Cu/Al 双金属复合管旋压复合成形规律研究

袁其炜[°],王建华^b,靳凯^b,陶杰[°]

(南京航空航天大学 a. 材料科学与技术学院; b. 机电学院, 南京 211106)

摘要:目的 探究双金属管材在复合过程中的受力变化以及关键工艺参数对覆管和基管壁厚分布的影响。 方法 通过有限元仿真技术和实验相结合,对铜和铝两种材料的双金属管进行旋压复合成形过程受力情况以 及壁厚变化进行研究。结果 覆管由于受力面积小于基管,导致各自承受的应力具有明显差异。另外,在双 金属管旋压复合时,覆管屈服强度需大于基管,否则基管不会发生减薄塑性变形。在 Cu/AI 双金属管旋压过 程中,随着压下量的减少,双金属管的减薄以覆管为主;随着旋轮安装角的减小,双金属管的减薄以基管 为主。结论 通过对压下量和旋轮安装角的优化,可实现对覆管和基管壁厚分布的良好控制。

关键词:双金属管; 旋压; 有限元; 壁厚分布; 旋轮安装角

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.007

中图分类号: TG306 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2018)04-0048-07

Forming Characteristics of Cu/Al Bimetal Tube Spinning

YUAN Qi-wei^a, WANG Jian-hua^b, JIN Kai^b, TAO Jie^a

(a. College of Material Science and Technology; b. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore changes of force in spinning process of bimetal tube and influences of key process parameters on wall thickness distribution of clad tube and metric tube. Through combining finite element simulation and experiment, the stress conditions and wall thickness changes in spinning forming process of bimetallic tubes of two kinds of materials were studied. The stress area of clad tube was smaller than that of matric pipe, resulting in a large difference in stress between clad tube and matric tube. In addition, the yield strength of clad tube should be greater than that of the matric tube; otherwise the matric tube would not have thinning deformation. During the spinning process of Cu/Al bimetallic tube, the thickness of clad tube and matric tube were changed. With the reduction of pressure amount, the thinning was dominated by the clad tube. With the reduction of the roller installation angle, the thinning is dominated by the matric tube. It is possible to control the distribution of clad tube and matric tube by adjusting the pressing force and the roller installation angle.

KEY WORDS: bimetallic tube; spinning; finite element; thickness distribution; roller installation angle

双金属管材在航空航天、核能工程、汽车、石化 等重要领域具有重要的需求。塑性成形是制造双金属 管材的一类重要技术,主要包括机械拉拔法、液压胀 形法、爆炸成形法、电磁成形法^[1-4]等。 旋压成形技术作为一种新颖的复合管材成形技术,具有成本低、柔性高等优点。近年来,国外开始 开展相关旋压成形双金属复合管的研究工作。Saito K. 等^[5]合作研发了 Nb/Cu 复合管射频超导腔,以节省

收稿日期: 2018-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(BK20170788); 国家重点研发计划(2017YFB0703301)

作者简介:袁其炜(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为旋压成形技术。

通讯作者: 陶杰(1963—), 男, 教授, 主要研究方向为金属材料成型加工及复合材料。

Nb 金属的用量,并尝试采用累积旋压复合法制备超 细晶铝管。Mohebbia等^[6-8]初步开展了铝/铝、铜/铝、 不锈钢/铝双金属管材旋压复合的变形机理及微观界 面结构和界面强度的研究,制备具有界面结合强度的 双金属复合管。国内对双金属旋压成形技术的研究亦 开展了相关研究工作。潘毓滨^[9]和王悦^[10]等对铜/铝、 铝/铝双金属复合管强力旋压进行研究,获得了工艺 参数对复合管成形的影响规律,同时对复合管材的界 面热阻效应进行了研究;江树勇等[11]采用滚珠旋压的 方式对铜/铝双金属管进行实验研究及模拟仿真。张 志鹏等[12]假设金属层变形为平面变形且管材满足等 效应力屈服准则,建立了双金属复合管旋压的解析模 型。程可等^[13]通过内旋的方式对 20 钢/316L 双金属 管进行制备,模拟双金属复合管的旋压成形过程,分 析衬管和基管径向、环向、轴向应力及其间的残余接 触应力的分布,同时研究旋压工艺参数嵌入量 δ 、衬 管与基管间隙 ψ 、导向角 β 、进给率 f 对复合管残余 接触应力的影响。虽然上述学者对双金属管的旋压成 形过程进行了一些探究,但是双金属管的旋压复合成 形机理、关键工艺参数对复合管成形过程的壁厚变化 以及对界面结合强度的影响规律等重要问题尚需进 一步的系统研究。

