

注塑机螺杆熔覆层残余应力消减工艺构建

曹军^{1,2} 童晨雷² 万里³ 陈超⁴

1 浙江工业大学 机械工程学院

2 海天塑机集团有限公司

3 海天激光机械制造有限公司

4 宁波海天塑化科技有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21036

[摘要] 注塑机螺杆激光熔覆修复层内常留存较高数值的残余拉应力,这一应力场分布直接关联螺杆在交变载荷作用下的尺寸稳定性与服役寿命。熔覆过程急热急冷的热循环特征使熔覆层与基体交界处产生不容忽视的组织应力和热应力,应力水平一旦超出基体材料的屈服极限便面临开裂风险。从热-力耦合视角审视应力生成机制后发现,单纯依赖某一环节的调控难以实现理想的消减效果,唯有将熔覆前基体热状态调控、熔覆过程热输入匹配与熔覆后应力释放手段加以系统整合,方可在保证冶金质量的前提下将残余应力控制在安全阈值内。基于螺杆圆柱曲面特征与服役工况提出的全链条消减路径,对提高再制造螺杆的可靠性具有工程参考价值。

[关键词] 注塑机螺杆; 激光熔覆; 残余应力; 消减工艺

中图分类号: TS943.66 **文献标识码:** A

Construction of Residual Stress Reduction Process for Injection Molding Machine Screw Coating Layer

Jun Cao^{1,2} Chenlei Tong² Li Wan³ Chao Chen⁴

1 College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology

2 Haitian Plastics Machinery Group Co., Ltd

3 Haitian Laser Machinery Manufacturing Co., Ltd

4 Ningbo Haitian Plastics Technology Co., Ltd

[Abstract] High residual tensile stresses are often retained in the laser cladding repair layer of injection molding machine screws, and this stress field distribution is directly related to the dimensional stability and service life of the screw under alternating loads. The thermal cycling characteristics of rapid heating and rapid cooling during the cladding process result in significant structural and thermal stresses at the interface between the cladding layer and the substrate. Once the stress level exceeds the yield limit of the substrate material, there is a risk of cracking. After examining the stress generation mechanism from the perspective of thermal mechanical coupling, it was found that relying solely on the regulation of a certain link is difficult to achieve ideal reduction effects. Only by systematically integrating the control of the thermal state of the substrate before melting, the matching of thermal input during melting, and the means of stress release after melting, can residual stresses be controlled within a safe threshold while ensuring metallurgical quality. The full chain reduction path proposed based on the characteristics of screw cylindrical surfaces and service conditions has engineering reference value for improving the reliability of remanufactured screws.

[Key words] injection molding machine screw, laser cladding, residual stress, reduction process

1 引言

注塑机螺杆长期在高温高压及强磨损的耦合条件下运行,螺纹棱和料筒内壁的磨损往往导致整机报废,激光熔覆技术因

稀释率可控、结合强度较高而成为螺杆再制造的主流修复手段。熔覆过程固有的急热急冷特性决定了残余应力不可避免,应力控制不当将诱发熔覆层微裂纹甚至剥落失效,这一问题对大尺

寸螺杆尤为突出。现有研究多聚焦于平面基材的应力演化规律,对圆柱曲面螺杆的应力分布特征关注不够充分,工艺措施也多为单一方法且各环节之间缺乏系统性衔接。据此,从应力生成的源头出发,立足螺杆几何特征与服役需求,构建一条涵盖熔覆前预处理、熔覆过程调控与熔覆后复合处理的全流程消减方案,具有明确的实际应用指向^[1]。

