

K418 合金和 42CrMo 钢激光焊焊缝的微观组织

刘秀波^{1,2}, 虞钢², 庞铭², 宋天麟³, 范莉³, 周晓京³

(1. 苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;
3. 苏州大学应用技术学院, 江苏 苏州 215021)

摘要:采用透射电镜及附带能谱 (TEM-EDS) 对 K418 高温合金涡轮盘和 42CrMo 合金钢转轴激光焊焊缝的微观组织进行了分析。结果表明:焊缝主要由树枝状非平衡凝固的 FeCrNiC () 固溶体组成,此外,还有少量细小、弥散的 Ni₃Al 相、Laves 颗粒和少量 MC 碳化物分布在树枝晶之间区域;根据热力学原理对形成这一组织特征的原因进行了简要讨论。

关键词:激光焊接; 焊缝; 微观组织; 透射电镜

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6264(2009)06-0126-04

Microstructure of laser welded seam of cast Ni-base superalloy K418 and 42CrMo steel

LIU Xiu-bo^{1,2}, YU Gang², PANG Ming², SONG Tian-lin³, FAN Li³, ZHOU Xiao-jing³

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Applied Technology College, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: Microstructure of laser welded seam of K418 superalloy turbo disk and alloy steel 42CrMo shaft was characterized by transmission electron microscopy (TEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). Results show that the laser welded seam has non-equilibrium solidified microstructure consisting of FeCrNiC () austenite solid solution dendrites as the dominant and some fine and dispersed Ni₃Al phase and Laves particles as well as little amount of MC carbides distributed in the interdendritic regions. Mechanism of the formation of the microstructure is briefly discussed based on thermal-dynamics principles.

Key words: laser welding; weld; microstructure; transmission electron microscopy (TEM)

涡轮增压器转子是发动机的核心部件,其质量对发动机的寿命有很大影响。它通常是由铸态的 K418 镍基高温合金涡轮盘和调质状态的 42CrMo 合金钢转轴焊接而成,二者的热物理性能和高力学性能差异很大^[1],属于典型的异种材料焊接。目前对 K418 和 42CrMo 焊接的主要方法是电子束焊接和摩擦焊,但电子束焊接需要真空环境且产生有害的 X 射线,摩擦焊接头常发生低应力破坏和表面缺陷。上述部件的连接问题一直困扰着我国的涡轮增压器研制工作者^[2-3]。

激光焊接具有功率密度高、焊接速度快、焊接深宽比大、工件热变形小和容易实现自动化等特点,且

不需要真空环境,不产生 X 射线,特别适合焊接特殊难焊的同种和异种金属材料^[4-10]。特别是近十几年来,在 Nd:YAG (掺钕钇铝石榴石) 激光加工技术中采用了光纤传输技术,使激光焊接技术获得了更为广泛的推广与应用^[11]。

为了有效探索焊接上述两种材料的新途径,为最终提高发动机涡轮增压器转子的质量和整体寿命,前期已经进行了 K418 和 42CrMo 异种金属材料平板^[12-13]以及涡轮盘和转轴实物零件的激光焊接试验^[14],并对焊接接头的微观组织和力学性能进行了初步分析。但是仍然存在以下三个问题:一是由于 Ni₃Al () 增强相的量少,且与 Laves 相和 MC 碳化物的分布重叠,通常很难精确标定其在 SEM(扫描电镜)上的位置,尽管 XRD(X 射线衍射)分析结果显示它的存在;二是由于 Laves 相复合了多种重合合金元素且结构复杂^[14];三是根据标准的 JCPDS 卡片数据,焊缝中可能存在的各种物相的衍射缝的晶面间距接近,且各物相的强反射几乎互相重叠,激光焊接固有的非平衡过程还将导致扩展固溶和点阵畸变。透射电镜

收稿日期: 2008-10-14; 修订日期: 2009-04-09

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009134); 苏州大学引进人才科研启动基金(Q4117801)

作者简介: 刘秀波(1968—),男,苏州大学机电工程学院副教授,博士,主要从事材料科学与激光加工等领域的科研与教学工作,电话: 0512-67165607, E-mail: liubobo0828@yahoo.com.cn。

