相比于挤压速度为 7.6 mm/s 时,挤压速度为 1.6 mm/s 时的最大等效应力降低了约 20%。然而,拉杆挤压成形过程中,降低管坯金属的屈服强度不利于抑制内凸或失稳起皱缺陷的产生;另一方面,如图 14 所示,随着挤压速度减小,管坯与模具间的热交换更充分,管坯易失稳区温度更高,金属软化效应更显著,更容易诱发内凸缺陷。图 15 统计了挤压速度对挤压成形后拉杆增厚区最大壁厚(t_{max})、中位壁厚(t_{mid})和最小壁厚(t_{min})的影响规律。由图可知,挤压速度对增厚区的壁厚影响较小。具体来看,当挤压速度从 7.6 mm/s 降低到 3.6 mm/s 时,拉杆增厚区壁厚基本不变。当挤压速度继续降至 1.6 mm/s 时,拉杆增厚区最小壁厚基本不变,而最大壁厚和中位壁厚分别减小约 9% 和 8%。此外,挤压速度对拉杆增厚区壁厚均匀性影响也不显著,不同挤压速度条件下,拉杆增厚区最大壁厚、中位壁厚和最小壁厚之间的差异程度并无明显规律。

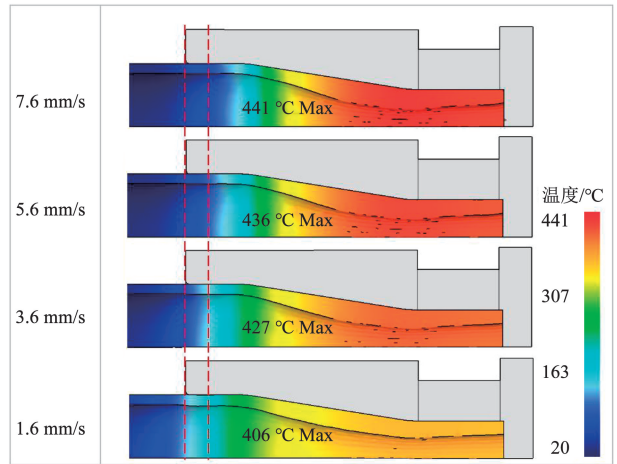


图 14 不同挤压速度下挤压结束时拉杆温度分布

Fig. 14 Temperature distribution at the end of the extrusion of the pull rod under different extrusion speeds

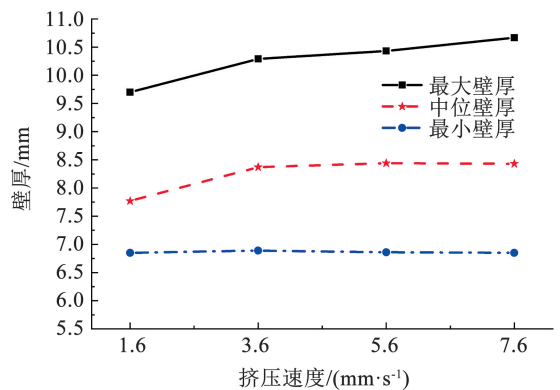


图 15 挤压速度对挤压结束时拉杆增厚区壁厚的影响

Fig. 15 Effect of extrusion speed on the thickness of the thickened region of the pull rod at the end of the extrusion

2.4 模具温度对拉杆挤压成形质量的影响

在较小的摩擦系数和所研究的模具温度条件下,随着模具温度降低,非等温热挤压拉杆的成形质量略有下降。在摩擦系数 0.1 和挤压速度 3.6 mm/s 的条件下,挤压 180 mm 后结束挤压,分析模具温度对非等温热挤压拉杆成形载荷和成形质量的影响。随着模具温度降低,拉杆挤压成形载荷显著减小,最大挤压成形载荷依次为 49 kN、53 kN、57 kN 和 62 kN。同时,挤压过程中管坯易失稳区所承受的应力也随之升高,最大等效应力值依次为 250 MPa、251 MPa、278 MPa 和 283 MPa。这是由于金属在热成形温度下会发生材料强度下降的软化效应。

如图 16 所示,在拉杆非等温热挤压成形过程中,即使模具温度很高也不会出现失稳起皱缺陷,这体现了非等温热挤压工艺的优越性。不过,当模具温度为 410 °C 时,易失稳区出现了轻微内凸倾向,产生这种缺陷的主要原因是,在较低的模具温度下,管坯易失稳区的高应力区域面积增加,且该区域管坯承受的应力升高。模拟结果表明,不同模具温度下易失稳区的温度分布其实是比较接近的。

