

文章编号: 0258-7025(2001)02-0186-03

DD2 单晶合金激光表面熔凝处理的组织特征及微观偏析行为^{*}

杨 森^{1,2} 黄卫东² 苏云鹏² 周尧和²

(¹清华大学机械系 北京 100084; ²西北工业大学凝固技术国家重点实验室 西安 710072)

提要 利用激光快速熔凝技术对 DD2 单晶合金在超高温梯度 and 快速凝固条件下的组织形态和元素的微观偏析行为进行了研究。实验结果表明激光重熔后微观组织较铸态组织显著细化,枝晶间析出相被抑制,合金元素的微观偏析行为大为改善。

关键词 激光快速凝固,偏析,DD2 单晶

中图分类号: TG 665 文献标识码: A

Microstructure Characteristics and Microsegregation of DD2 Single Crystal by Laser Surface Remelting

YANG Sen^{1,2} HUANG Wei-dong² SU Yun-peng² ZHOU Yao-he²

(¹Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

²State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The microstructure characteristics and microsegregation of DD2 single crystal have been studied under ultra-high temperature gradient and rapid solidification conditions by laser rapid remelting. The experimental results show that the microstructure has been greatly refined after laser rapid remelting, interdendritic precipitation phases remarkably suppressed and the microsegregation substantially improved.

Key words laser rapid solidification, microsegregation, DD2 single crystal

镍基合金作为一种重要的航空发动机叶片材料,人们对其定向凝固组织及性能进行了广泛研究,发现温度梯度的提高对改善合金的持久强度和寿命有重要作用^[1~3]。然而,由于传统的定向凝固技术所能达到的温度梯度有限,导致构件形成粗大的枝晶组织,并伴随严重的枝晶间元素偏析,致使镍基合金的优良性能难以充分发挥。

激光表面熔凝处理作为一种可控性极强的凝固技术在凝固理论研究和材料的表面改性中发挥了重要作用^[4~6]。在激光表面快速熔凝时,凝固界面的温度梯度高达 10^3 K/mm,凝固速度高达每秒数米。由于从熔池底部到顶部有很高的温度梯度存在,使得凝固组织从底部向上定向生长。

本文利用激光快速熔凝技术研究 DD2 单晶合金在超高温梯度和快速凝固条件下的微观组织特征及元素的微观偏析行为。

1 实验方法

实验用材料为 DD2 单晶合金,其成分为 (wt-%): 5.6Al-8Cr-5Co-6Mo-1Ti-8W-6Ta, C < 0.2, 其余为 Ni。用线切割法把试样加工成 30 mm × 5 mm × 5 mm 的试块。用 500# 砂纸轻轻打磨试样的表面,并用丙酮清洗,以使试样表面具有相同的状况。利用展宽的激光束(2 mm × 5 mm)对试样表面进行重熔,激光器为 RS850 型 5 kW CO₂ 激光器。实验过程中吹入氩气进行保护,以免试样表面氧化。工艺参数为:激光器输出功率 $P = 3.5$ kW,扫描速度 $V_b = 24.1$ mm/s。利用 Leica Quantinet500 定量金相显微镜, S-2700 扫描电镜对 DD2 合金激光定向凝固前后

* 国家自然科学基金(59771054)资助项目。

收稿日期:1999-09-16;收到修改稿日期:2000--

的组织形态及尺度特征进行分析研究。用 JSM-5800 型电子探针测试微区成分,测试区域如图 1 所示,偏析比 SR 由下式计算

$$SR = \frac{\text{枝(胞)晶间最大(最小)溶质含量}}{\text{枝(胞)晶干最小(最大)溶质含量}} \quad (1)$$

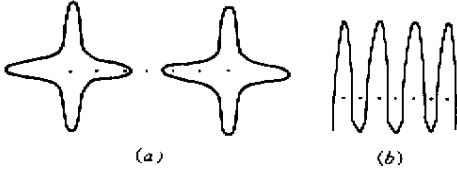


图 1 微区成分测试区域示意图

(a) 铸态枝晶组织 (b) 激光重熔后胞晶组织

Fig.1 Schematic diagrams of the measured region

(a) in the as-cast microstructure ;