(TEM) 由于其极强的分辨能力可以对显微组织和晶体结构进行精细表征从而有望澄清上述模糊认识。本文在前述工作的基础上,采用透射电镜及附带能谱(TEM-EDS)进一步对焊接接头的微观结构进行精细表征,以期对上述涡轮盘和转轴实物零件的激光焊接的工艺优化提供有益参考。

1 试验材料及方法

试验设备采用 HL3006D Nd: YAG 固体激光器,额定输出功率为 3kW,光束模式为多模。聚集镜镜头焦距为 200mm,激光从焦点半径 W_0 到光斑半径变为 1.414 W_0 的距离 Z_R 为 1.6mm (瑞利长度),激光在瑞利长度范围内近似平行。侧吹保护气为高纯氩气,侧吹角度为 35° ,侧吹方向和焊接方向相反。K418 涡轮盘和 42CrMo 转轴采用对接,连续激光焊接,中间不留间隙,焊前用丙酮反复清洗待焊零件。由于激光焊接对工作台的精度要求很高,试验中通过千分表调整工作台的水平和垂直精度,使其误差范围在 ± 0.04 mm 内。有关涡轮盘和转轴实物零件激光焊接实验的具体细节,可参考文献[14]。在焊缝中部的典型区域用线切割截取约 0.15mm 的薄片,首先机械减薄至约 50 μ m,然后在型号为 Catan 656 的小冲床上冲出一直径约 3mm 的薄片,最后对该薄片进行离子轰击减薄以制成待观察的样品,TEM 分析在 JEM-2100F (日本电子)场发射透射电镜(附带 EDS)上进行。

2 结果与分析

2.1 焊缝形貌

K418 涡轮盘和 42CrMo 转轴激光焊接焊缝横截面形貌见图 1,可见,由于相对较低的额定功率和零件的厚度较大,没有形成穿透焊接,焊缝顶部存在凹坑,由于 K418 高温合金的热传导系数较低^[1],底部残留金属液滴明显偏向 K418 侧。焊缝中部存在气孔且靠近部分熔化的 42CrMo 合金钢侧,这主要是由于其较高的熔点和较强的热传导能力。作者之前的初步分析表明^[14],焊缝主要由 FeCrNiC () 固溶体、Ni₃Al () 相、Laves 颗粒和少量 MC 碳化物组成。

2.2 微观组织 TEM 分析

对焊缝的 TEM (透射电镜) 及其选区衍射 (SAED) 分析表明,焊缝的主要组分是 γ -FeCrNiC 镍基固溶体,见图 2(a) 和 2(b),对应的 EDS (能量谱仪) 分析结果见表 1。可见,基体中富 Ni、Cr、Fe,考虑到能谱探

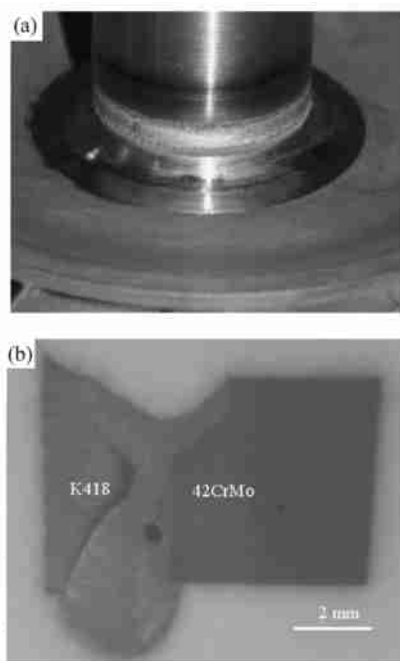


图 1 K418 涡轮盘和 42CrMo 转轴激光焊接焊缝宏观形貌 (a) 和横截面形貌 (b)

Fig. 1 Morphology of the laser-welded seam between K418 superalloy turbo disk and steel 42CrMo shaft^[14]

