

CLA16F/M 钢燃料元件电磁渐进成形规律及精确控制研究

郑 勇¹, 邱绍宇¹, 魏连峰¹, 严思梁², 程实建², 陈高詹¹, 姚力夫¹, 田大容¹

(1. 中国核动力研究设计院 反应堆燃料及材料重点实验室, 四川 成都 610213)

(2. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 基于 LS-DynaR8.0 软件平台建立 CLA16F/M 钢燃料元件电磁渐进成形电磁场-结构场顺序耦合有限元-边界元模型, 对不同放电电压、内外管间隙以及外管壁厚条件下燃料芯体多道次电磁渐进成形过程进行仿真分析与样件试制, 研究其局部塑性流动及缺陷形成规律, 并多方位表征其成形质量。结果显示过大的放电电压会导致变形区域向集磁器两端集中, 覆管与基管碰撞加剧, 引发截面畸变; 过小的放电电压无法激发覆管与基管碰撞、变形与贴合, 从而导致连接失效。合理选择覆管-基管间隙可以有效避免失稳起皱与壁厚不均匀缺陷。经过模拟燃料元件电磁渐进成形多参数优化, 实现了全流程高质量精确成形与缺陷控制, 试件覆管-基管贴合精度达到 10 μm 。

关键词: 燃料元件; CLA16 铁马钢; 电磁渐进成形; 成形缺陷

中图分类号: TL341; TG142

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)01-0234-08

高性能核燃料元件是第四代核电技术中液态金属冷却反应堆发展的亟需, 反应堆长时间、高可靠、稳定服役要求其燃料元件具有高传热效率, 为避免热量累计造成辐照肿胀, 应尽可能减小包壳管与燃料芯体之间的装配间隙, 制备出包壳-燃料芯体紧密贴合、包壳壁厚均匀分布的金属复合管件^[1]。

根据包壳-燃料芯体层间的界面结合性质, 双金属管紧密贴合技术可分为机械法与冶金法两类。机械紧密贴合法主要包括机械拉拔^[2]、滚压^[3]、旋压^[4-5]、液压胀形^[6-7]等。机械紧密贴合法工艺相对简单, 工序较少, 但其形成的机械连接界面难以承载热应力循环, 在高温下易产生应力松弛而分层失效^[8]。冶金法通过外界加热、加压, 或添加填充金属, 实现复合管件紧密贴合的制备技术, 代表性方法有离心铸造法^[9]、钎焊法^[10]、热挤压法^[11]、热等静压法^[12]、爆炸成形法^[13]。

以上工艺方法虽然理论上可以提高界面结合强度, 但仍存在工艺流程复杂、周期长、设备投资大、制件可重复性低等问题。此外, 冶金法中大量热输入极易导致紧密贴合界面处产生脆性金属间化合物和热影响区, 使界面力学性能急剧下降。因此, 亟需发展

燃料元件高效、短流程成形制造新技术。

双金属管电磁渐进成形技术是利用通脉冲强电流的成形线圈瞬间激发的强洛伦兹力驱动成形管件发生高速变形, 从而与被成形管件高速撞击, 进而实现界面机械咬合与冶金结合; 通过成形线圈的轴向进给与多道次放电, 可以逐次累积局部变形, 在双金属管中形成较大范围的界面可靠结合。该方法可利用冲击波效应强化双金属管件、破碎界面有害氧化物层、激发界面原子高速互扩散, 显著提高紧密贴合质量。其应用于燃料元件制造, 将有效提升燃料元件承载能力。

在管材电磁(渐进)成形原理及工艺控制方面, 德国多特蒙德技术大学 Tekkaya 院士等^[14]将矩形缩径线圈和集磁器集成到热挤压圆管生产线末端, 成功实现了复杂截面型材的连续生产, 并研究了挤压圆管电磁缩径过程的管材-芯棒配合状态对成形质量的影响, 提出了起皱、层离、折叠缺陷的控制方法。哈尔滨工业大学 Yu 等^[15]采用有限元和实验相结合的方法探究使得管件电磁缩径过程变形量和塑性应变能最大的放电频率, 并确定了最优电流频率下相对趋肤深度的取值范围。同时建立了管件电磁缩径过程的二维轴对称

收稿日期: 2023-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51705119); 中核集团领创科研基金(XXXXXX); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题(P2021-015); 陕西省高性能精确成形技术与装备重点实验室开放课题(PFTE-2020-KF-01); 大学生创新训练项目(202210359013)

作者简介: 郑 勇, 男, 1990 年生, 博士, 中国核动力研究设计院反应堆燃料及材料重点实验室, 四川 成都 610213, 电话: 028-85903138, E-mail: npic_zhengy@126.com

