

引用格式:李海宁,张周周,刘佳,等.缸筒内壁高频感应熔覆铜合金温度场的数值模拟与试验研究[J].热加工工艺,2025,54(4):32-37

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20222407

<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

缸筒内壁高频感应熔覆铜合金温度场的数值模拟与试验研究

李海宁, 张周周, 刘佳, 何龙龙

(西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:采用有限元方法的电磁-热耦合技术,建立了液压缸筒内壁高频感应熔覆铜合金的温度场模型,研究了其温度场的分布和影响因素,并通过实际感应熔覆试验对所提数值模型进行了冶金结合处显微组织观察与硬度等性能参数的验证。结果表明,在感应熔覆铜合金过程中,电流大小、频率和感应加热时间对缸筒内壁高频感应熔覆铜合金温度场的分布有明显影响。在电流为 3500 A、频率为 200 KHz、加热时间 4 s 的工况下对缸筒基体热影响最小,熔覆层和基体的冶金结合良好,无过烧与气孔缺陷。

关键词:缸筒内壁;感应熔覆;温度分布;冶金结合

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)04-0032-06

Numerical Simulation and Experimental Study on Temperature Field of High Frequency Induction Cladding Copper Alloy on Inner Wall of Cylinder

LI Haining, ZHANG Zhouzhou, LIU Jia, HE Longlong

(Machinery Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The temperature field model of high-frequency induction cladding copper alloy on the inner wall of hydraulic cylinder was established by using the electromagnetic thermal coupling technology of finite element method. The distribution and influence factors of the temperature field were studied. The performance parameters such as metallurgical joint, microstructure observation and hardness were verified by the actual induction cladding test. The results show that in the process of induction cladding copper alloy, the current, frequency and induction heating time have obvious effects on the temperature field distribution of high frequency induction cladding copper alloy on the inner wall of cylinder. Under the working conditions of 3500 A current, 200 KHz frequency and 4 s heating time, the thermal impact on the cylinder barrel matrix is minimal, the metallurgical bonding between the cladding layer and the matrix is good, and there are no over burning and porosity defects.

Key words: cylinder inner wall; induction cladding; temperature distribution; metallurgical combination

液压支架是煤矿采场工作面空间支撑和掩护的关键设备,是由多种功能的液压油缸和梁体、杆件结构组成的机构,以高水基的乳化液为介质来承载采场顶板压力和执行各个功能动作。受井下恶劣环境的影响,乳化液介质中经常会有腐蚀性化学物质存在,使缸筒内壁腐蚀,严重影响油缸的寿命进而影响支架的寿命。图 1 为缸筒内壁腐蚀图。目前,镀铜和 MIG 焊是缸筒内壁防腐的主要措施,但电镀工艺在



图 1 缸筒内壁腐蚀图

Fig.1 Corrosion of inner wall of cylinder barrel

生产过程产生的电解液不符合绿色生产与再制造要求^[1];MIG 焊熔工艺效率低,且存在基材表面损伤的质量问题。

高频感应熔覆工艺的特点是可以高效快速地获

收稿日期:2022-09-01

基金项目:国家自然科学基金(52204174)

作者简介:李海宁(1963-),男,甘肃甘谷人,教授,硕士,研究方向:液压支架;E-mail:932112927@qq.com

得熔覆层,具有对缸筒基体热伤害小、加工效率高、冶金结合力强、不会产生污染气体、成本低等优点^[2],是当前液压缸筒内壁防腐的新方向。缸筒内壁高频感应熔覆铜合金工艺是在缸筒基体内壁上预制铜合金材料;并利用感应线圈中的交变电磁场和导磁体的槽口效应^[3]使得铜合金熔覆层产生感应涡流,借助涡流的趋肤效应产生的热量来熔化铜合金材料,使其与基体形成良好的冶金结合进而形成熔覆层,达到强化基体内表面的目的^[4]。

研究表明,能否在高频感应熔覆过程中准确测量及控制熔覆温度是高频感应熔覆工艺过程中仍需迫切解决的难点,也是熔覆能否成功的关键所在^[5-6]。目前,采用红外谱仪是高频感应熔覆表层温度测量的常用方法,但该仪器只能对外表面熔覆层进行相关温度测量,对于缸筒内壁熔覆层温度的测量极为困难,无法得到温度在熔覆层中的具体分布情况,只能依据最终的冶金效果进行评判。