(a) macrograph; (b) micrograph of cross section of the welded seam

针很难准确地检测到少量 C 的存在,故可以推断本文的 TEM 结果与作者之前的分析结果一致,焊缝的基体是 γ -FeCrNiC 镍基固溶体。

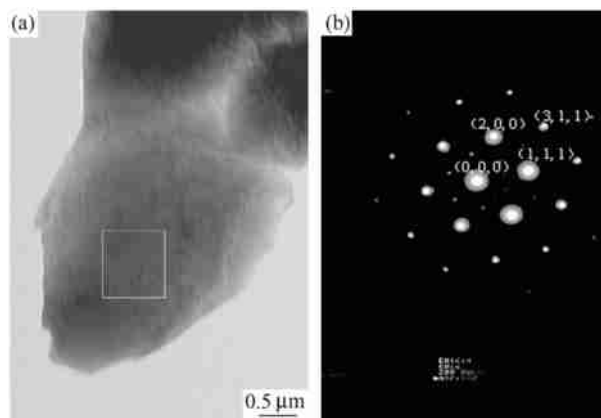


图 2 焊缝基体形貌 (a) 及其选区衍射 (b)

Fig. 2 Morphology of γ -FeCrNiC austenite solid solution dendrite in the weld and corresponding SAED pattern

(a) bright field image; (b) SAED pattern in [011] zone axis

图 3(a) 和 3(b) 是焊缝中 MC 碳化物颗粒的明场相及其选区衍射花样,从图 3 可以看出,该碳化物具有面心立方晶体结构 (fcc)。对应的 EDS 分析结果

(见表1)更进一步证实这些颗粒是 Nb、Ti 富集的 (Ti, Nb)C 碳化物。EDS 同时在检测到一些 Cu 的存在,这是因为样品座是 Cu 网。

表1 焊缝的成分分析 (wt %)
Table 1 EDS analysis results of the laser welded seam zone (wt %)

Major elements	Ni	Fe	Cr	Mo	Al	Nb	Ti	Cu	O
Matrix	45.12	35.49	10.56	—	2.20	—	—	6.63	—
MC carbide	3.79	3.99	5.66	15.44	—	48.29	13.41	9.43	—
Ni ₃ Al	40.02	26.21	8.60	—	12.59	—	—	2.57	10.01
Laves particles	25.46	19.45	7.27	3.90	1.96	15.20	19.46	7.29	—

相, 是大多数镍基高温合金中的主要强化相, 由于激光焊接导致的非平衡快速凝固, 所以其尺寸明显细化 (< 1μm), 同时其数量也由于部分溶解而减少, 但仍可以通过其选区衍射照片和对应的 EDS 分析清楚地鉴别出来, 见图4(b)和表1。

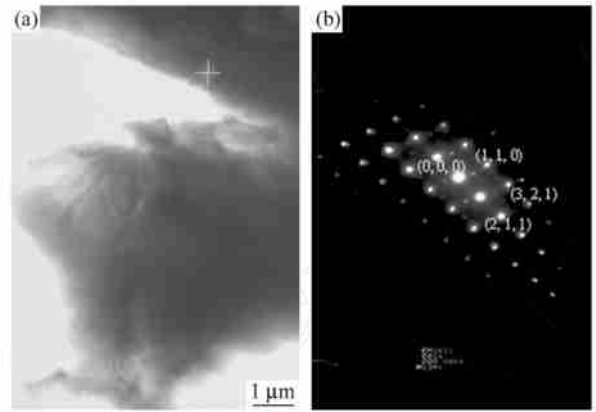


图4 焊缝中 Ni₃Al () 颗粒形貌 (a) 及其选区衍射 (b)
Fig. 4 Ni₃Al phase in the weld (a) bright field image; (b) SAED pattern in [111] zone axis

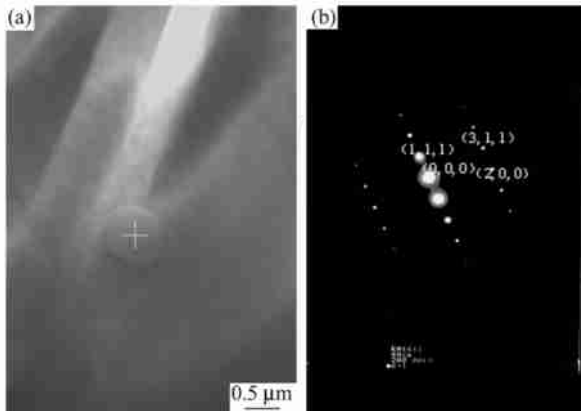


图3 焊缝中 MC 形 (Ti, Nb)C 碳化物形貌 (a) 及其选区衍射 (b)