顺序耦合模型。模型中采用网格随移的方法进行变形过程中电磁场的更新。相较于松散耦合模型,顺序耦合模型预测的管件成形结果与实验更为吻合。卢永进^[16]探究了提高管件电磁成形效率的方法。结果表明降低放电电容和线圈自感、升高放电电压和线圈板料间的互感可显著提高装置的输出磁能,并降低工件内的焦耳热损耗。Vivek 等^[17]研究了电磁缩径过程中作用于管件上的磁压力随电参数的变化规律,发现降低系统电容可以减少磁压力上升时间从而降低管件发生欧拉失稳的倾向。

然而,目前管件电磁成形工艺多用于局部胀形或缩径,针对以燃料芯体为代表的大长径比双金属复合管电磁渐进成形的研究较为鲜见,各道次间工艺参数匹配方法及其对局部材料塑性流变规律的影响仍缺乏研究,本工作采用数值仿真与实验研究相结合的方法开展了 CLA16F/M 钢模拟燃料元件电磁渐进成形过程材料塑性流动规律、缺陷预测与成形质量控制研究,以期电磁渐进成形技术在燃料元件高性能短流程制造领域的应用提供理论基础^[18-19]。

1 工艺分析与有限元建模

1.1 工艺分析与几何建模

本研究中模拟燃料元件目标件为包壳外径 $\Phi 12$ mm、芯体外径 $\Phi 10$ mm、长 100 mm 的复合管。其成形工

艺采用电磁渐进成形,成形前先将壁厚 1 mm 的 CLA16F/M 钢覆管(包壳)事先与基管(芯体)间隙装配,再将集磁器与线圈装配在覆管外侧,从管件中部开始放电成形局部区域,并不断移动线圈与集磁器位置逐点逐域成形,最终获得覆管与基管贴合良好的成形件(如图 1a 所示)。

研究中选用的基管尺寸为 $\Phi 10$ mm \times 3 mm \times 150 mm,覆管尺寸初步定为 $\Phi 14$ mm \times 1 mm \times 100 mm。集磁器选用截面型,其内径尺寸为 $\Phi 21$ mm,外径尺寸为 $\Phi 85$ mm,高度为 60 mm,工作区域长度为 15 mm,集磁器开口间隙取 1.0 mm,集磁器内表面和外管外表面间隙为 0.5 mm;线圈内径尺寸为 $\Phi 88$ mm,截面为 7 mm \times 5 mm 矩形,线圈匝数为 10 匝(如图 1b、1c 所示)。

1.2 网格划分

基于 LS-DynaR8.0 平台建立了模拟燃料元件电磁渐进成形全流程三维有限元-边界元模型,考虑成形过程中电磁场与结构场动态响应的耦合行为,模型中采用电磁场-结构场顺序耦合算法实时更新耦合场。鉴于成形过程中发生基管、覆管之间的高速碰撞,不能忽略管厚向变形,因此网格单元类型均采用由表面四边形单元偏移或扫掠得到的常应力六面体单元(如图 1d 所示),基管、覆管、集磁器、线圈单元数量分别为 3600、1100、55982、4800,两管厚向单元数量不低于 3 个。

