

文章编号:1673-5005(2007)06-0152-04

搭接率对 CK45 钢激光熔凝硬度及应力分布的影响

李同道, 韩 涛, 占焕校, 王 勇

(中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:采用大型有限元仿真软件 SYSWELD, 利用自建的宽带热源模型, 对 CK45 钢表面激光熔凝处理过程进行了不同搭接率下的二维数值分析计算, 考察了不同搭接率对材料熔凝区的硬度场、应力场等的影响。模拟计算结果表明, 自建的宽带热源模型符合宽带热源的热流密度分布规律, 模拟出的熔池形状与实际试样十分接近。经过激光熔凝后, 材料的硬度得到了显著的提升, 单道熔凝的最大硬度出现在熔凝区与母材的交界处。当相邻熔凝带热源中心距离较小时, 熔凝区硬度分布比较均匀(除两端外); 当相邻熔凝带热源中心距离较大时, 硬度分布不均匀。Mises 等效应力最大值出现在相邻熔凝带的搭接区, 此处是熔凝裂纹形成的主要部位。

关键词:搭接率; 数值模拟; 硬度; 应力; 有限元法

中图分类号:TP 39; TG 156. 99 **文献标识码:**A

Influence of overlapping ratio on hardness and stress distributions of CK45 steel by laser remelting

LI Tong-dao, HAN Tao, ZHAN Huan-xiao, WANG Yong

(College of Mechanical & Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: In order to study the influence of overlapping ratio on the hardness and the stress status of CK45 steel after laser melting process, SYSWELD was used to simulate the 2-D model with the broad-band volumetric heat source model. The calculated widths and depths of laser melting areas with the broad-band volumetric heat source model are in good accordance with the experimental results. The hardness of the melting zone increases obviously and the maximum hardness is in the heat affected zone (HAZ). The hardness distribution is more homogeneous with small distance between the centers of the adjacent laser melting beam than that with the large one. The maximum Mises stress is at the overlapping zone which is the place dangerous for crack initiation.

key words: overlapping ratio; number simulation; hardness; stress; finite element method

激光熔凝是采用激光束照射材料表面使其表层熔化, 然后依靠自身冷却快速凝固, 形成晶粒细小的改性层, 从而提高材料的耐磨、抗疲劳等性能的工艺, 该工艺目前受到了广泛关注^[1-3]。由于受激光光斑尺寸的限制, 构件不可能一次整体进行熔凝, 相邻的两熔凝层之间必将存在搭接, 而搭接率的大小对熔凝层硬度和熔凝区应力的分布会产生影响, 导致整体构件的使用性能发生改变, 因此研究搭接率对熔凝区硬度及应力分布的影响很有必要。本文中采用大型有限元模拟软件 SYSWELD 模拟计算 CK45

钢表面激光熔凝处理过程, 考察搭接率对材料熔凝区的硬度场、应力场等的影响, 为制定合理的激光熔凝处理工艺提供理论上的支持。

1 激光熔凝数值计算模型的建立

1.1 几何模型

本文中采用的是二维几何模型, 其尺寸为 150 mm × 50 mm。出于计算时间和计算精度两方面考虑, 熔凝区采用较细的网格划分, 而远离熔凝区的部分则网格划分得较为稀疏, 如图 1 所示。材料为

收稿日期: 2007-09-29

基金项目: 山东省自然科学基金项目(Y2006F64); 中国石油大学(华东)博士基金项目(Y050322)

作者简介: 李同道(1964-), 男(汉族), 山东寿光人, 博士研究生, 从事材料科学与工程方面的研究。

CK45 钢,机械性能、热性能等参数采用 SYSWELD 自带数据库提供的数据(考虑了材料性能随温度变化及相变的影响)。

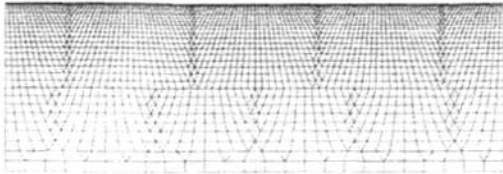


图 1 几何模型及网格划分结果

1.2 热源模型

激光熔凝涉及到激光束的移动加热过程。为了提高熔凝效率,采用的是 10 mm × 1 mm 的矩形激光光斑,而不是常用的圆形光斑。在数值模拟中描述热输入过程的双椭球热源模型^[4]、Gaussian 热源模型^[5]、三维锥体热源模型等显然不符合激光宽带熔凝加工过程中的能量密度几近均匀分布且为立方体而非旋转对称的特点,因此本文中采用自建的宽带热源模型,其分布函数为

$$Q_r = Q_0 \exp \left[\left(\frac{x-x_0}{a} \right)^{100} + \left(\frac{y-y_0}{b} \right)^{100} + \left(\frac{z-z_0}{c} \right)^{100} \right]$$