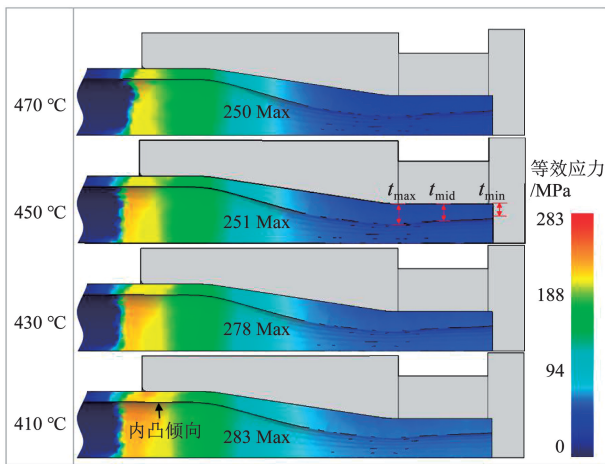


图 16 不同模具温度时挤压结束时等效应力分布

Fig. 16 Effective stress distribution at the end of the extrusion of the pull rod under different die temperatures

图 17 统计了模具温度对挤压成形后拉杆增厚区最大壁厚、中位壁厚和最小壁厚的影响规律。整体来看,模具温度对增厚区壁厚及其均匀性的影响较小,随着模具温度降低,拉杆增厚区壁厚略有减小。例如,当模具温度从 470 °C 降低到 410 °C 时,拉杆增厚区最大壁厚、中位壁厚和最小壁厚分别减小约 7%、10% 和 3%。

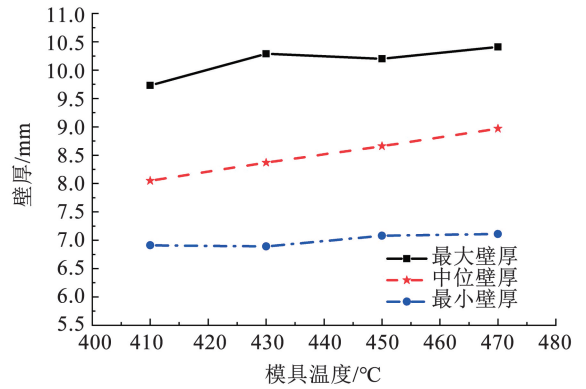


图 17 模具温度对挤压结束时拉杆增厚区壁厚的影响

Fig. 17 Effect of die temperature on the thickness of the thickened region of the pull rod at the end of the extrusion

3 拉杆非等温热挤压实验结果分析

图 18 为采用普通热挤压方法成形失败的某规格 2A12 铝合金拉杆。挤压成形后出现了典型的失稳起皱缺陷,甚至发生了图 11 所示的金属堆叠缺陷,导致管坯在卸料过程中从缺陷处拉断。因此,为了验证本文提出的拉杆非等温热挤压成形工艺及其有限元仿真效果,分析挤压行程为 162 mm 条件下拉杆成形质量。



图 18 某规格 2A12 铝合金热挤压拉杆典型起皱缺陷

Fig. 18 Typical wrinkling defect of a certain specification of 2A12 aluminum alloy pull rod processed by hot extrusion

如图 19 所示,管坯经过挤压成形后,拉杆成形区域表面润滑膜完整良好,2A12 铝合金拉杆的易失稳变形区未出现失稳起皱等缺陷,与模拟结果高度吻合。



图 19 单侧成形的 2A12 铝合金拉杆实物照片

Fig. 19 Photos of the 2A12 aluminum alloy pull rod processed by unilateral forming

为定量评估拉杆挤压成形质量,对比拉杆形状和增厚区壁厚尺寸的模拟和实测结果。考虑到拉杆实际挤压过程中管坯与模具间的摩擦系数难以确定,且观察到拉杆表面石墨润滑膜光滑完整,模拟过程中的摩擦系数取 0.05。如图 20 所示,2A12 铝合金拉杆的缩径区和增厚区的形状和壁厚尺寸的模拟和实验结果比较接近,增厚区壁厚尺寸偏差不得超过 0.12 mm,而且拉杆增厚区中位壁厚值均大于 8 mm,满足拉杆尺寸设计要求。因此,本文提出的采用夹具夹持管坯非变形区的非等温热挤压成形工艺,能够有效避免高强度铝合金拉杆成形过程中管坯尾端的屈曲失稳变形,并降低管坯首端的失稳起皱缺陷风险。本文采用 Deform-3D 软件材料库中 2024 铝合金材料模型替代 2A12 铝合金,能满足 2A12 铝合金拉杆非等温热挤压成形有限元仿真分析的需求,明确了拉杆非等温热挤压工艺特点和挤压工艺参数对拉杆成形质量的影响规律,为铝合金拉杆非等温热挤压工艺设计提供了依据。

