

电子束快速成形 TC18 合金多次堆积的组织特征研究

Microstructure Characterization of Multi-Deposited TC18 Alloy by Electron Beam Rapid Manufacture

中航工业北京航空制造工程研究所 杨光 巩水利 锁红波 陈哲源

[摘要] 本文研究了多次堆积电子束快速成形 TC18 合金组织特征。结果表明:沉积体的顶部为针状马氏体区;下部为网篮组织,网篮组织的片状 α 厚度不均匀,形成层带状过渡区; β 柱状晶呈外延生长趋势,在沉积体心部竖直向上生长;在沉积体边缘柱状晶主轴向心部倾斜,沉积体的硬度和片状 α 的厚度成反比例相关。

关键词: 电子束快速成形 TC18 多次堆积

[ABSTRACT] Microstructure characterization of TC18 alloy multi-deposited by electron beam rapid manufacture are investigated. The results show that the area of acicular martensite locates the upper portion of the builds, the bottom for basket-weave, α -plate dimensions of basket-weave are uneven, so ribbon transition area are formed. The primary solidified β columnar grains in the heart grow vertically, in the edge columnar crystal tilts to the heart. There is good agreement or correlation between the average α -plate dimensions and the hardness values.

Keywords: EBRM TC18 Multi-deposit

电子束快速成形技术是指以高能量密度的电子束作为热源,在真空环境中熔化送进丝材或预铺的粉末,按照预先规划的路径层层堆积直接制造金属零件的工艺方法。该技术具有成形速度快、保护效果好、内部质量优等特点,可以满足飞行器结构整体化、低成本、长寿命的要求,具有良好的应用前景。TC18 钛合金是一种高合金化的近 β 型钛合金,前苏联的近似牌号为 BT22,名义成分为 Ti-5Al-5V-5Mo-Fe-Cr,该合金的淬透性好,具有很好的热处理强化效应,适合制造飞机起落架、滑轮架等承力结构^[1-4]。在大型 TC18 合金构件的电子束快速成形时,零件的体积大、成形时间长,需进行多次堆积。本文研究了电子束快速成形 TC18 合金多次堆积状态的组织特征。

1 试验设备、材料及方法

试验是在中航工业北京航空制造工程研究所 ZD-

15A 型电子束熔丝沉积快速制造设备上完成的,该设备由电子枪系统、真空系统、电源系统、三维工作台、送丝系统以及综合控制系统 6 个部分组成。在加工过程中,电子枪、送丝系统和三维工作台通过综合控制系统协调工作,达到自动化操作的要求,其原理如图 1 所示。

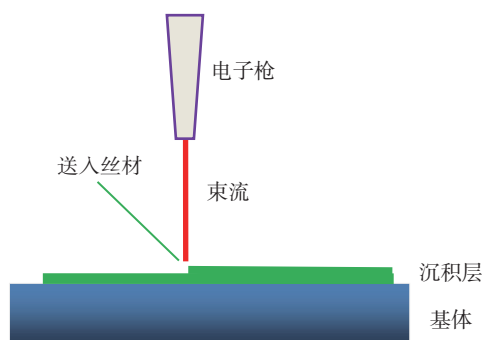


图1 电子束熔丝快速成形原理示意图
Fig.1 Diagram of EBRM principle

试验材料为 $\phi 2.0$ 的 TC18 丝材,成形基板为 20mm 厚的 TC18 板,丝材的成分如表 1 所示。

丝材用酒精清洗并烘干,基板经钢丝刷打磨去掉表层氧化皮,并用酒精擦拭干净。

试验工艺参数如表 2 所示。

试验采用多道多层堆积的方式,堆积路径为 Z 字形,共堆积 60 层,每隔 10 层中断 1 次,中断时间分别为 1h、1h、24h、10min、10min,中断方案如图 2 所示。

表1 TC18钛合金丝材的化学成分 %

	Ti	Al	V	Mo	Fe	Cr	C	N	O	H
质量分数	5.08	4.98	4.98	1.00	0.99	0.019	0.096	0.066	0.0035	

表2 电子束快速成形堆积参数

加速电压/kV	聚焦电流/mA	束流/mA	送丝速度 / (m·s ⁻¹)	堆积速度 / (m·s ⁻¹)	堆积间距/mm	层厚/mm
60	820	120	35	15	10	1.3