为此,本文提出基于电磁-热耦合的缸筒内壁铜合金高频感应熔覆方法,以期获得低成本、高质量的铜合金熔覆层。首先,根据电磁感应加热原理建立热传导模型,利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟电磁场和温度场的耦合^[7-8]关系,得到熔覆层和缸筒基体中温度场的具体分布情况。其次,通过数值模拟实际工况中高频感应加热时间、电流大小及频率大小对熔覆层和基体温度场的分布影响情况,为后续高频感应熔覆试验提供理论参考。最后,对熔覆试样进行了电子显微镜观察与显微硬度测试验证。

1 感应加热电磁场温度场的有限元数学模型构建

感应加热过程中变化磁场和变化电场是相互关联、相互激发的^[9]。在感应加热过程中,电通密度比传导电流密度小的多可以忽略不计^[10],感应加热电磁场可由简化后的 Maxwell 方程组来表述,且引入了拉普拉斯算子 ∇ ,其微分形式可以表示为

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_e + \vec{J}_s \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

式中: $\vec{H}$ 为磁场强度矢量,A/m; $\vec{E}$ 为电场强度矢量,V/m; $\vec{B}$ 为磁感应强度矢量,T; $\vec{J}$ 为传导电流密度矢

量,A/m²; $\vec{J}_e$ 为源电流密度矢量,A/m²; $\vec{J}_s$ 为感应涡流密度矢量,A/m²。

在感应加热的工件中, $\vec{H}$ 、 $\vec{J}_e$ 、 $\vec{E}$ 和 $\vec{B}$ 满足以下关系式:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

式中: μ 为磁导率,H/m; σ 为材料电导率,S/m。

在合适边界条件下对上述简化后的 Maxwell 电磁场方程组进行求解,进而对感应加热工件内部涡流形成的热源进行计算。为了将求解的难度降低,在求解复杂系统的电磁场的场量时经常会引入辅助量矢量磁位 $\vec{A}$,有助于方程方便求解与理解。具体的涡流方程如下:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{j} \quad (6)$$

将涡流方程按照复数计算,得到应用磁矢量微分方程来求解感应加热的涡流场公式如下:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = -j\omega\sigma\vec{A} + \vec{j} \quad (7)$$

式中: ω 为角频率,rad/s。

在感应加热中,被加热的铜合金层感应涡流产生的单位体积的发热功率 q_v 表达式如下:

$$q_v = \frac{|\vec{J}|^2}{\sigma} \quad (8)$$

式中: q_v 为发热功率,J/h。

温度场的控制方程可由傅里叶定律和能量守恒定律建立,由于材料的各向异性,传热系数 λ 会随着温度变化而变化,其温度控制微分方程可表示为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) - Q = 0 \quad (9)$$

