

基于金属蒸汽和外加磁场的MIG电弧模拟

付瑜, 韩绍华, 薛丁琪

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要 熔化极惰性气体保护焊中, 高温电弧使焊丝部分蒸发成蒸汽, 基于磁流体动力学模拟了金属蒸汽和外加纵向磁场下的MIG电弧。结果表明: 金属蒸汽改变了电弧温度分布和温度梯度, 温度峰值降幅达23.6%; 外加纵向磁场强度每增加0.01 T, 金属蒸汽在工件表面的覆盖半径减小约12.9%, 外加磁场可控制低碳钢焊接烟尘中含量最多的铁蒸汽分布。

关键词 外加磁场; 金属蒸汽; MIG; 数值模拟

中图分类号 TG444.74

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2021)03-0094-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20210330.001

Simulation of MIG arc based on metal vapor and external magnetic field

FU Yu, HAN Shaohua, XUE Dingqi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract In the process of MIG welding, the high temperature of the arc causes the welding wire to partially evaporate to form metal vapor. This paper simulated the MIG arc considering the metal vapor and the external longitudinal magnetic field based on magnetohydrodynamics. The results show that the metal vapor changes the temperature distribution and temperature gradient of the arc, and the peak temperature decreases by up to 23.6%. When the intensity of the applied longitudinal magnetic field increases by 0.01 T, the coverage radius of the metal vapor on the surface of the workpiece decreases by about 12.9%. The external magnetic field can influence the distribution of iron vapor, the main component in the welding fume of low carbon steel.

Keywords external magnetic field; metal vapor; MIG; numerical simulation

熔化极惰性气体保护焊(melt inert-gas welding, MIG)广泛用于各种金属焊接, 尤其适合易氧化金属^[1]。但由于焊接温度过高及弧光干扰, 通过试验探究其工艺颇为困难。数值模拟可直观呈现MIG电弧形态, 且随数值模拟技术发展, 其模拟精度越来越高^[2]。

外加磁场能调控焊接电弧行为, 从而改善焊缝成形。外加纵向磁场下, MIG电弧^[3]和TIG电弧^[4-5]形态扩张, 电弧压力峰值较无外加磁场时降低。纵向磁场的加入使焊缝余高减小, 熔宽增加, 焊缝表面平整度和成型精度提高^[6]。

由于MIG电弧温度达到上万K, 焊丝、熔滴、熔池都汽化产生金属蒸汽。王璐璐^[7]、Wang等^[8]发现金属蒸汽主要源于焊丝端部蒸发, 其蒸发量超过熔池蒸发量12倍。Murphy等^[9-10]研究表明, 由于金属蒸汽辐射, 电弧温度明显低于不考虑金属蒸汽时的温度。金属蒸汽在电弧中心区浓度较高, 导致电弧等离子体中心区温度降低^[11]。金属蒸汽对电弧和熔滴影响显著, 在模拟时应考虑^[12]。

目前对MIG电弧的模拟研究为金属蒸汽或外加磁场等对电弧的影响。同时考虑金属蒸汽和外加磁场对电弧影响的鲜少。作者用通用流体力学计算软件FLUENT模拟金属蒸汽和外加纵向磁场同时作用下的MIG电弧, 探究两者对电弧影响。

1 数学模型

1.1 基本假设

对MIG电弧等离子体的基本假设: 电弧处于局部热力学平衡状态(LTE); 电弧等离子体为层流不可压缩流体; 电弧等离子体是光学薄的, 即辐射重吸收和辐射损失相比可忽略不计; 氩气和金属蒸汽的热物性参数为温度的函数; 忽略焊丝熔化形状对电弧的影响。

计算用模型, 如图1所示。电弧模型以AF为旋转轴。电弧弧长AF为7 mm, ABC为焊丝轮廓的一半, 焊丝半径AB为0.6 mm。金属蒸汽考虑焊丝中含量最多的Fe, 铁蒸汽从焊丝端部AB进入电弧区域。CD为保护气体入口, DE为保护气出口, EF为工件。外加磁场方向沿对称轴AF向下。