(b) in the laser resolidified fine cellular/dendrite

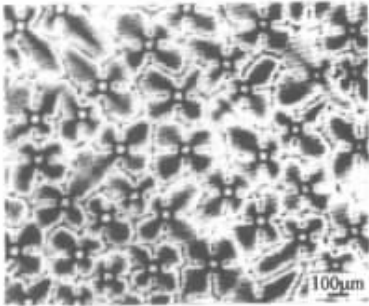


图 2 DD2 单晶的铸态组织

Fig.2 As-cast microstructure of DD2 single crystal

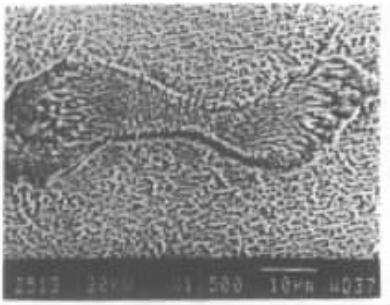


图 3 枝晶间 γ/γ' 共晶

Fig.3 The coarse blocky γ/γ' eutectic in interdendrite zone

2 实验结果与分析

2.1 微观组织结构特征

图 2 是 DD2 单晶合金的铸态组织照片,它由 100 方向定向生长的粗大的柱状晶组成,二次臂十分发达,其平均一次间距和二次间距分别为 $250 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$,在枝晶间存在块状的 γ/γ' 共晶以及一定数量的纤维空洞(见图 3)。图 4 是经激光定向凝固

后的显微组织的扫描电镜照片。在熔池底部有一白亮带,宽度约为 $5 \mu\text{m}$,随着离熔池底部距离的增加,组织逐步转变为胞晶,到熔池中部转变为枝晶,这是由于随着离熔池底部距离的增加固液界面的温度梯度逐渐减小而生长速度逐渐增大的结果。

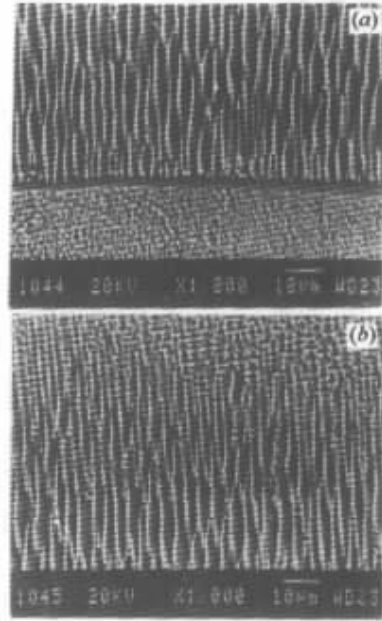


图 4 激光重熔后熔池中的定向凝固组织

(a) 熔池底部 (b) 熔池顶部

Fig.4 Unidirectional solidified microstructure after laser remelting

laser remelting

(a) bottom of the molten pool ;(b) top of molten pool

根据 Chalmers 等的成分过冷理论^[7](CS 理论): 固液界面在低速生长时,界面形态由熔体中存在的温度梯度和凝固速度所决定。当 $G_l/V_s \geq (G_l/V_s)^*$ 时,固液界面将以平界面形态生长, $(G_l/V_s)^* = mC_0(1-k)/kD, G_l, D, V_s, m, k, C_0$ 分别为液相中的温度梯度、扩散系数、生长速度、液相线斜率、溶质分配系数、合金成分。如果 $G_l/V_s < (G_l/V_s)^*$,平界面将失去稳定,界面就以胞晶形式生长;当凝固速度进一步增大或温度梯度进一步减小时,胞晶的生长也将失稳而长成枝晶。根据 Hoadly^[8]等对激光熔池温度场分布的计算,在激光熔池中,从熔池底部到顶部,温度梯度由最大值逐渐变小,而在同一截面上的生长速度却由最小逐渐增大。因此,在熔池与基体的结合部 $G_l/V_s \rightarrow \infty$,故此时期固液界面的生长以平界面的方式进行,最终在熔池与基体的结合部出现一条白亮带。随着离熔池底部距离的增加, G_l/V_s 值迅速减小,平界面失稳,出

现胞状生长,形成细胞晶。在熔池中部 G_l/V_s 进一步减小,于是组织又转变为枝晶。

2.2 元素的微观偏析行为

图5是DD2合金铸态组织中Al、Cr和Mo的分布曲线,由图可见铸态组织中合金元素存在严重的偏析,Al、Cr和Mo的偏析比分别为0.88、1.28和1.24。

图6是经激光重熔后Al、Cr和Mo的分布曲线,由图可见Al、Cr和Mo的偏析行为大大降低,其偏析比趋于1。

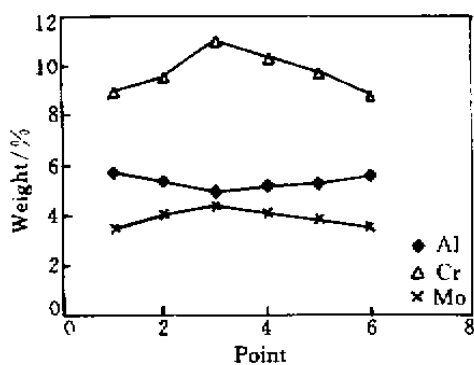


图5 DD2单晶合金铸态组织中Al、Cr和Mo的分布曲线(相邻测试点间距 $\Delta d = 50 \mu\text{m}$)