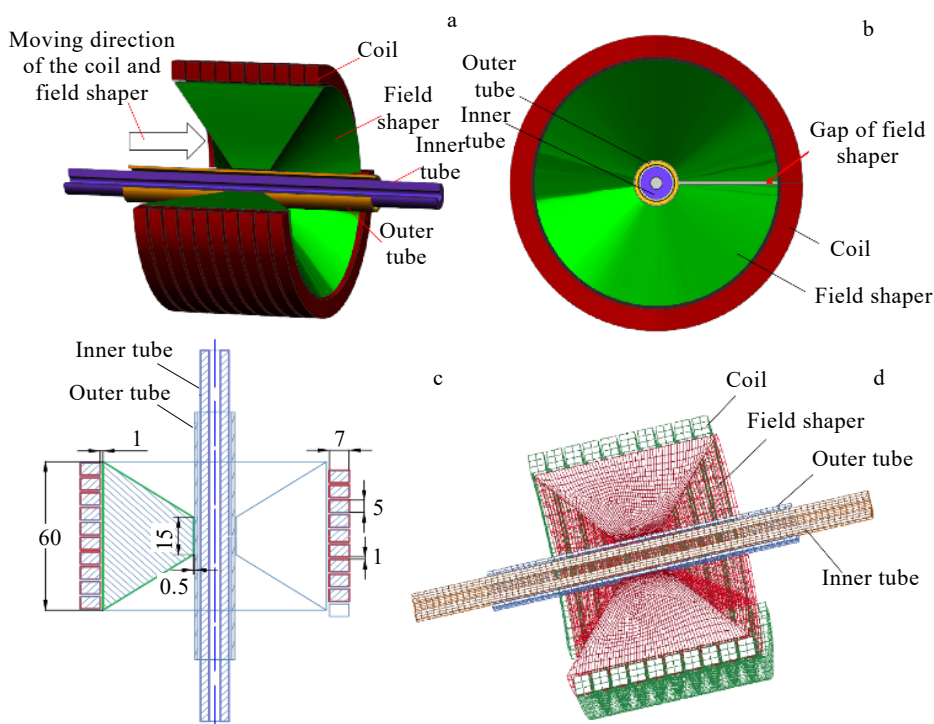


图1 模拟燃料元件电磁渐进成形工艺路线与工装结构

Fig.1 Process route and forming setups of electromagnetic incremental forming of dummy fuel elements: (a) process diagram; (b) structure of field shaper; (c) detailed dimensions of coil and field shaper; (d) 3D finite element model

1.3 材料模型

在模拟过程中线圈设置为带电源导体，而基管、覆管、集磁器均设置为不带电源导体，其内部可产生感生电流，具体电磁参数见表 1 所示。文中集磁器所用材料选用紫铜，线圈为无氧铜，基管采用 20 钢，三者在定义本构模型时均采用 20RIGID 命令设定为刚体，覆管设置为变形体，其本构模型采用分段线性函数定义，其本构数据来源于如图 2 所示的 Hopkinson 杆实验测得的 CLA16F/M 钢 1000~5000 s⁻¹ 下高速变形曲线。

1.4 边界条件

在模拟过程中由于内管所受到的电磁力相对外管而言可以忽略不计，同时所施加电磁力为节点单元上的力，为了避免外管内表面节点与集磁器、线圈产生互感而与外表面分离，这里在设定内管所有节点和外管内表面的节点不受力。

表 1 有限元模型中材料电磁参数
Table 1 Electromagnetic parameters defined in the finite element model

Material	EM material identifier	Electric conductivity/ ×10 ⁷ S·m ⁻¹	Relative permeability
OFHC copper coil	2	5.96	1
Red copper field shaper	4	5.81	1
CLA16 steel outer tube	4	1.26	1500
CLA16 steel inner tube	4	0.217	1500

表 2 有限元模型材料力学性能参数
Table 2 Mechanical parameters defined in the finite element model

Material	Density/ kg·m ⁻³	Young's modulus/ GPa	Poisson ratio	Yield strength/ MPa
OFHC copper	7860	207	0.30	173
Red copper	8900	108	0.32	90
CLA16 steel	7000	200	0.33	500
20# steel	7850	207	0.30	329

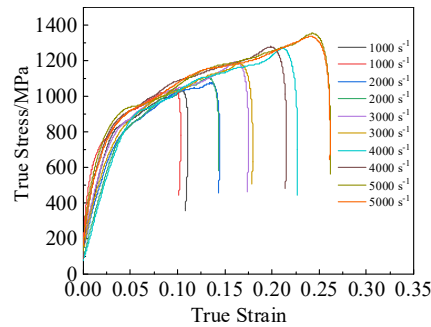


图 2 Hopkinson 杆实验测得的不同应变速率下 CLA16F/M 钢本构曲线
Fig.2 Constitutive curves of CLA16F/M steel under different strain rates measured by split Hopkinson bar tests

将电源放电模型视为 RLC 谐振电路，根据电路参数求得各放电电压下线圈中阻尼正弦函数型加载电流曲线，并参照文献[16]取曲线第一半波进行加载，如图 3 所示。

2 电磁渐进成形规律及缺陷分析

2.1 放电电压的影响

在基管-覆管间隙为 0.3 mm，覆管壁厚为 1.5 mm 条件下，研究放电电压分别为 1、3、5、6 kV 时首次放电过程中材料塑性流动规律，以上条件下覆管所受洛伦兹力如图 4a 所示。

可以发现经过第 1 个电流半波后电磁力迅速衰减，经过一定振荡后趋近于零，变形主要集中在第 1 个电流峰值之前阶段；不同电压下电磁力相差较大，这是由于电源电容一定时，放电能量正比于放电电压的平方。在 300 μs 时刻变形结束时，放电电压 1 kV 情况下管件特征节点无明显径向回弹，表明基管-覆管并未接触碰撞，这说明电压过小无法产生有效连接；随放电电压升高其余几组均在大约 50 μs 时发生基管-覆管接触并且产生回弹，回弹幅值不断衰减并趋于稳定，两管贴合较为紧密。进一步对 3~6 kV 放电电压下模型进行二道次电磁成形仿真，其中集磁器轴向进给距离设置为 12 mm。图 5 所示为二道次成形结束后应变和剖面变形情况。