收稿日期: 2020-10-25; 修回日期: 2021-03-29

基金项目: 福建省自然科学基金(2017J05077)

第一作者: 付瑜, 男, 硕士研究生; 主要从事焊接数值模拟研究。E-mail: 853367565@qq.com。

通信作者: 韩绍华, 女, 博士, 讲师; 主要从事材料的连接、焊接研究。E-mail: 89091619@qq.com。

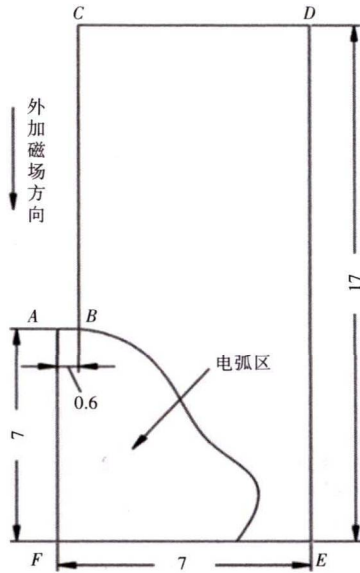


图1 计算模型示意图(mm)

Fig.1 Schematic diagram of calculation model (mm)

1.2 控制方程

圆柱坐标系下,金属蒸汽和外加纵向磁场的MIG电弧满足以下方程。

1.2.1 质量连续性方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} + \frac{\partial(ru)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中: u 为轴向速度; v 为径向速度; z 为轴向; r 为径向。

1.2.2 动量守恒方程

轴向动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial r\rho u u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r\rho v u}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\eta \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) \right] + F_z. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $F_z = J_r \times B_0 + \rho g$, 为轴向动量源项。

径向动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial r\rho v v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r\rho v u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\eta \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) \right] + \rho \frac{u^2}{r} - F_r. \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $F_r = J_z \times B_0$, 为径向动量源项。

周向(θ)动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial r\rho u w}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r\rho v w}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right] - \rho \frac{v w}{r} - F_w. \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $F_w = J_r \times B_1$, 为周向动量源项。

式(1)~(4)中: ρ 为气体密度; P 为压力; w 为周向速度; J_r

为径向电流密度; J_z 为轴向电流密度; B_0 为轴向电流感应产生的磁场强度; μ 为黏度; B_1 为外加纵向磁场强度。

1.2.3 能量守恒方程

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q. \quad (5)$$

式中 Q 为能量源项。

$$Q = \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{K_B}{e} \left(J_z \frac{\partial T}{\partial z} + J_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - 4\pi\epsilon_n. \quad (6)$$

式中:右边3项分别为焦耳热、电子输运焓和辐射热损失; c_p 为比热; T 为温度; k 为热导率; K_B 为玻尔兹曼常数; e 为电子电量; σ 为电导率; ϵ_n 为辐射发射系数。

1.2.4 麦克斯韦方程组

电流连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0. \quad (7)$$

欧姆定律:

$$J_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r}; \quad (8)$$

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (9)$$

安培环流定律:

$$B_0 = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr. \quad (10)$$

式中: φ 为电势; μ_0 为真空磁导率。

1.2.5 组分输运方程

铁蒸汽进入电弧区,改变等离子体的物性参数,铁蒸汽遵循组分输运方程:

$$\frac{\partial(\rho w_{Fe})}{\partial t} + \nabla(\rho v w_{Fe}) + \nabla \cdot J_{Fe} = 0. \quad (11)$$

