

文章编号:1673-5005(2012)04-0149-06

42CrMo 钢泵筒内壁激光相变硬化组织模拟

韩彬, 张哲, 王勇, 王楠楠

(中国石油大学 机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 采用有限元软件 SYSWELD 建立三维模型, 考虑相变潜热及材料热物理性能随温度的变化, 将温度场和相变模型进行耦合, 对泵筒内壁激光相变硬化组织转变过程及硬度分布进行数值模拟。结果表明: 激光相变硬化是一个快速加热和冷却的过程; 在加热过程中激光照射区域组织转变为奥氏体, 而在冷却过程中奥氏体发生马氏体转变; 激光相变硬化处理后, 完全淬火区主要以马氏体为主, 其最大体积分数可达 90% 左右。相变区硬度提高约 2 倍, 最大可达 540.6 HV_{0.2}; 相变区的组织及硬度模拟结果与试验结果吻合较好。

关键词: 泵筒内壁; 激光相变硬化; 数值模拟; 组织转变

中图分类号: TG 162.79

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.04.028

Numerical simulation of microstructure on laser transformation hardening on inner wall of 42CrMo pump barrel

HAN Bin, ZHANG Zhe, WANG Yong, WANG Nan-nan

(College of Electromechanical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: A 3-D finite element model was established for the numerical simulation of laser transformation hardening on the inner wall of pump barrel through a finite element code-SYSWELD. The change of thermal mechanical parameters with temperature was considered during the simulation. The metallurgy transformation was predicted by coupling phase evolution model with the results of temperature field. The hardness distribution was predicted using the simulation results of metallurgy transformation. The results show that laser transformation hardening is a fast heating and cooling process. During heating, the microstructure of laser heated zone is transformed to austenite which changes into martensite during cooling. After treatment, martensite could be achieved as a main phase in the hardened zone with a volume fraction of about 90%. The hardness of hardened zone is three times as that of base metal and the maximum value could reach 540.6 HV_{0.2}. The predicted microstructure and hardness of the hardened zone agree well with the experimental results.

Key words: inner wall of pump barrel; laser transformation hardening; numerical simulation; microstructure evolution

在采油过程中, 抽油泵泵筒长期受到油气水的腐蚀作用, 使其服役期限大大降低, 严重制约了工业生产。传统的泵筒内壁改性方法主要包括渗氮、渗硼、碳氮共渗等化学热处理工艺以及镀铬等。化学热处理需在较高温度下进行, 高温会使抽油泵泵筒产生变形并影响泵筒的组织结构, 另外处理的成本也较高^[1-2]。表面涂镀层(镀铬)与基体的结合强度较低, 如果在服役过程中脱落会加速泵筒的腐蚀。

激光相变硬化作为成熟的激光表面改性技术, 已经被应用于多个工业领域。激光相变硬化具有生产周期短, 无须淬火介质, 变形小, 可控性强和加工效率高等优点, 易实现表面局部及特殊部位的淬火。王杨等^[1]研制了泵筒内壁激光加工机器人, 并利用该机器人对泵筒内壁进行了激光相变硬化处理, 使得抽油泵泵筒硬度大幅提升。马洪伟等^[3]利用导光系统, 对细长油管进行了内壁激光相变硬化处理。

收稿日期: 2012-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179202); 山东省自然科学基金项目(ZR2009FM030); 中国石油大学研究生创新基金项目(CXZD11-11)

作者简介: 韩彬(1973-), 男(汉族), 四川三台人, 副教授, 博士, 主要从事材料失效与表面改性、新材料连接技术的研究。

然而,激光相变硬化是一个快速加热和冷却的过程,通过试验获得处理过程中的热循环、组织转变及应力分布情况较为困难。通过有限元模拟技术和一定的试验验证,可以有效地预测激光相变硬化过程^[4]。由于在激光处理过程中,回转体内壁和外壁的散热条件和约束条件存在差异,必定会造成处理后的温度场和残余应力不同。目前,对于平板或回转体外表面激光相变硬化的试验和模拟研究开展较为广泛,然而对于泵筒等细长管件内表面激光相变硬化的试验研究较少,数值模拟的研究还未见报道。笔者采用 SYSWELD 有限元软件建立泵筒三维数值模型,考虑材料的物理性能随温度变化和相变潜热,对泵筒内壁激光相变硬化过程进行模拟,获得温度场、组织及硬度分布,并对该过程进行相关试验验证。

