

低活化钢 U 形弯曲工艺仿真及实验研究

丁方强, 吴信涛, 李萍

(合肥工业大学, 合肥 230009)

摘要: **目的** 优化低活化钢的 U 形折弯成形工艺。**方法** 应用 DEFORM-3D 仿真软件, 对不同工艺参数下的 U 形折弯试验进行模拟, 探究成形温度、凸模下行速率以及凹模圆角半径等因素对 U 形折弯效果的影响, 对折弯工艺进行优化, 最后根据优化参数结果进行实验, 并将实验现象与模拟结果进行比较。**结果** 在成形温度为 600 °C、凹模圆角半径为 20 mm、凸模下行速率为 0.5 mm/s 时, U 形折弯的模拟效果最优, 在此工艺参数下进行折弯实验, 得到的 U 形件满足生产需求。**结论** 通过优化合适的工艺参数, 使用折弯工艺加工 U 形件完全可行。

关键词: U 形件; 低活化钢; 折弯工艺

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.009

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)04-0049-05

Simulation and Experimental Study on U-shaped Bending Process of Low Activation Steel

DING Fang-qiang, WU Xin-tao, LI Ping

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: To optimize the bending process of U-shaped for low activation steel, the U-shaped bending tests were simulated by DEFORM-3D simulation software under different process parameters, and the effects of forming temperature, speed and fillet on U-shaped bending were explored to optimize the U-shaped bending process. At last, experiments were taken according to the optimization results, and then the experiment results were compared with the simulation results. The simulation of U-shaped bending had the best effect at 600 °C, 0.5 mm/s and 20 mm. Bending tests were carried out under these process parameters, and the U-shaped parts obtained met the production requirements. Using the bending process to manufacture the U-shaped parts is completely feasible by optimizing the appropriate process parameters.

KEY WORDS: U-shaped parts; low activation steel; bending process

聚变堆包层是未来聚变堆部件的核心, 作为包容高温聚变等离子体的容器, 是进行中子能量的沉积转换、氦增殖以及辐射屏蔽的关键部件^[1]。第一壁作为包层结构直接面向高温等离子体的部件, 服役环境最为恶劣^[2-3], 要直接承受来自等离子体的高热

负载 (0.27 ~ 1 MW/m²) 和强中子壁负载 (0.78 MW/m²)。包层第一壁的结构安全可靠直接影响着整个包层模块的可靠运行, 也将影响着整个装置的安全运行。聚变堆包层的设计制造是制约核聚变反应实现商业应用的瓶颈之一^[4-5]。

收稿日期: 2016-06-10

作者简介: 丁方强 (1990—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要研究方向为精密塑性成形及控制。

通讯作者: 李萍 (1973—), 女, 哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密塑性成形、大塑性变形及扩散连接。

