DOI: 10.3901/JME.2018.02.048

磁场作用下铝/钢 CMT 焊接温度场及熔池流动行为*

刘一搏^{1,2} 张鸿名³ 孙清洁^{1,2} 李军兆² 冯吉才^{1,2}

- (1. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学(威海)特种焊接技术山东省重点实验室 威海 264209;
3. 哈尔滨工业大学(威海)土木工程学系 威海 264209)

摘要: 为探究纵向磁场在铝/钢冷金属过渡(Cold metal transfer, CMT)焊接过程中的作用机理,采用 ANSYS 软件对纵向磁场作用下电弧形态、温度分布和熔池流动行为进行数值模拟,重点研究不同线圈励磁电流对焊接温度场和熔池流动行为的影响。结果表明,外加磁场可以改变电弧等离子体的运动行为,进而影响了焊接电弧在基板表面和熔池内部的热量传导行为。施加磁场后,熔池中的峰值温度发生下降,峰值温度区域由熔池中心转向熔池外围,铝/钢界面处的高温停留时间和温度也随之下降。此外,外加磁场改变了铝液熔池内部的流动行为。熔池内部的流动特征由无磁场时的单一环流,转变为有磁场作用时的双环流流动特征。随着励磁电流的增加,熔池内部的流速和流动范围有增大的趋势。

关键词: 磁场; 铝/钢; 温度场; 流动行为; 电弧焊

中图分类号: TG156

Effect of Magnetic Field on the Weld Temperature Field and Flow Behavior of Molten Pool in Al/Steel CMT Welding Process

LIU Yibo^{1,2} ZHANG Hongming³ SUN Qingjie^{1,2} LI Junzhao² FENG Jicai^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology,
Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209;
3. Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209)

Abstract: In order to investigate the effect mechanism of longitudinal magnetic field on the Al/Steel cold metal transfer(CMT) welding process, the morphology and temperature distribution of weld arc and the flow behavior of molten pool are simulated by ANSYS software in present work. The results show that the external magnetic field (EMF) could change the movement of arc plasma, and ultimately affected the arc shape as well as the heat conduction behavior from weld arc to the molten pool and base plate. With application of EMF, the peak temperature of molten pool decreases, and the high-temperature zone moves from the center of molten pool to the lateral, which decreases the reaction temperature and retention time of high-temperature at the front interface of Al/steel joint. Besides that, the application of EMF also changes the flow behavior of molten pool. The flow behavior inside the molten pool changes from the single circulation into a double circulation flow characteristics by application of EMF. With the increase of core exciting current, the flow rate of inside molten pool is increase.

Key words: magnetic field; Al/Steel; temperature field; flow behavior; arc welding

0 前言

铝/钢连接结构由于综合了铝和钢双金属材料质量轻,强度高以及良好的导热导电性能,使得其

在汽车、航空航天等制造部门中有很多潜在的应用。但是铝/钢异种金属连接时,界面处会生成脆性的铁-铝金属间化合物,恶化铝/钢之间连接性能。如何控制铝/钢连接时的热量输入,抑制脆性化合物的生长,一直是学者们追寻的目标^[1]。当采用电弧连接方法时,焊缝金属的冷却速度快,元素固相扩散阶段的时间很短,铁-铝化合物层的生成主要和铝液与钢的直接界面反应有关。因此,如何降低

* 国家自然科学基金(51705103, 51475104)和哈尔滨工业大学(威海)校科学研究基金(HIT(WH)201605, 201507)资助项目。20170524 收到初稿, 20170804 收到修改稿

铝-钢界面反应温度和反应时间, 控制铝-钢界面前沿的传热传质行为, 是抑制脆性化合物层生长的根本途径^[2-8]。

磁场具有设备简单、无噪声、响应快、施加方式灵活等特点。将磁场引入到电弧焊中时, 电磁力会对熔池金属熔池进行搅拌, 起到细化晶粒的作用^[9-10], 同时, 强制机械对流使液态金属的温度更加均匀, 有利于等轴晶和包状树枝晶的生成, 提高焊缝的力学性能^[11-12]。此外, 也降低了焊缝中的残余应力分布^[13]。

除了磁场对同种金属的熔化和凝固过程研究, 近年来人们对磁场作用下异种金属的连接过程也做了大量的研究工作。研究表明, 施加纵向磁场可以提高铁/铝^[14-15]、铜/铝^[16]和钛/铝金^[17]属之间的连接性能, 界面处金属间化合物的生长受到了抑制。但是, 磁场在焊接过程的具体影响机制还不太清晰。电弧等离子体与磁场之间的耦合作用对异种金属焊接时的温度场与熔池流场、传热与传质行为产生什么影响, 还有待进一步研究。