2 熔覆层残余应力的形成机理及主要影响因素

2.1 熔覆层残余应力的形成机理

熔覆层残余应力的生成根植于激光熔覆过程中非稳态热循环的力学响应。激光束扫描时,螺杆表层材料在极短时间内被加热至熔融状态,随后依靠基体自身的导热能力快速冷却,熔覆层与基体之间形成陡峭的温度梯度。温度梯度诱发熔覆层高温区域的热膨胀行为受到周围低温基体的刚性约束,冷却阶段熔覆层的收缩又因基体的牵制而无法充分完成,热循环结束后便在界面附近留存了相当数值的残余应力。熔覆层凝固后期可能发生的马氏体相变所伴随的体积效应,进一步叠加了组织应力分量,最终残余应力场以热应力为主导、组织应力为补充的复合形态呈现出来。从时序维度进一步解析,熔覆层残余应力的最终留存经历了三个阶段:熔池形成阶段,高温液态金属处于无应力状态,应力载体尚未建立;冷却凝固阶段,固相骨架逐渐形成,熔覆层开始承受拉应力,此时的应力水平随温度下降速率呈非线性增长;降至室温阶段,熔覆层与基体达到热平衡,但前两阶段累积的弹性应变被冻结于组织内部,成为残余应力的最终载体。三个阶段中,凝固阶段对最终应力的贡献最大,因该阶段熔覆层的屈服强度随温度降低迅速升高,塑性变形能力同步衰减,热循环产生的应变无法通过塑性流动充分释放,只能以弹性应变的形式留存于晶格畸变之中。

2.2 熔覆层残余应力的主要影响因素

激光功率、扫描速度与送粉速率这三类工艺参数共同主导熔覆过程的温度场分布与冷却速率,进而决定残余应力的最终水平。功率升高时热输入量增加,高温持续时间延长,熔覆层与基体之间的温度梯度随之加大,冷却过程中的收缩约束也因此更为强烈;功率偏低则熔覆材料难以获得充分的熔化能量,未熔颗粒破坏熔池流动状态,凝固组织的不均匀性催生局部应力集中点。扫描速度的提升缩短激光与材料的交互时间,熔池存在周期变短,冷却速率加快,热应力生成倾向明显增强;扫描速度过慢则热量在基体内过度积累,热影响区范围扩大,基体的热变形倾向相应增加。送粉速率的变化直接影响熔覆层厚度,较厚的熔覆层意味着更大的收缩体积和更高的应力累积倾向。三者的匹配并非各自独立,某一参数的调整需要通过另外两个参数的协同变动来抵消其对温度场或熔池行为的单向影响。

3 现有残余应力消减方法及适用性分析

3.1 常用残余应力消减方法介绍

消减熔覆层残余应力的技术路径大致归为热处理法、机械作用法与表面重熔法三类,各自对应不同的应力释放机制与操作条件。

(1) 退火处理是将熔覆后的螺杆置于加热炉内升温至去应力温度区间并保温适当时间,炉内均匀的热环境促使原子获得足够动能发生缓慢迁移和重新排列,应力集中区域的弹性应变由此得到逐步释放,炉冷过程中的缓慢降温则避免新温差应力的引入。

(2) 超声冲击处理依赖冲击针高频撞击熔覆层外表面,每秒钟数万次的机械脉冲在表层诱发剧烈的局部微塑性变形,原本集中的残余拉应力在被撞击区域得以缓解,部分测点甚至呈现压应力特征,这种方法不依赖加热设备且操作灵活。

(3) 激光重熔是对已凝固的熔覆层表面再次施以较低能量密度的激光扫描,使浅层材料重新熔化后依靠基体导热自然冷却,薄层金属经历二次热循环后原先集中的应力分布被重新分配,应力峰值有所降低^[2]。

3.2 各方法的适用范围与优缺点比较

退火处理、超声冲击与激光重熔三种方法在适用场景和局限性上存在明显差异,选择何种工艺取决于螺杆的失效形式与修复要求。三者的核心区别见表1。

表1 三种残余应力消减方法的适用范围与优缺点对比

方法	适用范围	优点	局限
退火处理	各类螺杆熔覆后的整体应力消除	应力释放彻底,操作简单,效果稳定	能耗较高,处理周期长,可能影响基体原有硬度
超声冲击	表层应力调控,现场修复作业	设备轻便,不加热,可局部处理	作用深度有限,对深层应力影响微弱
激光重熔	熔覆层表面质量与应力协同改善	热影响区域小,可精准定位处理	控制不当易引入新的应力,工艺窗口较窄