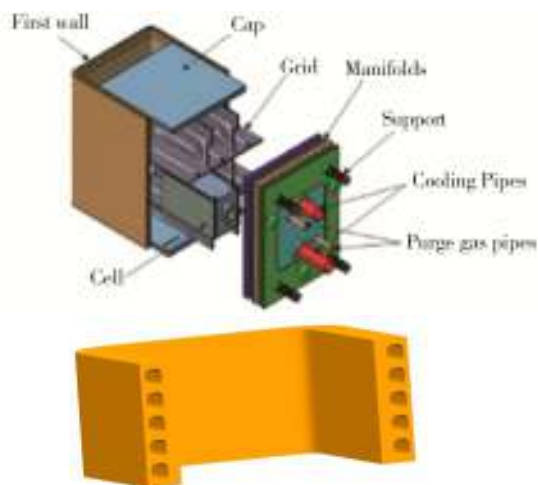


图1 聚变包层模块和第一壁示意图
Fig.1 Diagram of the test blanket module and the first wall

低活化马氏体钢因为较高的热导率、较低的热膨胀和热膨胀系数等优良的热物理性能,被普遍认为是未来聚变示范堆和聚变动力堆的首选结构材料^[6]。

现阶段国内外关于聚变堆包层第一壁的加工方法,主要是机械加工结合后续的弯板和焊板相结合方法,这些加工方法存在着流道畸变、材料利用率和生产率较低、产品尺寸精度较差以及工艺不稳定等不足。近年来发展起来的等温精密挤压塑性成形技术是一种先进的、少无切削的近净成形技术,利用这种方法加工具有聚变堆包层第一壁特征位置尺寸的U形件时^[7-10],可以显著改善材料的塑性和流动能力,降低变形抗力,有助于简化成形过程,显著提高生产率和材料利用率。

在近净成形工艺中,原始U形坯料是通过机械加工而成的,这种原料加工方法材料利用率及生产率均较低,而通过弯曲工艺,将板条状低活化钢折弯成U形坯料,则可以大幅提高生产率及材料利用率,这将使近净成形工艺加工包层第一壁更加经济可行。

1 模拟

通过 DEFORM-3D 有限元软件,采用刚塑性有限元法,对U形折弯进行仿真模拟,探究温度、凹模圆角以及凸模下行速率对U形件折弯效果的影响,从而对弯曲工艺进行优化^[11-15]。

模拟选用 DEFORM-3D 材料库中与低活化马氏体钢性能较为接近的 9Cr2WVTa,坯料选用 22 mm×26 mm×210 mm 的板条状坯料。坯料网格划分为 15000,摩擦因数取 0.20。凸凹模有限元模型如图2所示。

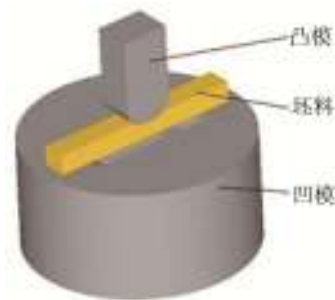


图2 模具与工件的有限元模型
Fig.2 The finite element model of the die and workpiece

1.1 凹模圆角对折弯效果的影响

图3为成形温度为 600 °C,下行速率为 1 mm/s 条件下,不同凹模圆角成形的最大载荷及金属损伤曲线。从图3中可以看出,随着凹模圆角半径的增加,最大成形载荷及材料损伤值均随之下降。

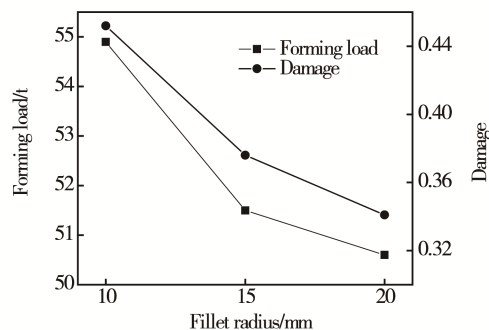


图3 不同圆角半径下的最大成形载荷及材料损伤曲线
Fig.3 Curve of maximum forming load and damage at different fillet radius

凹模圆角对折弯效果的影响,主要体现在坯料与凹模圆角的接触面积。当弯曲开始时,坯料与圆角理论上处于线接触,在弯曲进行过程中,由于凸模的下压载荷作用,坯料与圆角接触处发生变形,此时坯料与圆角处于面接触。当圆角半径较小时,坯料与凹模圆角的接触面积也较小,在相同的上模载荷下,坯料表面受到的损伤越大;而当凹模圆角半径较大时,坯料与圆角处摩擦力减小,板条弯曲也更容易,相应的最大成形载荷也就越低,因此,结合所需零件及凹模的最终尺寸,圆角半径选择为 20 mm。

1.2 温度对折弯效果的影响

图4为下压速率为 1 mm/s,凹模圆角半径为 20 mm 条件下,不同成形温度成形的最大载荷及金属损伤曲线。从图4中可以看出,随着成形温度的增加,

最大成形载荷随之降低,而材料最大损伤则随之增强。相较于凹模圆角半径及凸模下行速率,成形温度对板条折弯最大载荷的影响更大,其中,成形载荷从 700 °C 时的 39.3 t 上升到 500 °C 时的 70.5 t,增长了 79.4%,其变化范围明显高于其他因素。