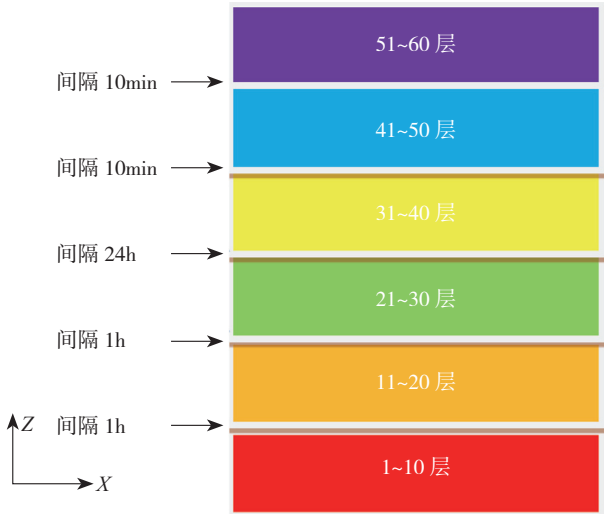


图2 堆积间断方案

Fig.2 Discontinuous scheme of multi-deposit

成形后沉积体的尺寸为 140mm (X) × 90mm (Y) × 85mm (Z) (其中 X 为束流扫描方向, Y 为搭接方向, Z 为沉积高度方向), 用线切割去除基材并切分试样, 采用适合于两相钛合金腐蚀的 Kroll 试剂(配比为 100ml H₂O+1~3ml HF+2~6ml HNO₃) 腐蚀, 观察其宏观形貌, 并制备出金相组织观察样品, 采用单反数码相机拍摄其宏观组织形貌, 利用 ZEISS Axiovert 200MAT 金相显微镜、德国 ZEISS 的 SUPRA 40/40VP 场发射扫描电镜观察显微组织形貌, 在 XOY 平面从上至下每隔 5mm 测试金属洛氏硬度。

2 结果与讨论

2.1 多次堆积状态宏观组织特征

电子束快速成形多次堆积状态 XOZ 截面的宏观形貌如图 3 所示, 粗大的柱状晶贯穿整个截面, 宽度为

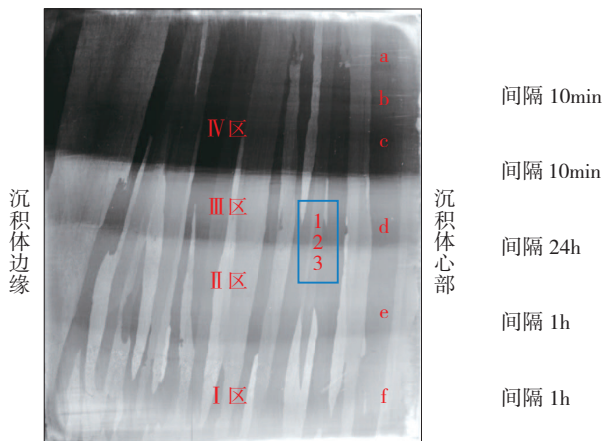


图3 多次堆积状态宏观形貌

Fig.3 Macro-image of multi-deposited TC18 alloy

2~6mm 不等, 在沉积体心部柱状晶垂直生长, 在沉积体的边缘, 柱状晶主轴略向心部倾斜; 从底部到顶部有 3 条明显的条带组织, 把整个截面分成 4 个区域, 分别命名为 I 区、II 区、III 区和 IV 区, III 区和 IV 区之间的明暗过渡明显, I 区和 II 区之间的明暗过渡较模糊, II 区和 III 区之间的过渡特征介于两者之间; 各区的界面并未对柱状晶的生长造成明显影响。

在电子束快速成形过程中, 热量散失主要通过热传导和辐射两种方式, 如图 4 所示, 在沉积体的心部熔池的热量主要由已经成形的沉积体向下传到基体, 温度梯度在沉积高度方向的分量最大, 故晶粒向上呈柱状晶生长, 并在生长过程中淘汰掉与竖直方向偏差较大的晶粒; 在沉积体的外部一部分热量通过辐射方式散发出去, 温度梯度向心部倾斜, 故柱状晶的主轴方向略向心部发生偏转。