Fig.5 Solute distribution in the as-cast microstructure of DD2 single crystal (the distance between two adjacent points is $50 \mu\text{m}$)

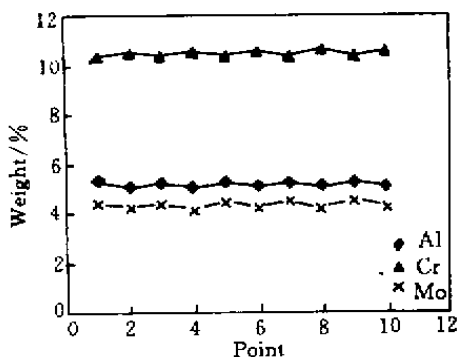


图6 激光重熔后Al、Cr和Mo的分布曲线(相邻测试点间距 $\Delta d = 2.5 \mu\text{m}$)

Fig.6 Solute distribution after laser remelting (the distance between two adjacent points is $2.5 \mu\text{m}$)

根据凝固理论,非平衡凝固是造成溶质偏析的根本原因,然而,成分偏析的大小又受凝固非平衡程度的影响。研究表明,在凝固界面以平面方式推进的近平衡凝固条件下,当凝固过程达到稳态时,固相中没有偏析存在,只是在凝固初始阶段(宽度约为 D/kV_s)和终了阶段(宽度约为 D/V_s),仍存在成分

的不均匀性。随着凝固过程对平衡的偏离,偏析开始增大,在胞状或树枝状生长区的某点上达到最大值,然后随着冷却速度的增大,即非平衡程度的加剧,偏析逐渐减小,表现为偏析比向1趋近。当固液界面以极高的速度推进时,熔质陷落完全发生,使得凝固过程在无熔质分凝条件下进行,从而可再度获得无偏析组织^[9]。由以上分析可知,在激光超高温梯度快速定向凝固过程中,凝固过程显著地偏离平衡,溶质截留效应增强使得溶质分配系数 $k \rightarrow 1$,从而使 $C_s \rightarrow C_0$;同时由于组织结构的超细化,使得合金元素在固相中扩散带来的均匀化效应增强,此外,枝/胞晶间的析出相在数量上减少,在尺度上更加弥散,也有利于合金元素的均匀分布。

3 结论

(1)激光重熔后组织较铸态组织显著细化,胞晶间距只有 $5 \mu\text{m}$ 。在熔池中从熔池底部到顶部,组织形态逐渐由低速平界面向细胞晶和细枝晶转变;
(2)激光重熔后组织中显微偏析程度大为降低,元素的分布更趋均匀。

参考文献

- 1 Chen Shiqing, Chen Rongzhang. Directionally Solidified High Temperature Materials. Beijing: Aeronautical Industry Press, 1988. 169 ~ 220 (in Chinese)
- 2 Z. X. Shi, J. G. Li, H. Z. Fu. Effect of solidification interface morphologies on microstructures of a Ni-base superalloy. *J. Met. Sci. Technol.*, 1990, **6**: 167 ~ 172
- 3 J. G. Li, X. M. Mao, H. Z. Fu. Interface Morphologies and Microstructures during dendrite-to-cell transition at high growth rate. *Acta Metall. Sinica*, 1991, **4**(1): 71 ~ 74
- 4 J. Singh. Review: laser beam and photon-assisted processed materials and their microstructures. *J. Mater. Sci.*, 1994, **29**(20): 5232 ~ 5258
- 5 M. Zimmermann, M. Carrard, M. Gremaud *et al.*. Characterization of the banded structure in rapidly solidified Al-Cu alloys. *Mater. Sci. & Eng.*, 1991, **134A**(25): 1278 ~ 1282
- 6 S. C. Gill, M. Zimmermann, W. Kurz. Laser resolidification of the Al-Al₂Cu eutectic: the coupled zone. *Acta Metall. Mater.*, 1992, **40**(11): 2895 ~ 2906
- 7 W. A. Tiller, K. A. Jackson, J. W. Rutter *et al.*. The redistribution of solute atoms during the solidification of metals. *Acta Metall.*, 1953, **1**: 428 ~ 437
- 8 A. F. A. Hoodyly, M. Rappaz, M. Zimmermann. Heat flow simulation of laser remelting with experimental validation. *Metall Trans. B*, 1991, **22B**(1): 101 ~ 109
- 9 W. J. Boettinger, L. A. Bendersky, R. J. Coriell *et al.*. Microsegregation in rapidly solidified Ag-15 wt-% Cu alloys. *J. Crystal Growth*, 1987, **80**: 17 ~ 25