式中: w_{Fe} 为铁蒸汽质量分数; J_{Fe} 为铁蒸汽的扩散通量。

$$J_{Fe} = -\rho D w_{Fe}. \quad (12)$$

式中 D 为质量扩散系数。由黏度近似方程^[13]给出:

$$D = \frac{2\sqrt{2} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{0.5}}{\left[\left(\frac{\rho_1^2}{\beta_1^2 \eta_1^2 M_1} \right)^{0.25} + \left(\frac{\rho_2^2}{\beta_2^2 \eta_2^2 M_2} \right)^{0.25} \right]^2}. \quad (13)$$

式中: M_1 和 M_2 为铁和氩气的摩尔质量; ρ_1, η_1 和 ρ_2, η_2 分别为铁和氩气的密度和黏度; β_1, β_2 为常数,根据Wilke^[14]的研究, $\beta_1 = \beta_2 = 1.385$ 。

1.3 边界条件

模型所用边界条件,如表1所示。其中 v_{Fe} 和 v_{Ar} 分别为给定的铁蒸汽和氩气入口速度, $J_0 = I / (2\pi R_w)$ 为焊丝端部电流密度,焊接电流 I 为 210 A, R_w 为焊丝半径 0.6 mm。

表1 边界条件
Table 1 Boundary conditions

边界	类型	$u/(m \cdot s^{-1})$	T/K	φ/V
AB	速度入口	v_{Fe}	3 000	$-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} = J_0$
BC	壁面	0	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$
CD	速度入口	v_{Ar}	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$
DE	压力出口	$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$
EF	壁面	0	6 000	0
FA	对称轴	$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$

1.4 物性参数

保护气体用氩气,其和铁蒸汽物性参数^[15]:密度 ρ ,黏度 μ ,热导率 k ,电导率 σ ,比热 c_p 和辐射发射系数 ϵ_n 。铁蒸汽进入氩气区域后形成混合物,混合物的物性参数由混合定律得到。

对于混合物密度,使用体积权重混合定律:

$$\rho_m = \frac{\rho_1 \rho_2}{w_1 \rho_2 + w_2 \rho_1} \circ \tag{14}$$

式中: ρ_m 为混合物密度; ρ_1 、 w_1 和 ρ_2 、 w_2 分别为铁蒸汽和氩气的密度和质量分数。

对于混合物的热导率,使用质量权重混合定律:

$$k_m = w_1 k_1 + w_2 k_2 \circ \tag{15}$$

式中: k_m 为混合物热导率; k_1 、 k_2 分别为铁蒸汽和氩气的热导率。

混合物的比热:

$$c_{pm} = w_1 c_{p1} + w_2 c_{p2} \circ \tag{16}$$

混合物电导率:

$$\sigma_m = w_1 \sigma_1 + w_2 \sigma_2 \circ \tag{17}$$

混合物黏度:

$$\mu_m = w_1 \mu_1 + w_2 \mu_2 \circ \tag{18}$$

1.5 求解方法

前处理用 Gambit 软件,模拟用基于压力的求解器,二维旋转轴对称模型,用 SIMPLE 算法进行压力速度耦合。通过用户自定义标量(UDS)添加电流连续性方程,用户自定义函数(UDF)添加方程源项、设置物性参数。后处理用 Tecplot 处理云图。

2 结果与讨论

2.1 温度场

金属蒸汽和外加磁场对电弧温度场影响,如图2所示。无外加磁场时,电弧峰值温度由不考虑金属蒸汽时的 29 780 K 降到考虑金属蒸汽后的 22 758 K,降温幅度约 23.6%,金属蒸汽使电弧高温区变小且上移,电弧上部等温线收缩,下部扩张,且温度梯度明显减