双金属复合管旋压复合过程中,金属的变形、流 动及界面结合情况极其复杂。文中通过数值模拟与实 验相结合的方式对双金属管旋压复合成形过程进行 了研究,主要探究复合管材在成形过程中的受力情况 及工艺参数对双金属管壁厚分布的影响规律,为高性 能双金属复合管的旋压复合制造提供了重要的指导。

1 有限元模型

双金属管旋压复合成形有限元模型见图 1。固定 芯模和复合管坯通过旋轮绕管坯做螺旋运动,以实现 等效的成形过程^[15],基管和覆管两层管材采用 C3D8R 实体单元实施划分,管坯夹持端的端面通过 约束固定,采用库仑摩擦条件定义坯料和模具之间的 接触,设置旋轮与坯料之间的摩擦因数为 0.3, 坯料 与芯模之间的摩擦因数为 0.1。实际成形的基管为 Φ 14 mm×1 mm×100 mm 的 6061 无缝铝合金管, 覆管



Fig.1 FEM model of bimetal tube spinning

为 ϕ 16 mm×1 mm×100 mm 的紫铜管。在有限元模拟 中为减少计算时间,去除了部分不参与变形的长度。 待复合的双金属管的长度为 60 mm。基管与覆管力学 性能见表1。

表 1 材料常温下的力学性能 Tab.1 Material properties at room temperature

	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	伸长 率 δ/%
紫铜	8960	110	0.32	145	230	64
6061 铝 合金	2690	80.7	0.33	112	205	25

双金属管旋压受力及材料选择的初 2 步分析

双金属管旋压过程中变形区域金属的变形情况 极其复杂,因为双金属管不仅有内外两层金属,而且 金属材料性能有所差别。整管壁厚及基管和覆管的壁 厚控制相对困难。基管和覆管的受力面积、屈服强度、 抗拉强度都影响整个双金属管的壁厚变化。旋压复合 过程中,双金属管的等效应力分布情况见图 2。



Fig.2 Equivalent stress distribution of Cu/Al bimetallic tube spinning

从图 2 可以看出,基管和覆管最大等效应力虽在 同一个数量级上,但是数值还是相差较大。旋轮的下 压区域双金属管所受的应力最大,从图 2 上看出,基 管的最大等效应力的区域更大,分析认为基管受力面 积较覆管的受力面积更大。双金属管旋压复合过程中 径向等效应力分布情况见图 3,由于基管和覆管的壁 厚较薄,沿管件壁厚方向的等效应力与图2显示的覆 管和基管表层的应力应变相比没有较大变动。对比最 大等效应力区域发现,基管仍相对较大,而覆管的受 力则较为集中,与图2相对应。

在变形区,基管和覆管是紧密贴合的,接触面上 所受的力应大小相同方向相反,由于内外管坯表面的





受力面积不同,导致了基管和覆管所受的应力相差较 大。此外,由图2和图3可知,成形过程中覆管所受 应力较基管大很多,因此在室温下选择双金属材料旋 压时,需考虑覆管和基管材料的强度关系来确定覆管 和基管的材料。由于在旋压复合成形时,基管所受的 应力本就较覆管更小,所以覆管的屈服强度应至少高 于基管的屈服强度,否则在整个覆管减薄变形过程 中,基管所受的应力都将低于对应材料的屈服强度, 基管将不发生塑性变形,导致无法生成有效的界面强 度。以铜为基管,铝合金为覆管的双金属管和原始基 管的对比见图4,由于基管屈服强度相对覆管的屈服 强度较大,基管所受的应力无法达到其发生塑性变形 的要求,可以看出 Cu/Al 双金属管在经过多道次的旋 压后,基管轴向长度没有发生变化,即基管基本没有 发生减薄变形。



图 4 Al/Cu 双金属管旋压成形前后对比 Fig.4 Comparison before and after spinning of Cu/Al bimetallic tube

通过以上对双金属管基管和覆管的受力分析可 知,双金属管的旋压在成形前,要充分考虑到覆管和 基管的材料力学性能参数,因为材料力学性能直接影响着管件的变形及壁厚变化的情况。在成形有良好界面结合强度的双金属管时,覆管的抗拉强度就要高于基管的屈服强度,否则基管将不发生变形,基管的内部基体也无法与覆管变形过程中挤压而出的基体接触,将导致无法形成有效的界面结合。

3 双金属管旋压复合关键工艺参数 研究

影响双金属旋压成形的因素有很多,例如工艺参数、管坯尺寸、旋轮尺寸以及材料属性,将重点研究 旋压复合过程中的关键工艺参数,包括压下量、转速、旋轮安装角对双金属管旋压成形效果的影响规律。

