核主泵转子屏蔽套真空热胀形原理及技术

崔岩,张立文,张驰,李飞

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:目的 为保证真空热胀形工艺对屏蔽套的成形精度,进而保证后续的套装质量,研究真空热胀形工艺 的矫形能力及成形原理。方法 利用有限元软件 MSC.Marc,建立了核主泵转子屏蔽套热胀形过程的二维轴 对称热力耦合有限元模型,通过对焊接后屏蔽套测量得到模型中屏蔽套尺寸,通过此模型计算了屏蔽套在 热胀形过程中的温度场、应力场、应变场及径向位移场,预测了屏蔽套胀形后的形状,分析了热胀形对屏 蔽套的矫形原理,并对屏蔽套进行了真空热胀形实验,从而对有限元模型的可靠性进行验证。结果 计算结 果表明,热胀形过程中,屏蔽套上发生了较大的塑性应变和蠕变应变,热胀形后,屏蔽套的内径在 276.879~276.883 mm 之间。实验结果表明,热胀形实验后屏蔽套的半径分布与有限元模型计算结果符合良 好。结论 热胀形工艺通过使屏蔽套发生塑性变形和蠕变变形,实现了对屏蔽套尺寸及形状的精确控制,其 中,塑性变形是热胀形工艺可以对屏蔽套上的形状缺陷进行治理的原因。 关键词:核主泵;屏蔽套;真空热胀形;有限元;精密成形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.01.014

中图分类号: TH162⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2021)01-0105-06

Principle and Technique of Vacuum Hot Bulge Forming Process of Reactor Coolant Pump Rotor-can

CUI Yan, ZHANG Li-wen, ZHANG Chi, LI Fei

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: The work aims to study the shape-righting capacity and forming principle of vacuum hot bulge forming process to ensure the forming precision of vacuum hot bulge forming process on rotor-can and further ensure the fitting quality. The finite element software MSC.Marc was used to establish a 2-D axisymmetric thermo-mechanical coupled finite element model for the vacuum hot bulge forming process of reactor coolant pump. The initial dimension of the rotor-can was measured from the rotor-can after welding. Using this model, the temperature field, stress/strain field and radical displacement field on rotor-can during vacuum hot bulge forming process were calculated, the shape of rotor-can after vacuum hot bulge forming process were calculated, the shape of rotor-can after vacuum hot bulge forming process was analyzed. Vacuum hot bulge forming experiment was conducted on the rotor-can to verify the reliability of the finite element. The calculation results indicated that large plastic strain and creep strain occurred on roton-can during vacuum hot bulge forming process, the radius of the rotor-can was 276.879-276.883 mm. The experimental results of the radius distribution of the rotor-can after vacuum hot bulge forming process can realize the precise control of the size and shape of the rotor-can by plastic deformation and creep deformation, in which plastic deformation is the reason why the vacuum hot bulge forming process can repair the shape defects on the rotor-can.

收稿日期: 2020-08-31

基金项目:国家重点基础研究发展计划 (973) (2015CB057305);国家自然科学基金 (51604058)

作者简介:崔岩(1993—),男,博士生,主要研究方向为核主泵转子屏蔽套的精密加工、装配与可靠性评估。 通讯作者:张立文(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为固态热加工过程数值模拟。

KEY WORDS: reactor coolant pump; rotor-can; vacuum hot bulge forming process; finite element model; precision forming

屏蔽式核主泵由于其安全性强、可靠性高等优势,在三代核电技术中得到了广泛的应用^[1]。与传统轴封泵不同,屏蔽式核主泵的转子直接暴露在核电站一回路的高压冷却液中。为保护转子免受一回路冷却液的侵蚀,需要在转子外套装转子屏蔽套^[2]。转子屏蔽套通过热套装工艺装配在转子外侧,屏蔽套的制造精度和加工质量对热套装成功率和套装质量有着重要影响。AP1000核主泵转子屏蔽套通常由 Hastelloy C276 合金经裁剪、滚圆、焊接制得^[3],其内径大于550 mm,而厚度只有0.5 mm,为保证屏蔽套的热套装成功率及热套装质量,进而保证屏蔽套的按全服役,屏蔽套半径误差要求小于0.038 mm^[4]。薄壁、大径厚比、高精度的要求使得 AP1000核主泵转子屏蔽 套的制造十分困难,即使采用精密剪裁、焊接,也很难达到误差设计要求^[5]。

