

GH4033 基材相对稀释率的仿真研究

陈 刚¹ 黎向锋¹ 左敦稳¹ 王宏宇^{1,2} 张 敏^{1*}

(¹ 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016; ² 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 在研究多道激光熔覆稀释率时提出基材相对稀释率概念及其计算公式, 并从冷却时间、搭接中心偏距和搭接率研究第一道对第二道的热效应以及基材相对稀释率。结果表明, GH4033 在自然冷却情况下需要经历较长的冷却时间(360 s)才能明显减小第一道对第二道的热效应, 基材相对稀释率才会接近 0; 搭接中心偏距越大, 基材相对稀释率越小; 多道激光熔覆比较理想的搭接率为 50%。

关键词 激光技术; 多道激光熔覆; 稀释率; 有限元; GH4033; 涂层

中图分类号 TF124.85 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP48.011601

Simulation on Substrate Relative Dilution Ratio for GH4033

Chen Gang¹ Li Xiangfeng¹ Zuo Dunwen¹ Wang Hongyu^{1,2} Zhang Min^{*1}

(¹ College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
² School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The concept of relative dilution ratio of the substrate and its calculation formula are suggested in studying multi-pass laser cladding dilution ratio. And the heat effects of the first pass on the second pass and relative dilution ratio of the substrate are discussed in the respective of the cooling time, overlapping center offset and overlapping ratio. For the GH4033 substrate, it takes 360 s to decrease the heat effect of the first pass on the second pass markedly and to make relative dilution ratio of the substrate near to zero. The larger the overlapping center offset, the less the relative dilution ratio of the substrate is. Overlapping ratio of 50% is appropriate for multi-pass laser cladding.

Key words laser technique; multi-pass laser cladding; dilution ratio; simulation; GH4033; coating

OCIS codes 160.3900; 140.6810; 350.5030; 350.3850

1 引 言

镍基高温合金 GH4033 常用在航空发动机的第三级涡轮叶片上^[1], 在 GH4033 上激光熔覆一层 NiCoCrAlY 合金可以增强其抗高温抗热振及抗高温氧化性能^[2,3]。稀释率^[4]代表着基体受破坏的程度^[5], 研究表明基材再次凝固得到的微观组织与熔化前的有明显不同^[6], 其性能与熔化前的也有所不同。激光熔覆制备大面积涂层时, 基材相对稀释率表示了前后两道激光熔覆之间基材被稀释部分的比例关系, 反映了前一道对后一道的稀释率的影响程度, 目前还未见基材相对稀释率的报道^[7,8]。本文将利用有限元技术来仿真多道的粉末预置式激光熔覆温度场^[9], 分别讨论了冷却时间、搭接中心偏距和搭接率对基材相对稀释率的影响, 以及分析了第一道对第二道的热效应。

2 多道激光熔覆

2.1 物性参数

对于粉末预置式激光熔覆, 后一道待熔化的材料与前一道已熔化的材料都传递热量和吸收热量。并且前一道已熔化和后一道待熔化的材料组织不同, 即前者材料组织是冶金状态, 后者是粉末状态。在相同温度

收稿日期: 2010-09-19; **收到修改稿日期:** 2010-09-25

基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(200902011)和航空科学基金(2010ZE52056)资助课题。

作者简介: 陈 刚(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事涂层方面的研究。E-mail: junioreaglet@163.com

导师简介: 黎向锋(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事智能制造等方面的研究。E-mail: fxli@nuaa.edu.cn

* **通信联系人。** E-mail: nuaazm@126.com

下,已熔化与未熔化材料的物性参数需要通过麦氏方程进行折算^[10],其已融化状态的物性参数来自于文献[11]。基材 GH4033 的物性参数不需要进行折算,其密度、比热容和热导率来自文献[12]。

2.2 仿真模型

仿真的几何模型尺寸:粉末片尺寸 30 mm×6 mm×0.4 mm;基材的尺寸 30 mm×6 mm×4 mm。粉末片模型和部分的基材采用映射网格划分,基材的另一部分采用自由网格划分,划分后的有限元模型如图 1。坐标的原点设置在粉末片和基材的交界面的顶点。