式中: ρ 为密度,kg/m³; λ 为导热系数,W/(m·°C); T 为温度,°C; Q 为感应涡流内热源,W/m³。

由于感应熔覆缸筒内壁铜合金时感应线圈与被加热部分都在缸筒内壁,可以不考虑空气对流所造成的热损失,只考虑热辐射导致的热损失。

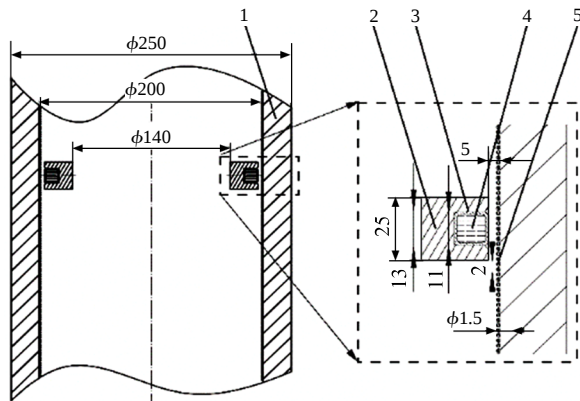
2 系统数值模型的建立与计算

缸筒内壁高频感应熔覆铜合金工艺中,高频感应加热涉及到电磁场和温度场两个物理场的相互作用耦合。由于这两个场之间的相互作用较强,所以可

以利用 COMSOL Multiphysics 软件进行直接耦合求解。这种方法能够一次性计算耦合场的单元矩阵、计算效率较高、收敛精度高,可通过一次耦合得出结果,最终得到电磁场和温度场耦合的分布情况。缸筒基体和熔覆层的金属性能均随感应加热的时间变化而变化,缸筒内壁熔覆铜合金数值模拟计算所要用的材料物理参数有:相对磁导率、比热容、导热系数、密度、电阻率等,其材料参数可参考《机械制造工艺材料技术手册》^[11]。

2.1 感应熔覆系统的组成

缸筒内壁感应熔覆铜合金系统主要由内壁紧贴铜合金的液压缸筒、感应熔覆线圈、导磁体三部分组成。缸筒工件的外径为 250 mm、内径为 200 mm、长度为所需长度。感应熔覆线圈采用 T3 铜正方形管;边长 13 mm、壁厚 1.0 mm、外径为 190 mm、内径为 164 mm,感应线圈里面通有冷却水初始温度为 20℃,流量为 2.0 L/min。熔覆层采用铜合金丝;铜合金直径为 1.5 mm、紧贴在缸筒内壁。感应熔覆过程中温度设置为 1000~1100℃。导磁体采用硅钢质材料;边长 25 mm,中间的槽口将感应线圈卡在导磁体里面。图 2 为缸筒内壁熔覆铜合金示意图。其中熔覆层预置铜合金材料及缸筒基体 (27SiMn 钢) 材料的化学成分见表 1。



1- 缸筒基体;2- 导磁体;3- 感应线圈;4- 冷却水;5- 铜合金

图 2 缸筒内壁熔覆铜合金示意图(mm)

Fig.2 Schematic diagram of cladding copper alloy on the inner wall of cylinder barrel (mm)

2.2 模型的建立与网格的划分

根据缸筒内壁感应熔覆铜合金系统的组成,利用 COMSOL Multiphysics 软件对其进行模型的建立。由于该系统具有轴对称性,即计算得出的温度场、电磁场和感应电流的分布均是轴对称的,为了减少网格单元数量和提高计算精度,在计算过程中只

表 1 铜合金及缸筒基体化学成分含量(质量分数,%)
Tab.1 Copper base alloy chemical composition content (wt%)

	元素	含量(%)		元素	含量(%)
铜合金	Sn	6.00~7.00	缸筒基体	C	0.24~0.32
	Pb	≤0.02		Si	1.10~1.40
	P	0.10~0.25		Mn	1.10~1.40
	Al	≤0.002		P	≤0.035
	Fe	0.05		S	≤0.035
	Si	≤0.002		Cu	≤0.300
	Sb	≤0.002		Cr	≤0.300
	Bi	≤0.002		Mo	≤0.150
	Cu	余量		Fe	余量

取系统的一半进行计算。考虑到存在热辐射和漏磁的现象,还需要对整个系统所处的空气域环境进行建模。为了同时满足计算的精确度和减少网格单元数量的要求,对熔覆层的铜合金层设置为超细化网格,其它区域设置物理场控制网格。缸筒内壁感应熔覆铜合金计算模型及网格化如图 3 所示。

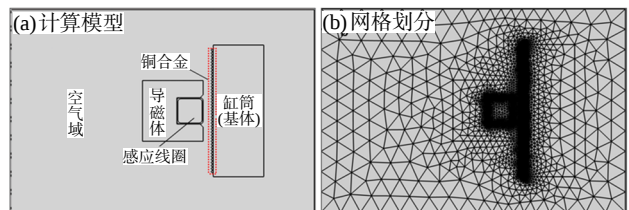


图 3 感应熔覆计算模型及其计算模型计算模型网格划分
Fig.3 Induction cladding calculation model and its mesh division