真空热胀形技术是一种针对薄壁桶件的精密成 形技术,具有工艺稳定性好、成形精度高、成本低等 优势,因此,为提高转子屏蔽套的制造精度,可通过 真空热胀形技术对焊后的屏蔽套进行矫形。

真空热胀形其本质为蠕变时效成形在薄壁桶件 精密成形过程的应用。目前已经有很多国内外学者对 蠕变时效成形过程进行了研究。HO.K.C.等^[6-7]建立 了铝合金的蠕变本构方程,方程中考虑了微观组织演 化对蠕变成形过程的影响,并通过此模型计算了铝合 金板材的应力应变分布; Aaron C.L.Lam 等^[8]通过实 验和有限元模拟的方式研究了AA2219铝合金板材的 蠕变时效成形过程,并分析了强化梁、网格板、等 栅格 3 种强化方式对铝合金板材回弹的影响; XU Yong-qian 等^[9]通过实验研究了一种 Al-Cu-Mg 基合 金在蠕变时效成形过程中的热变形行为、弹性变形行 为、非等温蠕变变形行为及回弹行为;LIU Chi 等^[10] 研究了蠕变时效成形过程对 AA2524-T3 铝合金微观 组织、力学性能及疲劳裂纹扩展行为的影响 , 结果表 明随着蠕变时效成形过程时间的延长, AA2524-T3 铝合金中 s 相尺寸随之增加,铝合金硬度呈先增加后 减小趋势, 且铝合金中疲劳行为随之减少; LI Yong 等^[11]对 AA2050-T34 铝合金的蠕变时效成形特性进 行了实验研究,并根据实验结果建立了 AA2050-T34 板材多点成形有限元模型,进而预测了 AA2050-T34 板材多点成形后的缺陷情况;吕凤工等[12]对铝合金带 筋构件的蠕变时效成形过程进行数值模拟和实验研 究,分析筋条部位的变形规律,并利用应力松弛试验 对筋条部位的材料性能进行等效评估;崔振华等^[13] 研究了温度、应力等参数对 7050 铝合金的蠕变时效成 形后微观组织及性能的影响,进而揭示了7050铝合金

蠕变时效成形规律和成形机制。可以看出,在过去对 蠕变时效成形的研究中,研究对象多为板材,对薄壁 桶件的研究较少。WANG Ming-wei 等^[14–15]针对钛合 金桶件真空热胀形过程建立了二维轴对称热力耦合有 限元模型,计算了真空热胀形过程中零件与模具的温 度场及应力应变场。朱智等^[16–20]对核主泵转子屏蔽套 真空热胀形过程进行了有限元和实验研究,但在这些 研究中,屏蔽套被视为完美桶件,忽略了屏蔽套在剪裁、 焊接等过程中产生的加工误差,未对真空热胀形工艺对 形状缺陷的治理能力进行研究。

文中对 AP1000 核主泵转子屏蔽套的真空热胀形 过程进行了模拟及实验研究,首先,利用有限元软件 MSC.Marc 建立了 AP1000 核主泵转子屏蔽套真空热 胀形过程的有限元模型,测量焊接后屏蔽套以获得模 型中屏蔽套尺寸,并应用此模型计算屏蔽套热胀形过 程中的温度场、应力场及应变场,预测屏蔽套在热胀 形过程中胀形量的大小,分析了真空热胀形工艺对屏 蔽套上环状鼓包缺陷的矫形原理,并进行了屏蔽套真 空热胀形试验及热套装试验,从而对模型的可靠性进 行了验证。