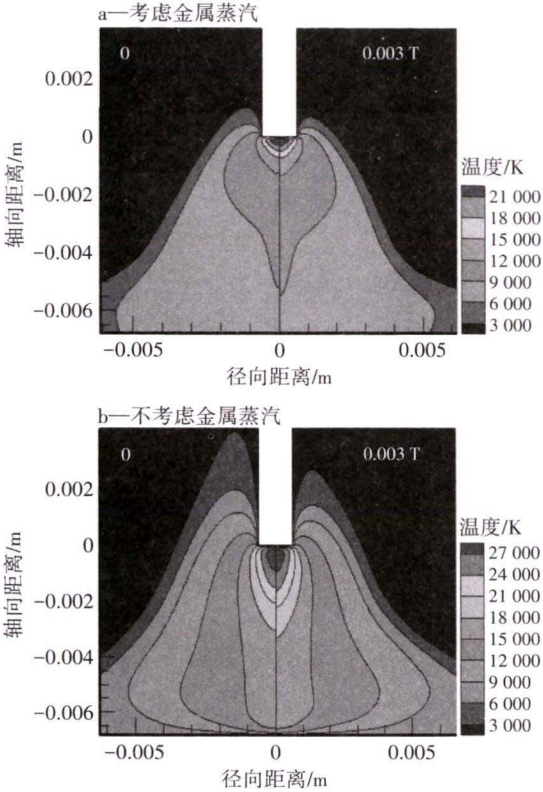


图2 金属蒸汽和外加磁场对电弧温度场影响
Fig.2 Influences of metal vapor and external magnetic field on arc temperature field

小;有外加磁场时,有无金属蒸汽两种情况的电弧峰值温度分别为 22 770、29 748 K,金属蒸汽导致电弧温度峰值降低约 23.5%。无金属蒸汽时,有无外加磁场的电弧峰值温度差值为 32 K;有金属蒸汽时,该差值仅为 12 K,外加磁场对电弧峰值温度影响很小,且使电弧略有收缩,原因是外加磁场产生周向电磁力,使电弧绕轴线旋转。金属蒸汽进入电弧区域后,由于其净辐射系数较大,电弧等离子体辐射损失加重,电弧温度降低;且焊丝金属蒸发需吸收大量热量,导致电弧降温。

考虑金属蒸汽,无外加磁场的模拟结果与文献^[16]使用相同焊接参数(焊接电流为 210 A,保护气流量为 18 L/min)得到的试验结果对比,如图3所示。模拟结果和试验拍摄的电弧形态一致,均呈上窄下宽的钟罩型,电弧整体轮廓接近,证明模拟结果具有一定的准确性。

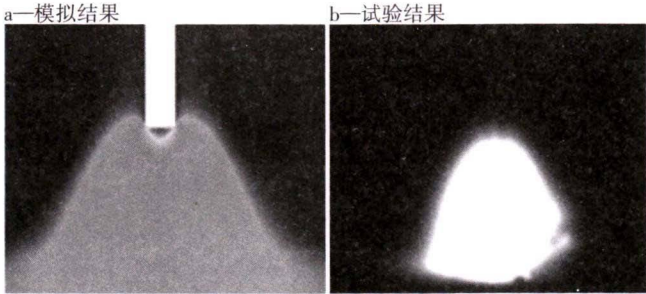


图3 模拟和试验结果对比
Fig.3 Comparison of simulation and experimental result

2.2 外加纵向磁场对电弧的影响

外加纵向磁场使电弧等离子体沿轴线高速旋转,金属蒸汽分布也受影响。外加纵向磁场对金属蒸汽分布的影响,如图4所示。其为不同外加磁场强度下金属蒸汽质量分数为0.05%的轮廓。随外加磁场强度增加,金属蒸汽分布范围减小。

为评估外加纵向磁场强度对金属蒸汽分布的影响,选取工件表面铁蒸汽质量分数为0.05%处的径向坐标,该值越大,说明金属蒸汽在工件径向表面的覆盖范围越大。外加纵向磁场强度分别为0、0.01、0.02、0.03 T时的情况对比,如图5所示。可以看出,外加纵向磁场强度越大,金属蒸汽在工件表面的覆盖半径越小。通过计算可知,外加纵向磁场强度每增加0.01 T,金属蒸汽在工件表面的覆盖半径减小约12.9%。