式中, Q_0 为最大热流密度;系数 a, b, c 由熔池尺寸决定。

为了模拟搭接对熔凝区性能的影响,采用相邻

两道熔凝带中心位置的距离 d 来表示搭接率的大小。如果相邻两道熔凝带中心位置的距离比较大,相应的搭接率就小,反之亦然。这里相邻两道熔凝带中心位置的距离分别取 5, 6, 7, 8, 9 mm。

1.3 边界条件

熔凝过程一般无需外力固定试样,因此机械约束条件可视为自由约束条件。散热条件主要考虑与周围空气的热交换,即

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \alpha (T_s - T_a)$$

式中, α 为表面换热系数; T_a 为周围介质温度; T_s 为已知边界温度; n_x, n_y, n_z 分别为边界外法线的 x, y, z 方向余弦。

2 模拟计算结果分析

2.1 温度场分析

在热加工工艺系数中,热量的计算结果直接影响着材料相分布、硬度和应力等的计算精度及准确性,而这又取决于热源模型的选取和参数设置。图 2 为采用自建的宽带热源模型得到的熔池形状与实际熔凝试样的对比。可以看出模拟结果与实际样品的熔凝区截面十分吻合。图 3 为节点 74 的热循环曲线和温度变化率(dT/dt)曲线。

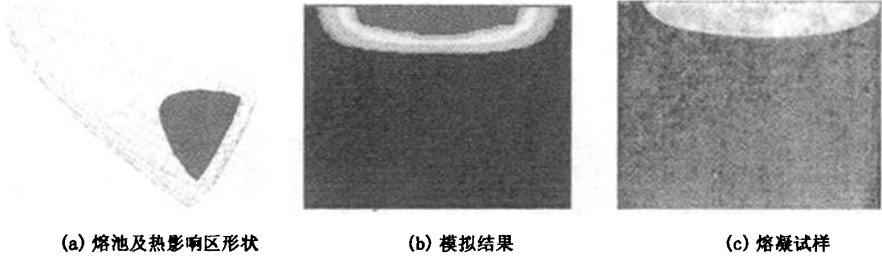


图 2 熔凝试样与模拟结果的熔凝区形状

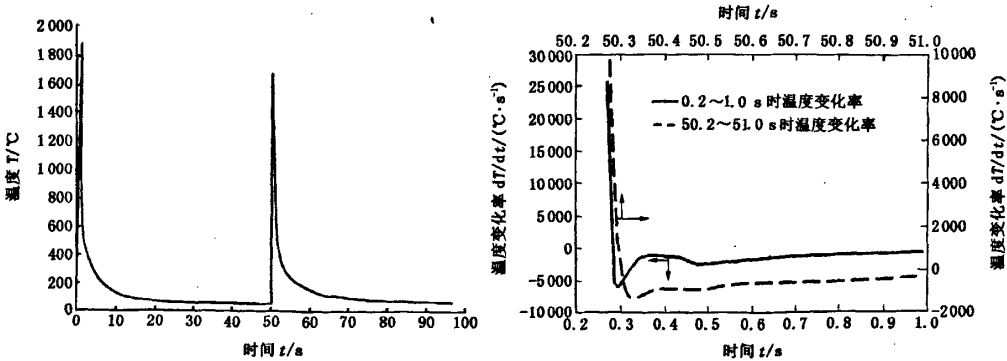


图 3 节点 74 的热循环曲线和温度变化率曲线

从图3中可以看出,激光熔凝过程是一个快速加热、快速冷却的过程,其温降速率可达 $-6 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$,为获得具有细小晶粒、高硬度组织的表面改性层提供了热力学条件。从图3也可以看出,由于第一道热作用使基体受到预热作用,从而使后续熔凝道的冷却速度降低。