Fig. 3 TEM image showing morphology of (Nb, Ti)C carbides in the weld and corresponding SAED pattern (a) bright field image; (b) SAED pattern in [011] zone axis

图4(a)是焊缝中弥散的 Ni₃Al () 颗粒的明场

图5(a)是焊缝中弥散的 Laves 颗粒的明场相, EDS 分析表明: 与固溶体基体相比, 其成分富 Nb, Mo, Ti, 贫 Ni, Cr, Fe。该 Nb 富集的颗粒的化学成分近似为 (Fe + Cr + Ni, 56.2 wt %) 和 (Nb + Mo + Ti, 38.5 wt %), 通常具有 (Ni, Cr, Fe)₂(Nb, Mo, Ti) 形分子式以及 MgZn₂ 形密排六方 (hcp) Laves 晶体结构。这一结果与作者之前的研究^[13] 有所不同, 文献[13] 的结果显示 Laves 颗粒 SEM-EDS 分析的化学成分约为 (Fe + Cr + Ni, 70 wt %) 和 (Nb + Mo + Ti, 28 wt %)。分析认为, 导致这一差异可能有两个原因: 第一是文献[13] 焊接的平板厚度是 3.5mm, 所以焊接速度可以在较快的情况下达到穿透焊接, 所以诸如 Nb,

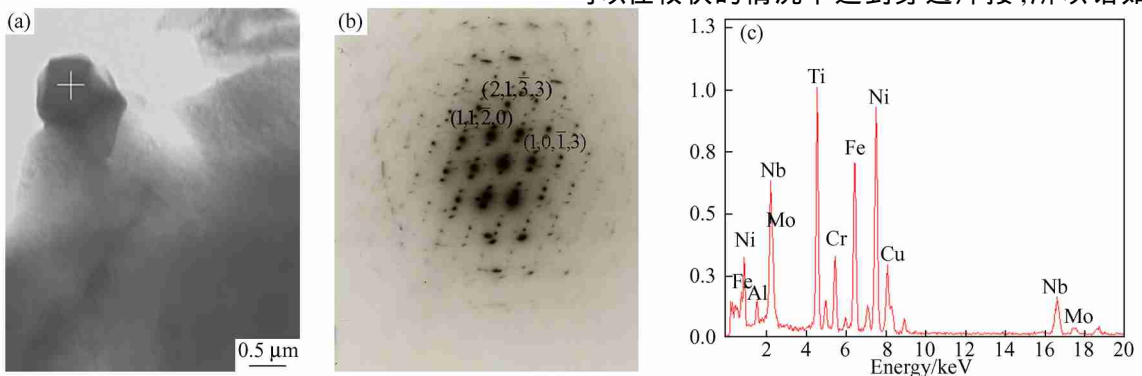


图5 焊缝中 Laves 颗粒形貌 (a) 选区衍射 (b) 及 EDS 分析结果 (c)

Fig. 5 Laves particles in the weld (a) bright field image; (b) SAED pattern in [3301] zone axis; (c) EDS spectrum

Mo 和 Ti 之类的重金属元素没有足够的时间通过扩散而形成偏聚;而偏聚是形成 Laves 相的前提并且是一个取决于时间的现象,所以强烈地受制于焊接速度及其导致的焊接冷却速度,所以那种情况下形成的 Laves 相及 (Nb + Mo + Ti) 的含量相对较少。第二个原因能谱电子探针的分析区域约为 $1\mu\text{m}$,而所形成的 Laves 颗粒的尺寸很小,可能小于或等于电子探针的分析区域,从而导致基体的成分信息混杂进去。但由于 TEM 分析下的放大倍数远高于 SEM,基体的成分信息不再混杂进去,所以电子探针的分析区域和结果相对比较客观准确。

众多研究^[15-17]表明,Laves 相的效应及对力学性能的影响取决于其数量和形态。细小弥散分布时可起强化作用,而当其数量很多时可使材料塑性降低。本文的相关研究^[14]证实,在外应力作用下,Laves 颗粒

