选区激光熔化成形4Cr5MoSiV1钢显微硬度预测模型研究

毕延超[1]，陶凤和[1]，贾长治[1]，陈帅[2]
1.陆军工程大学石家庄校区　河北石家庄　050003
2.32562部队　贵州龙里　522730

摘要：选区激光熔化成形工艺参数与成形件力学性能之间有着密切联系，采用Dimetal-50 SLM设备选取4Cr5MoSiV1钢粉末以不同工艺参数成形硬度试样，研究工艺参数与成形件显微硬度之间的规律，并采用多项式回归的方法建立工艺参数到显微硬度的预测模型，最后通过实例对预测模型的准确性进行验证。

关键词：选区激光熔化；4Cr5MoSiV1钢；显微硬度；预测模型

1　序言

选区激光熔化成形技术（Selective Laser Melting，SLM）与传统减材制造方式相比，除了原材料和后处理决定成形件力学性能外，选区激光熔化成形的工艺参数也在一定程度上影响着成形件的力学性能[1-7]。

选区激光熔化成形过程是一个复杂的物理、化学变化过程，成形过程中金属粉材以极快的速度熔化、凝固，其机理难以用传统平衡凝固学理论解释，卢秉恒院士指出，研究强非平衡态下凝固学理论是一个重要课题[8-12]。当前从工程应用的角度，分析选区激光熔化成形工艺参数与成形件力学性能之间的定量关系，并建立二者间的数学解析模型，既可以为工艺参数选择提供依据，又可以在一定程度上有效预测成形件力学性能，因此具有重要的现实意义。

显微硬度反映的是材料抵抗物体压入其表面深度的能力，是材料弹塑性能的综合指标之一[13]。本文通过不同工艺参数成形试样并测试其显微硬度，在分析工艺参数对显微硬度影响规律基础上，通过多项式回归的方法建立工艺参数到显微硬度的预测模型，为选区激光熔化技术的工程应用提供参考。

2　试验设备、材料和方法

（1）试验设备　试样成形设备采用广东信达雅公司研制的选区激光熔化设备DiMetal-50，其激光器为200W光纤激光器、聚焦光斑为70μm、最快扫描速度为6000mm/s、最大成形尺寸为50mm×50mm×50mm。

（2）试验材料　试验选用气雾化法制备的4Cr5MoSiV1钢粉末，粒径分布为15~45μm，化学成分见表1。

表1　4Cr5MoSiV1钢化学成分（质量分数）（%）

C	Cr	Mo	V	Ni	Si	Mn	S	P	Fe
0.39	5.24	1.27	1.05	0.23	0.87	0.48	0.01	0.02	Bal

（3）试验方法　选取激光功率和扫描速度两个主要工艺参数，采用全面试验的方法安排试验，见表2。其余工艺参数分别为：扫描间距为70μm、

表2　全面试验安排表

序号	激光功率/W	扫描速度/mm·s^{-1}	序号	激光功率/W	扫描速度/mm·s^{-1}
1	140	240	9	180	240
2	140	280	10	180	280
3	140	320	11	180	320
4	140	360	12	180	360
5	160	240	13	200	240
6	160	280	14	200	280
7	160	320	15	200	320
8	160	360	16	200	360

加工层厚为45μm、扫描策略为S形正交扫描、成形角度为45°、成形室氧含量控制线为1200ppm（1ppm=10^{-6}）、测氧时间为20s、测氧周期为60s[14]。

每种工艺参数组合下成形1个边长为10mm的立方体硬度试样，如图1所示。

试样成形后首先进行镶嵌（见图2），然后进行磨抛，最后采用HXS-1000AK型维氏硬度计测量试样的显微硬度，加载压力500g（4.9N），时间为15s，选取5个不同的位置，每个位置测3组，对测试结果剔除超大误差后求得算术平均值作为试样的显微硬度值。