文中采用 ANSYS 软件对外加纵向磁场作用下的铝/钢 CMT 焊接过程进行了模拟, 对比分析了不同线圈励磁电流下的焊接电弧、熔池、基板的温度场分布和熔池流场分布特征, 从数值模拟的角度阐述磁场在铝/钢连接中的作用机理。

1 有限元模型的建立

1.1 数学模型及边界条件

图 1 所示为磁场线圈及焊枪的实际尺寸几何模型。分别为铁芯、磁场线圈、焊丝、电弧区、氩气区、熔池区域和基板 7 个部分。文中采用了非均匀网格的模型划分方式。电弧区、熔池区和基板等磁场主要作用区域用细网格, 其他区域用较粗的网格划分, 用以提高整体计算效率。由于所建模型为轴对称结构, 因此在平面的网格划分之后, 采用 ANSYS 中的 vrotat 命令将几何模型围绕 y 轴旋转, 获得三维立体空间模型。图 2 所示为磁场线圈的具体尺寸, 以及线圈和焊炬的相对位置示意图。熔池区的表面轮廓是由下式中的熔池表面控制方程计算得出^[18]

$$P_a - \rho g \Phi + P_d + \lambda = -\gamma \frac{(1 + \Phi_y^2) \Phi_{xx} - 2 \Phi_x \Phi_y \Phi_{xy} + (1 + \Phi_x^2) \Phi_{yy}}{(1 + \Phi_x^2 + \Phi_y^2)^{3/2}}$$

式中, P_a 为电弧压力; ρ 和 γ 分别为液态金属的密度和表面张力; g 为重力加速度; P_d 为熔滴冲击力;

λ 为待定常数, 其大小由熔池体积的增加量等于填充金属体积这一约束条件确定, 下角标 x 、 y 分别表示函数 Φ 对 x 和 y 的偏导数。

图 1 励磁线圈及焊接区域网格划分模型

图 2 励磁线圈尺寸和焊炬的相对位置

文中对焊丝、电弧区域、氩气区、熔池区域和基板表面区域设置了边界条件, 数值模拟计算区域如图 3 所示, 模型边界条件和载荷如表 1 所示。由于氩气在温度高于 5 000 K 时开始导电, 因此为了保证电弧区域内气体处于导电状态, 在第一次计算电场时, 将电弧区的温度赋值为 10 000 K。其余区域初始温度设置为室温 298 K。基板底部设置为零电势面, 焊丝为阳极。

图 3 模型边界示意图

表 1 模型边界条件

边界	竖直方向 速度 $u/(m/s)$	水平方向 速度 $v/(m/s)$	温度 T/K	电势 φ/V	磁感应强度 B/T
AE	0	0	—	$\partial\varphi/\partial y=0$	—
ED	$\partial u/\partial y=0$	0	$\partial T/\partial y=0$	$\partial\varphi/\partial y=0$	—
DC	0	0	10 000	0	$\partial B/\partial x=0$
BC	$\partial u/\partial y=0$	$\partial v/\partial y=0$	$\partial T/\partial y=0$	$\partial\varphi/\partial y=0$	—
BF	u 给定	0	$\partial T/\partial x=0$	$\partial\varphi/\partial x=0$	B 给定
AF	—	—	—	$I(A)=\text{const}$	B 给定
FG	0	0	500	—	—
EG	0	0	2 000	—	—

1.2 基本假设

针对外加磁场作用下的 CMT 焊接过程数值模拟, 文中采用的基本假设如下。

(1) 电弧区域内等离子体处于局部热平衡状态, 即电子和离子的温度基本相等。

(2) 电弧等离子体的流动处于层流状态, 熔池内部金属的流动处于紊流状态。

(3) 电弧等离子体属于光学薄级别, 对于辐射的再吸收与总辐射损失相比忽略不计。

(4) 忽略熔池及金属蒸气对焊接电弧的影响。

(5) 采用等效平均电流值近似代替 CMT 特殊的电流变化和热量输入, 以等效热焓和冲击力近似代替熔滴过渡时所带来的热量和对熔池表面的冲击作用。

1.3 控制方程

电弧等离子体介质和熔池中的液态金属均可视为流体, 满足流体动力学基本规则。同时, 在流动运动中也必然会伴随着质量运输、动量传递和能量运输的过程, 则需遵循质量、动量和能量守恒定律。