1 数值计算模型

激光束照射到工件表面,会在试样表面和内部产生随时间变化的温度场。依据傅里叶定律和能量守恒定律推导出导热微分方程,考虑材料内部的相变潜热,对三维导热微分方程进行求解,即可获得温度场的分布。用公式表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{\Phi}{\rho c} \quad (1)$$

式中, Φ 为相变潜热, J/kg ; ρ 、 c 和 λ 分别为材料的密度、比热容和热传导系数, kg/m^3 、 $\text{J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ 、 $\text{W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$,它们是温度的函数; r 、 φ 、 z 为柱坐标变量。

1.1 几何模型和网格划分

利用 Visual-Mesh 建立模型,如图 1 所示。考虑

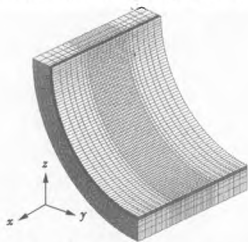


图 1 几何模型及网格划分

Fig. 1 Geometric model and mesh division

到模型的对称性,只对 1/4 的泵筒模型进行研究。采用八节点六面体单元将模型离散化。在进行有限元网格划分时,既要考虑计算精度,又要顾及运算速度以减少工作量。因此,对相变区网格划分细密,热影响区和基体网格划分较为稀疏,网格划分过程中

共建立了 26 934 个单元和 23 717 个节点。

1.2 边界条件

试样与周围空气接触表面,其边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha(\theta - \theta_0).$$

其中

$$\alpha = \begin{cases} 0.0068\theta, & \theta_0 < \theta < 500^\circ\text{C}; \\ 0.231\theta - 82.1, & \theta \geq 500^\circ\text{C}. \end{cases}$$

式中, $\partial\theta/\partial n$ 为边界上与边界面成法向的温度导数; θ_0 、 θ 分别为周围介质和工件表面温度, $^\circ\text{C}$; α 为复合换热系数, $\text{W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$,包括对流和辐射^[5]。

在试样上表面接受激光照射的部分,可以将激光看作一种外加的热流密度项,表示为

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \bigg|_{r=r_1} = -q_s + \alpha(\theta - \theta_0).$$

式中, q_s 为单位面积外部输入热流, W/m^2 ; r_1 为泵筒内壁半径, m 。

在试样接受激光处理之前,工件具有均匀的初始温度,一般为周围环境温度,取为 20°C 。

1.3 相变模型

JMAK 模型常用于等温条件下扩散型相变的计算,而激光加热过程是一个连续冷却的过程,因此需要对 JMAK 模型进行修正,利用修正的 JMAK 模型进行计算^[6]。表示为

$$p_k^i = p_k^{\max} (p_j^i - p_j^{i-1}) (1 - \exp(-b_k \tau_j^{n_k})).$$

式中, p_k^i 为第 k 个组织在第 j 个时间步时的体积分数; p_j^i 为奥氏体在第 j 个时间步时的体积分数; $p_k^{\max}$ 为第 k 个组织可获得的最大体积分数; τ 为延迟时间; n_k 和 b_k 是常数,可从 CCT 曲线中获得。

在冷却过程中,当冷却速度大于临界淬火速度时,奥氏体将转变为马氏体。此过程为非扩散型转变,使用 Koistinen-Marburger 模型^[7]进行相变计算:

$$p_m(\theta) = p_0(1 - \exp(-0.011(M_s - \theta))), \quad \theta \leq M_s.$$

式中, p_0 代表 $t=0$ 原始相的比例; M_s 为初始相变温度。

1.4 硬度计算

硬度取决于试样的化学成分、相组成(马氏体、贝氏体、铁素体等)以及冷却速率。采用有限元软件进行热计算,获得相组成以及各相的比例和冷却速率,进行硬度计算^[8],计算式为

$$\begin{aligned} H_{V_m} &= 127 + 949w_C + 27w_{Si} + 11w_{Mn} + 8w_{Ni} + 16w_{Cr} + 21lg v_r, \\ H_{V_b} &= -323 + 185w_C + 330w_{Si} + 153w_{Mn} + 65w_{Ni} + 144w_{Cr} + \\ & 191w_{Mo} + lg \tilde{v}_r(10 - 19w_{Si} + 4w_{Ni} + 8w_{Cr} + 130w_V), \\ H_{V_f} &= 42 + 223w_C + 53w_{Si} + 30w_{Mn} + 12.6w_{Ni} + 7w_{Cr} + w_{Mo} + \\ & lg v_r(10 - 19w_{Si} + 4w_{Ni} + 8w_{Cr} + 130w_V). \end{aligned}$$

