

# 液压支架立柱活塞杆堆焊过程数值模拟

张瑾<sup>1,2</sup>, 曾威<sup>3</sup>, 陈向阳<sup>1,2</sup>, 王成军<sup>1,2</sup>, 胡海霞<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 矿山智能装备与技术安徽省重点实验室, 安徽淮南 232001; 3. 中达电子(江苏)有限公司, 江苏 苏州 215200)

**摘要:**为预测液压支架立柱活塞杆堆焊过程的温度场分布情况,以 ANSYS 软件为平台,运用 APDL 编程及单元生死技术,在常温 20、150、300 °C 预热情况下对活塞杆模型进行了焊接瞬态热分析,得到了立柱活塞杆的焊接温度场分布规律。结果表明,常温堆焊焊缝容易形成淬硬组织,预热能降低焊缝淬硬组织的形成倾向。

**关键词:**数值模拟;温度场;堆焊;有限元分析

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192196

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)9-0122-03

## Numerical Simulation of Surfacing Process of Hydraulic Support Column Piston Rod

ZHANG Jin<sup>1,2</sup>, ZENG Wei<sup>3</sup>, CHEN Xiangyang<sup>1,2</sup>, WANG Chengjun<sup>1,2</sup>, HU Haixia<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Mine Intelligent Equipment and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Zhongda Electronic (Jiangsu) Co., Ltd., Suzhou 215200, China)

**Abstract:** In order to predict the distribution of the temperature field during the surfacing process of a hydraulic support column piston rod, the ANSYS software was used as a platform, the APDL programming and the unit life and death technology were applied to perform the transient thermal analysis of piston rod model under 20, 150, 300 °C preheating temperatures. The distribution of the welding temperature field of the column piston rod was obtained. The results show that hardening microstructure is easy to form in surfacing weld at room temperature. Preheating can reduce the formation tendency of hardening microstructure in weld.

**Key words:** numerical simulation; temperature field; surfacing; finite element analysis

采煤生产时,为了保证采煤工人的生命安全和生产作业的顺利进行,需要用液压支架对工作面进行支护,以防止煤矸石和煤屑落入刮板输送机并隔离采空区。液压支架属于重型设备,其投资费用占整个采煤工作面成套设备总投资费用的 60% 以上<sup>[1]</sup>。然而,在服役过程中,液压支架上的立柱活塞杆表面容易被飞溅的煤矸石击中,导致其表面发生破损,同时,由于采煤环境中有多含有 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的腐蚀性介质及硬颗粒,随着时间推移,其逐渐混入到液压油内,导致立柱内表面和立柱活塞杆表面产生腐蚀和磨损,进而导致采煤生产效率的降低,严重

时甚至会使得采煤无法进行而导致重大损失<sup>[2]</sup>。为提高立柱活塞杆表面的强度、硬度和耐腐蚀性能,一般要对立柱活塞杆表面进行表面改性处理,以提高其表面的强度、硬度和耐腐蚀性能,进而提高立柱活塞杆的服役寿命,降低煤炭采掘成本,提高经济效益。堆焊是液压支架立柱活塞杆表面改性的一种主要技术。目前,堆焊技术研究热点主要集中在涂层制备和涂层力学性能表征上<sup>[3-5]</sup>,而对堆焊过程中的温度场分布研究较少。本文利用 ANSYS 有限元分析软件,对立柱活塞杆表面堆焊不锈钢金属层的焊接温度场进行数值模拟研究,得到了不同预热温度条件下焊接温度场分布情况。

## 1 模型的建立与数值模拟

液压支架立柱活塞杆二维图如图 1 所示,尺寸为:直径  $\phi 99$  mm、长 670 mm、球头半径 52.5 mm、孔径  $\phi 30$  mm。活塞杆材料为 27SiMn,在立柱活塞杆表

收稿日期:2019-07-20

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2019A0127);安徽省重点研究与开发计划项目(201904a05020092)

作者简介:张瑾(1981-),女,河南周口人,讲师,硕士,主要研究方向:塑性成型及计算机模拟;电话:18715540697;