质量守恒方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程。在焊接电弧和熔池流体内部存在的外力主要有流体静压力、流体黏度阻力、电磁力、外加磁场产生的洛伦兹力还有浮力和重力。当采用柱坐标系表示动量守恒关系时, 轴向和径向的动量守恒方程如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r u_z)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + j_z B_\theta + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right] + \rho g + F_z \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z u_r)}{\partial z} - \rho \frac{u^2 \theta}{r} = -\frac{\partial P}{\partial r} - \\ j_r B_\theta + \frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - 2u \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right] + F_r \quad (3) \end{aligned}$$

能量守恒方程。电弧内部的能量交换包括焦耳热、电子迁移所做的功、热传导引起的能量, 以及辐射热损失等。电弧焊接过程中的能量守恒关系可以由式(4)表示

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r T)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z T)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \kappa}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{5k_b}{2e} \left(j_r \frac{\partial T}{\partial r} + j_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} - S \quad (4) \end{aligned}$$

式(1)~(4)中 u_r 、 u_z 表示等立体体的轴向和径向运动速度(m/s); μ 为黏度(m²/s); ρ 为气体密度(kg/m³); B_θ 为电弧自感应磁场强度(T); 除了电弧自感应磁场强度 B_θ 外, 电弧中带电粒子还受到外加磁场产生的洛伦兹力作用, 由于环形线圈产生的磁感应强度(B)不是绝对的轴向, 同时也存在径向分量, 从而会产生径向和轴向洛伦兹力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, 分别用 F_r 、 F_z 表示; j_r 、 j_z 分别为径向和轴向的电流密度(A/m²); T 为温度(K); C_p 为比定压热容(J/K); κ 为热导率(W·m⁻¹·K⁻¹); k_b 为玻尔兹曼常数(J/K); S 为单位面积辐射能(J/m²)。

2 模拟方法与验证

2.1 模拟方法

文中采用顺序耦合法, 将磁场作用下的电弧与熔池模拟过程分为电场、磁场和流场三个模块。在电场模块中计算出电势分布和电流密度; 随后将计算获得的电流密度分布作为载荷加载到磁场模块当中, 获得电磁力和焦耳热分布; 最后将热、力条件作为载荷加载到流场模块当中, 获取电弧温度场分布, 如此完成一次计算。将温度场数据导入到电场模块作为新的初始条件, 开始第二次运算。循环迭代直到计算结果收敛, 提取模拟数据结果。

2.2 温度场验证

由于熔池的实际温度难以测量, 因此文中对基板的温度场进行了测量, 将基板测量位置的温度与模拟结果对比, 测温位置如图 4 所示。其中, 起始测温位置位于距离起弧端 15 mm 处, 热电偶每隔 2 mm 沿垂直于焊接方向放置。由于文中模型为瞬态

图 4 热电偶测温位置示意图

模型,为了尽可能降低熔池前方对当前位置的传热,将测量区域上方的钢板表面用高温胶带隔离,并在胶带上方放置 2 mm 厚钢板盖住。

图 5 所示为焊接速度 15 mm/s,焊接电流 96 A 下的实际测温 and 模拟温度曲线图。从图中可以看出,模拟结果所得各点温度与实际焊接过程中的温度极值基本相符。

图 5 实际测量温度与模拟温度对比

3 模拟结果与讨论

3.1 电弧温度场

图 6 为不同励磁电流下电弧外层带电粒子的运动行为。当励磁电流为 0 A 时,焊丝端部等离子体表现为由外向焊丝内部流动,电弧中、下部的等离子体沿着电弧外沿向弧跟方向运动。随着磁场的加入,等离子体的流动方向表现出旋转运动行为,流动速度数值和流动范围也要高于无磁场作用时,并且随着励磁电流的增加呈现出增加的趋势。在相同的励磁电流数值下,改变励磁电流的方向会使得等离子体的旋转方向发生改变。

图 6 不同励磁电流下等离子体的运动分布

图 7 所示为不同励磁电流下的焊接电弧温度场分

布。当励磁电流为 0 A 时,电弧中的温度呈高斯分布趋势,电弧底部的峰值温度位于电弧的正下方。当励磁电流为 1 A 时,从电弧形态和温度分布上看,电弧高度会发生下降,电弧在基板表面的作用范围变大,电弧底部温度峰值位置开始向熔池两侧偏移。随着励磁电流的进一步增大,如图 7c 所示,电弧底部的高温区会进一步侧移,电弧形状呈扁长形,电弧在基板表面的作用范围与无磁场时相比增大了 20%。