式中, H_{V_m} 、 H_{V_b} 和 H_{V_f} 分别为淬火马氏体、贝氏体和铁素体的硬度; v_r 为 700 ℃ 时的冷却速率; w 为元素的质量分数, 下角标为元素名称。

2 试验条件及热源校正

采用 5 kW 大功率横流连续 CO₂ 激光加工设备 and 激光导光系统在 42CrMo 泵筒内壁进行激光相变硬化试验, 其原始组织为回火索氏体。选择的激光参数: 激光功率为 1.5 kW, 扫描速度为 65 mm/s, 光斑直径为 3 mm。经激光处理后, 采用光学显微镜观察相变硬化后的组织, 采用显微维氏硬度计测量相变层的硬度。

SYSWELD 软件内部自带了热源校正工具 (heat input fitting)。该工具可以对热源参数进行调整。通过反复修改热源参数, 可以使获得的热源形貌更为接近实际, 进而使得模拟结果更为准确。将具体的工件尺寸、材料性能等参数载入软件中, 考虑材料热物性参数随温度的变化^[9], 不断调整高斯热源参数, 使得到的模拟热源截面形貌同实际情况趋于一致。图 2 为相变区金相照片, 图 3 为热源校正后获得的热源截面形貌。图 3 中浅色区为相变区 (温度高于 775 ℃ 的区域)。由图 2、3 可知, 模拟结果和试验结果吻合较好。

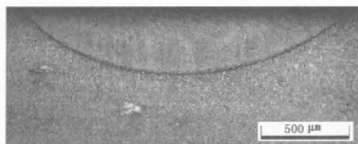


图2 相变区金相图

Fig.2 Cross-sectional macrograph of phase transition zone

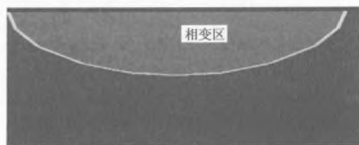


图3 校正的热源截面

Fig.3 Predicted hardened zone using heat input fitting

3 结果分析

3.1 温度场

图 4(a) 为沿模型轴向不同点处的热循环曲线。由图可知, 在不到 0.2 s 的时间内, 相变区中心点被迅速加热到峰值温度 1031.52 ℃。在轴向方向上, 随着距相变中心区距离的增大, 热源能量密度不断降低, 热循环峰值温度不断降低。在距相变区中心点 1.5 mm 的地方, 其峰值温度为 778.65 ℃, 略高于奥氏体转变温度, 而距中心点 3 mm 的地方, 其峰值温度仅为 563.05 ℃。表明在激光束的照射作用下, 泵筒内表面产生了极大的温度梯度。图 4(b) 为径向不同点处的热循环曲线。其分布规律与轴向相同, 随着距离增加, 峰值温度不断降低。这主要是由于随着距离的增加, 热传导向径向传递的热量逐步降低而造成的。图 5 为相变中心点的温度变化速率曲线。在相变过程中, 最大加热速度达到了 15.2 k ℃/s, 最大冷却速度为 3.86 k ℃/s, 表明激光相变硬化是一个快速加热和冷却的过程。图 6 为 0.5 s 时刻试样表面的温度分布云图。图 6 中, 相变区表示在激光相变硬化过程中, 温度超过奥氏体化温度 A_{c1} 的区域。由图 6 可知, 相变硬化过程对工件表面的影响局限在一个较小的范围内, 表明激光相变硬化可以实现大型工件局部改性。

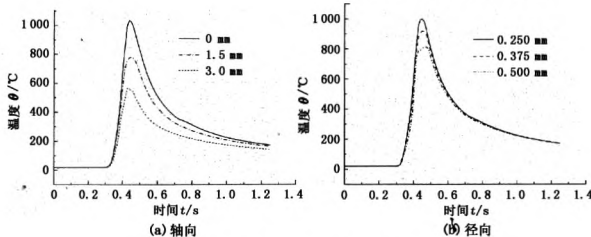


图4 相变区轴向、径向不同点热循环曲线

Fig.4 Thermal cycles curves of different axial points at phase transition zones

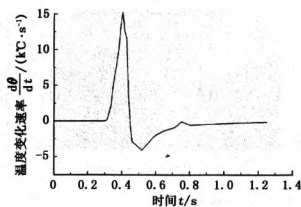


图5 相变区中心点温度变化速率

Fig. 5 Temperature change rate of center node at phase transition zones

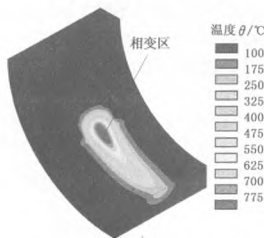
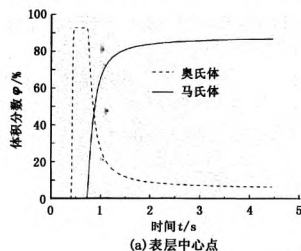