可以发现以上 3 组仿真结果均出现了壁厚变化，主要体现为集磁器开口处外管壁厚明显减薄，与之相对一侧管壁增厚，这是由于在缝隙处电磁力较大，材料切向流动剧烈所导致的。且随着电压增加壁厚变化率变大，通过计算，在间隙 0.3 mm 情况下 3 组仿真中局部壁厚变化均超过 20%，不符合技术要求；且随着电源电压的增加至 5 kV 时，截面出现了畸变，开始产生“竹节”状起皱，电压增大到 6 kV，起皱幅值显著增大。

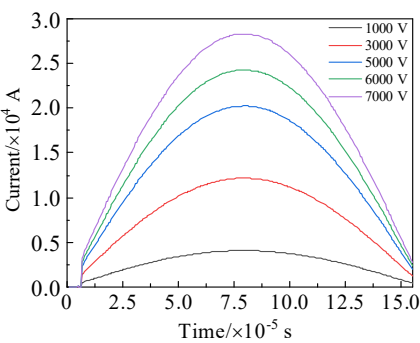


图 3 不同放电电压下电流-时间曲线
Fig.3 Current-time curves in the forming coil under different discharging voltages

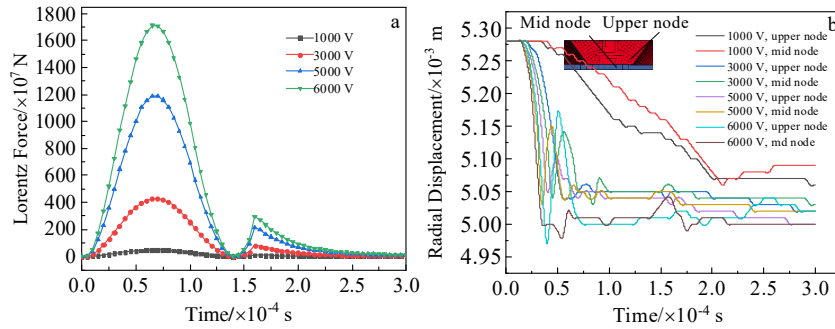


图 4 不同放电电压下主要变形区洛伦兹力变化规律与局部塑性变形规律

Fig.4 Variation rules of Lorentz force (a) and local plastic deformation (b) of the main deformation zone under different discharging voltages

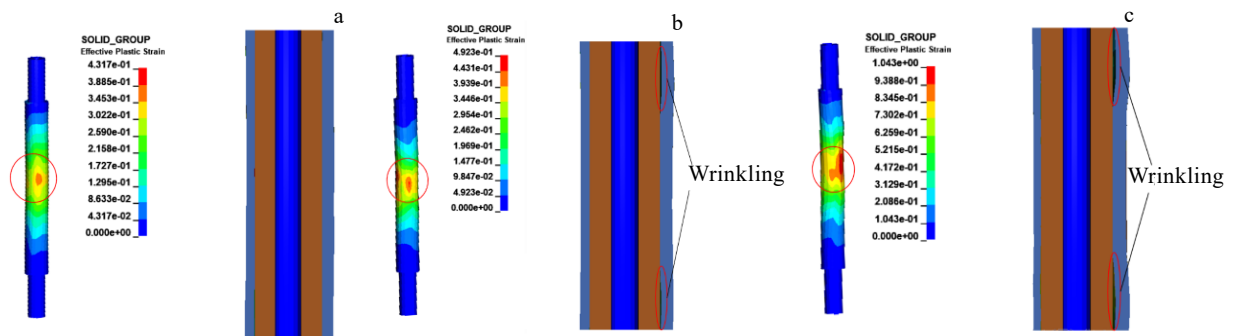


图 5 基管-覆管间隙为 0.3 mm 时不同电压下二道次变形应变分布与截面形貌

Fig.5 Effective plastic strain distribution and section profile of the clad pipe at a clearance of 0.3 mm and different discharging voltages: (a) 3000 V; (b) 5000 V; (c) 6000 V