2.3 模型的计算与求解

研究步骤选择频域-瞬态研究,计算时间周期为 8 s,分布计算求解时间步为 0.1 s,由于前处理要对缸筒和铜合金层进行 200℃的保温,所以计算中取缸筒及其铜合金层初始温度为 200℃。在计算过程中,通过设置感应线圈热源不同电流大小与电流频率等参数,将不同工况下的缸筒和铜合金层的温度场分布体现出来。本研究所设置的 4 种加热工况具体参数见表 2,感应加热时间均为 4 s。

表 2 感应加热工况参数

Tab.2 Working condition parameters of induction heating

工况序号	频率 /KHz	电流大小 /A
A	2	3500
B	20	3500
C	200	3500
D	200	1500

2.4 数值模拟的结果分析

2.4.1 电流频率对感应加热系统温度场的影响

在 A、B、C 工况参数下均加热 4 s。铜合金层和缸筒基体的温度分布如图 4 所示。铜合金层内表面和缸筒外表面的温度随时间变化曲线如图 5 所示。

比较这 3 种情况,发现在电流大小一样的条件下,频率越大,功率密度也越大。铜合金熔覆层升温

越快,在较短时间内缸筒外表面温度来不及升高,受热的表层温度使得熔覆层铜合金熔化。与缸筒内表面形成冶金结合^[12],缸筒基体没有被损伤,这也是高频感应熔覆铜合金的特点之一。发现在频率较低时,功率密度小。熔覆铜合金层升温慢,由于铜合金导热性能良好,将热量传导在缸筒外表面。随着加热时间延续,既让熔覆铜合金层熔化过热,又让缸筒基体损

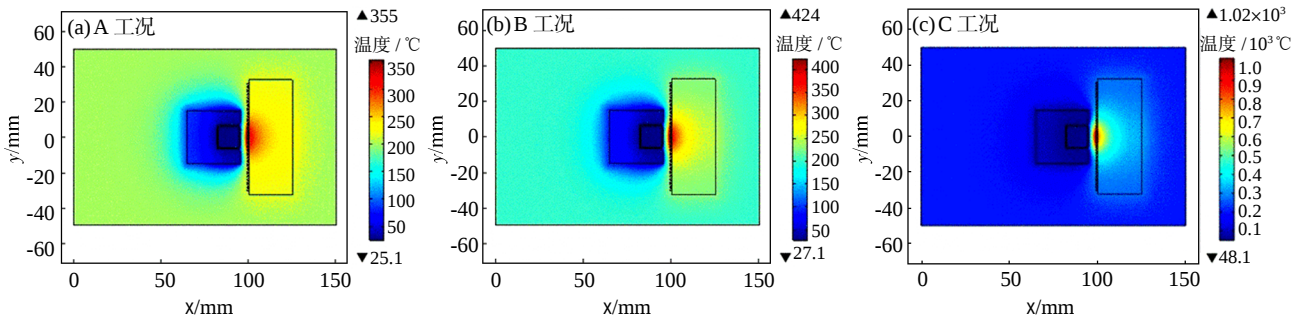


图 4 A、B、C 工况下感应加热 4 s 后温度场的分布云图

Fig.4 Cloud map of temperature field distribution after induction heating for 4 s under three conditions of A, B and C

