高温合金 Ω 截面密封环旋压成形规律研究

邵光大¹,李智军²,李宏伟¹,詹梅¹

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘要:目的研究工艺参数对高温合金 Ω 截面密封环旋压成形过程的影响规律,解决该类构件旋压成形 难题。**方法** 基于 ABAQUS/Explicit 平台建立了高温合金 Ω 截面密封环普旋三维有限元模型,通过该模 型研究了旋压成形过程中的主要工艺参数对其等效应力、等效塑性应变、壁厚变化的影响规律,进而揭 示了各参数对环件成形质量的影响。**结果** 芯模转速增大,不均匀变形程度增大,等效应力峰值先增大 后减小,壁厚减薄基本不变;增大旋轮进给率与旋轮圆角半径,均有利于降低不均匀变形程度和等效应 力峰值,改善壁厚减薄。**结论** 当芯模转速为 10~15 rad/s,旋轮进给率为 0.8~1.0 mm/r,旋轮圆角半径 为 1.5~2.0 mm 时,可以获得成形质量较高的 Ω 截面密封环。

关键词: 旋压; 密封环; 有限元; 工艺参数

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.005

中图分类号:TG335 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2019)05-0037-06

Spinning Forming Rule of a Superalloy Ω -section Sealing Ring

SHAO Guang-da¹, LI Zhi-jun², LI Hong-wei¹, ZHAN Mei¹

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
 Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the influence rule of process parameters on the spinning process of a superalloy Ω -section sealing ring. A 3D elastic-plastic finite element model for the spinning processes of Ω -section sealing ring was established based on the ABAQUS/Explicit platform. The influence rules each parameter on the equivalent stress, equivalent plastic strain and wall thickness change during spinning forming were researched to reveal the influences of each parameter on the forming quality of rings. The results show that when the mandrel speed increased, the degree of uneven deformation of Ω -section sealing ring increased, the peak value of the equivalent stress increased first and then decreased, and the extreme value of the wall thickness tended to increase slightly. Increase of the roller feed ratio and the roller nose radius are favorable to decrease the degree of uneven deformation and the peak value of the equivalent stress, and improve the thickness distribution. When the mandrel speed is 10~15 rad/s, the roller feed ratio is 0.8~1.0 mm/r, and the roller nose radius is 1.5~2.0 mm, high quality sealing ring can be obtained.

KEY WORDS: spinning; sealing ring; finite element; process parameters

高温合金 Ω 截面密封环具有回弹性好、可压缩 范围大、可靠性高等优点,作为发动机关键构件,能 起到密封高温高压介质、保护系统的作用^[1—3]。高温 合金密封环一般采用薄壁带材经冷加工成形,旋压被

收稿日期: 2019-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1737212, U1637102)

作者简介:邵光大(1996-),男,博士研究生,主要研究方向为高温合金复杂结构件成形工艺。

通讯作者:李宏伟(1979-),男,博士,教授,主要研究方向为多尺度建模仿真的形性协同调控。

(1)

认为是成形密封环的一种精确高效成形方式^[4—5],然 而由于 Ω 截面密封环具有截面形状复杂、壁薄(0.25 mm)的"结构特性",以及高温合金伸长率低、强度 高的"材料特性",使其成形过程易产生缺陷,从而影 响成形精度和成形性能^[5—8]。旋压成形过程中,工艺 参数是影响成形质量的重要因素,合理的参数匹配 是保证材料稳定塑性流动变形的关键条件,进而才 能从根本上避免缺陷的产生,获得高质量的目标成 形件^[9—15],因此,研究并分析工艺参数对 Ω 截面密 封环旋压成形质量的影响规律,对解决该类构件旋 压成形难题具有重要意义。

文中针对 Ω 截面密封环旋压工艺参数展开研究, 提出一种 Ω 截面密封环多步旋压新工艺,先进行 Ω 形结构上半边的"收口段"外旋和"翻边段"内旋成形, 再进行下半边的"收口段"和"翻边段"成形,然后基于 Abaqus/Explicit平台建立密封环旋压成形的三维有限 元模型,分析 Ω 截面密封环多道次普旋成形过程中 的工艺参数对等效塑性应变、等效应力峰值以及壁厚 减薄的影响规律,为优化密封环旋压成形工艺,提高 密封环成形质量提供可靠依据。