2.2 基管-覆管间隙的影响

为进一步探究基管-覆管间隙对电磁渐进成形均匀性的影响, 根据文献[18]所采用的截面畸变评估方法(见式(1)), 一般认为 Φ 值小于等于 0.2 时, 视为变形均匀。

$$\Phi = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max}} \quad (1)$$

式中, R_{\max} 和 R_{\min} 分别表示变形结束后覆管壁母线上节点的最大和最小半径。经分析得知基管-覆管间隙为 1.0 mm 时, 节点最大半径为 7.03 mm, 最小半径为 6.51 mm, $\Phi=0.074$; 而当间隙为 0.5 mm 时, 节点最大半径为 6.88 mm, 最小半径为 6.53 mm, $\Phi=0.050$ 。从而得知间隙为 0.5 mm 情况下, 其截面畸变值更低, 成形效果相对更优。

图 6 所示为不同基管-覆管间隙下对应节点的回弹量。从图可知道, 2 种情况下贴膜率均为 100%, 但是, 当内外管间隙减小到 0.5 mm 时, 各节点回弹量也相应降低。

在间隙为 0.5 和 1.0 mm 2 种条件下选取 $Z=0$ mm 截面上圆周方向上的节点对变形后外管内外表面形貌进行进一步测量, 如图 7 所示。

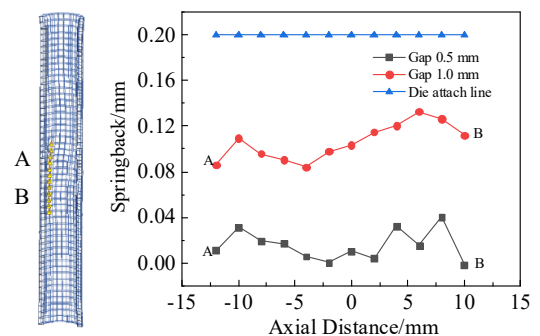


图 6 不同覆管-基管间隙下电磁渐进成形复合管局部回弹量与贴模度

Fig.6 Local spring-back degree and die sticking degree of the electromagnetic incremental formed clad tube at different flyer tube-base tube clearances

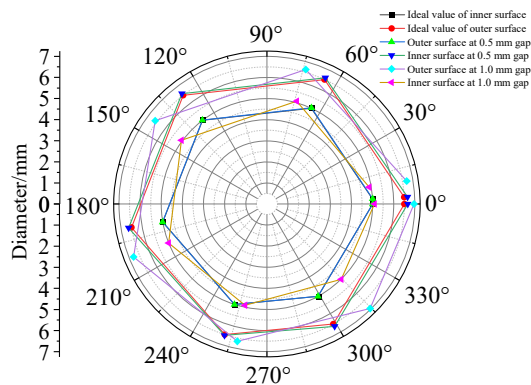


图 7 不同覆管-基管间隙下贴合界面情况

Fig.7 Interface sticking characteristics at different flyer tube-base tube clearances

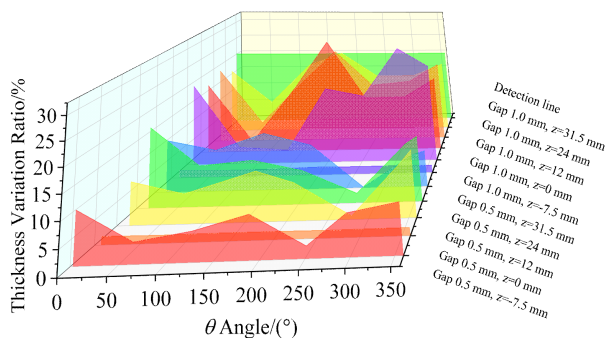


图 8 不同轴向截面覆管壁厚变化率分布情况

Fig.8 Distribution of thickness variation ratio of the flyer tube at different axial sections

可见 2 种条件下覆管内表面节点都达到理想贴合状态,但覆管-基管间隙为 1.0 mm 情况下,其覆管外壁相对偏离数值较大,说明该条件下覆管壁厚变化较为显著。为进一步探明间隙对电磁渐进成形区域壁厚变化的影响,选取不同轴向截面对其壁厚变化率进行测量,结果如图 8 所示。

对比可知,在间隙 1.0 mm 情况下,三道次成形完成后覆管局部壁厚变化超过 20%,且整体壁厚变化的波动范围也较大,这是由于间隙过大时覆管高速变形距离增大,在材料加工硬化、应变率硬化的综合作用下覆管运动过程中阻尼较大,且管厚向变形难以均匀分散,详情如图 9 所示。综合上述分析考虑,可以得出管间的间隙值过大会造成磁脉冲成形时冲击速度下降进而使得壁厚变化率的增加,而过小的间隙则可能造成截面畸变起皱等缺陷;通过多组模拟分析,可以确定当间隙为 0.5 mm 时,电源电压为 6000 V 情况下,成形质量符合工艺的要求。