E-mail:banquansuoyou@163.com

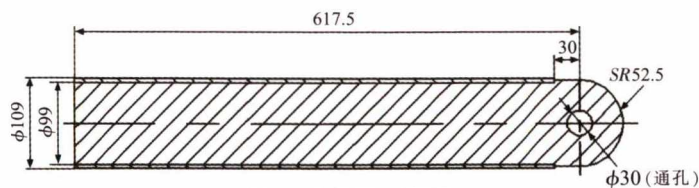


图1 活塞杆二维图  
Fig.1 Two dimensional drawing of piston rod



图2 活塞杆有限元模型  
Fig.2 Finite element model of piston rod

面堆焊一层厚 5 mm 的焊层, 堆焊用焊丝牌号为 H2Cr13, 堆焊金属的化学成分如表 1 所示。在常温 20 °C, 预热到 150、300 °C 三种情况下对液压支架立柱活塞杆的堆焊过程进行数值模拟。

表 1 堆焊金属的化学成分(质量分数, %)

Tab.1 Chemical composition of the surfacing metal(wt%)

C	Cr	Mn	Si	Ni	S	P
0.16~0.24	12.00~14.00	0.30~0.60	0.30~0.60	≤0.60	≤0.30	≤0.30

### 1.1 模型建立及网格划分

对活塞杆模型采用扫掠的方式划分网格, 靠近焊缝的区域网格划分细密且均匀, 尽量保证计算的准确性, 远离焊缝的区域网格尺寸可适当增大, 以减少计算时间。生成的网格有限元模型如图 2 所示。由于液压支架立柱活塞杆模型为常见的圆柱形, 不存

在复杂曲面, 且映射网格对载荷的施加和收敛的控制是非常有利的, 当映射网格划分不能实施时, 才考虑选用自由网格进行补充<sup>[6]</sup>。所以在划分网格时可以优先考虑映射六面体单元, 为了获得一个好的瞬态焊接温度场, 焊缝处的单元网格最好控制在 2 mm 以下<sup>[7]</sup>。

### 1.2 热物理参数设定

图 3 为堆焊层的密度、比热容和导热系数随温度的变化曲线。密度、比热容、导热系数等参数随温度变化, 焊接过程中立柱的温度从室温 20 °C 上升至 1500 °C 之上, 然后冷却至室温, 温度变幅剧烈, 所以参数改变也很大。查阅相关手册得到几个关键点数

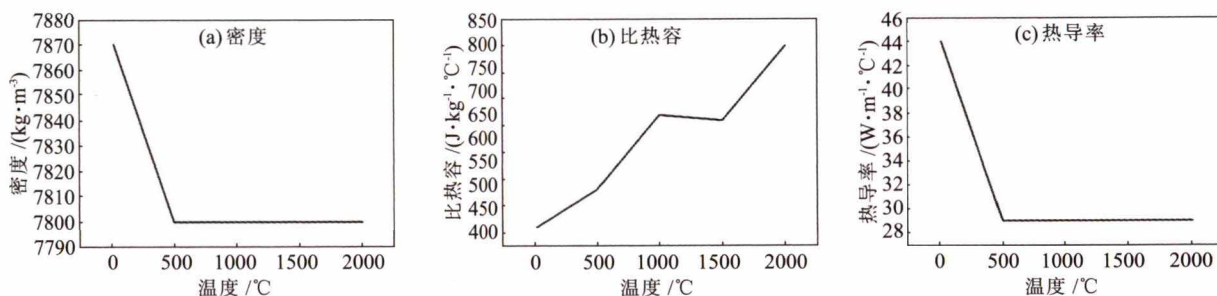


图3 堆焊层的热物理参数曲线  
Fig.3 Thermal physical parameter curves of the surfacing layer

值, 由外推法及插值法得到参数-温度曲线, 如图 3 所示。为保证堆焊效果, 焊区材料应与立柱材料性质相近, 故焊区与立柱参数取值一致<sup>[8]</sup>。

### 1.3 数值计算过程

堆焊的数值模拟是一个瞬态分析的过程, 在进行瞬态分析之前须在极短的时间内 ( $t=0.01$  s) 给整个模型施加初始温度进行稳态分析, 从而得到一个均匀分布的温度场。之后利用 APDL 语言循环的命令实现热源移动的过程。