1 热胀形有限元模型建立

1.1 热胀形过程分析

转子屏蔽套真空热胀形过程的成形过程如图 1 所 示。首先,选用热膨胀系数大于工件的材料,将其加 工制得外径略小于屏蔽套内径的厚壁胀形模具,并于 室温下将屏蔽套套在胀形模具外面,如图 1b 所示。之 后,将转子与屏蔽套一同放入真空热处理炉中加热至 胀形温度并保温。在胀形温度下,模具与屏蔽套贴合, 如图 1c 所示。由于高温软化原理和应力松弛原理,屏 蔽套将发生塑性变形和蠕变变形。随后,将转子与模具 降温至室温,工件发生的塑性变形和蠕变变形被保留了 下来,从而实现对屏蔽套的精密成形,如图 1d 所示。

1.2 有限元模型

AP1000 核主泵转子屏蔽套轴向高度超过 2000 mm, 由于屏蔽套轴向高度对热胀形过程中屏蔽套的胀形 量几乎没有影响,为方便计算,仅沿轴向取 480 mm 进行研究,如图 2 所示,其中屏蔽套高度为 480 mm, 厚度为 0.5 mm,自上而下等距测量了屏蔽套的周长, 进而得到了屏蔽套对应位置的内径(*R*₁,*R*₂,*R*₃,*R*₄, *R*₅)。为方便分析,以环向尺寸缺陷的形式对屏蔽套 沿轴向的形状缺陷进行描述,即屏蔽套上的形状缺陷 与屏蔽套具有相同的旋转对称性。







根据热胀形过程中真空炉、胀形模具及转子屏蔽 套的对称性,利用有限元软件 MSC.Marc 建立了二维 轴对称热力耦合有限元模型,对转子屏蔽套的真空热 胀形过程进行计算,模型如图3所示。模型中胀形模 具和转子屏蔽套的材料分别为1Cr18Ni9Ti不锈钢和 Hastelloy C276 合金。Hastelloy C276 为单相奥氏体组 织,且存在较多孪晶,其初始组织如图4所示。胀形 模具高为500mm,外半径为276.875mm,厚度为20 mm,屏蔽套尺寸参数如图2所示,并以四次多项式 对5个测量点的轴向位置与半径进行拟合:

 $R(x) = Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 + Dx + E$

式中: R(x)为屏蔽套对应位置的半径; x 为屏蔽 套轴向坐标; A, B, C, D, E 为待定系数, 带入各 点后求得, $A=-7.2338\times10^{-11}$, $B=7.5714\times10^{-8}$, $C=-2.2918\times10^{-5}$, $D=1.8681\times10^{-3}$, E=276.48。

胀形模具和屏蔽套的初始温度均为 20 ℃。在胀 形过程中,胀形模具和屏蔽套被钼加热单元加热,热 胀形过程中钼加热单元的温度如图 5 所示。由于炉内 真空,钼加热单元与胀形模具和屏蔽套间通过热辐射 进行换热。在热胀形过程中,屏蔽套及胀形模具竖直 放置于真空热处理炉内,相当于一端固定,因此,在 模型中屏蔽套及胀形模具左端节点设置为 *x* 方向位 移为 0。模型中的单元类型均为轴对称四节点四边形 单元,共存在 4930 个单元,9322 个节点。



Fig.3 Finite element model of vacuum hot bulge forming process of rotor-can



图 4 胀形前 Hastelloy C276 合金初始组织 Fig.4 Microstructure of Hastelloy C276 before vacuum hot bulge forming process