3.1 压下量

在双金属的旋压成形过程中,压下量直接影响双 金属复合管的壁厚变化。在其他工艺参数(转速为 500 r/min,旋轮进给速度为 200 mm/min,旋轮安装 角为 90°)不变的情况,探究不同压下量下的 Cu/Al 双金属复合管的变形情况及对基管和覆管壁厚变化 的影响规律。分别选用 0.5, 0.3, 0.1 mm 这 3 个依次等 量减小的压下量进行成形仿真研究。

不同压下量下 Cu/Al 双金属管等效应变的分布 情况见图 5。随压下量的增加,双金属管的等效应变 也随之增大。对比覆管和基管端部的伸长量,研究发 现压下量减少,基管相较覆管的伸长量随之减小。依 据体积不变定律,随压下量减小,基管的减薄率与覆 管减薄率的比值减小。

模拟与实验中不同压下量下覆管和基管的壁厚 分布情况见图 6,可以看出不同压下量下,模拟和实 验对应覆管和基管的壁厚基本相同,从而也验证了模 拟的准确性。随着压下量的增加,覆管和基管的壁厚 都在减小。整理计算所得的不同压下量下覆管和基管 实际减薄率的比值情况见图 7。当压下量较小时,覆 管的减薄率远大于基管,但随着压下量的增大,覆管 和基管的减薄率的比值趋近趋于 1,因此,在旋压成 形双金属管的过程中,可以通过改变压下量的大小, 而在一定程度上实现对 Cu/Al 双金属管覆管和基管 壁厚分布的控制。多道次小压下量 Cu/Al 双金属复合 管旋压成形后得到覆管较薄、基管较厚的双金属管见 图 8。

3.2 转速

转速是指旋压过程中主轴每分钟转过的圈数。研 究在其他工艺参数(压下量为 0.3 mm,旋轮进给速 度为 200 mm/min,旋轮安装角为 90°)不变的条件下, 转速对双金属复合管的变形情况及基管与覆管壁厚









变化的影响。分别设置转速为 500, 350, 200 r/min。 不同转速下的 Cu/Al 双金属管成形后的等效应变见 图 9,通过对比发现不同转速下双金属的变形情况大 致相同,同时所测的不同转速的覆管和基管轴向长度 也基本相同。分析认为,不同的转速下,覆管基管的 受力面积大小都没有发生变化,即管材的受力情况也 基本相同。但随着转速的增加,双金属管轴向单位距 离内的接触变形的圈数更多,材料的流动会更为均 匀。同时由于单位长度接触变形圈数更多,变形的运



图 7 不同压下量下覆管和基管壁厚减薄率的比值 Fig.7 Ratio of thickness reduction of clad tube to matric tube in different press amount



图 8 多道次小压下量 Cu/Al 双金属管 Fig.8 Multi-pass and low-pressure Cu/Al bimetallic tube

动轨迹重叠得较为紧密,覆管表面质量会更为优良。 实验所测得的不同转速下的双金属管成形后覆管和 基管壁厚分布情况见图 10,可以看出不同的转速下, 基管的壁厚基本保持恒定,在转速为 200 r/min 时覆 管的壁厚略有浮动。结果表明,宏观上转速对双金属 管旋压成形过程的影响较小。不同转速减薄成形的覆 管和基管尺寸上基本没有变化。但随着转速的增加, 管材与旋轮接触的轨迹变得更为紧密,单位面积的材 料经过多次的变形使流动更为均匀,覆管表面粗糙度 随之提高。



图 9 不同转速下 Cu/Al 双金属管的等效应变的分布情况 Fig.9 Equivalent strain distribution of Cu/Al bimetallic tube at different





3.3 旋轮安装角

旋轮安装角是芯模轴线和旋轮轴线构成的角。研 究在其他工艺参数(压下量为 0.3 mm,旋轮进给速

度为 200 mm/min, 转速为 500 r/min) 不变的情况下, 旋轮安装角β对Cu/Al双金属管旋压受力情况和壁厚 分布的影响。分别设置旋轮安装角 β 为 90°, 60°, 45°。 不同旋轮安装角下的 Cu/Al 双金属管的等效应变见 图 11。对比图 11 中 a—c 的 Cu/Al 双金属管覆管和基 管的端部伸长量,随着旋压安装角的减小,基管的流 动变形量增大,使成形后基管的轴向长度发生较大的 变化。随着旋轮安装角的减小,成形过程中旋轮与覆 管接触的受力面积有较大的增大,使覆管和基管所受 的应力趋近。因为铜的强度高于铝,基管的减薄率也 随之增加,致使基管轴向长度上有较大的变化。Cu/Al 双金属管在不同旋轮安装角下,旋压成形后模拟和实 验所测得的覆管和基管的壁厚分布情况见图 12。从 图 12a 和 12b 中覆管和基管壁厚的变化可以看出,随 着旋轮安装角减小,覆管的壁厚变大,基管的壁厚变 小。模拟和实验的管材壁厚变化的趋势一致,随着旋