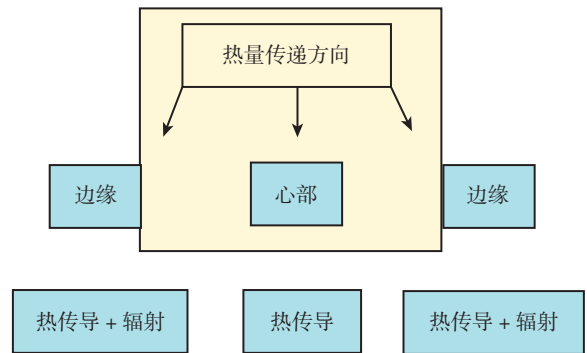


图4 热量传递示意图

Fig.4 Diagram drawing of heat transmit

2.2 多次堆积状态微观组织特征

沉积体的上部, 两次间隔时间都为 10min, 产生的过渡区特征却不同, 第 1 次间隔 10min 却产生了明显的明暗过渡特征, 而对 IV 区和 III 区的组织进行 SEM 电镜分析, 研究发现, 在 IV 区全为针状马氏体(图 5 (a)~(c)), 但马氏体针的粗细略有不同, 而 III 区则为片状的网篮(图 5(d)), III 区和 IV 区之间则呈针状向网篮过渡。针状向网篮过渡造成了 III 区和 IV 区之间明显明暗的层带过渡特征。

电子束快速成形过程中熔池的冷却速度极快, 易以切变形式形成马氏体 α', 而对已经凝固的一点来说, 继续堆积时要经历反复升温又降温的过程, 升温时马氏体 α' 分解, 当该点的温度在相变点以上并且冷却速度达到马氏体转变条件时, 仍会生成马氏体 α', 如果该点的温度低于相变点或者冷却速度很低不能达到马氏体转变的条件时, 针状马氏体就会转变成片状的网篮组织。在连续堆积状态下, 会在沉积体的顶部动态的保持一定宽