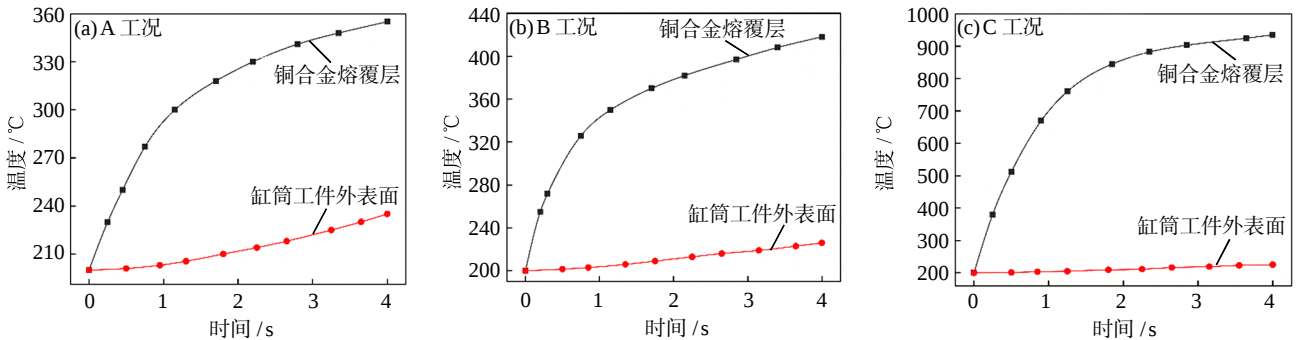


图 5 A、B、C 工况下铜合金熔覆层和缸筒工件外表面的温度随时间变化曲线

Fig.5 Time-dependent curves of temperature of copper alloy cladding surface and outer surface of cylindrical workpiece under three working conditions of A, B and C

伤。所以对缸筒内表面熔覆铜合金频率选择高频。

2.4.2 电流大小对感应加热系统的影响

频率大小为 200 kHz 时,电流由 3500 A 降为 1500 A 时,感应熔覆系统的温度分布如图 6 所示。与图 4 相比,在电流频率和加热时间相同,电流大小减小时,熔覆铜合金层温度升高缓慢,由于铜合金的传热作用,缸筒基体受热层也变厚。随着加热时间的延续,缸筒基体受到热损伤。

3 试验验证

3.1 熔覆层与结合界面的微观形貌观察

在上文数值模拟的参数指导下进行了实际试验操作,图 7 为试验现场图。

在感应加热后对熔覆试样进行了微观形貌观察,发现在 C 工况数值模拟参数下感应加热对基体的热

影响最小,且熔覆层和缸筒基体的冶金结合良好。图 8 为感应熔覆试验的 SEM 微观形貌图。图 8(a)为数值模拟最优参数(C 工况)下的微观形貌,左边为缸筒基体,右边为铜合金熔覆层,基体层为铁素体+回火索氏体^[13],结合区冶金结合良好,熔覆层及其界面未发现异常。图 8(b)~(d)为其他参数下的熔覆层与基体结合的微观组织形貌。图 8(b)为基体区域有过烧的趋势,熔覆层及其界面结合未发现异常。图 8(c)基体区域有明显的过烧现象,熔覆层有气孔缺陷产生,熔覆层与结合界面不够紧密。图 8(d)熔覆层区域有气孔缺陷出现。

3.2 结合界面显微硬度分析

硬度试验可以将异种金属冶金结合时界面两侧金属的软硬程度反映出来,同时根据两侧硬度差异来反映界面组织与成分的变化。对模拟最优参数 C

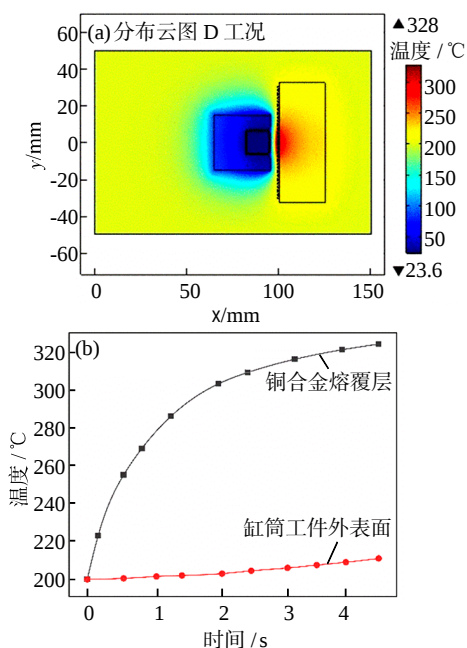


图 6 D 工况下温度分布云图及其铜合金熔覆层表面和缸筒工件外表面的温度随时间变化曲线

Fig.6 Cloud diagram of temperature distribution under working condition D and its temperature change curve of copper alloy cladding layer surface and outer surface of cylinder workpiece with time