2.3 热效应

研究表明第一道激光熔覆起始位置的不同会导致不同的熔化截面形貌,这是由热环境的改变所引起。用搭接中心偏距来调节第一道激光熔覆的起始位置,以研究不同换热环境对稀释率的影响。

熔覆层通过热传导把激光能量传递至基材内部,同时基材与周围环境的接触表面存在着热交换,最终把原来集中在较小区域的热量分散到整个基材内。由于基材的热导率以及换热环境的限制,在激光熔覆后的较短时间内,基材都会处于较高温,从而导致前一道激光熔覆对后一道有明显的热效应。

2.4 基材相对稀释率及其影响因素

稀释率越低,基材受到的破坏程度就越小。由于前一道对后一道有明显的热效应,后一道稀释率较前一道就会变大,从而难以保证前后两道稀释率的均匀性。

为了比较前后两道的基材被稀释的面积,提出了基材相对稀释率。基材相对稀释率是后一道的基材被稀释部分与前一道的变化程度,后一道被稀释的部分不包括后一道中再次熔化的前一道已熔化部分,如图 2 所示。现取两道激光熔覆来说明基材相对稀释率 ΔK , ΔK 越小,后一道相对于前一道的稀释率变化就越小,理想的效果是 ΔK 接近 0,即第二道熔化的未熔化基材面积与第一道已熔化的基材面积相等。

$$A = A_1 + A_2, \quad (1)$$

$$\Delta K = (A_2 - A_1)/A_1 = (A - 2A_1)/A_1, \quad (2)$$

式中 A_1 为第一道扫描结束后基材截面内熔化区域的面积, A_2 为在原未熔化区域中第二道熔化的面积, A 为两道熔化的总面积。

激光熔覆实验表明,影响基材相对稀释率的因数有搭接率、冷却时间和搭接中心偏距(即搭接中心线与熔覆材料中心线的偏距),通过改变这三个因数能够控制下一道激光熔覆的稀释率,从而实现基材相对稀释率控制。

2.5 多道激光熔覆的安排

激光熔覆的工艺参数:功率为 1.25 kW,光斑直径为 2 mm,扫描速度为 400 mm/min。基材尺寸为 30 mm×6 mm×4 mm。根据该工艺参数进行激光熔覆实验,得到单道次的熔覆实物截面,如图 3 所示。可见基材熔化区域与未熔化的组织相差比较大,所以减小激光重熔对已有组织的破坏至关重要。

进行两道激光熔覆温度场仿真,两道之间冷却时间 Δt 设置为 180 和 360 s,以考察不同冷却时间对两道基材相对稀释率的影响,从而为获得理想的基材相对稀释率提供一定指导。

图 4 是多道扫描安排情况,显示了搭接长度 d 和搭

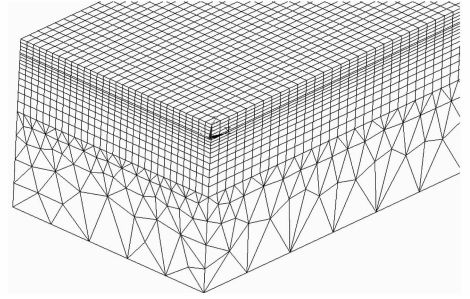


图 1 多道的仿真模型

Fig. 1 Simulation model for multi-pass

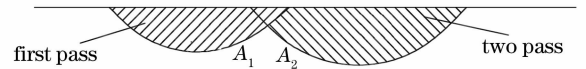


图 2 A_1 和 A_2 的示意图

Fig. 2 Sketch maps of A_1 and A_2

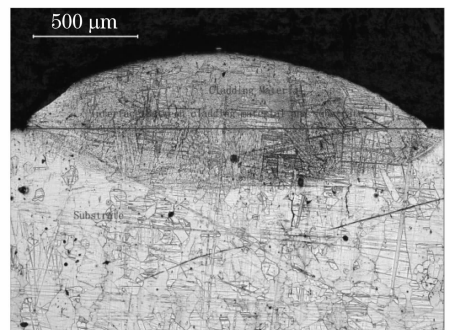


图 3 激光熔覆的实物截面

Fig. 3 Laser cladding object section

接中心偏距 e (为搭接区域中心线与熔覆材料中心线的偏距) 的具体位置, 图中的熔覆材料中心线为熔覆材料样件的 X 向对称中心线。设置搭接长度 d 分别为 0.8, 1 和 1.2 mm, 搭接率 η 为搭接长度除以光斑直径, 则对应的 η 分别为 40%, 50% 和 60%; 搭接中心偏距 e 设置成 0, 0.5 和 0.75 mm。