2.2 硬度场分析

经过激光熔凝后,材料的硬度得到了显著的提高。图4为不同搭接距离时的硬度分布图。从图中可以看出,单道熔凝区的最大硬度出现在熔凝区与母材的交界处,这是由于此处的冷却速度较大,形成较多的马氏体所致(图5(a))。由图4和图5可以看出,熔凝区硬度的分布与熔凝区的马氏体分布有着直接的关系,马氏体含量大的地方,其硬度值也

大。

当相邻热源中心距离较小时($d=5, 6, 7 \text{ mm}$),前一熔凝道在搭接区的高硬度部分受后一熔凝道的热作用影响出现再次熔凝,但由于前一道对基体有预热的作用,冷却速度下降,硬度值下降,使熔凝区硬度分布比较均匀(除两端外);而当 d 为 8 mm 和 9 mm 时,搭接区还存在一个高硬度区域,这一区域是由于前一道熔凝区与母材的交界处的高硬度区受后续熔凝道的热作用不够,得以将较高的硬度保持下来,致使整体硬度分布不均匀,从而使耐磨性出现差异,影响构件的使用性能。

从以上的分析可以看出,考虑硬度分布并兼顾生产效率,在所选的几组搭接工艺下, $d=7 \text{ mm}$ 是最优的搭接参数。

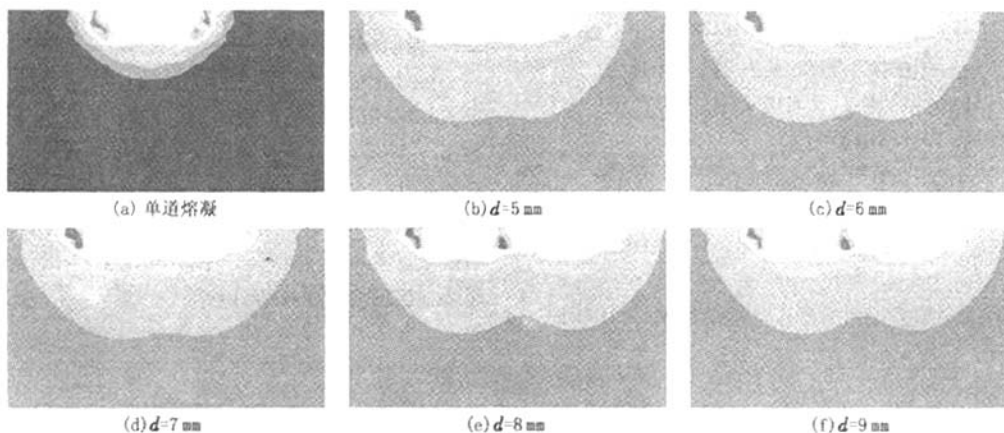


图4 硬度分布云图

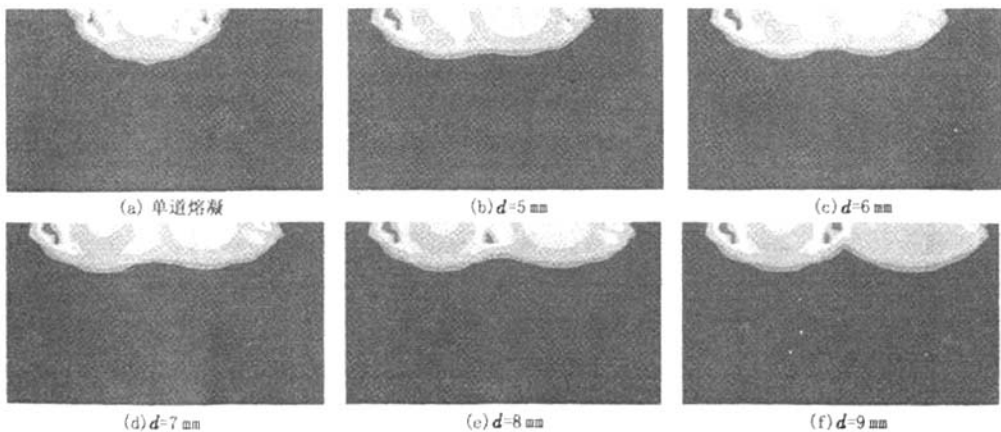


图5 马氏体分布云图

2.3 应力场分析

应力对激光熔凝过程中裂纹的产生具有重要的

影响作用。搭接区宽度不同同样影响了应力的分布。图6为不同搭接距离时的应力分布云图。单道

熔凝的热影响区存在较大的 Mises 等效应力,是容易产生失效的区域。搭接熔凝后的搭接区也存在较大的应力,是容易产生失效、出现裂纹的地方,这已经被试验所证实(图7)。不同搭接率下,出现高应力的区域也有所不同,基本呈现先减小后增大的趋势,在 d 为 7 mm 时危险应力区域较小。

从以上的分析可以看出,熔凝搭接率影响着熔

凝区的相组成、硬度及残余应力的分布状态,合适的搭接参数可以得到硬度均匀的熔凝硬化层与合理的应力分布。但是,要想得到理想的熔凝性能,除了要选择合适的搭接率外,还要根据激光的光斑尺寸与功率,并配以合适的扫描速度,才能够达到构件使用性要求。

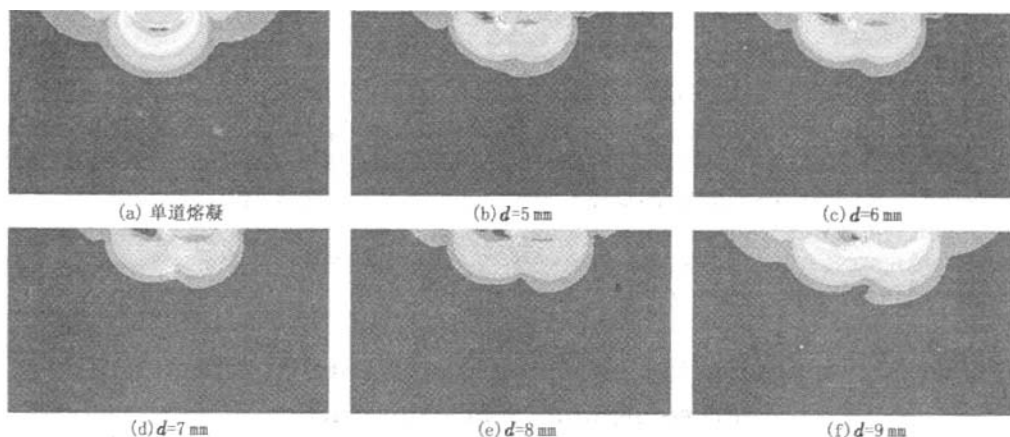


图6 Mises 等效应力分布云图



图7 实际试样熔凝区裂纹

3 结论

(1) 自建的宽带热源模型符合宽带熔凝热源的热流密度分布规律,模拟出的熔池形状与实际试样十分吻合。