图 7 试验现场
Fig.7 Test site

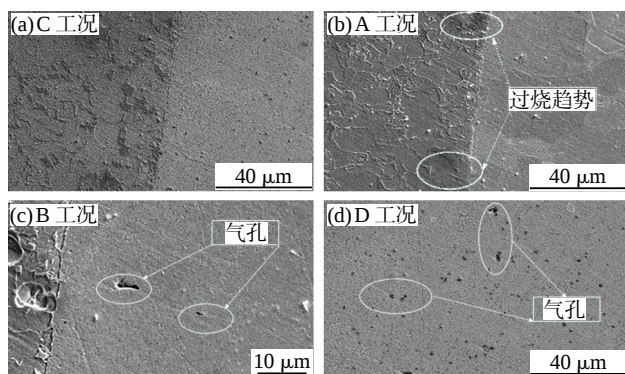


图 8 铜镀层及其熔覆界面形貌

Fig.8 Morphology of copper coating and its cladding interface

工况下的熔覆试样 1 与其它任意工况参数下的试样 2 进行垂直于界面的显微硬度测试,以界面结合处为零点,正值测试点表示向缸筒基体侧延伸,负值表示测试点向铜合金熔覆层侧延伸。图 9 为显微硬度测试图,所得结果见图 10。

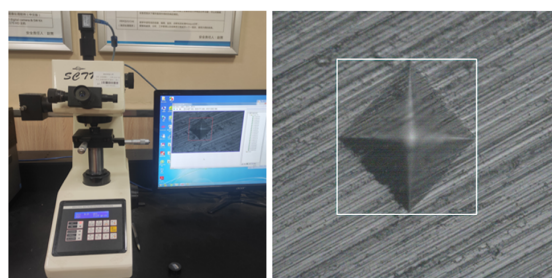


图 9 显微硬度测试
Fig.9 Microhardness test

从图 10 可看出,试样 1 界面的右侧为缸筒基体,基体的热影响区硬度达到 750 HV 左右,热影响区约为 0.5 mm,再往基体侧延伸硬度降为 27SiMn 钢的硬度 220 HV 左右。界面左侧为铜合金熔覆层,从界面向熔覆层侧延伸,硬度值逐步下降到距界面 0.2 mm 处,保持在 355 HV 左右稳定,说明 Fe 元素在界面到熔覆层有一定程度的扩散,这也是界面附近熔覆层硬度高与远离界面熔覆层硬度的原因。试样 2 与试样 1 相比基体热影响区约为 0.9 mm,且由于存在过烧或者气孔缺陷导致热影响区硬度测试波动较大。

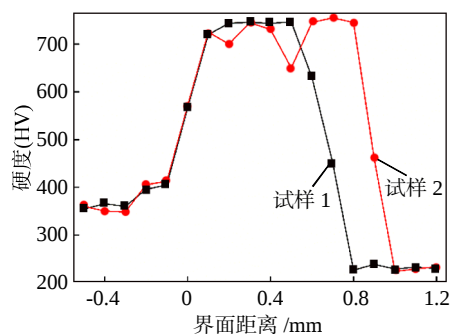


图 10 熔覆层界面显微硬度
Fig.10 Microhardness of cladding layer interface

4 结论

通过数值模拟得出铜合金熔覆层和缸筒基体温度的分布云图和随时间的变化曲线,可得出电流、频率和加热时间是影响缸筒内表面熔覆铜合金层质量的主要因素。通过试验验证发现在 C 工况:电流为 3500 A、感应频率为 200 kHz、加热时间为 4 s 时,铜合金熔覆层和缸筒基体冶金结合良好,且结合处无过烧气孔缺陷,增强了缸筒基体的性能。

(1) 在一定电流载荷下,频率越高,加热表面功率密度越大,熔覆铜合金内表面升温也越快,且温度分布贴近缸筒内表面,因此感应熔覆工艺往往采用高频感应加热。

(2) 在一定频率情况下,虽可通过延长加热时间来达到熔化铜合金层的温度,但延长加热时间会导致缸筒基体的损伤和熔覆铜合金层的过热或者产生气孔。所以在相同的频率作用下,电流越大,感应加热越迅速。

(3) 电流大小变大或者频率变大都会让感应加热变快,若时间控制不好,容易导致铜合金熔覆层过热,有缺陷产生。但过低的电流大小和频率会延长加热时间,由于传热作用基体会受到损伤,且生产效率降低。