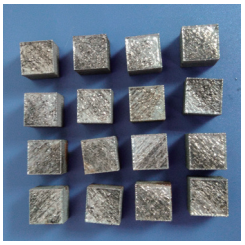

图1　硬度试样

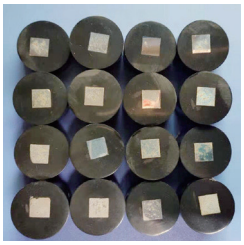

图2　镶嵌后的硬度试样

3　结果与分析

（1）工艺参数对显微硬度的影响规律　测得试样显微硬度值见表3。

表3　试样的显微硬度值

序号	激光功率/W	扫描速度/mm·s^{-1}	显微硬度HV
1	140	240	518
2	140	280	556
3	140	320	506
4	140	360	467
5	160	240	575
6	160	280	588
7	160	320	556
8	160	360	497
9	180	240	610
10	180	280	608
11	180	320	574
12	180	360	532
13	200	240	585
14	200	280	602
15	200	320	570
16	200	360	538

激光功率和扫描速度变化对显微硬度的影响如图3所示。

选区激光熔化成形过程中，金属粉末熔化、凝固过程速度极快（10^5~10^8K/s），过冷度较大，成形件晶粒尺寸极小（1μm左右）。晶粒大小是影响金属件显微硬度的重要因素之一，霍尔佩奇关于显微硬度与晶粒大小的公式[15]为

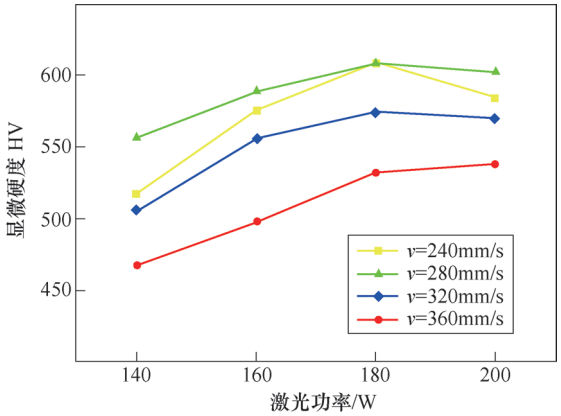

图3　不同工艺参数下试样的显微硬度

$$H=C(\sigma_0+kd^{1/2}) \quad (1)$$

式中　H——显微硬度（HV）；

C——常量（HV·MPa^{-1}）；

d——晶粒直径尺寸（μm）；

σ_0，k——与晶体有关的常数。

当扫描速度为360mm/s时，随着激光功率的增大，成形区域内单位时间接收到的激光能量变大，金属粉末熔化、凝固过程中的过冷度增大，晶粒变小[16, 17]，由式（1）可知，细晶强化作用使得显微硬度值逐渐变大。当扫描速度为240mm/s、280mm/s和320mm/s时，激光功率增大过程中超过某一限值后，由于激光能量密度过大，造成熔池温度过高、持续时间增长，晶粒呈粗化趋势[18, 19]，此时由式（1）可知，随着激光功率的增大，显微硬度值先增大后减小。

（2）工艺参数到显微硬度的预测模型　结合激光功率和扫描速度对4Cr5MoSiV1钢试样显微硬度影响的变化规律，采用多项式回归的方法求解工艺参数到显微硬度的预测模型[20]，初步选用二元二次多项式回归模型，即

$$H=\beta+\beta_1P+\beta_2v+\beta_{11}P^2+\beta_{22}v^2+\beta_{12}Pv \quad (2)$$

式中　H——显微硬度（HV）；

P——激光功率（W）；

v——扫描速度（mm/s）；

β、β_1、β_2、β_{11}、β_{22}和β_{12}——常数。

回归通过R语言逐个引进变量后得到回归方

程，其统计检验量F=39.72，取显著性水平α为0.05，查表得$F_{0.05}$（5，10）=3.33，可见回归方程高度显著，回归方程为：

$$H=-1096+11.25P+4.822v-3.094\times10^{-2}P^2-9.297\times10^{-3}v^2+1.100\times10^{-3}Pv \quad (3)$$

式中 H——显微硬度（HV）；

P——激光功率（W）；

v——扫描速度（mm/s）。

对回归方程进行偏回归平方和、残差平方和以及偏f值进行计算，得方差分析，见表4。

表4 方差分析

变量	偏回归平方和	残差平方和	偏F值
P	9073.8	17641.9	7.20
$v\|P$	10351.3	7290.7	18.46
$P_2\|P$，v	2450	4840.4	6.07
$v_2\|P$，v，P_2	3540.3	1300.2	29.95
$Pv\|P$，v，P_2，v_2	19.4	1280.8	0.15