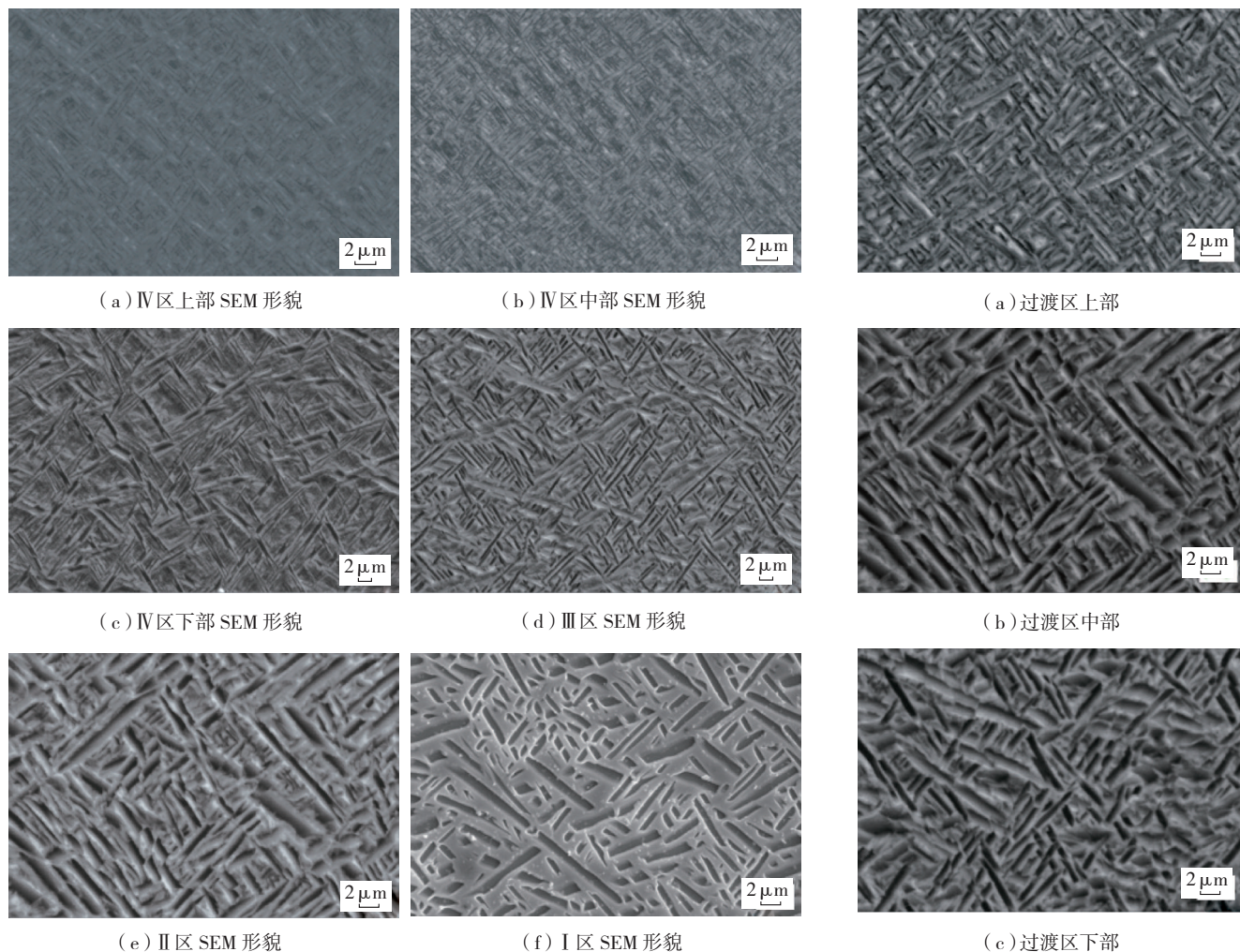


图5 多次堆积状态微观形貌
Fig.5 Micro-image of multi-deposited TC18 alloy

图6 过渡区的SEM照片
Fig.6 SEM-image of transition area

度的马氏体区。

II区和I区的SEM形貌如图5(e)、图5(f)所示,都是由片状网篮组成,片状网篮的厚度不一致,对间隔24h产生的层带过渡区(图3中1、2、3处)进行SEM分析,形貌如图6所示,在过渡区的上部(图6(a)) α 片层的平均厚度为 $1.4\mu\text{m}$,中部(图6(b))片层的平均厚度为 $1.6\mu\text{m}$,下部(图6(c))的平均厚度为 $1.3\mu\text{m}$ 。

对距离沉积体不同高度 α' 针的直径和片状 α 网篮的厚度进行了测量,测试结果如图7所示,在IV区针状马氏体的直径在 $0.3\sim 0.7\mu\text{m}$ 之间,从IV区到III区 α 的片层厚度从上至下逐渐变大,在III区的顶部片层厚度明显升高达到 $1.2\mu\text{m}$,在II区片层 α 的厚度从上至下逐渐变小,在I区则是先升后降。

电子束快速成形沉积体经多次堆积后的最终组织取决于原始堆积和接续堆积2种状态产生贡献的大小,对于原始堆积态来说,形成的组织是上部较为细小,而下部经历多次热循环组织逐渐长大;接续堆积时,会对

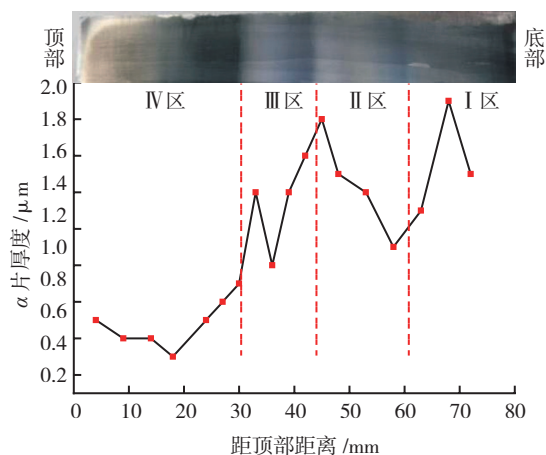


图7 片层 α 厚度的变化趋势
Fig.7 Change trend of α -plate dimensions

原沉积体重新施加一个热循环过程,当间隔时间较短时($\leq 1\text{h}$),沉积基面的温度较高,接续堆积对原沉积体产生的影响不大,只会使原沉积体的最顶部的组织发生

异常长大(Ⅲ区顶部);当间隔时间较长时(24h),原沉积体已冷却到室温,接续堆积施加的热循环对原沉积体产生的影响很大,会改变原沉积体自上至下组织由细变粗的趋势,反而从上至下 α 的片层厚度由粗变细(Ⅱ区)。

2.3 多次堆积硬度分布特征

对XOY截面自上至下进行了洛氏硬度测量,测试结果如图8所示,沉积体的顶部硬度值从37HRC升高到40HRC,经Ⅲ区时硬度急剧下降到33.5HRC,Ⅰ区和Ⅱ区硬度值32.5HRC上下波动,对比沉积体不同位置的硬度值和片层 α 的厚度发现,硬度值和片层厚度呈反向相关的关系,片层越厚硬度值越小。