图 7 不同励磁电流下电弧的温度分布

3.2 基板及熔池温度场

图 8 为不同励磁电流下熔池和基板的温度场分布。当励磁电流为 0 A 时,此时电弧底部的峰值温度区域在熔池表面的中心位置。其中,铝合金熔池温度范围在 1 100~1 850 K,熔池铝液与钢板板接触处的界面前沿温度范围为 1 200~1 350 K。当励磁电流为 1 A 时,如图 8b 所示,电弧的旋转运动使得熔池表面的高温区域从熔池凹液面中心处向熔池外沿偏移。同时,熔池向基板内部的传热方向也由中心位置向下传导转变为由熔池两端分别向下传导的模式。此外,同无磁场作用时的温度分布相比,励磁电流为 1 A 时的熔池内部温度范围降低至 957~1 400 K,铝/钢界面处的最高温度为 1 200 K。但是,熔池周边的基板温度会升高,基板上表面 500 K 以上温度区域由 13 mm 增加到 17 mm。

随着励磁电流的增加,如图 8c 所示,由于电弧底部峰值温度在熔池表面的位置进一步向外围移动,电弧的能量逐步发散,熔池内部的温度范围降

低至 950~1 400 K, 铝/钢界面处的温度也随之下降到 1 100 K 左右。此外, 基板表面 500 K 以上温度区域增加到 20 mm。

图 8 不同励磁电流下熔池和基板的温度分布

3.3 熔池流场

图 9 为不同励磁电流时电磁力驱使下的熔池流动行为。当无外加磁场作用时, 熔池内部的电磁力仅为熔池中电流产生的自感应电磁力。此时电磁力的大小主要和电流密度有关, 无外加磁场时电弧的导电通道集中在熔池中心上方, 该处的电流密度最大, 产生的自感应电磁力最强, 最大流速达到 0.011 m/s。施加磁场后, 如图 9b、9c 所示, 旋转电弧改变了熔池中的电流密度分布, 熔池的流速大小和最高流速位置均发生了变化, 峰值流速区域由熔池中心位置向周围偏移, 最大流速达到 0.056 m/s。当励磁电流继续增大至 2 A 时, 熔池的流速提高到 0.070 m/s, 流速峰值区域同无磁场相比向外围偏移了 2 mm。

图 9 不同励磁电流下电磁力驱使的熔池流动行为

图 10 为电磁力和表面张力耦合作用下的熔池流动行为。结合熔池的温度场分布结果, 在励磁电流为 0 A 时, 熔池表面的峰值温度在熔池中心处, 并向熔池外围递减。由于铝液的表面张力是随着温度的升高而呈现下降趋势, 因此在表面张力作用下熔池流动方向为从熔池中心向熔池外围流动, 熔池内部峰值流速达到 0.14 m/s。同单一自感应电磁力作用时的流场分布相比, 加入表面张力后熔池峰值流速提高了一个数量级, 表现出以表面张力为主要驱动力的流动趋势。

当引入外加磁场时, 如图 10b 所示, 以半侧熔池为例, 熔池内部呈现出双环流的流动特征, 并以表面熔池的峰值温度区域为环流分割线。由前文可知, 旋转电弧使得熔池表面的峰值温度区向熔池外沿偏移, 在半侧熔池中表现出中间高、两端低的温度分布特征。此时, 表面张力会驱使铝液从高温区流向低温区域, 在熔池内部形成两个环流。从流速上看, 励磁电流为 1 A 时的熔池流速整体上有提高, 最大流动可以达到 0.20 m/s, 流速的增大有利于铝/钢界面前沿的元素传质行为, 延长了铁原子在界面前沿铝液中过饱和的形成时间, 抑制了铁铝化合物的生长行为。此外, 外沿环流的出现有利于熔池在基板表面的铺展, 增加了铝、钢之间的有效接触面积和传热行为。当励磁电流增加至 2 A 时, 如图 10c 所示, 熔池的流动速度还会进一步提高, 最大流速达到 0.26 m/s。