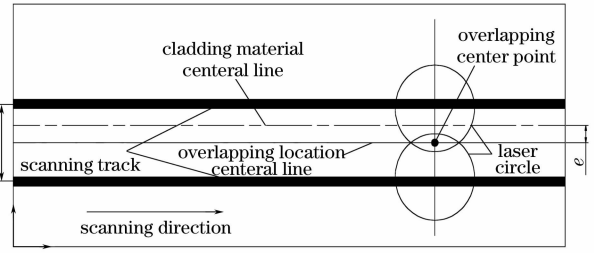


图 4 多道扫描安排

Fig. 4 Arrangement of multi-pass laser cladding

3 结果分析

3.1 冷却时间

选取 $\eta=50%$ 和 $e=0$ mm, 考察冷却时间 Δt 分别为 180 和 360 s 时基材相对稀释率的变化, 图 5 是 $X=15$ mm 基材截面的熔化区域和未熔化区域的 ANSYS 仿真结果(以下所取截面皆为 $X=15$ mm)。根据结果可计算出: $\Delta t=180$ s 时, $A_1=0.3854$ mm², $A=1.1106$ mm², 则 $\Delta K=88.17%$; $\Delta t=360$ s 时, $A_1=0.3854$ mm², $A=0.9670$ mm², 则 $\Delta K=47.62%$ 。即在此种条件下后一道的稀释率相对于前一道有较大的变化, 前一道对后一道的热效应非常明显。延长冷却时间虽然能降低前一道对后一道的热效应, 但过长的冷却时间不适合大面积涂层的制备, 改善基体的换热环境可以减小前一道对后一道的热效应, 并且可以极大地减少冷却时间, 改善机体换热环境的方法可以是强制冷却。

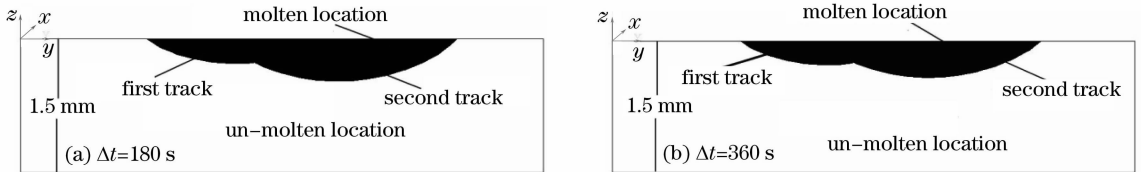


图 5 在不同冷却时间下基材的熔化区域与未熔化区域

Fig. 5 Molten location and the un-molten location for different cooling time

3.2 搭接中心偏距

图 6, 7 显示了在 $\eta=50%$, $\Delta t=360$ s 时不同 e 的基材熔化区域与未熔化区域的分布情况。对于 $e=0.5$ mm, $A_1=0.4804$ mm², $A=0.9759$, 则 $\Delta K=3.11%$; 对于 $e=0.75$ mm, $A_1=0.6159$ mm², $A=1.0806$ mm², 则 $\Delta K=-24.5%$ 。可见, 对于 $\eta=50%$, 从基材相对稀释率和基材的熔化截面形貌看, $e=0.5$ mm 是比较好的搭接中心偏距。