Fig.5 Procedure of vacuum hot bulge forming process

2 模拟结果与分析

热胀形不同阶段屏蔽套上的应变分布如图 6 所 示。热胀形开始后,随着温度的升高,胀形模具和屏 蔽套共同受热膨胀。由于模具热膨胀系数较大, 膨胀 较快,在加热过程中胀形模具逐渐与屏蔽套发生接 触,屏蔽套产生弹性应变。随着温度升高,屏蔽套变 形增加,同时,由于高温软化作用,屏蔽套的屈服强 度降低,屏蔽套开始发生塑性变形。保温阶段开始时 屏蔽套上的应变分布如图 6a 所示,可知,保温阶段 开始时,屏蔽套上各位置的弹性应变均为 1.21×10⁻³, 塑性应变在 2×10⁻⁴~1×10⁻³,且屏蔽套内径较小的位 置由于更早与胀形模具发生接触,变形量更大,发生 的塑性变形也更大,在此时屏蔽套上几乎没有蠕变应 变。在热胀形保温阶段,在高温和应力的共同作用下, 屏蔽套发生蠕变变形,弹性应变逐渐转化为蠕变应 变。热胀形保温阶段结束后,屏蔽套上的弹性应变减 小至 6.2×10⁻⁴, 蠕变应变增加至 6.4×10⁻⁴, 蠕变 应变的增加量基本等于弹性应变的减少量,在保温阶段塑性应变基本没有变化,如图 6b 所示。保温阶段 结束后,胀形模具和屏蔽套冷却收缩,屏蔽套与胀形 模具分离。图 6c 为热胀形结束后屏蔽套上的应变分 布情况,可以看出,胀形结束后,屏蔽套上的弹性应 变全部释放,热胀形过程中产生的塑性应变与蠕变 应变保留了下来,从而达到了胀形的目的。同时, 由于在胀形过程中屏蔽套内径较小位置胀形量较 大,因此热胀形工艺可以有效对屏蔽套上的形状缺 陷进行治理。

图 7 为热胀形前后屏蔽套内径分布情况,可以看 出,屏蔽套初始内径较小的位置胀形量较大,初始内 径较大的位置胀形量较小,因此热胀形后屏蔽套内径 分布均匀性明显提高。热胀形后,屏蔽套的内径在 276.879~276.883 mm,在工艺要求的(276.875±0.038) mm范围内。由此可知,热胀形工艺可以对屏蔽套的 尺寸及形状精度有效进行治理。







图 7 热胀形前后屏蔽套内径分布 Fig.7 Radius distribution on rotor-can before and after vacuum hot bulge forming process

3 屏蔽套热胀形及热套装实验

为验证转子屏蔽套真空热胀形有限元模型的准确性,对屏蔽套进行了真空热胀形实验。实验所用胀 形模具由 1Cr18Ni9Ti 不锈钢经精密加工制得,其高 为500 mm,外半径为276.875 mm,屏蔽套由Hastelloy C276 合金经剪裁、滚圆、焊接制得,高为480 mm, 厚度为0.5 mm,实验前从上至下等距取5个测量点 以此测量屏蔽套外径,进而得到屏蔽套半径。

真空热胀形实验时,首先将屏蔽套套在胀形模具 外侧,并将套有屏蔽套的胀形模具放入井式真空炉 中,关闭炉门,将屏蔽套和胀形模具加热至800℃并 保温3h,使屏蔽套发生蠕变变形,之后降温,屏蔽 套和胀形模具收缩分离,胀形完成。热胀形实验前后 的屏蔽套如图8所示,可以看出,热胀形后屏蔽套的 内径略有增加,且圆整度有所提高。胀形实验后再次 测量了屏蔽套五测量点的内径,并将测量结果与模拟 结果进行了对比,如图9所示,可以看出,热胀形后 模拟结果与实验结果符合较好,说明文中所建立的有 限元模型可以对核主泵转子屏蔽套的真空热胀形过 程有效进行预测。

利用自主搭建的实验平台对热胀形后的屏蔽套 进行了热套装试验,如图 10 所示。为减慢屏蔽套降 温速度,延长套装时间,在屏蔽套外侧设置了保温层。 采用了吊装转子的方式进行热套装,试验开始时,将 屏蔽套置于井式炉中,并加热至套装温度,之后打开 炉门,通过吊装机构将转子插入屏蔽套中,转子的插 入需要在 15 s 内完成^[5],待屏蔽套冷却,收缩套装在 转子上后,通过吊装机构将转子与屏蔽套共同吊出, 套装完成。热套装后的转子及屏蔽套如图 11 所示, 可以看出,热胀形后的转子屏蔽套完全套装在了转子 上 , 且屏蔽套与转子间贴合良好 , 说明经热胀形工艺 矫形后的转子屏蔽套可以用于热套装。