## 2 模拟结果与分析

不预热(20 °C)的焊接温度场如图 4 所示。当热源移动到第三道焊缝时, 焊件最低温度为 20 °C, 熔

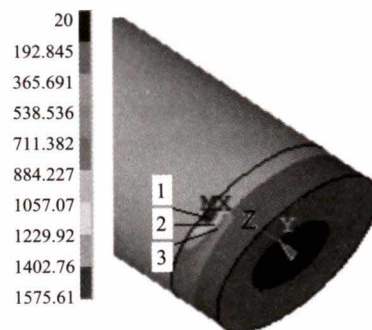


图4 不预热下焊接温度场分布(°C)  
Fig.4 Welding temperature field distribution without preheating (°C)

池温度为 1580 °C, 第一道焊缝温度冷却到 200 °C 左右, 第二道焊缝冷却到 400 °C 左右。

在处理中,取  $y-z$  平面上序号为 1、2、3 处的节点(编号分别为 12771、12773、13154),得到不同节点温度随时间的变化关系,如图 5 所示。由图 5 可见,节点 12771 的峰值温度为  $1506.2^{\circ}\text{C}$ ,40s 后冷却到  $310^{\circ}\text{C}$  以下,此时奥氏体开始向马氏体转变,在 70s 时由于热源移动到了第二道焊缝,对该点进行了重复加热,但峰值温度在  $300^{\circ}\text{C}$  左右,所以对组织转变的影响不大。焊后能得到较多的马氏体,有利于提高堆焊层硬度,但脆性也较大<sup>[8]</sup>。

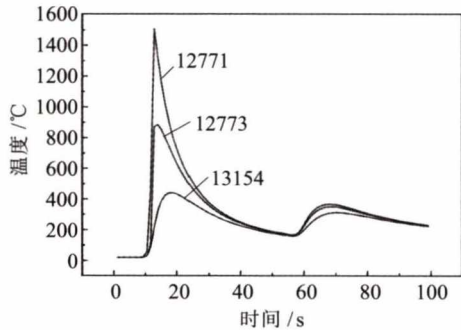


图 5 不预热下不同网格节点的温度随时间变化曲线  
Fig.5 Change curves of temperature with time of different mesh nodes without preheating

预热温度为  $150^{\circ}\text{C}$  时,温度场分布如图 6 所示。当热源移动到第三道焊缝时,焊件温度为  $150^{\circ}\text{C}$ ,熔池温度为  $1702^{\circ}\text{C}$ ,第一道焊缝温度冷却到  $300^{\circ}\text{C}$  左右,第二道焊缝冷却到  $500^{\circ}\text{C}$  左右。

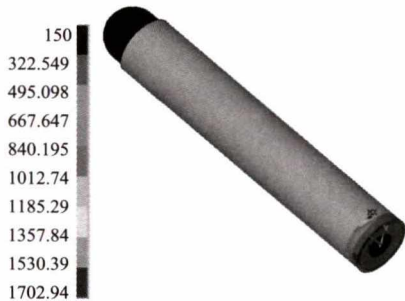


图 6 预热温度  $150^{\circ}\text{C}$  时焊接温度场分布( $^{\circ}\text{C}$ )  
Fig.6 Welding temperature field distribution at  $150^{\circ}\text{C}$  preheating temperature( $^{\circ}\text{C}$ )

预热温度为  $150^{\circ}\text{C}$  时不同节点温度随时间的变化关系如图 7 所示。节点 12771 的峰值温度为  $1622.5^{\circ}\text{C}$ ,58s 后冷却到  $310^{\circ}\text{C}$  以下,进入马氏体转变区域,在 70s 时热源对该点进行了重复加热,峰值温度在  $500^{\circ}\text{C}$  左右,所以组织成分除了马氏体外还有部分细珠光体,堆焊层硬度有所降低,但具备较好的抗冲击性能。

预热温度为  $300^{\circ}\text{C}$  时,温度场分布如图 8 所示。当热源移动到第三道焊缝时,焊件温度为  $300^{\circ}\text{C}$ ,熔

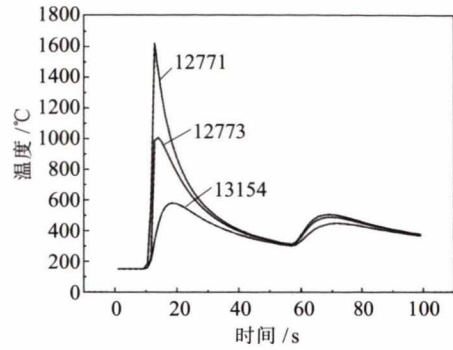


图 7 预热温度  $150^{\circ}\text{C}$  时不同网格节点温度随时间变化曲线  
Fig.7 Change curves of temperature with time of different mesh nodes at  $150^{\circ}\text{C}$  preheating temperature