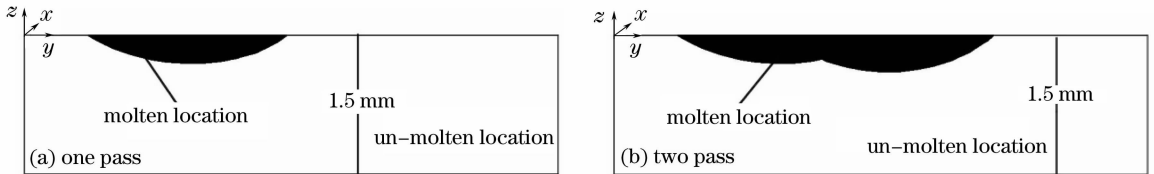


图 6 搭接中心偏距 $e=0.5$ mm

Fig. 6 Overlapping center offset $e=0.5$ mm

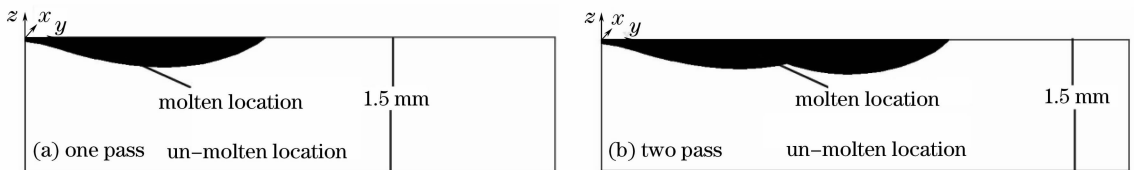


图 7 搭接中心偏距 $e=0.75$ mm

Fig. 7 Overlapping center offset $e=0.75$ mm

随着 e 的变大, 第一道激光熔覆后基材的熔化面积也变大, 第二道的稀释率相对于第一道的在减小, 第

一道对第二道的热效应也变小。这是因为熔道越靠近基材的外表面,单位时间内基材向空气传递的热量变少,热量主要集中在基材内部,导致基体熔化的面积变大,从而使前一道对后一道热效应变小。

3.3 搭接率

图8是在 $e=0.5\text{ mm}$, $\Delta t=360\text{ s}$ 时不同搭接率的熔化区域与未熔化区域分布图。对于 $\eta=40\%$, $A_1=0.5958\text{ mm}^2$, $A=1.1458\text{ mm}^2$,则 $\Delta K=-3.12\%$;对于 $\eta=60\%$, $A_1=0.5186\text{ mm}^2$, $A=1.0979\text{ mm}^2$,则 $\Delta K=11.72\%$ 。图9是在基材表面上 $X=15\text{ mm}$ 处节点最高温度值沿 Y 向坐标的分布。图8与图6(b)比较可知,搭接率为40%和50%时 ΔK 都接近0,但是 $\eta=50\%$ 时搭接区域节点的最高温度变化最平缓如图9,所以 $\eta=50\%$ 是多道激光熔覆比较理想的搭接率。

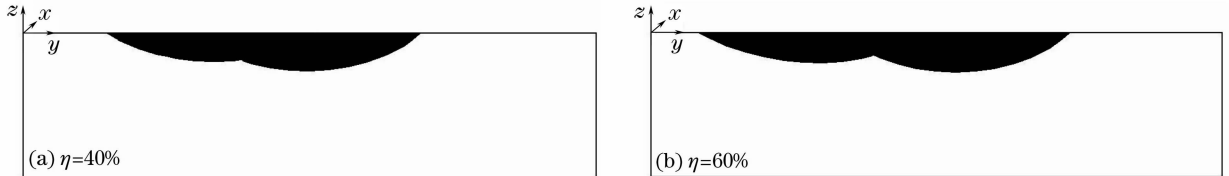


图8 不同搭接率的两道后截面形貌

Fig. 8 Section feature of two passes for different η

4 结 论

在研究多道激光熔覆稀释率变化时,提出相对稀释率概念及其计算公式,从冷却时间、搭接率和从搭接率的变化率来考察第一道对第二道的热效应以及基材相对稀释率,得出的结论如下:

1) 对于GH4033,当搭接率为50%、搭接中心偏距为0时,需要冷却360 s才能使基材相对稀释率接近0。冷却时间越长,第一道对第二道的热效应就越小,但延长冷却时间对大面积涂层制备并不可取,所以增加基体的表面换热效率比较合适。

2) 搭接中心偏距的改变对第一道和第二道都会产生影响,其值越大,第一道熔化区域的面积就越大,基材相对稀释率却越小。对于文中所述的熔覆基材尺寸,搭接中心偏距为0.5 mm比较合适。