取显著性水平α为0.05，经查表得到临界值$F_{0.05}$（1，14）=4.60、$F_{0.05}$（1，13）=4.67、$F_{0.05}$（1，12）=4.75、$F_{0.05}$（1，11）=4.84、$F_{0.05}$（1，10）=4.96，由表4可知激光功率P、扫描速度v、激光功率二次项P^2和扫描速度二次项v^2的系数通过了显著性检验，激光功率和扫描速度交互项Pv的系数未能通过显著性检验。

剔除变量Pv后，再次进行回归分析，得到统计检验量F=23.45，取显著性水平α为0.05，对应$F_{0.05}$(4,11)=3.36，可见回归方程高度显著，再次校验各变量的系数均通过显著性检验，因此得到优化后的工艺参数到显微硬度预测模型为：

$$H=-1152+11.58P+5.009v-3.094\times10^{-2}P^2-9.297\times10^{-3}v^2 \quad (4)$$

式中 H——显微硬度（HV）；

P——激光功率（W）；

v——扫描速度（mm/s）。

（3）显微硬度预测模型的验证 计算二元函数的最大值，得到P=186.22W、v=248.37mm/s时，H取最大值602.07HV。采用（P=186.22W，v=248.37mm/s）、（P=150W，v=248.37mm/s）、（P=186.22W，v=340mm/s）3组工艺参数成形硬度试样（其余试验条件保持不变），测得试样显微硬度值分别为612HV、547HV、571HV，与预测值相对误差分别为1.65%、2.22%、2.00%，在一定程度上验证了工艺参数到显微硬度预测模型的准确性。

4 结束语

1）选区激光熔化成形4Cr5MoSiV1钢显微硬度的变化规律为：当扫描速度为360mm/s时，随着激光功率的增大，显微硬度呈逐渐增大趋势；当扫描速度为240mm/s、280mm/s和320mm/s时，随着激光功率的增大，显微硬度呈先增大后降低。

2）通过多项式回归得到的工艺参数到显微硬度的预测模型如式（4）所示，经验证模型的准确性较好，在一定程度上反映了激光功率和扫描速度与成形件显微硬度之间的定量关系。

参考文献：

[1] 郭绍庆，刘伟，黄帅，等.金属激光增材制造技术发展研究[J].中国工程科学，2020，22（3）：56-62.

[2] 韩彦龙.增材制造技术进展与技术优势研究[J].承德石油高等专科学校学报，2020，22（3）：49-52.

[3] 乐方宾.金属材料增材制造研究与应用[J].江西科学，2020，38（2）：157-262.

[4] 王勇，周雪峰.激光增材制造研究前沿与发展趋势[J].激光技术，2021，45（4）：475-484.

[5] 周成侯，李蝉，吴王平，等.金属材料增材制造技术[J].金属加工（冷加工），2016（S1）：879-883.

[6] 马明明，陈贞韬.激光选区熔化成形受电弓滑板连接座工艺与性能研究[J].金属加工（热加工），2020（10）：43-47.

[7] 孙小峰，荣婷，黄洁，等.激光增材制造技术在航空制造领域的研究与应用进展[J]. 金属加工（热加工），2021（3）：7-14.

[8] 卢秉恒.增材制造技术——现状与未来[J].中国机械工程,2020，31（1）：1-2.

[9] 程锦泽.大尺寸金属3D打印制造装备激光加工工艺技术研究与探讨[J].金属加工（热加工），2020（8）：6-8.

[10] 孙小峰，黄洁，荣婷，等.Ti-6Al-4V合金激光选区熔化及热处理性能影响研究[J].金属加工（热加工），2021（8）：1-6.

[11] 杨胶溪，吴文亮，王长亮，等.激光选区熔化技术在航空航天领域的发展现状及典型应用[J].航空材料学报，2021，41（2）：1-15.