与 (Ti, Nb)C 形碳化物的界面可为微裂纹和微孔洞的萌生与扩展提供便利,因此对焊接接头的抗拉强度是有害的。所以,对 Laves 颗粒的形成,包括其形态、分布、尺寸以及含量等需进行严格控制,今后的研究集中在对激光焊接工艺参数的优化以及焊后的热处理,以控制 Laves 颗粒的数量和形态及其对焊接接头微观组织和力学性能的影响。

3 结论

根据上述的 TEM-EDS 分析结果,焊缝主要由树枝状非平衡凝固的 FeCrNiC () 镍基固溶体基体组成,此外,少量细小、弥散的 Ni_3Al () 相、Laves 颗粒和 MC 碳化物分布在树枝晶之间,这一组织特征是由激光焊接所固有的非平衡属性所导致的动力学和热动力学条件决定的。

参 考 文 献

- [1] 谭真,郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
- [2] 杜随更,傅莉,王晋伟,等. K418 高温合金与 42CrMo 钢异种金属摩擦焊接头碳化物带形成机制[J]. 中国有色金属学报,2003,13(2): 323 - 327.
DU Sui-geng, FU Li, WANG Jin-wei, et al. Forming mechanism of carbide band in friction welding joint of superalloy K418 and steel 42CrMo[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 323 - 327.
- [3] 杜随更,傅莉,曹营,等. K418 涡轮盘和 42CrMo 轴摩擦焊接头的强化[J]. 西北工业大学学报,2004,22(1): 112 - 115.
DU Sui-geng, FU Li, CAO Ying, et al. On strengthening the friction welding joint between K418 Turbo disk and 42CrMo shaft[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(1): 112 - 115.
- [4] 虞钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [5] Mai T A, Spowage A C. Characterization of dissimilar joints in laser welding of steel-koval, copper-steel and copper-aluminium[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 374: 224 - 233.
- [6] Ribolla A, Damoulis GL, Batalha GF. The use of Nd: YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164 - 165: 1120 - 1127.
- [7] Kuo T Y, Lin H C. Effects of pulse level of Nd: YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in automotive aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 416: 281 - 289.
- [8] 王红英,李志军. AZ61 镁合金激光焊接接头的组织与性能[J]. 中国有色金属学报,2006,16(8): 1388 - 1393.
WANG Hong-ying, LI Zhi-jun. Microstructure and properties of AZ61 magnesium alloy joints produced by laser welding method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1388 - 1393.
- [9] Idowu O A, Ojo O A, Chaturvedi M C. Effect of heat input on heat affected zone cracking in laser welded ATI Allvac 718Plus superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 454 - 455: 389 - 397.
- [10] Wang A H, Xu H G, Yang P, et al. Nd: YAG laser butt welding of a 12 vol % SiC particulate-reinforced magnesium alloy composite[J]. Materials Letter, 2007, 61: 4023 - 4026.
- [11] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京:中国计量出版社,1998.
- [12] 庞铭,虞钢,刘兆,等. K418 与 42CrMo 异种金属的激光穿透焊接[J]. 中国激光,2006,33(8): 1122 - 1126.
PANG Ming, YU Gang, LIU Zhao, et al. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(8): 1122 - 1126.
- [13] Liu, X B, Yu G, Pang M, et al. Dissimilar autogenous full penetration welding of superalloy K418 and 42CrMo steel by a high power CW Nd: YAG laser[J]. Applied Surface Science, 2007, 253: 7281 - 7289.
- [14] Liu X B, Yu G, Guo J, et al. Research on laser welding of cast Ni-based superalloy K418 turbo disk and alloy steel 42CrMo shaft[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 453: 371 - 378.
- [15] Radhakrishna C, Rao K P. The formation and control of Laves phase in super-alloy 718 welds[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32: 1977 - 1984.
- [16] Janaki Ram G D, Venugopal Reddy A, Prasad Rao K, et al. Control of laves phase in incol718 GTA welds with current pulsing[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(5): 390 - 398.
- [17] Janaki Ram G D, Venugopal Reddy A, Prasad Rao K, et al. Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd: YAG laser welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 73 - 82.