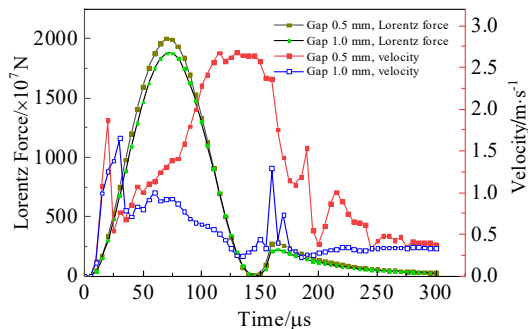


图 9 复合管电磁渐进成形节点速度和电磁力随时间变化过程

Fig.9 Variation of nodal velocity and electromagnetic force in the clad tube in electromagnetic incremental forming

2.3 基管-覆管临界间隙值的确定

本研究固定放电电压为 6 kV,基管-覆管间隙的下限与上限分别设置为 0.3 和 0.5 mm,并采用黄金分割法搜索最优间隙值,如下式所示。

$$\delta = \delta_f + 0.618 \times (\delta_r - \delta_f) \quad (2)$$

式中, δ_r 表示在获得良好成形质量条件下的内外管间的间隙, δ_f 则代表成形质量存在缺陷时的间隙,按照这种方法,即第一寻找步中 δ_r 为 0.5 mm, δ_f 为 0.3 mm,通过该搜索模式不断修改模型并进行有限元分析,最终确定临界间隙为 0.4236 mm。为对该临界值进行验证,将其代入到式 (2) 中,得出下一步中间隙值为 0.3764 mm,2 种间隙下成形质量如图 10 所示,通过对比可见更新后的间隙值下模拟结果中出现了小幅度的起皱,且截面上下端出现一定程度畸变,而间隙为 0.4236 mm 条件下两管包覆质量良好,综上可以确认上述临界间隙的准确性。

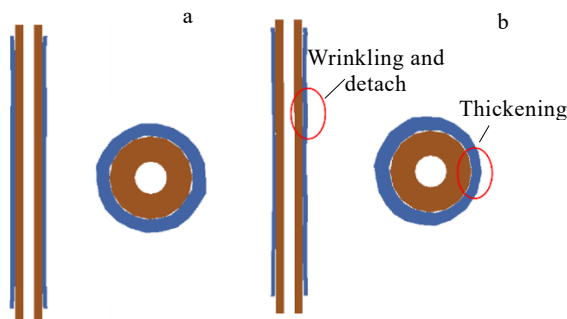


图 10 搜索得到的不同临界间隙下成形质量对比图

Fig.10 Comparison diagram of forming quality under different critical clearances obtained by golden section searching: (a) 0.4236 mm and (b) 0.3764 mm

2.4 覆管壁厚的影响

为研究给定覆管-基管间隙情况下覆管壁厚与成形质量之间的关系,开展了覆管壁厚 1.0 与 1.5 mm 下三道次电磁渐进成形效果分析。图 11 为覆管壁厚 1.0 mm 条件下其截面不同周向位置的壁厚变化情况。可见随壁厚减小,壁厚变化率峰值增加,整管的壁厚波动变大,覆管局部增厚和减薄处相差值最大可达到近 60%,这主要是由于壁厚减小带来的是外管整体刚度的下降,进而加剧了在电磁驱动高速成形过程材料流动的不均匀性。

3 电磁渐进成形方案验证

为了检验上述变形规律以及优化工艺方案可行性,本研究对放电电压 6 kV,内外管间隙 0.4236 mm,覆管壁厚为 1.5 mm 的模拟燃料元件进行整管电磁渐进成形全过程仿真(如图 12 所示)。总共完成 6 个复合道次的加工,集磁器有效连接区域管长为 87 mm,经过检测分析,整体模拟成形质量符合标准,因此可以确定采用电磁脉冲成形技术加工燃料芯体方案的可行性。图 12 为整个工艺验证过程及最终成形结果,可见其最终截面材料流动及等效塑性应变都相对均匀,符合预测情况。