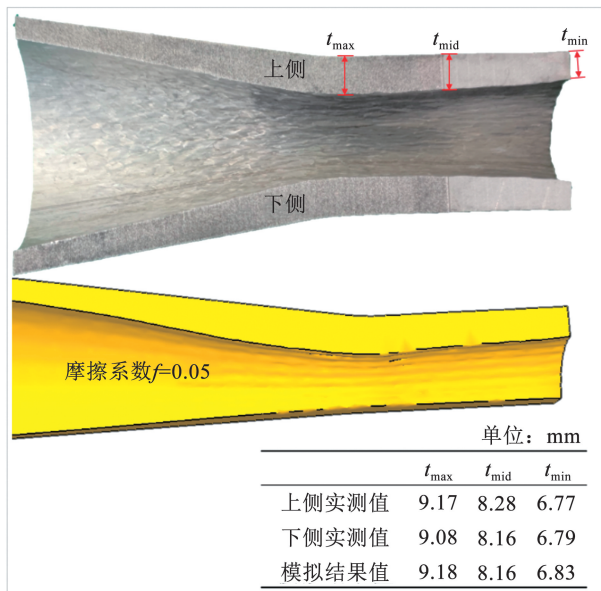


图 20 拉杆壁厚尺寸模拟和实测结果

Fig. 20 Simulation and measurement results of the wall dimension of the pull rod

4 结论

1) 提出了一种夹具夹持管坯非变形区、仅预热模具、无需冷却管坯的铝合金拉杆非等温热挤压成形工艺,该工艺不仅可有效地避免 2A12 铝合金拉杆成形时管坯尾端屈曲,而且管坯首端沿挤压方向的梯度温度分布,能维持管坯非变形区的材料强度,降低了管坯首端失稳起皱风险。

2) 模拟结果表明,在摩擦系数 0.05 ~ 0.3、挤压速度 1.6 ~ 7.6 mm/s 和模具温度 410 ~ 470 °C 的工艺参数范围内,摩擦系数对 2A12 铝合金拉杆成

形质量影响显著,而挤压速度和模具温度影响较小。三类参数对拉杆增厚区壁厚均匀性均无显著影响。随着摩擦系数的减小,拉杆失稳起皱风险降低,增厚区壁厚增加(最大增幅 56.5%)。当模具温度和挤压速度较低时,拉杆容易出现内凸缺陷,增厚区壁厚略有减小,壁厚降幅不超过 10%。

3) 通过对比 2A12 铝合金拉杆非等温热挤压成形的有限元仿真和实验结果发现,拉杆缩径区和增厚区的形状和壁厚尺寸的模拟结果和实验结果非常接近,增厚区壁厚尺寸偏差不得超过 0.12 mm。