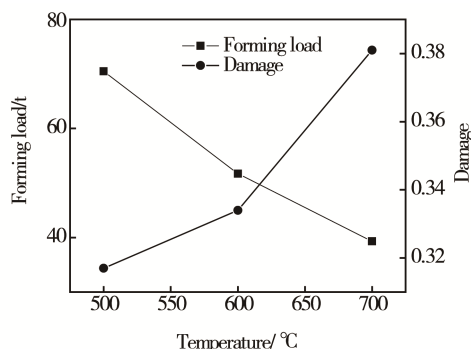


图4 不同成形温度下的最大成形载荷及材料损伤曲线
Fig.4 Curve of maximum forming load and damage at different temperature

本次模拟折弯成形时,载荷主要用于克服 U 形件圆角处金属的弯曲塑性变形,当成形温度较高时,低活化钢在产生加工硬化的同时,回复机制(动态回复或动态再结晶)启动,金属的塑性越好,金属产生滑移的切应力随之降低,其变形抗力随着成形温度的升高而降低,宏观上便表现为 U 形弯曲过程中最大成形载荷的降低。

在实际生产中,较高的成形温度意味着较高的生产成本及较低的生产效率,在变形温度的选取中应综合考虑各种现实因素,而且,较高的变形温度会对 U 形件及圆角处带来较大的表面损伤,因此,本次变形温度选择 600 °C。

1.3 下行速率对折弯效果的影响

图5为变形温度为 600 °C,凹模圆角半径为 20 mm 条件下,不同下行速率成形的最大载荷及金属损伤曲线。从图5中可以看出,随着凸模下行速率的增加,最大成形载荷及金属最大损伤均随之增加。

下行速率对最大成形载荷的影响可以从两个方面解释:首先,在塑性成形时,变形速率越高,则金属晶体的临界切应力越高,从而使得变形抗力增加,产生这种现象的原因是由于来不及消除加工硬化所致,且下行速率较大时,金属没有足够的时间进行回复再结晶,使金属板条弯曲更加困难;第二,一般来说,当提高下行速率时,由于温度效应显著,金属变形区温度将升高,从而降低了变形抗力,增

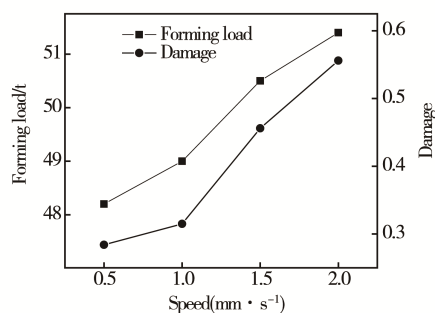


图5 不同下压速率下的最大成形载荷及材料损伤曲线
Fig.5 Curve of maximum forming load and damage at different speeds

加了金属塑性,但温度效应的效果对冷变形时更明显,而在本实验 600 °C 情况下可以忽略不计。而且有研究表明,变形速率对金属的断裂抗力基本没有影响,变形速度越大,金属会更早地到达断裂阶段,材料塑性也便降低。综合上面两种因素,最大成形载荷最终表现为随着下行速率的增大而增大。

结合不同下行速率下 U 形件表面最大损伤以及现实液压机运行状况,选择凸模下行速率为 0.5 mm/s。

1.4 最优工艺参数模拟结果

图6为成形温度为 600 °C,下行速率为 0.5 mm/s,凹模圆角半径为 20 mm 的工艺参数下进行的 U 形件弯曲模拟等效应变及损伤示意图。从图6a中可以看出,在 U 形件直道外表面与凹模圆角接触处等效应变约为 0.2,而直道其他部分应变几乎为 0,因此,在本次模拟折弯试验中,U 形件直道的前半端没有发生塑性变形;横道部分等效应变最大处达到约 0.5,这是因为在折弯末端坯料受到凸模及凹模底端的挤压压力的作用,产生少量的挤压变形。U 形件外圆角及横道内侧损伤较为严重,最大处约达到 0.29,如图6b所示。圆角的外层表面没有出现弯曲拉裂。