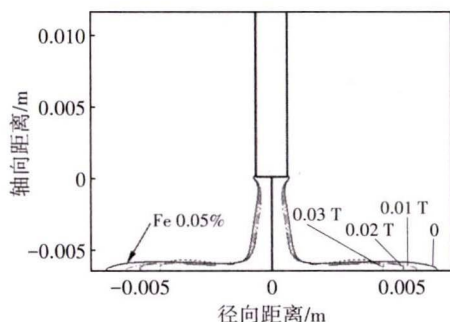


图4 外加纵向磁场对金属蒸汽分布的影响

Fig.4 Influences of an external longitudinal magnetic field on distribution of metal vapor

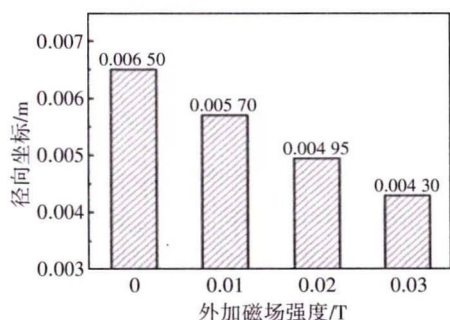


图5 外加纵向磁场对金属蒸汽覆盖范围的影响

Fig.5 Influence of an external longitudinal magnetic field on coverage of metal vapor

3 结论

1) 金属蒸汽使电弧温度降低,温度峰值降幅约23.6%,要准确模拟电弧温度分布须考虑金属蒸汽;外加磁场对电弧峰值温度影响很小,但使电弧形态略有收缩。

2) 外加纵向磁场对金属蒸汽的分布也产生影响,随外加磁场强度增加,金属蒸汽的覆盖范围减小。外加纵向磁场强度每增加0.01 T,金属蒸汽在工件表面的覆盖半径减小约12.9%,外加磁场可控制低碳钢焊

接烟尘中含量最多的铁蒸汽的分布。

4 参考文献

- [1] 韩琦. 外加磁场作用MIG焊电弧及熔滴过渡行为研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2018.
HAN Qi. Study on the behavior of arc and droplet transfer in MIG welding with external magnetic field[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018. (in Chinese)
- [2] 李叶, 李志勇, 斛晓飞, 等. Ar、He保护的MIG焊电弧模拟对比研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 248-251.
LI Ye, LI Zhiyong, HU Xiaofei, et al. Comparative study of MIG welding arc simulation with Ar and He protection [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 248-251. (in Chinese)
- [3] 朱胜, 王启伟, 殷凤良, 等. 纵向磁场作用下MIG焊电弧数值模拟[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(3): 263-267.
ZHU Sheng, WANG Qiwei, YIN Fengliang, et al. Numerical simulation of MIG welding arc under longitudinal magnetic field[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(3): 263-267. (in Chinese)
- [4] 刘政军, 李宇航, 苏允海. 纵向磁场下GTAW电弧传热与流动数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 120-125.
LIU Zhengjun, LI Yuhang, SU Yunhai. Numerical simulation of heat transfer and flow of GTAW arc under longitudinal magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 120-125. (in Chinese)
- [5] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 外加稳态磁场作用下的焊接电弧数值仿真[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(7): 1068-1075.
ZHOU Xiangman, TIAN Qihua, DU Yixian, et al. Numerical simulation of welding arc under external static magnetic field [J]. Mechanical Science and Technology, 2018, 37(7): 1068-1075. (in Chinese)
- [6] 王启伟, 朱胜, 徐胜良, 等. 纵向磁场对铝合金电弧熔敷成形表面精度的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(4): 11-14.
WANG Qiwei, ZHU Sheng, XU Shengliang, et al. Effect of longitudinal magnetic field on forming accuracy for arc additive manufacturing aluminum alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(4): 11-14. (in Chinese)
- [7] 王璐璐. 铝合金P-GMAW电弧—熔池多因素耦合行为及机制[D]. 上海:上海交通大学,2015.
WANG Lulu. The coupling mechanism and behaviors of arc-molten pool under multifactors during P-GMAW process for aluminum alloy [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [8] WANG L L, WANG H P, LU F G, et al. Numerical analysis of Al vapour effects in gas metal arc welding of Al alloys[J]. Science and technology of welding and joining, 2014, 19 (5): 361-368.
- [9] MURPHY A B, THOMAS D G. Prediction of arc, weld pool and