1 研究方法

1.1 有限元建模

采用的坯料为薄壁环形带材,几何尺寸为 56 mm (ϕ)×18 mm (H)×0.25 mm (t),材料为高温合金 GH4169,其抗拉强度 σ_b =900 MPa,屈服强度 σ_s =450 MPa,弹性模量 E=199.9 GPa,泊松比 v=0.3,强度系 数 K=1124.5,硬化指数 n=0.253。在对材料变形抗力 数据拟合中,采取的模型为 σ = $K\varepsilon^n$,拟合函数方程为:

 $\sigma = 1124.5\varepsilon^{0.253}$

本研究环件单面内表面母线由 4 段曲线组成,1 和 3 段为圆弧,2 和 4 段为直线,这 4 段曲线顺次连 接形成该薄壁环件内表面母线。Ω 形密封环最终截面 形状可分为1 和 2 段组成的"收口段"以及 3 和 4 段组 成的"翻边段",如图 1 所示。

基于 Abaqus 软件,通过动态显式算法对其旋压 过程进行有限元建模。其中,环坯选择 S4R 壳单元, 并采用局部网格划分技术对其主要变形区进行网格 细分。芯模直径为 55.6 mm,采用解析刚体。旋轮采 用离散刚体,单元类型为 R3D4。接触约束算法采用 罚函数法,接触界面采用"有限滑动模式",旋轮与坯 料间摩擦因数取 0.1,芯模与坯料间摩擦因数取 0.3。 建立的装配模型如图 2a 所示。由于密封环上下对称, 两部分成形过程完全一样,所以只对密封环上半部分 成形过程进行研究,特征截面节点选取位置如图 2b 所示。文中研究的几个主要工艺参数有芯模转速、旋 轮进给率以及旋轮圆角半径。旋轮圆角半径取 0.5,1, 1.5, 2 mm, 进给速率取 0.1, 0.4, 0.7, 0.9 mm/r, 芯模 转速取 5, 10, 15, 20 rad/s。



图 1 Ω 截面密封环结构 Fig.1 Structure of Ω-section sealing ring





1.2 模型可靠性验证

在模型中分别设置质量放大因子为 1 000, 5 000, 10 000 等 3 种数值,不同质量放大因子下动内能之比 时程曲线见图 3,可以看出,在不同的质量缩放因子 下,每一道次初始时模型的动内能比较大,随后呈快 速下降趋势。在质量放大因子为 1000 和 5000 时,可 以满足在大多数时间下比值是小于 15%的,因此可以

39

认为,此时模型计算结果是可靠的。不同质量放大因 子下计算时间见图4,从图4观察到,随质量放大因 子的减小,模拟求解时间增大,为了在满足计算精度 的前提下提高效率,文中选取质量放大因子为 5000 进行后续的模拟计算。





2 结果与讨论

2.1 应变分析

对 Ω 截面密封环旋压成形过程中的应变分布





进行分析,采用芯模转速 5 rad/s、旋轮进给率 0.4 mm/r、旋轮圆角半径 1 mm 的工艺参数进行 Ω 截面密 封环旋压成形有限元仿真。各道次等效应变分布情况 如图 5 所示,可以看出,密封环中间"直线段"为大应 变区,该区域的宽度随第一阶段外旋过程的进行逐渐 变窄,且逐渐向"直线段"的后部移动。这是因为在密 封环的旋压成形过程中,环件下方与模具存在约束作 用,同时由于结构因素,端部"圆弧段"也会对中间"直 线段"材料有约束,因此造成直线段的变形量较大。 由于旋轮轨迹采用逐道次贴模,随变形的继续,先成 形部分已贴模,旋轮作用位置向端部"圆弧段"移动, 因此,应变极大值分布带逐渐变窄且越来越靠近"圆 弧段"。内旋翻边阶段环件的变形比较小,因此等效



图 5 密封环合道伏寺效应变分单 Fig.5 Equivalent strain distribution at each pass of the sealing ring

塑性应变值变化不是很明显。此外,可以看出,沿环 件周向应变分布比较均匀。

2.2 芯模转速对成形结果的影响

图 6 为不同芯模转速下密封环特征截面节点处 的等效应变分布趋势。从图 6 可以看出,同一芯模转 速下,等效应变沿特征截面节点先增大后减小,在中 间节点处达到最大值,这是因为中间节点处环件变形 量较大,且环件变形区域中部受到两边材料的约束, 材料减薄相对较大,导致厚向压应变增大;同时两边 材料的约束作用使其两边受拉,导致其轴向拉应变很 大,从而造成等效塑性应变增大。随着芯模转速的增 大,各节点处等效塑性应变基本呈增大趋势。芯模转 速为 5 rad/s 和 10 rad/s 时,等效塑性应变差值微小, 这说明芯模转速在此范围内对等效塑性应变的影响 不大。