图 12 不同旋轮安装角下模拟和实验覆管和 基管的壁厚分布 Fig.12 Thickness distribution of clad tube and matric

tube of different roller installation angles

轮安装角的减小,覆管的减薄率减小,基管的减薄率 增大。通过对图 12 中覆管和基管减薄率的计算,发 现在旋轮安装角 β=45°时,基管与覆管减薄率之比大 于 2,因此,在旋压过程中可以通过选用小的旋轮安 装角来实现调节基管的壁厚。同时,结合压下量对双 金属管覆管壁厚的控制,从而实现对整个双金属管的 壁厚分布的控制。

4 结论

 覆管和基管外表面的受力面积不同,导致了 基管和覆管所受的应力相差较大。管坯材料力学性能 直接影响着双金属管的变形及壁厚变化情况。在室温 下选择双金属材料旋压时,需考虑覆管和基管材料 的强度关系,覆管的屈服强度应至少高于基管的屈 服强度。

2) 压下量 p 越大,双金属变形量越大,伸长量 越大。同时在一定范围内随着压下量的增大,覆管和 基管的减薄率之比会由大变小。在小的压下量下,双 金属管的减薄以覆管为主。在多道次旋压过程中可以 通过选用小的压下量来改变覆管壁厚,从而调节整个 双金属管的壁厚分布。

3) 旋轮的安装角度 β 对覆管和基管的壁厚减薄

影响较大,随着旋轮安装角的减小,覆管的减薄率减 小,基管的减薄率增大。在旋轮安装角较小时,双 金属管的减薄以基管为主。通过对压下量和旋轮安 装角的调节,可以实现对整个双金属管壁厚分布的 有效调控。

参考文献:

- HALACZEK D. Analysis of Manufacturing Bimetallic Tubes by the Cold Drawing Process[J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2016, 61(1): 241–248.
- [2] 孙显俊,陶杰,郭训忠,等. Fe/Al 复合管液压胀形数值 模拟及试验研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(3): 66—70. SUN Xian-jun, TAO Jie, GUO Xun-zhong, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Hydro-bulging of Fe/Al Composite Pipe[J]. Forging Technology, 2010, 35(3): 66—70.
- [3] 孙显俊,陶杰,郭训忠. 铁/铝爆炸复合双金属管界面的结合性能[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2011, 21(10): 2175—2180.
 SUN Xian-jun, TAO Jie, GUO Xun-zhong. Bonding Prop-

erties of Iron/Aluminum Explosive Composite Bimetallic Tube Interface[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2175—2180.

- [4] YU H, FAN Z, LI C. Magnetic Pulse Cladding of Aluminum Alloy on Mild Steel Tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2): 141–150.
- [5] SAITO K, FUJINO T, HITOMI N, et al. R&D of Nb/Cu Clad Seamless Cavities at KEK[J]. 2003.
- [6] MOHEBBI M S, AKBARZADEH A. A Novel Spinbonding Process for Manufacturing Multilayered Clad Tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(3): 510—517.
- [7] MOHEBBI M S, AKBARZADEH A. Accumulative Spin-bonding (ASB) as a Novel SPD Process for Fabrication of Nanostructured Tubes[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 528(1): 180—188.
- [8] MOHEBBI M S, AKBARZADEH A. Fabrication of Copper/Aluminum Composite Tubes by Spin-bonding Process: Experiments and Modeling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9/10/ 11/12): 1043—1055.
- [9] 潘毓滨. 金属复合管强力旋压工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
 PAN Yu-bin. Research on Strong Spinning Process of Met-

al Composite Pipe[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

- [10] 王悦.双金属管复合旋压的界面热阻效应及成形工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
 WANG Yue. Research on Interface Thermal Resistance and Forming Process of Double Metal Tube Composite Spinning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] JIANG S Y, ZHANG Y Q, ZHAO Y N, et al. Finite Element Simulation of Ball Spinning of NiTi Shape Memory Alloy Tube Based on Variable Temperature Field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 781–787.
- [12] JIANG S, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. Investigation of Interface Compatibility during Ball Spinning of Composite

Tube of Copper and Aluminum[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1–8.

[13] 程可,徐文斌,陆晓峰. 20/316L 双金属复合管旋压成 形数值模拟与分析[J]. 塑性工程学报, 2015(1): 119—125.
CHENG Ke, XU Wen-bin, LU Xiao-feng. Numerical Sim-

ulation and Analysis of 20/316L Bimetallic Compound Tube in Spin Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015(1): 119—125.

[14] ZOGHI H, AREZOODAR A F, SAYEAFTABI M. Enhanced Finite Element Analysis of Material Deformation and Strain Distribution in Spinning of 42CrMo Steel Tubes at Elevated Temperature[J]. Materials & Design, 2013, 47(9): 234–242.