图6 0.5秒时刻的温度场分布

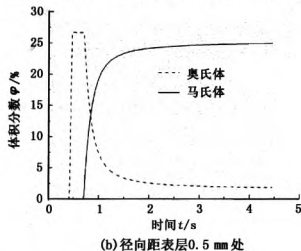
Fig. 6 Temperature distribution at 0.5 s

3.2 组织分析

图7为不同点激光处理过程中的组织演变图。由图7(a)可知,在加热过程中,表层组织发生奥氏体转变,大部分组织转变为奥氏体。由于奥氏体转



(a) 表层中心点



(b) 径向距表层0.5 mm处

图7 不同点的组织转变曲线

Fig. 7 Phase evolution curves of different points

图9为激光处理后,沿径向不同深度处的金相组织。由图9(a)可知,相变区主要以马氏体为主。图9(b)为不完全淬火区,组织主要由马氏体和回火索氏体组成。图9(c)为相变区和基体的交界区域。基体材料主要由回火索氏体组成。由图9可以明显

变属于扩散型转变,需要时间,而激光相变的加热和冷却速度较快,造成少部分组织未发生奥氏体转变。当激光热源离开照射表面后,进入冷却阶段,而激光冷却速度较快,材料以其未加热基体作为淬火介质,发生自冷淬火,产生大量马氏体,加热过程的少量奥氏体以残余奥氏体的形式存在。图7(b)为距表层0.500 mm处的组织演变情况。在加热过程中,同样发生了奥氏体转变,但其奥氏体数目相对较少。由图4(b)可知,0.500 mm处的峰值温度为812.99℃,低于 A_{c3} 线,且其 A_{c1} 线以上停留时间较短,使得大量的组织不能发生奥氏体转变,最终造成其获得的马氏体含量大大减少。

图8为模拟获得的相变处理后最终的组织分布情况。相变区主要以马氏体为主,其体积分数可达90%左右。相变区存在着少量的铁素体、珠光体以及残余奥氏体。在表层0.75 mm的范围内,相变区具有较高的马氏体含量,当距离增大到1.5 mm左右时,马氏体基本消失。由前面的温度场分析可知,随着距表层中心距离的不断增大,峰值温度不断降低,使得在加热过程中材料难以获得充足的奥氏体转变,继而造成冷却后马氏体含量的减少。截面方向上,在距离表层中心点0.375 mm的范围内具有高的马氏体含量,距表层0.625 mm左右时,马氏体基本消失。这主要是由于激光的能量被上表层吸收后,热量主要靠热传导传递给基体,随着距离的增加,基体获得的热量也逐渐减少,马氏体转变量将变低。