图 10 不同励磁电流和表面张力作用下的熔池流动行为

4 结论

(1) 外加磁场改变了电弧、熔池与基板之间的

温度分布特征。随着励磁电流的增加, 熔池表面峰值温度区域向熔池外侧偏移, 熔池内部温度下降, 基板表面的加热面积增大。

(2) 外加磁场改变了熔池内部的流动行为, 表现出双环流模式的流动特征。随着励磁电流的增大, 熔池内部整体流动速度随之增大。

(3) 施加磁场后, 一方面铝/钢界面前沿温度的下降会抑制铁铝金属间化合物层生长厚度; 另一方面双环流的流动模式和流速的提高会促进熔池的铺展行为, 增加铝液前沿处铁原子达到过饱和的形成时间, 最终抑制了铁铝化合物的生长。

参 考 文 献

- [1] 朱明, 石珂, 樊丁, 等. 脉冲旁路耦合电弧 MIG 焊的动态数学建模及过程控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 86-93.
ZHU Ming, SHI Yu, FAN Ding, et al. Modeling and control of pulsed double-electrode MIG welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 86-93.
- [2] SUN J H, YAN Q, LI Z G, et al. Effect of bevel angle on microstructure and mechanical property of Al/steel butt joint using laser welding-brazing method[J]. Materials and Design, 2016, 90: 468-477.
- [3] HUSSEIN S A, TAHIR A S M, HADZLEY A B. Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: A review[J]. Materials Today Communications, 2015, 5: 32-49.
- [4] LEI H Y, LI Y B, CARLSON B E, et al. Cold metal transfer spot joining of AA6061-T6 to galvanized DP590 under different modes[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(051028): 1-10.
- [5] CAO R, YU G, CHEN J H, et al. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(10): 1753-1763.
- [6] SU Y C, HUA X M, WU Y X. Effect of input current modes on intermetallic layer and mechanical property of aluminum-steel lap joint obtained by gas metal arc welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 578: 340-345.
- [7] BORRISUTTHEKUL R, YACHI T, MIYASHITA Y, et al. Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 467: 108-113.
- [8] 孙大千, 张月莹, 苏雷, 等. 电极形状对铝-钢点焊接头组织及力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 36-43.
SUN Daqian, ZHANG Yueying, SU Lei, et al. Effect of electrode morphology on microstructures and mechanical properties of spot welded Al-steel joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 36-43.
- [9] LIM Y C, YU X, CHO J H, et al. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement Part 1-Autogenous nickel alloy welds[J]. Science and Technology of Welding and joining, 2010, 15(7): 583-589.
- [10] YANG C G, LIU G P, CHEN Y H, et al. Effect of electromagnetic stirring plus single pulse on the microstructure and properties of high strength Al-Cu alloy welds[J]. Advanced Materials Research, 2012, 391: 1225-1229.
- [11] 常云龙, 贺优优, 杜怀周. 纵向磁场对低碳钢 MIG 焊缝组织及性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(4): 385-387.
CHANG Yunlong, HE Youyou, DU Huaizhou. Effect of longitudinal magnetic field on microstructure and properties of MIG weld joint of mild steel[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(4): 385-387.
- [12] SHEN Q, LI Y B, LIN Z Q, et al. Effect of external constant magnetic field on weld nugget of resistance spot welded dual-phase steel DP590[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2011, 47(10): 4116-4119.
- [13] XU D, LIU X S, YANG J G, et al. Dynamic evolution of welding residual stress field under noncontact electromagnetic force[J]. Journal of Applied Physics, 2010(107): 054904.
- [14] LIU Y B, SUN Q J, LIU J P, et al. Effect of axial external magnetic field on cold metal transfer welds of aluminum alloy and stainless steel[J]. Materials Letters, 2015, 152: 29-31.
- [15] CHEN R, WANG C M, JIANG P, et al. Effect of axial magnetic field in the laser beam welding of stainless steel to aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2016, 109: 146-152.
- [16] LIU Y B, SUN Q J, WANG H, et al. Effect of the axial external magnetic field on copper/aluminium arc weld joining[J]. Science and Technology of Welding and joining, 2016, 21(6): 460-465.
- [17] SUN Q J, LI J Z, LIU Y B, et al. Microstructural characterization and mechanical properties of Al/Ti joint

welded by CMT method-Assisted hybrid magnetic field,
Materials and Design, 2017, 116: 316-324.

[18] 曹振宁, 武传松, 吴林. 熔滴冲击下 MIG 焊接熔池的
计算机模拟[J]. 金属学报, 1994, 30(12): 537-542.

CAO Zhenning, WU Chuansong, WU Lin. Computer
simulation of MIG weld pools with droplet impact[J].
Acta Metallurgica Sinica, 1994, 30(12): 537-542.