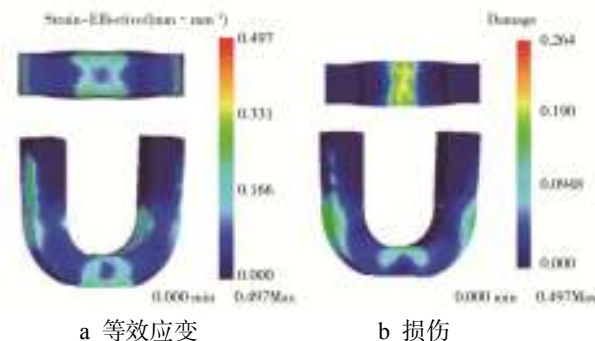


图6 U 形件折弯模拟后等效应变及损伤示意图
Fig.6 Equivalent strain and damage after the simulation of U-shaped bending

2 实验

成形温度为 600 °C，凹模圆角半径为 20 mm，下行速率为 0.5 mm/s 的工艺条件下，U 形件的模拟图及折弯实物如图 7 所示。



图 7 U 形件的最终模拟图及折弯实物图

Fig.7 Final simulation diagram and bending physical map of U-shaped part

按照模拟优化出的工艺参数进行低活化钢 U 形件折弯实验，选取 3 件折弯效果较好的 U 形件，对其各部位进行实际测量，取平均值并与模拟结果进行比较。测量结果如表 1 所示。

表 1 U 形件各部位模拟尺寸及实际尺寸测量值
Table 1 Simulation and actual measurement values of U-shaped part

	直道 宽度	圆角 宽度	横道 宽度	内圆角 厚度	外圆角 厚度
模拟尺寸 /mm	21.9	21.5	21.6	29.4	25.8
实际尺寸 /mm	21.8	20.8	21.0	30.9	24.5
误差/%	0.5	3.3	2.8	5.1	5.0

从表 1 可以看出，与原始坯料相比，U 形件的模拟尺寸中直道宽度基本没有变化，圆角宽度减薄较为严重，达到 2.3%，横道宽度也略有减薄；而内圆角厚度则增加到 29.4 mm，相比于 U 形件其他位置，尺寸变化较大，不过仍然在所需加工精度范围内；外圆角厚度略有减薄，可以忽略不计。

至于实验所得的 U 形件实际尺寸（不考虑实测误差），则较好地契合了模拟结果预期，与模拟尺寸误差整体较小，完全可以用于后续近净挤压成形加工。

3 结论

通过对低活化钢板条 U 形折弯工艺的仿真模拟，

优化出了较为符合生产要求及结果预期的工艺参数，得到的 U 形折弯件基本可以直接用于 H 型截面 U 型件的挤压成形，极大地提高了生产率及材料利用率，这对于通过等温精密挤压成形技术制造聚变堆包层有重要现实意义。

1) 从 U 型弯曲模拟结果可以看出，提高成形温度及凹模圆角半径、降低凸模下行速率均可降低弯曲载荷，但总体来说，折弯所需载荷吨位较低，降低载荷不是唯一目的，因此，优化工艺参数时应综合考虑。

2) 在 U 形弯曲的仿真模拟中，当成形温度为 600 °C，凹模圆角半径为 20 mm，凸模下行速率为 0.5 mm/s 时，得到的 U 形件效果更符合预期。

3) 在实际实验中，按照模拟优化的工艺参数进行 U 形折弯，得到的 U 形件实际尺寸与模拟尺寸最大误差为 5.1%，误差范围较小；外层圆角处的减薄量与内层圆角处的增厚量符合预期，可以用于后续等温精密挤压成形。