图 7 为芯模转速对环件等效应力最大值的影响。 可以看出,随芯模转速增大,等效应力先增大后急剧 减小。这是因为随芯模转速增大,还料变形速度增大,



图 6 芯模转速对特征截面节点等效应变的影响 Fig.6 Influence of mandrel speed on equivalent strain of section node



图 7 芯模转速对应力最大值的影响 Fig.7 Influence of mandrel speed on maximum stress

导致应力也增大;但芯模转速增大到20 rad/s时,环件 端部微小摆动引起应力释放的程度远远大于变形速度 导致的应力增大,所以在该转速下,应力有所降低。

图 8 为芯模转速对密封环壁厚极值的影响,可以 看出,随芯模转速的增大,环件壁厚极大值先增大后 减小,壁厚极小值缓慢增大。壁厚极值随芯模转速的 增大而增大,是由于旋轮辗过相同宽度材料的时间变 短,材料在厚度上变形不充分。



图 8 芯模转速对壁厚极值的影响 Fig.8 Influence of mandrel speed on wall thickness extremum

2.3 旋轮进给率对成形结果的影响

图 9 为不同旋轮进给率下密封环特征截面节点 处的等效应变分布趋势。可以看出,同一进给率下, 沿环件特征截面节点等效塑性应变先增大后减小,在 中间节点处达到最大,也就是进给率增大对 0—7 号 节点的等效应变影响较小,对 7—25 号节点的等效应 变影响显著。这是因为,在前面节点区域,环件刚开 始变形,材料变形量较小,而中间区域材料变形量很 大,进给率增大造成各节点等效塑性应变改变程度一 样时,变形量大的区域等效塑性应变变化绝对值大一 些。此外,随旋轮进给率增大,环件不均匀变形程度 呈减小趋势。



图 9 旋轮进给率对特征截面节点等效应变的影响 Fig.9 Influence of roller feed ratio on equivalent strain of section node

图 10 为进给率对等效应力峰值的影响,可以看出, 随旋轮进给率增大,等效应力峰值呈减小趋势。这是因 为在无芯模旋压变形时,材料流动比较自由,材料有向 旋轮运动方向流动的趋势,且旋轮进给率增大,旋轮作 用相对时间缩短,使得材料变形更加容易,进而造成了 等效应力峰值和不均匀变形程度同时减小。



图 10 进给率对应力最大值的影响 Fig.10 Influence of roller feed ratio on maximum stress

图 11 为旋轮进给率对环件壁厚极值的影响。可 以发现随旋轮进给率增大,壁厚极大值减小,壁厚极 小值增大,这有利于控制壁厚的减薄,也使得环件的 壁厚更加均匀。根据体积不变原理,一些区域材料减 薄减小,流入端部位置的材料也减小,因此其壁厚增 厚程度也减小。在本研究中,壁厚极小值一般分布在 中间区域,极大值为环件端部区域,材料流向是从中 部流向端部的,这就不难理解随进给率增大,会发生 壁厚极小值增大而壁厚极大值减小的现象。



Fig.11 Influence of roller feed ratio on wall thickness extremum

2.4 旋轮圆角半径对结果的影响

图 12 为不同旋轮圆角半径下环件特征截面节点 处的等效应变分布趋势,可以看出,等效应变极大值 分布在 15—20 号节点附近,相同节点处,等效塑性 应变值随旋轮圆角半径的增大而减小,这说明不均匀 变形程度随旋轮圆角半径的增大而减小。这是因为旋轮圆角半径增大,旋轮与坯料接触面积增大,单位接触压力有所减小,使得材料的变形更均匀,从而节点应变减小。也就是说,在本研究取值范围内,大的旋轮圆角半径更有利于变形均匀。图 13 为旋轮圆角半径对等效应力峰值的影响,可以看出,随旋轮圆角半径增大,峰值应力呈降低趋势,这也验证了上述分析。







图 13 旋轮圆角半径对应力最大值的影响 Fig.13 Influence of roller nose radius on maximum stress



图 14 旋轮圆角半径对壁厚极值的影响 Fig.14 Influence of roller nose radius on wall thickness extremum