俯 视 图

热胀形实验前后的屏蔽套 图 8 Fig.8 Rotor-can before and after vacuum hot bulge forming process



图 9 屏蔽套内径模拟及实验结果 Fig.9 Simulation and experimental results of inner radius of rotor-can



转子屏蔽套热套装实验平台 图 10 Fig.10 Shrink fitting experimental apparatus of rotor-can



图 11 热套装实验后的转子及屏蔽套 Fig.11 Rotor-can and rotor after shrink fitting

4 结语

研究了 Hastelloy C276 合金薄壁屏蔽套的真空热 胀形过程,利用有限元软件 MSC.Marc 建立了屏蔽套 热胀形过程的有限元模型,模型中屏蔽套的尺寸为实 际测量所得,模拟了此转子屏蔽套的热胀形过程,并 计算得到了胀形过程中屏蔽套上的温度场、应力场、 应变场,得到结论如下。

1) 热胀形工艺通过使屏蔽套发生塑性变形和蠕 变变形,实现了对屏蔽套尺寸及形状的精确控制,其 中,塑性变形是热胀形工艺可以对屏蔽套上的形状缺 陷进行治理的原因。

2) 对有缺陷的转子屏蔽套进行了真空热胀形实 验,测量了胀形前后屏蔽套的内径变化,并将测量结 果与模拟结果进行了对比,结果表明模拟结果与实验 结果符合良好,从而证明了转子屏蔽套真空热胀形有 限元模型的可靠性。

3) 对胀形后的屏蔽套进行了热套装实验,实验 后屏蔽套完全套装在了转子上,说明经热胀形工艺矫 形后的屏蔽套可以有效保证后续的热套装质量。

参考文献:

- [1] 庄亚平. AP1000 屏蔽泵的应用分析[J]. 电力建设, 2011, 31(11): 98-101. ZHUANG Ya-ping. Application of AP1000 Canned Motor Pump[J]. Electric Power Construction. 2011, 31(11): 98-101.
- [2] 李新和, 刘燕平, 严岳胜, 等. 大径厚比超薄壁筒形 件变薄旋压鼓形[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(3): 64-70. LI Xin-he, LIU Yan-ping, YAN Yue-sheng, et al. Analysis on Bulging during Flow Forming of Tube with Ultra Thin-wall and Large Diameter/Thickness Radio[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(3): 64-70.
- [3] 马广义,吴东江,柴东升,等.核主泵屏蔽套近无缺 陷激光焊接技术[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 1-8. MA Guang-yi, WU Dong-jiang, CHAI Dong-sheng, et al.

Near-free-defect Laser Welding of AP1000 Nuclear Reactor Coolant Pump Can[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(15): 1—8.