参考文献

- [1] 李先梦, 湛利华, 申儒林, 等. 2A12 硬铝合金热拉伸流变行为及本构建模[J]. 锻压技术, 2017, 42(4): 159
LI Xianmeng, ZHAN Lihua, SHEN Rulin, et al. Hot tensile flow behavior and constitutive model of aluminum alloy 2A12[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(4): 159. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2017.04.028
- [2] 徐鑫福, 冯亚昌. 飞机飞行操纵系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989
XU Xinfu, FENG Yachang. Aircraft flight control system[M]. Beijing: Beihang University Press, 1989
- [3] 赖仁享. 直升机收口拉杆冷加工技术研究[C]//第二十九届全国直升机年会论文集. 景德镇: 中国航空学会, 2013: 543
LAI Renxiang. Study on cold processing technology of helicopter closing pull rod[C]// Proceedings of the 29th National Helicopter Annual Conference. Jingdezhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2013: 543
- [4] 邱泽宇, 徐雪峰, 付春林, 等. 5A02 铝合金薄壁管坯热挤压缩径增厚成形实验研究及优化[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(5): 7
QIU Zeyu, XU Xuefeng, FU Chunlin, et al. Experimental research and optimization on hot extrusion shrinkage and thickening of 5A02 aluminium alloy thin-walled tube[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(5): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2019.05.002
- [5] 赵升吨, 张玉亭. 旋锻技术的研究现状及其应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2010, (2): 16
ZHAO Shengdun, ZHANG Yuting. Research status and its application of rotary swag technique[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2010, (2): 16. DOI: 10.16316/j.issn.1672-0121.2010.02.004
- [6] 王强. 飞机铝合金管坯拉杆收口工艺[J]. 锻压技术, 2024, 49(3): 60
WANG Qiang. Closing process on pull rod for aircraft aluminum alloy pipe[J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49(3): 60. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.009
- [7] LIU Yongda, WANG Xiaoliang, XU Jie, et al. Severely weakened extrusion strengthening effect in porthole die extrusion of Al-Mg-Si alloy miniature complex hollow profile under an ultra-large extrusion ratio[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 332: 118575. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118575
- [8] LIU Yongda, XU Jie, WANG Xiaoliang, et al. Metal flow hysteresis behavior and shape control strategy during porthole die extrusion of

- micro heat pipe[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(7): 268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.01.009>
- [9] 郑贵全. 拉杆热收口工艺研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(15): 99
ZHENG Guiquan. Research on hot shell nosing process for strut[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(15): 99. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2010.15.062
- [10] 张亚, 徐春国, 任广升, 等. 厚壁管温热缩口与管壁增厚的数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(4): 12
ZHANG Ya, XU Chunguo, REN Guangsheng, et al. Numerical modelling study on warm-hot necking and wall thickening of thick-walled tubes[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(4): 12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.003
- [11] LIU Guihua, GUO Yongqiang, JIANG Zhen. Influence of heating models on necking deformation during tube extrusion process[J]. Advanced Materials Research, 2011, 189-193: 1778. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.1778
- [12] 郭永强, 徐春国, 任伟伟, 等. 大直径无缝钢管挤压缩口成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(12): 53
GUO Yongqiang, XU Chunguo, REN Weiwei, et al. Research on necking extrusion forming process for seamless steel tube with large diameter[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(12): 53. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2014.12.012
- [13] LI Xiaodong, XU Xuefeng, WEI Ke, et al. Effect of temperature and friction on necking and thickening for 5A02 aluminum alloy thin-walled tube in differential temperature extrusion [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108: 683. DOI: 10.1007/s00170-020-05465-w
- [14] 李晓冬, 徐雪峰, 魏科, 等. 5A02 铝合金管材缩口增厚的影响显著性及成形规律研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(2): 63
LI Xiaodong, XU Xuefeng, WEI Ke, et al. Study on influence significance and forming law of necking and thickening of 5A02 aluminum tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(2): 63. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2021.02.009
- [15] XU Chunguo, REN Guangsheng, GUO Yongqiang, et al. Tube necking extrusion principle and forming process of trailer rear axle [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 634. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.052
- [16] GUO Yongqiang, XU Chunguo, HAN Jingtao, et al. New technique of precision necking for long tubes with variable wall thickness[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2020, 15(4): 622. DOI: 10.1007/s11465-019-0565-7
- [17] JIANG Haishun, WU Rendong, YUAN Chaolong, et al. Prediction of recrystallization structure of 2A12 aluminum alloy pipe extrusion process based on BP neural network[J]. Metals, 2023, 13: 664. DOI: 10.3390/met13040664
- [18] XIA Yingxiang, SHU Xuedao, ZHANG Qingdong, et al. Modified Arrhenius constitutive model and simulation verification of 2A12-T4 aluminum alloy during hot compression[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 1325. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.190
- [19] 张振兴. 2A12 铝合金翼座热塑性成形模拟及成形技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018
ZHANG Zhenxing. Research on thermosplastic forming simulation and forming technology of 2A12 aluminum alloy tail seat [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018
- [20] 陈钰浩, 闵小华, 张海洋, 等. 应变速率对 TC17 和 TC4 钛合金锻件力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2023, 43(3): 49
CHEN Yuhao, MIN Xiaohua, ZHANG Haiyang, et al. Effect of strain rate on mechanical properties of TC17 and TC4 alloy forgings [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(3): 49. DOI: 10.11868/j.issn.1005-5053.2022.000187

(编辑 丁晓清)