作者简介: 刘一搏, 男, 1987 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方
向为异种金属熔钎焊接、电弧增材制造方法及工艺、水下湿法焊接技
术等。

E-mail: ybliu0701@hit.edu.cn

孙清洁(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。
主要研究方向为超声电弧复合焊接机理、高效焊接方法及设备、水下焊
接技术等。

E-mail: qjsun@hit.edu.cn

第 7 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

基于加工轨迹均匀包络原理的高精度圆柱滚子高一致性加工方法研究

作者: 姚蔚峰

毕业学校: 浙江工业大学

指导教师: 袁巨龙

轴承是装备制造业中应用广泛的精密基础零部件, 圆柱滚子是轴承关键零部件, 其形状精度、表面质量及其批一致性对滚动轴承的运动精度和使用寿命产生重要影响。目前无心磨削等轴承圆柱滚子外圆加工方法存在加工精度批一致性差等技术难题, 为此本文提出了基于圆柱面加工轨迹均匀包络原理的高精度轴承圆柱滚子高一致性加工方法, 即将双平面研磨抛光技术应用于轴承圆柱滚子外圆成形, 以实现高形状精度、高表面质量和高一致性。

圆柱面加工轨迹均匀包络是圆柱滚子外圆成形的必要条件。因此本文重点对双平面方式下圆柱外圆加工过程的工件运动状态、圆柱面加工轨迹均匀性、研磨盘磨损轨迹均匀性以及它们的影响因素等关键问题进行了研究。主要研究工作如下。

本文以几何运动学为理论基础, 构建了双平面方式下圆柱外圆加工系统以及工件几何运动学模型, 描述了工件各个几何参数和运动参数之间的数学关系。通过圆柱工件运动状态的观测实验和数据分析基本验证了该理论模型的有效性。滚动角速度是描述圆柱工件滚动行为的关键指标。经仿真研究发现, 滚动角速度随时间变化是条非标准的余弦曲线, 夹具公转转速和自转转速、工件放置位置以及工件放置偏角是影响圆柱滚动角速度的重要因素。工件放置位置的影响最大, 其次是各转速之比, 工件放置偏角的影响最小。夹具公转转速应设置在低速, 夹具自转转速应设置高速, 相比行星式, 偏心式使圆柱滚动更加稳定。

本文针对双平面方式下圆柱外圆加工系统, 提出了一种圆柱面加工轨迹的仿真及其均匀性定量评价方法。基本步骤是, 在工件几何运动学模型基础上, 计算加工轨迹的坐标点矩阵, 仿真圆柱面加工轨迹; 将圆柱面划分为若干个单元网格, 计算每个单元网格内的加工轨迹密度, 进而计算它们的标准差, 以此作为圆柱面加工轨迹均匀性的定量评价指标。研究表明, 工件放置位置对加工轨迹均匀性的影响程度最大, 其次是各个转速之比, 工件放置偏角的影响不大。偏心式的加工轨迹均匀性优于行星式, 行星式加工轨迹形态呈鱼鳞状, 偏心式加工轨迹形态呈织网状。

本文针对双平面方式下圆柱外圆加工系统, 对研磨盘磨损轨迹进行仿真, 并以轨迹密度标准差作为评价指标对磨损均匀性进行定量分析。研究表明, 各转速之比和工件放置位置是影响研磨盘磨损轨迹均匀性的两大因素, 两者影响程度相当。偏心式和行星式的磨损均匀性相差不大, 但磨损轨迹形态完全不同, 行星式为交错型摆线, 偏心式为拉伸型摆线。较高的夹具自转转速有助于改善研磨盘磨损轨迹均匀性。

本文基于圆柱面加工轨迹均匀包络原理自主研制了双平面方式下圆柱外圆加工实验平台。以轴承钢 GCr15 圆柱滚子为加工对象, 通过行星式和偏心式的研磨加工实验和对比研究发现, 较小粒径的磨料有助于获得更低的圆度和表面粗糙度, 偏心式的整体加工效果优于行星式。采用偏心运动方式, 在优选的加工条件下, 经过机械去除的精研以及化学机械去除的粗抛和精抛阶段, 一批工件的平均圆度达到 $0.36\ \mu\text{m}$, 偏差达到 $0.13\ \mu\text{m}$, 单个工件的圆度最小达到 $0.295\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度 Ra 最小达到 $8\ \text{nm}$ 。经过上述工艺流程, 工件的形状精度、表面质量及其批一致性得到明显改善。