退火处理凭借其应力释放的彻底性在大尺寸螺杆的整体消减中占据主要地位,但其加热周期和能耗问题不容忽视。超声冲击在设备轻便性和作业灵活性上具有突出优势,尤其适合已装机螺杆的在线应力调控,但冲击针的作用深度有限,对熔覆层底部的应力状态改善作用较弱。激光重熔能够精准作用于指定区域,实现应力调控与表面质量改善的协同,但参数控制稍有不慎便会在熔覆层表面引入新的应力集中点。

4 面向注塑机螺杆熔覆层的残余应力消减工艺构建

4.1 熔覆前基体预热与表面预处理

螺杆基体升温后,热导率随温度升高而下降,熔池热量向深处传导速率降低,冷却曲线形态改变;热膨胀系数的升高使基体加热阶段膨胀量趋近熔覆层膨胀需求,收缩过程中二者相互牵制减弱。轴类回转体零件激光熔覆模拟结果表明,预热475℃时径向最大残余应力下降39.8%,轴向下降42.1%^[3]。316L不锈钢的模拟研究亦证实,预热500℃可使残余应力减小约20%^[4]。预热温度尚需兼顾基体相变温度窗口——温度过高可使基体局部跨越临界点,冷却过程中诱发非预期组织转变,其体积效应将额外叠加组织应力。综合上述结论并考虑螺杆常用基体材料38CrMoAlA的相变特征,预热温度推荐400~500℃,升温速率5~10℃/min,保温不少于30 min。表面预处理方面,螺杆表面残留油脂在激光辐照下分解,气态产物若未及时逸出将被凝固熔覆层包裹形成气

孔缺陷,该缺陷在外加载荷下易成为应力集中优先位置。打磨后表面粗糙度需控制在合理区间,过光滑则熔覆材料与基体机械嵌合作用减弱,过粗糙则凹槽底部在熔覆时形成局部应力集中。

4.2 熔覆过程中工艺参数的匹配控制

激光功率、扫描速度与送粉速率三者的匹配关系决定热输入密度与熔池行为,主导残余应力生成强度。功率偏高而扫描速度偏低时,热输入过量使熔池高温维持时间延长、温度梯度增大,收缩约束加剧;功率偏低则熔覆材料熔化能量不足,未熔颗粒破坏熔池流动状态,凝固组织不均匀性催生局部应力集中。扫描速度过快时热量未及向深度方向传导,熔池周围形成更为陡峭的温度梯度;速度过慢则热影响区扩展,基体热变形倾向增加。针对注塑机螺杆激光熔覆修复的专利方案给出了可参考工艺参数:底层熔覆功率1700~1800 W,顶部熔覆1600~1700 W,扫描速度6 mm/s,送粉量12 g/min和14 g/min,光斑直径4 mm,搭接率40%,保护气流量12 L/min,单层厚度800~1000 μm ,激光束与螺杆表面呈85°~95°夹角。综合上述方案,推荐激光熔覆工艺参数为:激光功率1600~1800 W(底层取上限、顶部取下限),扫描速度6 mm/s,送粉量12~14 g/min,搭接率40%,单层厚度800~1000 μm 。三者之中扫描速度对温度梯度的控制权重最高,参数匹配的实质在于寻求热输入、冷却速率与沉积量之间的动态平衡。

4.3 熔覆后退火与超声冲击复合处理

退火处理依靠热场促使全厚度范围应力松弛;超声冲击通过高频撞击在表层引入塑性变形,调控近表应力状态。二者复合着眼应力消减的纵深梯度——退火先行降低整体应力水平,超声冲击随后在表层施加压应力层,以抵消服役过程中的拉应力峰值。

退火温度选择需兼顾应力消减与基体组织稳定性。邓德伟等研究显示Q235钢板上熔覆316L不锈钢经800 $^{\circ}\text{C}$ 退火2 h,残余应力降幅达83.8%^[5]。但该温度可能影响38CrMoAlA基体调质硬度,综合27SiMn钢上铁基熔覆层的研究结果(350~550 $^{\circ}\text{C}$ 退火2 h后残余应力均明显降低),推荐螺杆熔覆后退火工艺为550~600 $^{\circ}\text{C}$,保温2 h,炉冷至室温。