- weld properties with a desktop computer model of metal-inert-gas welding[J]. *Welding in the World*, 2017, 61(3):623-633.
- [10] LU Fenggui, WANG Huiping, MURPHY A B, et al. Analysis of energy flow in gas metal arc welding processes through self-consistent three-dimensional process simulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 68:215-223.
- [11] OGINO Y, HIRATA Y. Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW[J]. *Welding in the World*, 2015, 59(4):465-473.
- [12] 武传松, 孟祥萌, 陈姬, 等. 熔焊热过程与熔池行为数值模拟的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(2):1-15.
- WU Chuansong, MENG Xiangmeng, CHEN Ji, et al. Progress in numerical simulation of thermal processes and weld pool behaviors in fusion welding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(2):1-15. (in Chinese)
- [13] TANAKA M, YAMAMOTO K, TASHIRO S, et al. Time-dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapour in gas tungsten arc welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(43):434009.
- [14] WILKE C R. A viscosity equation for gas mixtures[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1950, 18(4):517-522.
- [15] MURPHY A B. The effects of metal vapour in arc welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 43:434001.
- [16] 王小伟. 基于磁控技术MIG焊接熔滴行为的模拟研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- WANG Xiaowei. The numerical simulation of metal transfer in MIG based on magnetron-welding technology[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013. (in Chinese)

芬兰 Wartsila 公司成功打印 3D 金属发动机部件

据 2021 年 1 月 8 日 3dprintingindustry.com 报道: 芬兰 Wartsila 公司增材制造中心(WHAM)成功设计并打印了一个 3D 发动机的金属零件。

为验证 3D 打印金属零件(设计用作发动机)的可行性, Wartsila 参加了全球工程公司 Etteplan 组织的研讨活动。Wartsila 公司表示: “我们非常自信地将此零件放入发动机, 无论是对新产品, 还是对已有改进零件, 3D 打印的设计自由度都很高, 可为其增值加价。”

2018 年, 该中心开发了一个“区域生态系统”, 涉及地方大学, 既结合工业技能又结合学术, 将 Wartsila 的发动机设计之家 Vaasa 打造成世界级 3D 打印中心。

WHAM 首个成功案例是 2019 年用 3D 打印了复合升举工具, 用于发动机零件, 比传统固体钢升举工具更轻、更精致、易使用。该工具可升举 240 kg 发动机活塞, 首次展示了无变形的最大 960 kg 升举能力。为做到这点, Wartsila 使用了来自美国金属和碳纤维 3D 打印机制造商 Markforged 的工业系列 X7 3D 打印机。

市场对 3D 打印制造用于重负荷发动机零件持有异议, 但研究和试验证明, 材料不是障碍, 事实上 3D 打印提供了更多机会。原来的升举工具由固体钢机加工而成, 比 3D 打印替代件质量超出 75% 多。

WHAM 最近 3D 打印了用于发动机的关键零件, 已在发动机上以全输出方式试验成功。为开发该件, Wartsila 调配了 3D 打印机, 包括芬兰的 EOS, 瑞典的 AMEXCT, 意大利的 Additive FVG, 在开发制造过程中表现出各种作用。该件的成功试验证明 3D 打印越来越符合在舰船工业的应用需求。增加 3D 打印的数量将降低能量排放、节约开支、缩短交货时间、去除仓储和运输需求。

夏沐清 2021 年 3 月 31 日编译自 3dprintingindustry.com