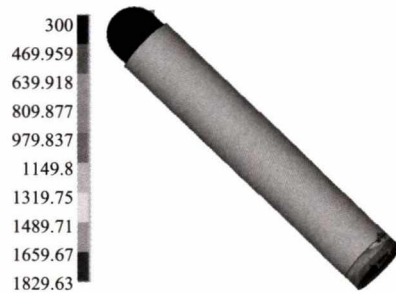


图 8 预热温度  $300^{\circ}\text{C}$  时温度场分布  
Fig.8 Welding temperature field distribution at  $300^{\circ}\text{C}$  preheating temperature

池温度为  $1829^{\circ}\text{C}$ ,第一道焊缝温度冷却到  $400^{\circ}\text{C}$  左右,第二道焊缝冷却到  $600^{\circ}\text{C}$  左右。

预热温度  $300^{\circ}\text{C}$  不同节点温度随时间变化关系如图 9 所示。节点 12771 的峰值温度为  $1738.7^{\circ}\text{C}$ ,60s 时出现第一个波谷温度为  $500^{\circ}\text{C}$ ,在 70s 时热源对该点进行了重复加热,峰值温度在  $660^{\circ}\text{C}$  左右,直到焊完第二道焊缝,该点的温度都保持在  $310^{\circ}\text{C}$  以上,没有进入马氏体转变区,所以最终得到的马氏体成分较少,细珠光体成分较多,堆焊层硬度较低,不具备足够的耐磨性。

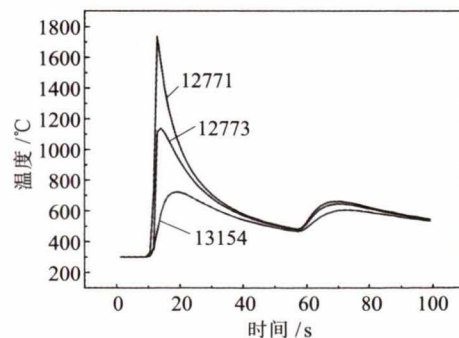


图 9 预热温度  $300^{\circ}\text{C}$  不同网格节点温度随时间变化曲线  
Fig.9 Change curves of temperature with time of different mesh nodes at  $300^{\circ}\text{C}$  preheating temperature

通过以上对比可知:随着预热温(下转第 129 页)


度增大而变化的主控因素是焊接角变形。

(4) 当装配间隙小于等于 0.3 mm 时,不同装配间隙下试板焊后的焊缝正面熔宽、背面熔宽和背宽比的差异很小,试板焊后面外变形的差异也很小。但还应该严格控制工件对接面自身的平整度和工件对接面与工件上下表面的垂直度这 2 个指标。

### 参考文献:

- [1] 陈立伟,姜秋月,于燕,等. 镀锌钢板激光焊焊接接头组织与性能[J]. 热加工工艺,2016,45(15):222-224.
- [2] Zhang Linjie, Bai Qinglin, Ning Jie, et al. A comparative study on the microstructure and properties of copper joint between MIG welding and laser-MIG hybrid welding [J]. Materials & Design, 2016, 10: 35-50.
- [3] 王悦悦,殷国涛,胡小小,等. 硬质合金/不锈钢激光焊接性能分析[J]. 热加工工艺,2017,46(5):200-203.
- [4] Pang Shengyong, Chen Xin, Shao Xinyu, et al. Dynamics of vapor plume in transient keyhole during laser welding of stainless steel: Local evaporation, plume swing and gas entrapment into porosity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 28-40.
- [5] 王家淳. 消除钛合金激光焊接的隐患 [J]. 热加工工艺, 2000,39(5): 48-49.
- [6] Xie M X, Li Y X, Shang X T, et al. Microstructure and mechanical properties of a fiber welded socket-joint made of powder metallurgy molybdenum alloy [J]. Metals, 2019, 9

(6): 640.