超声冲击方面,镍基高温合金激光熔覆层模拟研究表明,冲击可使表层残余拉应力转化为压应力,最大压应力值达-263.9 MPa。针对螺杆螺纹棱等曲率较大区域,需调整冲击入射角度以保证有效接触^[6]。推荐参数:频率20~40 kHz,电流1.5~2.5 A,针径3~5 mm,轴向进给300~500 mm/min。螺杆须炉冷至室温后方可冲击,冲击前轻度打磨去除氧化皮。

4.4 全流程消减工艺方案的集成

全流程消减工艺方案将熔覆前预热处理、熔覆过程参数匹配与熔覆后退火-超声冲击复合处理纳入统一框架,三条控制路径在时序上前后衔接、在应力调控维度上相互补充。预热处理降低熔覆阶段热冲击幅值,参数匹配从源头压缩应力生成强度,复合后处理对已生成残余应力实施梯度消减——退火作用于全

厚度范围,超声冲击专注于表层应力状态重构。方案集成的难点在于各环节参数之间的匹配约束:预热温度与退火温度的差值需控制在合理区间,本研究推荐预热400~500 $^{\circ}\text{C}$ 、退火550~600 $^{\circ}\text{C}$,二者差值约100~150 $^{\circ}\text{C}$,该区间既可保证预热环节对热梯度的有效调节,又可避免两次加热累积效应改变基体表层组织状态。超声冲击参数需根据退火后熔覆层硬度调整,硬度偏高时冲击入射能量需适当提升以保证塑性变形有效引入。螺杆直径变化带来的散热条件差异亦需纳入考量,小直径螺杆散热路径短、冷却速率快,预热温度和退火保温时间可适当下调。全流程时序控制要点如下:预热(400~500 $^{\circ}\text{C}$, ≥ 30 min)→激光熔覆(参数按4.2节推荐值)→炉冷至室温→退火(550~600 $^{\circ}\text{C}$, 2 h,炉冷)→轻度打磨去除氧化皮→超声冲击(20~40 kHz, 1.5~2.5 A,轴向进给300~500 mm/min)→检验。各环节调控效果在应力消减维度形成互补,最终实现熔覆层残余应力从整体到表层、从深度方向到近表区域的全方位梯度消减。

5 结语

熔覆层残余应力的本质在于非均匀温度场与材料约束之间的力学响应,控制策略必须立足于对热-力历史的有效干预。本文从螺杆的圆柱曲面特征与服役条件出发,构建了涵盖预热调控、过程参数匹配与后处理复合的全流程消减工艺方案,明确了各环节的应力调控机制与相互衔接关系。该方案的核心在于三条控制路径的时序配合与功能互补:预热从基体热响应层面改变温度梯度形成条件,参数匹配从热输入源头压缩应力生成强度,退火-超声冲击复合处理从纵深方向实现应力的梯度消减。后续研究可在工艺参数与应力水平的定量映射关系、不同直径系列螺杆的工艺差异化策略等方面作进一步探索。

[参考文献]

- [1]于希辰,王志文,刘海青,等.后热处理对激光熔覆涂层应用的研究进展[J].金属热处理,2019,44(3):114-119.
- [2]刘晓东,姜洪雷,谢蒙.Q345钢激光熔覆的残余应力分析[J].金属热处理,2020,45(3):5.
- [3]张大兵,梁鹏,童昶,等.活塞杆表面激光熔覆硬度和残余应力的数值模拟[J].应用激光,2023,43(8):39-47.
- [4]李燕乐,潘忠涛,戚小霞,等.热处理工艺对激光熔覆316L温度场与应力场的影响规律[J].中国机械工程,2024,35(4):666-677.
- [5]邓德伟,马云波,马云山,等.重熔及退火对316L不锈钢激光熔覆层残余应力的影响[J].金属热处理,2020,45(8):113-118.
- [6]张颖,戚永爱,梁绘昕,等.超声冲击激光熔覆层的应力场数值模拟[J].应用激光,2015,35(3):288-294.

作者简介:

曹军(1979—)男,汉族,浙江宁波人,硕士,高级工程师,主要研究方向:激光复合加工技术,智能制造。