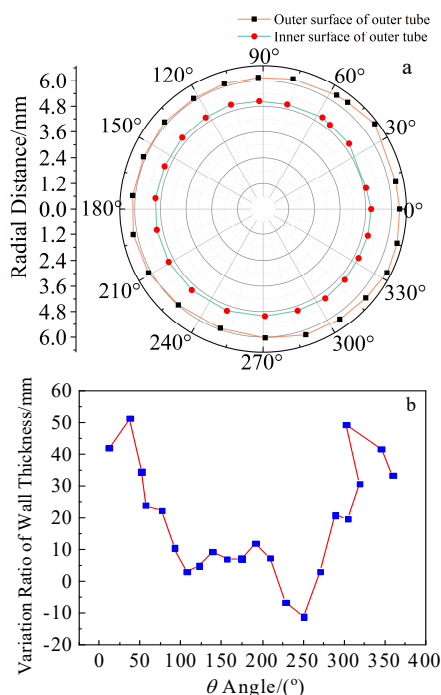


图 11 覆管壁厚为 1.0 mm 时成形结束后壁厚变化

Fig.11 Thickness variation of the flyer tube with initial thickness of 1.0 mm after electromagnetic incremental forming: (a) radial coordinate of the inner and outer surface of the flyer tube; (b) thickness variation map of the flyer tube along circumferential direction

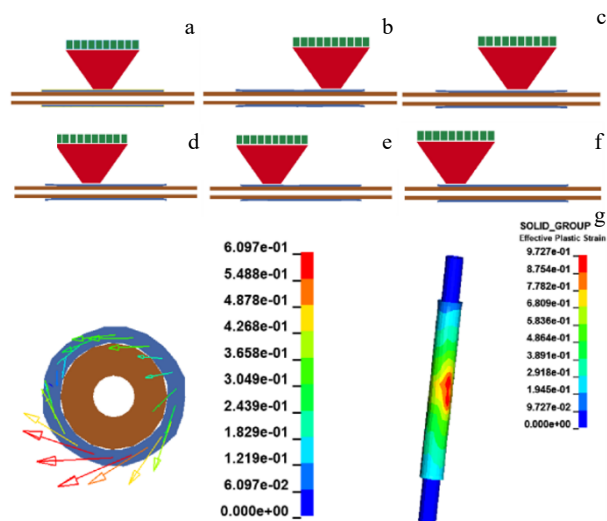


图 12 电磁渐进成形工艺方案验证过程及模拟结果

Fig.12 Testing process of the electromagnetic incremental forming scheme: (a-f) simulated results of the first to the sixth forming step; (g) distribution of the velocity field and effective plastic strain

为了验证有限元模型与优化方案的应用效果,在重庆普尔萨科技有限公司 Xtra-pulse70 电磁成机上采用上述最优工艺方案开展了模拟燃料元件电磁渐进成形的验证试验,成形工装如图 13a 所示,通过 6 道次放电成功试制出 100 mm 长的模拟燃料元件样件,成形后在合肥碳汇工业技术服务有限公司采用 METROTOM 1500-225 KV G3 HR 型工业 CT 进行了模拟燃料元件的断层扫描分析,可见结合状态良好,覆管与基管的间隙低于 10 μm ,证明了本研究方案的可靠性(见图 13b)。

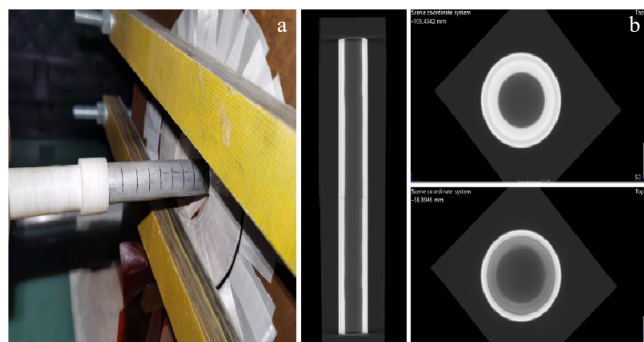


图 13 模拟燃料元件电磁渐进成形实验工装及断面 CT 成像图
Fig.13 Experimental setups of the electromagnetic incremental forming process of dummy fuel element (a) and CT graphs of the specimen (b)

4 结 论

1) 根据模拟燃料元件结构特点与成形质量要求, 提出了实现覆管-基管紧密贴合的多道次电磁渐进成形工艺方案, 建立了电磁渐进成形过程电磁场-结构场顺序耦合有限元模型。

2) 放电电压值较大时覆管和基管之间的撞击速度与回弹显著增大, 过大的放电电压会导致变形区域向集磁器两端集中, 且切向金属流在变形过程中发生变向, 进而引发截面畸变; 过低的放电电压无法激发覆管与基管碰撞、变形与贴合, 从而导致连接失效。

3) 覆管-基管间隙存在临界值, 间隙低于临界值则结合截面发生失稳起皱; 当间隙过大时, 会造成壁厚变化率增大, 且壁厚均匀性显著降低, 通过黄金分割搜索法确定临界间隙为 0.4236 mm。