- [7] 许爱平,董俊慧,甄邵杨,等. 不同热输入对 TC4 钛合金激光焊焊缝形貌和性能的影响 [J]. 内燃机与配件,2020(9): 126-127.
- [8] 张颖云,朱增辉,刘江哲,等. 1.2 mm 厚 TC4 钛合金薄板激光焊工艺研究[J]. 应用激光,2019,39(4):596-601.
- [9] 张颖云,赵安安,陈素明. TC4 钛合金激光锁面对接焊的微观组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺,2019,48(13):46-49.
- [10] 王浩军,张颖云,伍亚辉,等. TC4 钛合金薄板双侧激光角焊搭接变形研究[J]. 热加工工艺,2020,49(9):144-146.
- [11] 王浩军,张颖云,毛悦,等. TC4 钛合金搭接接头双侧激光角焊的组织与性能[J]. 热加工工艺,2019,48(11):147-150.
- [12] 刘西霞,尹存宏,刘维岗. 基于随焊气体动态冷却方法的钛合金薄板激光焊接变形试验研究[J]. 热加工工艺,2017,46(13): 57-60.
- [13] 刘西霞,黄锐,姚刚,等. 钛合金薄板激光对接焊温度场的数值模拟[J]. 激光技术,2013,37(5):700-704.
- [14] 梅述文,成群林,胡佩佩,等. TC4 钛合金蒙皮骨架结构件光纤激光焊工艺研究[J]. 热加工工艺,2015,44(3):83-86.
- [15] 陈俐,胡伦骥,巩水利. 薄板钛合金激光焊熔透稳定性临界条件的计算[J]. 焊接学报,2005(11):35-38.
- [16] 王俊杰,常明,何恩光,等. 钛合金薄板激光修饰焊残余应力研究[J]. 航空制造技术,2015(3):75-77.
- [17] Gao X L, Zhang L J, Liu J, et al. Effects of weld cross-section profiles and microstructure on properties of pulsed Nd: YAG laser welding of Ti6Al4V sheet [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(5/8): 895-903. 

(上接第 124 页)度的升高,组织呈现马氏体→马氏体+细珠光体→珠光体的转变趋势。不预热时焊件温度梯度大,堆焊层冷却速度快,得到的马氏体多,硬度大,但脆硬性也大;预热到 300℃时温度梯度低,冷却时间过长,珠光体成分较多,不利于马氏体的生成,得到的堆焊层硬度较低,难以满足使用要求;预热到 150℃既可以使焊件的温度梯度降低,提高堆焊层与母材的熔透量,减少堆焊层金属的气孔、裂纹和夹渣等缺陷,还能得到较好的组织成分,达到耐磨与抗冲击的性能要求<sup>[9]</sup>,所以对于立柱活塞杆堆焊工艺来说,焊前预热 150℃是一个较好的选择。

### 3 结论

(1) 随着预热温度的升高,组织呈现马氏体→马氏体+细珠光体→珠光体的转变趋势。

(2) 预热到 150℃既可以使焊件的温度梯度降低,提高堆焊层与母材的熔透量,减少堆焊层金属的气孔、裂纹和夹渣等缺陷,还能得到较好的组织成分,达到耐磨与抗冲击的性能要求。所以对于立柱活塞杆堆焊工艺来说,焊前预热 150℃是一个较好

的选择。

### 参考文献:

- [1] 李二兴. 液压支架活塞杆表面防护层的制备与组织性能研究 [D]. 郑州:郑州大学,2012:4.
- [2] Shao Q, Li S, Liu L Z, et al. The influence on the corrosion of hydraulic support system of chloride ions in the transmission medium and preventive measures [J]. Procedia Engineering, 2011,26:1214-1219.
- [3] 王志华. 液压支架立柱的腐蚀机理及其防护[J]. 矿山机械, 2011,23(2):39-43.
- [4] 王海波,王永强,张敏. 堆焊在液压支架立柱中缸中的应用 [J]. 航天制造技术,2009(4):24-27.
- [5] 吕纪武,刘宁,黄一声. 活塞杆堆焊后的回火温度的研究[J]. 金属加工,2009(10):29-31.
- [6] ANSYS Inc. ANSYS Modeling and Meshing Guide [M]. Twelfth Edition. SAS IP Inc, 2001.
- [7] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.
- [8] 赵程,杨建民. 机械工程材料[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
- [9] 何仁财. 液压支架中立柱的设计及焊接模拟分析[D]. 南昌:南昌大学,2011. 