3) 对于搭接中心偏距为0.5 mm、冷却时间为360 s,搭接率为50%是多道激光熔覆比较理想的搭接率。

参 考 文 献

- Wang Hong, Zuo Huafu, He Xun *et al.*. Failure analysis of 3rd turbine blade of aero-engine[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2007, **2**(1): 24~28
王红,左华付,何训等. 某航空发动机第三级涡轮叶片失效分析[J]. *失效分析与预防*, 2007, **2**(1): 24~28
- Wang Hongyu, Zuo Dunwen, Yan Jing *et al.*. Effects of nanometer Al_2O_3 particles on oxidation behaviors of laser cladding low Al NiCoCrAlY coatings[J]. *Oxidation of Metals*, 2010, **74**(1-2): 49~60
- Sun Ronglu, Liu Zhiyong, Niu Wei *et al.*. Influence of Ti substrate dilution on the microstructure of NiCrBSiC laser clad coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **35**(11): 1741~1745
孙荣禄,刘智勇,牛伟等. 钛合金稀释作用对NiCrBSiC激光熔覆层微观结构的影响[J]. *中国激光*, 2010, **35**(11): 1741~1745
- Wang Hongyu, Zuo Dunwen, Li Xiangfeng *et al.*. Thermal shock behaviors of NiCoCrAlY cladding coatings strengthened by nano-SiCp on Ni-based superalloys[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, **431~432**: 5~8
- Guiping Zhao, Chongdu Cho, Jae-Do Kim. Application of 3-D finite element method using Lagrangian formulation to dilution control in laser cladding process[J]. *Mechanical Sciences*, 2003, **45**(5): 777~796
- Yang Jiaoxi, Wang Zhiyong, Zuo Tiechuan. High power diode laser cladding aggregate tungsten carbide-Ni based superhard composites[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3262~3266
杨胶溪,王智勇,左铁钊. 高功率半导体激光熔覆聚状WC-Ni基超硬复合材料[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3262~3266

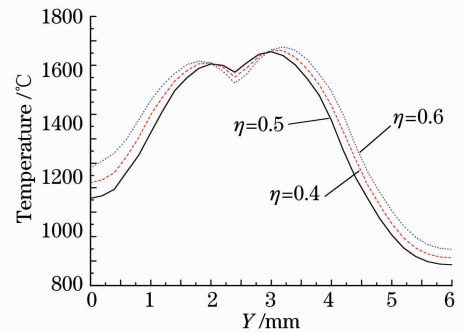


图9 在基材表面上 $X=15\text{ mm}$ 处节点最高温度值沿 Y 向的分布

Fig. 9 Max temperatures of nodes of $X=15\text{ mm}$ on the substrate surface distribute in the Y direction

- 7 Yanxiang Li, Jian Ma. Study on overlapping in the laser cladding process[J]. *Surface & Coating Technology*, 1997, **90**(1-2): 1~5
- 8 Kai Zhang, Weijun Liu, Xiaofeng Shang. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(3): 549~557
- 9 Zhong Rutao, Xiong Zheng. Research on continuous/pulse laser cladding superalloy K403[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 852~857
钟如涛,熊 征. 连续/脉冲 CO₂ 激光熔覆高温合金 K403[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 852~857
- 10 Liu Zhidong, Chen Yong, Zhu Jun *et al.*. Research on temperature field numerical simulation and performance of laser re-melted Ni-coating oriented by jet electroforming on 45 steel[J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(2): 104~109
刘志东,陈 勇,朱 军等. 45 钢喷射电镀 Ni 层激光重熔温度场数值模拟及其性能研究[J]. *应用激光*, 2007, **27**(2): 104~109
- 11 K. A. Khor, Y. W. Gu. Effects of residual stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO₂/NiCoCrAlY coatings[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, **277**(1): 64~76
- 12 Committee of Engineering Material Practical Manual. Engineering Material Practical Manual (Volume II)[M]. Beijing: Chinese Standard Publisher, 1989. 259~276
工程材料实用手册编委会. 工程材料实用手册(第 2 卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1989. 259~276