[12] JIA H L，SUN H，WANG H Z，et al.Scanning

（下转第19页）

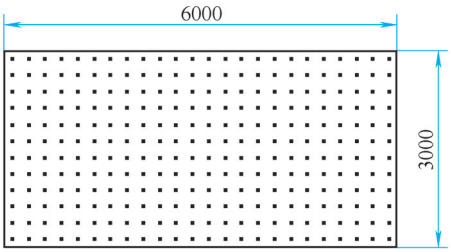

图12 不锈钢覆面板垫块分布

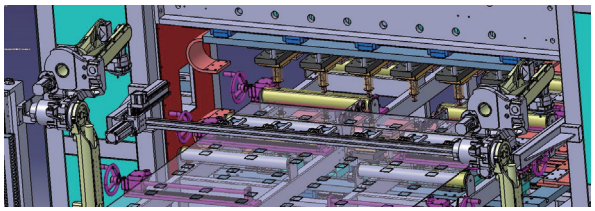

图13 自动上料与焊接部位

4.2 自动电阻焊工艺研究方向

一张覆面板上需要焊接约300块垫块，每个垫块需焊接2~4个焊点，且电阻焊接过程基本为全自动，因此如何保证焊点的焊接质量，顺利实现垫块的不间断量产成为关键技术。

分析认为，一方面需继续开展电阻焊接头性能与氩弧焊性能的进一步研究，如接头其他力学性能、耐腐蚀性能，从结构设计层面更好地实现电阻焊替代氩弧焊的可行性；另一方面，需继续开展电阻焊工艺试验，掌握影响电阻焊接头量产的关键因素。例如：设计正交试验方案，通过大量试验，得到最优化的焊接参数，以使电阻焊接头的性能具有较大的裕度，从而保障电阻焊焊接质量的可靠性、稳定性；或者，开展电阻焊超声波检测技术研究，通过建立电阻焊超声波信号特征与电阻焊熔核抗拉强度、抗剪力的映射关系等方法，检验电阻焊的质量；还可在电阻焊设备上开发焊点质量反馈系统装置，生产时可实时反馈每个焊点质量，当出现异常时及时停机止损。

5 结束语

1）从电阻焊技术原理进行分析，同时通过初步试验，证明了采用电阻焊方法的接头抗剪力与氩弧焊的相当，生产效率可达到手工氩弧焊的近百倍，具有明显的优势。

2）分析了垫块采用电阻焊的关键技术，包括自动电阻焊设备的研制，以及覆面板批量生产时焊点质量的保证。

后续有待进一步研究电阻焊接头性能以及可靠的电阻焊工艺，继续推进不锈钢垫块电阻焊在现场的实际应用，促进我国核电关联产业建设的极大发展。

参考文献：

[1] 胡旭.机械设计原理及其工程实践研究[M].北京：中国原子能出版社，2019.

[2] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册·第2卷：材料的焊接[M].北京：机械工业出版社，2001.

[3] 王宜文.22MnB5/TRIP590不等厚异质高强钢电阻点焊接头组织性能研究[D].济南：山东建筑大学，2019.

MW 20210915

（上接第13页）

strategy in selective laser melting (SLM)：a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2021，113（9）：2413-2435.

[13] 龙伟民.材料力学性能测试手册[M].北京：机械工业出版社，2014.

[14] 陈帅.选区激光熔化成形火炮备件的组织性能与工艺优化研究[D].石家庄：陆军工程大学，2020.

[15] WANG Y，WANG YT，LI RD，et al.Hall-Petch relationship in selective laser melting additively manufactured metals: using grain or cell size[J]. Journal of Central South University，2021，28（4）：1043-1057.

[16] WANG J T，LIU S P，FANG Y P，et al.A short review on selective laser melting of H13 steel[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2020（9）：1-14.

[17] 马晓坤.3D打印技术的发展及应用现状[J].化学工程与装备，2020，22（3）：49-52.

[18] 程灵钰，何召辉，孙靖.激光选区熔化成形316L不锈钢组织和力学性能分析[J].激光与红外，2021，51（2）：171-177.

[19] JIRI H，MAREK P，JAKUB M，et al.Influence of scanning strategy parameters on residual stress in the SLM process according to the bridge curvature method for AISI 316L stainless steel[J].Materials，2020，13（7）：1-10.

[20] 何晓群.应用回归分析（R语言版）[M].北京：电子工业出版社，2017.

MW 20210713