(2) 经过激光熔凝后,材料硬度得到了显著提高,单道熔凝区的最大硬度出现在熔凝区与母材的交界处。

(3) 当相邻熔凝带热源中心距离较小时,熔凝区硬度分布比较均匀(除两端外);当相邻熔凝带热源中心距离较大时,硬度分布不均匀。

(4) Mises 等效应力最大值出现在相邻熔凝带的搭接区,此处是熔凝裂纹形成的主要部位。

参考文献:

- [1] KUSINSKI Jan. Microstructure, chemical composition and properties of the surface layer of M2 steel after laser melting under different conditions[J]. Applied Surface Science, 1995,86:317-322.
- [2] LI J F, LI L and STOTT F H. Thermal stresses and their implication on cracking during laser melting of ceramic materials[J]. Acta Materialia, 2004,52:4385-4398.
- [3] KAC S and KUSINSKI J. SEM structure and properties of ASP2060 steel after laser melting[J]. Surface and Coating Technology, 2004(180/181):611-615.
- [4] JOHN Goldak, ADITYA Chakravarti, MALCOLM Bibby. New finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B(Process Metallurgy), 1984, 15B(2):299-305.
- [5] CHANG W S, NA S J. A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equations and the thermal distortion of a small structure in micro-joining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1/3):208-214.

(编辑 陈淑娟)