- [4] 关锐,高永军. AP1000反应堆主泵屏蔽套制造工艺浅 析[J]. 中国核电, 2008, 1(1): 49—53.
 GUAN Rui, GAO Yong-jun. Brief Analysis on Fabrication Process of AP1000 Reactor Coolant Pump Can[J].
 China Nuclear Power, 2008, 1(1): 49—53.
- [5] 朱智.核主泵转子屏蔽套真空热胀形及热套装研究
 [D].大连:大连理工大学,2014.
 ZHU Zhi. Research on Vacuum Hot Bulge Forming and Shrink Fitting of Reactor Coolant Pump Rotor-can[D].
 Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [6] HO K C, LIN J, DEAN T A. Constitutive Modeling of Primary Creep for Age Forming an Aluminium Alloy[J]. Journal of Materials Process Technology, 2004, 153(1): 122–127.
- [7] HO K C, LIN J, DEAN T A. Modeling of Springback in Creep Forming Thick Aluminum Sheets[J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(4/5): 733-751.
- [8] AARON C L L, SHI Zhu-sheng, YANG Hao-liang, et al. Creep-age Forming AA2219 Plates with Different Stiffener Designs and Preform Age Conditions: Experimental and Finite Element Studies[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 155–163.
- [9] XU Yong-qian, ZHAN Li-hua, HUANG Ming-hui, et al. Deformation Behavior of Al-Cu-Mg Alloy during Non-isothermal Creep Age Forming Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 26–34.
- [10] LIU Chi, LIU Yi-lun, LI Song-bai, et al. Effect of Creep Aging Forming on the Fatigue Crack Growth of an AA2524 Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 725: 375–381.
- [11] LI Yong, SHI Zhu-sheng, YANG Yo-lun, et al. Experimental and Numerical Study of Creep Age Forming of AA2050 Plates with Sparse Multi-point Flexible Forming Tool[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 1016—1023.
- [12] 吕凤工,黄遐,曾元松,等. 7B04 铝合金带筋构建蠕 变时效成形数值模拟与试验[J].塑性工程学报,2017, 24(3):19—24.
 LYU Feng-gong, HUANG Xia, ZENG Yuan-song, et al. Numerical Simulation and Experiment on Creep Age Forming for 7B04 Aluminium Alloy Stiffaned Compo-

Forming for 7B04 Aluminium Alloy Stiffened Component[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(3): 19—24.

[13] 崔振华,刘晓艳,王路路,等.7050 超高强铝合金蠕 变时效成形行为与性能研究[J].有色金属材料与工程, 2020,41(3):7—14. CUI Zhen-hua, LIU Xiao-yan, WANG Lu-lu, et al. Study on Creep Age Forming Behavior and Properties of 7050 Ultra-high Strength Aluminum Alloy[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2020, 41(3): 7—14.

- [14] WANG M W, ZHANG L W, PEI J B, et al. Effect of Temperature on Vacuum Hot Bulge Forming of Titanium Alloy Cylindrical Workpiece[J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17: 957–962.
- [15] 王明伟, 张立文, 裴继斌, 等. 温度对 BT20 合金筒 形件真空热胀形影响模拟研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(2): 141—144.
 WANG Ming-wei, ZHANG Li-wen, PEI Ji-bin, et al. Simulation and Research on Influence of Temperature on Vacuum Hot Bulge Forming of BTZO Alloy Cylindrical Workpiece[J]. Transcations of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(2): 141—144.
- [16] 朱智, 张立文, 宋冠宇, 等. HastelloyC-276 合金应力 松弛行为的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(4): 697—700.
 ZHU Zhi, ZHANG Li-wen, SONG Guan-yu, et al. Study on Stress Relaxation Behavior of Hastelloy C-276 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(4): 697—700.
- [17] 朱智, 张立文, 顾森东. 工艺参数对转子屏蔽套真空 热胀形影响的模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(9): 2257—2261.
 ZHU Zhi, ZHANG Li-wen, GU Sen-dong. Modeling Effects of Process Parameters on Vacuum Hot Bulge Forming of Rotor Cans[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(9): 2257—2261.
- [18] 朱智, 张立文, 顾森东. HastelloyC-276 合金应力松弛 实验及蠕变本构方程[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1063—1067.
 ZHU Zhi, ZHANG Li-wen, GU Sen-dong. Stress Relaxation Test of HastelloyC-276 Alloy and Its Creep Constitutive Equation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4): 1063—1067.
- [19] 朱智, 张立文, 崔岩, 等. 胀形间隙对核主泵转子屏 蔽套真空热胀形的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(4): 289—294.
 ZHU Zhi, ZHANG Li-wen, CUI Yan, et al. Effect of Bulging Clearance on Vacuum Hot Bulge Forming of

Reactor Coolant Pump Rotor Can[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(4): 289–294.

[20] ZHU Z, ZHANG L W, GU S D. FEM Analysis of Vacuum Hot Bulge Forming of Hastelloy C-276 Thin-walled Cylindrical Workpiece[J]. Journal of Center South University, 2014, 21(8): 3019–3023.