看出,经激光相变硬化处理后,相变区组织明显细化。这将有助于激光处理后材料硬度的提高。由图8,9比较可知,沿截面方向,组织分布规律和模拟结果相吻合。

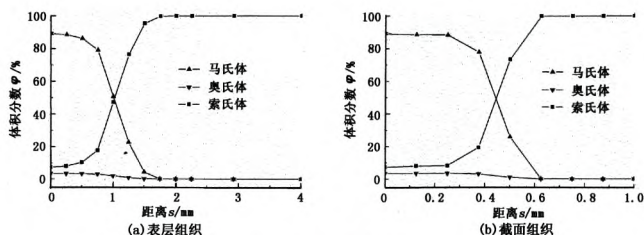


图8 模拟的组织分布

Fig.8 Microstructure distribution of simulation

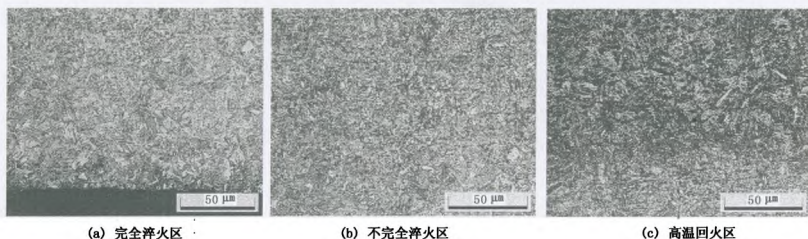


图9 激光相变组织

Fig.9 Microstructure at laser phase transformation zone

3.3 硬度分析

图10为试验和模拟获得的硬度分布。由图10可知,相变区的硬度模拟结果与试验结果吻合较好,

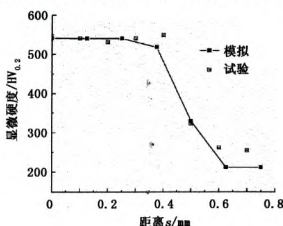


图10 硬度分布图

Fig.10 Distribution of hardness

母材区域的硬度存在着一定的偏差。激光处理后相变区硬度得到了显著提高,数值约为基体的两倍。相变区最大硬度可达 $540.6HV_{0.2}$,高硬度区域约为 0.4 mm。由图8、10可知,截面显微硬度分布情况同马氏体沿截面的分布规律相似。激光淬火后产生的马氏体含碳量高于常规马氏体组织,且淬火后造成马氏体亚结构尺寸细化以及马氏体缺陷密度增加^[10-11]。这些因素共同造成了激光相变处理后材料整体硬度的提高。因此,激光相变硬化处理后,相

变区产生的马氏体有助于材料硬度显著提高。

4 结论

(1) 泵筒内壁激光相变硬化处理过程中,沿着表层和截面方向,随着距中心点距离的增大,峰值温度不断降低。相变区中心点有较高的加热速度和冷却速度。

(2) 相变区由完全淬火区、不完全淬火区以及过渡区组成。在激光照射加热过程中,大部分表层组织发生奥氏体转变,冷却时,奥氏体转变为马氏体;完全淬火区组织以马氏体为主,其体积分数最大可达90%。

(3) 泵筒内壁经激光相变硬化处理后,硬度提高约2倍,最大可达 $540.6HV_{0.2}$;相变区的组织及硬度模拟结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 王扬, 邓宗全, 曲存景, 等. 抽油泵整体泵筒激光表面淬火[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4): 40-42.
WANG Yang, DENG Zong-quan, QU Cun-jing, et al. Laser surface hardening for integral barrel tubing pumps [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31

- (4):40-42.
- [2] 王奎生, 张嗣伟. 连续抽油杆抽油装置的研究现状及发展方向[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22(2):98-101.
- WANG Kui-sheng, ZHANG Si-wei. Developing state of pumping units for continuous suck[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1998, 22(2):98-101.
- [3] 马洪伟, 王勇, 韩彬, 等. 表面状态对 N80 油管激光强化影响的试验研究[J]. 石油机械, 2008, 36(9):13-15.
- MA Hong-wei, WANG Yong, HAN Bin, et al. Experimental study of influence of surface condition on laser enhancement of N80 tubing [J]. CPM, 2008, 36(9):13-15.
- [4] 朱祖昌, 李培耀, 俞少罗. 相变硬化激光热处理的数值解及组织性能的预测[J]. 金属学报, 1996, 32(1):105-112.
- ZHU Zu-chang, LI Pei-yao, YU Shao-luo. Numerical solution and prediction of microstructures and properties for phase transformation hardening with laser treatment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1996, 32(1):105-112.
- [5] LI Chao-wen, WANG Yong, HAN Bin, et al. Microstructure, hardness and stress in melted zone of 42CrMo steel by wide-band laser surface melting [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(4):530-535.
- [6] ZHAN Huan-xiao, WANG Yong, LI Chao-wen, et al. Computational and experimental study of a melt-hardened zone on a roller modified by wide-band laser treatment [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(3):251-257.
- [7] MIOKOVIC T, SCHULZE V, VÖHRINGER O, et al. Prediction of phase transformations during laser surface hardening of AISI 4140 including the effects of inhomogeneous austenite formation [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 435-436:547-555.
- [8] TOBAR M J, ÁLVAREZ C, AMADO J M, et al. Laser transformation hardening of a tool steel: simulation-based parameter optimization and experimental results[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(22/23):6362-6367.
- [9] SYSWELD. Engineering guide of training and toolbox [M]. France: ESI Group, 2004.
- [10] 路纲, 席守谋. 4Cr13 钢激光相变强化机理研究[J]. 材料热处理学报, 2002, 23(4):26-29.
- LU Gang, XI Shou-mou. Investigation on laser transformation strengthen mechanism of 4Cr13 steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2002, 23(4):26-29.
- [11] 李同道, 韩涛, 占焕校, 等. 搭接率对 CK45 钢激光熔凝硬度及应力分布的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6):152-155.
- LI Tong-dao, HAN Tao, ZHAN Huan-xiao, et al. Influence of overlapping ratio on hardness and stress distributions of CK45 steel by laser remelting [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(6):152-155.

(编辑 沈玉英)