极大值减小,壁厚极小值呈增大趋势。这说明,适当 增大旋轮圆角半径有利于控制环件的壁厚减薄。本研 究范围内,旋轮圆角半径增大至1.5 mm时,最大壁 厚减薄率已经可以控制在13%左右,此时环件壁厚分 布也更均匀。

3 结论

 1)芯模转速增大,不均匀变形程度增大,等效 应力峰值先增大后减小,壁厚减薄基本不变;增大旋 轮进给率与旋轮圆角半径,均有利于降低不均匀变形 程度和等效应力峰值,改善壁厚减薄。

2) 在本研究所涉及工艺参数范围内,当工艺参 数取值区间如下:芯模转速为10~15 rad/s,旋轮进给 率为0.8~1.0 mm/r,旋轮圆角半径为1.5~2.0 mm时, 可以获得成形质量较高的Ω截面密封环。

参考文献:

- [1] 范平章. 航天飞机金属静密封技术和制造工艺[J]. 航 天制造技术, 1999(2): 11—16.
 FAN Ping-zhang. Space Shuttle Metal Static Seal Technology and Manufacturing Process[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 1999(2): 11—16.
- [2] Advanced Products Company. Seals for Extreme Environments[M]. Advanced Products Company, 2013.
- [3] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, et al. Sealing in Turbomachinery[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 313—349.
- [4] 孟艳梅. 曲母线形件复合旋压成形的数值模拟及工艺 分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.
 MENG Yan-mei. Numerical Simulation and Technical Analysis of Compound Spinning of Abnormity Works[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2005.
- [5] LEFRANCOIS M. Metal-to-metal Seals: The Innovative Route in Static Sealing[J]. Sealing Technology, 2004(4): 10—13.
- [6] ZHANG X, LI H, ZHAN M. Mechanism for the Macro and Micro Behaviors of the Ni-based Superalloy during Electrically-assisted Tension: Local Joule Heating Effect[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 742: 480–489.
- [7] ZHANG X, LI H, ZHAN M, et al. Extraordinary Effect

of the δ Phase on the Electrically-assisted Deformation Responses of a Ni-based Superalloy[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 597—604.

- [8] 郭正华,康春爽,赵刚要,等.高温合金复杂截面薄 壁圆环多道次滚压成形截面变形特征[J]. 失效分析与 预防, 2018, 60(2): 5—10.
 GUO Zheng-hua, KANG Chun-shuang, ZHAO Gangyao, et al. Cross Section Deformation Analysis on Multi-pass Roll Forming of Superalloy Thin-walled Rings with Complex Cross Section[J]. Failure Analysis and Prevention, 2018, 60(2): 5—10.
- [9] 张晋辉,杨合,詹梅,等.旋轮参数对大型变壁厚椭 圆封头强力旋压成形的影响[J].塑性工程学报,2011, 18(2):114—119.
 ZHANG Jin-hui, YANG He, ZHAN Mei, et al. Influences of Roller Parameters on Power Spinning of Large Ellipsoidal Heads with Variable Thickness[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(2):114—119.
- [10] 詹梅,李虎,杨合,等.大型复杂薄壁壳体多道次旋 压过程中的壁厚变化[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 115—121.
 ZHAN Mei, LI Hu, YANG He, et al. Wall Thickness Variation during Multi-pass Spinning of Large Complicated Shell[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008,
- [11] ZHAN M, YANG H, ZHANG J H, et al. 3D FEM Analysis of Influence of Roller Feed Rate on Forming Force and Quality of Cone Spinning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, S187/188(12): 486—491.

15(2): 115-121.

- [12] ZHAN M, GUO J, FU M W, et al. Formability Limits and Process Window Based on Fracture Analysis of 5A02-O Aluminium Alloy in Splitting Spinning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 15-32.
- [13] ZHANG H R, ZHAN M, GUO J, et al. Forming the Transverse Inner Rib of a Curved Generatrix Part Through Power Spinning[J]. Advances in Manufacturing, 2019, 7: 105—115.
- [14] CHEN S W, GAO P F, ZHAN M, et al. Determination of Formability Considering Wrinkling Defect in First-pass Conventional Spinning with Linear Roller Path[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 44—55.
- [15] MUSIC O, ALLWOOD J M, KAWAI K. A Review of the Mechanics of Metal Spinning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 3—23.