(4) 在高频交变电流情况下,由于磁屏蔽现象,高温层趋于铜合金层,可以对缸筒基体起到保护作用,这是高频感应熔覆铜合金与其他现在已有的熔覆技术相比最显著、最独特的优势所在。

参考文献:

- [1] 张媛媛. 熔铜技术在矿用液压支架油缸中的应用研究[J]. 矿业装备,2021(2):226-227.
- [2] 张伟,于鹤龙,汪勇,等. 一种内孔零件内壁表面金属防护涂层的制备方法;201510197174.6[P]. 2015-07-29.
- [3] 曾慧敏. 链轮感应加热过程中导磁体作用机制研究 [D]. 北京:燕山大学,2021:28-51.
- [4] 栗靖. 液压支架油缸内壁熔铜新工艺分析[J]. 中国设备工程,2019(19):153-154.
- [5] Belyaev M, Galunin S, Ishin V, et al. Numerical simulation and optimization of heater for scanning induction hardening of shaft [C]//2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference,2016.
- [6] Jing Y, Bo S. Effects of heating time on the microstructure and properties of an induction cladding coating [J]. Results in Physics,2018,11:212-218.
- [7] 朱叶,俞树文,梁融,等. 基于磁-热耦合的感应加热过程数值模拟研究[J]. 热加工工艺,2020,49(7):89-92.
- [8] 王金莲. 基于 COMSOL 和正交试验的注塑模具电磁感应加热工艺参数优化[J]. 塑料工业,2021,49(12):82-85.
- [9] 秦义. 高频感应熔涂温度场及应力场的数值模拟[D]. 呼和浩特:内蒙古科技大学,2012:30-46.
- [10] 杨建鸣. 圆柱体工件高频感应熔涂温度场数值模拟[J]. 铸造技术,2012,33(4):419-422.
- [11] 谢明师. 机械制造工艺材料技术手册. 中册[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [12] 刘超. 基于 ANSYS 的铜钢高频感应熔敷数值模拟[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [13] 李顺雨. 锡青铜-钢双金属复合板组织控制及其性能研究 [D]. 大连:大连理工大学,2019. [4]
- [6] Schopphoven T, Gasser A, Wissenbach K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying [J]. Journal of Laser Applications,2016,28:022501.
- [7] Chen L, Zhang X, Wu Y, et al. Effect of surface morphology and microstructure on the hot corrosion behavior of TiC/IN625 coatings prepared by extreme high-speed laser cladding[J]. Corrosion Science,2022,201:110271.
- [8] 李俐群,申发明,周远东,等. 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比[J]. 中国激光,2019,46(10):174-183.
- [9] Makarenko V D, Shatilov S P, Gumerskii K K, et al. Effect of oxygen and hydrogen sulfide on carbon dioxide corrosion of welded structures of oil and gas installations [J]. Chemical and Petroleum Engineering,2000,36:125-130.
- [10] 张玉成,鞠新华,庞晓露,等. O_2 浓度对钢在超临界 CO_2 中腐蚀速率的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报,2015,35(3):220-226.
- [11] 王蕊,欧阳昌耀,李启航,等. 高速激光熔覆 Ni 基合金涂层对球墨铸铁表面改性的研究 [J]. 热加工工艺,2023,52(10):73-77.
- [12] Sasaki K, Burstein G T. The generation of surface roughness during slurry erosion-corrosion and its effect on the pitting potential[J]. Corrosion Science,1996,38:2111-2120.
- [13] Esmailzadeh S, Aliofkhazraei M, Sarlak H. Interpretation of cyclic potentiodynamic polarization test results for study of corrosion behavior of metals:a review[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces,2018,54:976-989.
- [14] Gu D, Zhang H, Dai D, et al. Anisotropic corrosion behavior of Sc and Zr modified Al-Mg alloy produced by selective laser melting[J]. Corrosion Science,2020,170:108657.
- [15] Zhao Y, Liu W, Fan Y, et al. Effect of Cr content on the passivation behavior of Cr alloy steel in a CO_2 aqueous environment containing silty sand [J]. Corrosion Science,2020,168:108591. [4]

(上接第 31 页)