参考文献：

- [1] TANIGAWA H, SHIBA K, MÖSLANG A, et al. Status and Key Issues of Reduced Activation Ferritic/martensitic Steels as the Structural Material for a DEMO Blanket[J]. J Nucl Mater, 2011, 417(1—3): 9—15.
- [2] TAMURA M, HAYAKASA H, TANIMURA M, et al. Development of Potential Low Activation Ferritic and Austenitic Steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 1986, 141—143: 1067—1073.
- [3] HUANG Q. Development Status of CLAM Steel for Fusion Application[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 455(1—3): 649—654.
- [4] WU Y. Design Status and Development Strategy of China Liquid Lithium-lead Blankets and Related Material Technology[J]. J Nucl Mater, 2007, 367: 1410—1415.
- [5] 黄波. 聚变堆包层用低活化钢管类件成形研究[D]. 合肥: 中国科学院研究生院, 2012.
HUANG Bo. Study on Formability of Low Activation Steel Pipes for Blanket of Fusion Reactor[D]. Hefei: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [6] 黄群英, 李春京, 李艳芬, 等. 中国低活化马氏体钢 CLAM 研究进展[J]. 核科学与工程, 2007, 27(1): 41—50.
HUANG Qun-ying, LI Chun-jing, LI Yan-fen, et al. R&D Status of China Low Activation Martensitic Steel[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2006, 27(1): 41—50.
- [7] 叶兴福, 冯开明, 罗天勇, 等. ITER TBM 第一壁制造方法与样件试制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011, 31(4): 356—358.

- YE Xing-fu, FENG Kai-ming, LU Xing, et al. Introduction of ITER TBM First Wall Fabrication Methods and Mockup Fabrication[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2011, 31(4): 356—358.
- [8] 徐杰, 李向博. 某牌号低活化马氏体钢 U 形件成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 110—114.
- XU Jie, LI Xiang-bo. Forming Process of U-shaped Part of Low Activation Martensitic Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 110—114.
- [9] FU Z M. Numerical Simulation of Springback in Air-Bending Forming of Sheet Metal[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 121-126: 3602—3606.
- [10] MAISONNIER D, COOK I, PIERRE S, et al. DEMO and Fusion Power Plant Conceptual Studies in Europe[J]. Fusion Eng Des, 2006, 81(8—14): 1123—1130.
- [11] 王大勇, 李伟, 陆兴, 等. U 型钢压弯的有限元分析与回弹预测[J]. 模具工业, 2010, 36(4): 19—22.
- WANG Da-yong, LI Wei, LU Xing, et al. Finite Element Analysis and Springback Prediction of the Press Bending of U-shaped Section Steel Part[J]. Die & Mould Industry, 2010, 36(4): 19—22.
- [12] 符永宏, 王忠领, 华希俊, 等. U 形件模具表面摩擦对回弹影响的数值模拟[J]. 锻压技术, 2011, 36(6): 28—32.
- FU Yong-hong, WANG Zhong-ling, HUA Xi-jun, et al. Numerical Simulation of U-bending Die Surface's Friction Influence on Springback[J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 36(6): 28—32.
- [13] CHO J R, MOON S J, MOON Y H, et al. Finite Element Investigation on Spring-back Characteristics in Sheet Metal U-bending Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(1): 109—116.
- [14] 薛克敏, 陈龙, 孔炎, 等. CLAM 钢 U 形弯曲回弹数值模拟优化与试验[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(1): 53—57.
- XUE Ke-min, CHEN Long, KONG Yan, et al. Numerical Simulation Optimization and Experimental Study on U-bending Springback of CLAM Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(1): 53—57.
- [15] LEE M S, LEE K H, KIM H H, et al. Effect of Clearance and Pressure on Matrix Flow in U Bending of Epoxy/ carbon Fibre Composites[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S2): 397—406.