4) 根据制定的工艺并合理选择模具工装参数, 成功试制出 100 mm 模拟燃料元件试验件, 断层扫描分析显示覆管-基管结合间隙低于 10 μm 。

参考文献 References

- [1] Du Shuhong(堵树宏), Li Yonghua(李永华), Sun Tao(孙涛) *et al. Nuclear Power Engineering(核动力工程)*[J], 2022, 43(4): 1
- [2] Chen Haiyun(陈海云), Cao Zhixi(曹志锡). *Process Equipment & Piping(化工设备与管道)*[J], 2006, 43(5): 16
- [3] Ling Xingzhong(凌星中). *Welded Pipe and Tube(焊管)*[J], 2001, 24(2): 43
- [4] Wang Yue(王悦). *Study on Thermal Boundary Resistance and Process of Bimetal Composite Tube Spinning(双金属管复合旋压的界面热阻效应及成形工艺研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014
- [5] Mohebbi M S, Akbarzadeh A. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(3): 510
- [6] Cao Xiaoyan(曹晓燕), Deng Juan(邓娟), Shangguan Changhuai(上官昌淮) *et al. Steel Pipe(钢管)*[J], 2014, 43(2): 11
- [7] Wang X S, Li P N, Wang R Z. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2005, 45(4-5): 373
- [8] Chen Haiyun(陈海云), Cao Zhixi(曹志锡). *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2007, 14(2): 86
- [9] Duan Huiping(段辉平), Yin Sheng(殷声), Liu Mu(柳牧) *et al. Journal of University of Science and Technology Beijing(北京科技大学学报)*[J], 1996, 18(4): 334
- [10] Krishna B V, Venugopal P, Rao K P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 407(1): 77
- [11] Chen Z, Ikeda K, Murakami T *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 137(1): 10
- [12] Wang Xiaofeng(王晓峰). *Study of the Brass/Mild Steel Bimetallic Tube by Diffusion under Inner Pressure(H62 黄铜/碳钢双金属管内压扩散复合的研究)*[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2005
- [13] Wang Baoyun(王宝云), Ma Dongkang(马东康), Li Zhengxian(李争显) *et al. Welding(焊接)*[J], 2005(9): 54
- [14] Jäger A, Risch D, Tekkaya A E. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 936
- [15] Yu H, Li C. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209: 1053
- [16] Lu Yongjin(卢永进). *Research on Uniformity of Tube Electromagnetic Forming(管件电磁成形均匀性研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006
- [17] Vivek A, Kim K H, Daehn G S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 840
- [18] Xue Kemin(薛克敏), Chen Peng(陈鹏), Yan Siliang(严思梁) *et al. Journal of Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学学报)*[J], 2021, 53(2): 155
- [19] Chen Shujun(陈树君), Yu Yang(于洋), Xia Yu(夏羽) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2013, 42(5): 998

Forming Rules and Accurate Control Method of CLA16F/M Steel Fuel Cell Subjected to Electromagnetic Incremental Forming

Zheng Yong¹, Qiu Shaoyu¹, Wei Lianfeng¹, Yan Siliang², Cheng Shijian², Chen Gaozhan¹, Yao Lifu¹, Tian Darong¹

(1. Science and Technology on Reactor Fuel and Materials Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This work is aimed to investigate time-spatial distribution rules and the effect of process parameters and geometric parameters on the forming quality of CLA16F/M steel manufactured by electromagnetic incremental forming. Based on LS-DynaR8.0 platform, an electromagnetic field-structure field sequential coupled finite element-boundary element model of electromagnetic incremental forming process of dummy fuel element was established. With the aid of the numerical simulation model, the electromagnetic forming process of dummy fuel element under different discharging voltages, flyer tube-base tube clearances and wall thickness of flyer tube were simulated and analyzed, and the sample fuel element was manufactured, for the sake of studying the local plastic flow rules, defects generation rules and characterizing the forming quality. Results show that oversized discharging voltage brings about the concentration of deformation zones to both ends of the tube. Also, the collision between the flyer tube and the base tube is aggravated and section distortion is introduced. Undersized discharging voltage cannot generate the collision, deformation and sticking and thus cause disconnection. Appropriate clearance between base tube and flyer tube can effectively avoid wrinkling and nonuniformity of wall thickness. By comprehensive optimization of process parameters, through-process high quality precise forming of defects control of dummy fuel element was realized and the sticking precision between base tube and flyer tube reaches 10 μm .

Key words: fuel element; CLA16F/M steel; electromagnetic incremental forming; forming defects

Corresponding author: Yan Siliang, Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Engineering Research Center of High Performance Copper Alloy Materials and Processing, Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China, Tel: 0086-551-62905110, E-mail: yansiliang741@163.com