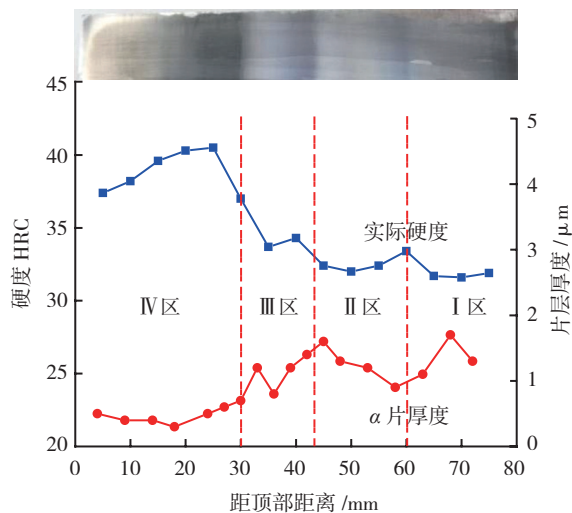


图8 α 片层厚度与硬度的关系
Fig.8 Relationship between α -plate dimensions and rockwell C-scale hardness (HRC)

3 结论

(1) 电子束快速成形沉积体的顶部为针状马氏体,其余部分为网篮组织,由于多次堆积,网篮组织中片状 α 的厚度及取向不均匀,形成了截面上明暗相间的层带状过渡区域;

(2) 层带状过渡区没有明显阻碍遍布整个沉积体的粗大柱状晶的外延生长趋势;

(3) 短时中断($\leq 1\text{h}$)对沉积体网篮组织中 α 片层厚度影响不大,间隔时间越长(24h),接续堆积产生的热影响作用越明显, α 片层厚度越易发生变化;

(4) α 片层厚度和硬度呈反向相关的关系,片层越厚,硬度值越小。

参考文献

[1] Denis C, Ola H, Harvey W. Characterization of H13 steel produced via electron beam melting. Rapid Prototyping Journal, 2004, 10(1): 35-41.

[2] Taminger K M B, Hafley R A, Dicus D L. Solid freeform fabrication: an enabling technology for future for future space mission. Keynote Lecture for 2002 International Conference on Metal Power Deposition Rapid Manufacturing, San Antonio, TX, Metal Power Industries Federation, April 8-10, 2002: 51-60.

[3] 颜永年, 林峰, 张人佶, 等. 快速制造技术的最新进展及其发展趋势. 电加工与模具, 2006(s1): 12-21.

[4] 师昌绪, 李恒德, 周廉. 材料科学与工程手册(上册). 北京: 化学工业出版社, 2004: 2-223. (责编 深蓝)

(上接第67页)

中的元组件资源进行工装配置,配置过程中,如果库中的元组件不足,则可以返回到资源管理模块中,增加所需的工装元组件。在工装配置完成之后,对工装进行性能分析,快速添加工装上的约束和载荷,使用CATIA的分析功能完成工装型架的应力及变形分析,判断其应力和变形是否处于满足精度要求的范围内,如不满足,则返回工装配置模块修改工装型架的配置方式。最后进入到工装可视性分析模块,根据工装的应用情况,布置测量点,分析在一定的仪器观测位置下能否对测量点进行观测,从而获得最佳的观测位置,为工装型架的测量过程提供指导。

4 结束语

基于盒式连接的可重构柔性工装,在飞机、航天器等产品的研制及中小批量生产中,具有良好的应用前景。工装配置与分析系统,可以对其进行快速的配置和分析,方便地进行工装元组件的组装,判断是否满足强度要求以及获得测量仪器布局信息,大大减少了工装设计人员的工作量,提高了设计效率,对促进可重构柔性工装的实际应用具有重要意义。

参考文献

[1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

[2] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005(9): 28-32.

[3] Jonsson M, Kihlman H, Ossbahr G. Coordinate controlled fixturing for affordable reconfigurable tooling//Proceedings of the 2nd conference on assembly technologies and systems. Canada: Toronto, 2008.

[4] Jonsson M, Kihlman H. Fixture design using configurators//Proceedings of swedish production symposium. Sweden: Stockholm, 2008.

[5] Kong Z, Huang W, Ceglarek D. Visibility analysis for assembly fixture calibration using screen space transformation. Transactions of the ASME, 2005(8): 626-634.

[6] 郑联语, 王艺玮, 蔡志为. 基于盒式连接和六足机构的翼盒水平装配可重构柔性夹具设计与验证初探. 航空精密制造技术, 2011, 47(3): 44-48.

(责编 亦非)