

离心喷射沉积距离对 TiAl 基合金组织的影响^①

陈文哲

(福州大学材料系, 福州 350002)

Jacobs M H, Loretto M H

(IRC in Materials, University of Birmingham)

摘 要 研究了 γ -TiAl 基合金经离心喷射沉积成形时不同喷射距离对合金组织的影响。合金经等离子弧熔炼并重熔后, 在真空条件下进行离心喷射沉积成形, 喷射沉积距离分别为 200、300、400 和 500 mm。结果表明, 经离心喷射沉积后的合金仍存在着孔隙, 且随喷射距离的增加, 孔隙率增加, 孔隙越细密。成形后的组织结构为层片状组织, 其形貌、层片大小也随成形距离的不同而变化。

关键词 TiAl 离心喷射沉积 孔隙率

以 γ -TiAl 为基的钛铝合金具有优异的高温应用性能, 如低密度、高抗氧化性和抗蠕变能力及优异的高温强度, 已引起了航空工业以及汽车、石油工业的兴趣和关注, 被视作未来最有发展前景的高温结构材料^[1-3]。然而, TiAl 合金因其低的室温塑性和断裂韧性, 严重地阻碍了它的应用。近年来, 一种新的材料成形工艺——喷射成形正被用来代替传统的钢铁冶炼浇注或常规的粉末冶金方法, 以期提供实用的高温结构工程材料带来新突破。最近, 英国伯明翰大学高性能应用材料研究中心在气体雾化喷射成形的基础上, 率先开展了金属间化合物的离心喷射沉积成形工艺的研究。这种新工艺颇具特色, 与其它喷射成形法相比, 它不需要雾化器及高压气体辅助雾化, 而且可在真空条件下成形^[4]。显然, 进一步深入研究离心喷射沉积成形工艺及其影响因素, 对控制材料的组织结构并进而改善或提高材料的性能有着重要的理论意义和应用价值。因此, 本文主要研究了 TiAl 合金在真空条件下的离心喷射成形工艺, 着重于喷射成形距离对合金组织的影响和作用规律, 以期反馈、改进并提供最佳

喷射成形工艺。

1 试验方法

1.1 离心喷射沉积成形

离心喷射沉积(CSD)试验是在英国伯明翰大学高性能应用材料研究中心进行的。试验合金成分为 Ti-48Al-2Mn-2Nb。该合金先经正压力氩气保护下的等离子弧熔炼, 得到了成分纯净的锭块, 而后将其重熔后喷射成形。在熔炼炉下部直接连接着离心喷射沉积成形设备, 可直接获得熔炼-沉积成形的合金材料。于成形室中, 在距离熔炼炉喷嘴下方约 250 mm 处置一铜盘, 铜盘周围设有沉积物接收衬板, 衬板可在竖直方向上下运动, 其截面形状、运动速度及距铜盘的距离可据要求预先设定。当熔融的金属从喷嘴下注至以 3 000 r/min 高速旋转的水冷铜盘时, 极大的离心力使金属熔体雾化成细小的液滴并飞快地溅射沉积在预先设置的接收衬底上, 在衬板内壁上形成了一定厚度和形状的合金材料, 其示意图如图 1 所示。

① 中英友好奖学金计划(SBFSS)及福建省自然科学基金会资助
陈文哲, 男, 39 岁, 副教授, 博士研究生

收稿日期: 1996-01-15; 修回日期: 1996-04-23

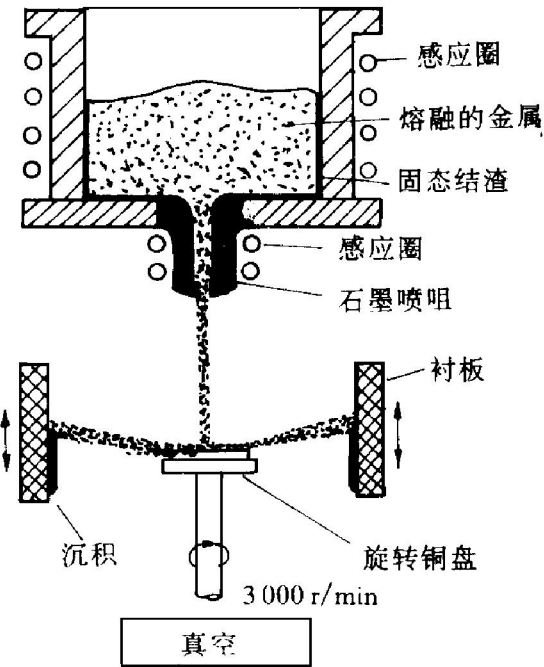


图 1 离心喷射沉积成形示意图

是铸锭成型、粉末固结或是气体雾化喷射成形都会产生一些孔隙。对经抛光未浸蚀的离心喷射沉积试样的观察结果表明，合金中也依然存在孔隙。这表明，孔隙的形成与金属间合金本身的熔液粘滞性、流动性和收缩性等性质有关，当然，还与离心喷射沉积工艺参数以及气氛介质等密切相关，喷射距离尤其是影响孔隙率高低的一个重要因素。表 1 列出了不同喷射距离成形的合金样品经图像分析仪定量分析测试的孔隙率，并且，为了比较，表中还列出了氩气保护下等距离沉积的圆环状合金(CSD-ring)的孔隙率值。

表 1 喷射成形距离对 Ti-48Al-2Mn-2Nb 合金孔隙率的影响

喷射距离 /mm	孔隙率/%			喷射条件
	平均	最大	最小	
200	0.84	1.19	0.39	真空
300	1.16	1.86	0.66	真空
400	3.75	6.07	1.18	真空
500	4.05	10.20	0.50	真空
CSD-ring d400	2.38	5.76	1.03	氩气保护

表中所列的孔隙率的最大值和最小值分别表示该状态样品在整个测试截面上所有测试视场中出现的最大孔隙率值或最小孔隙率值。由表可见，合金样品的孔隙率随喷射距离的增加而增加。更进一步地，即使是同样的喷射条件，孔隙在试样截面的分布也并非均匀，在某个局部出现了孔隙的集聚。当喷射距离增加到 500 mm 时，平均孔隙率大于 4%，局部孔隙率高达 10% 左右。这种情况表明，尽管有时候平均的孔隙率值可能不大，但由于局部出现较大的孔隙或出现较严重的孔隙偏析或偏聚，这都必将影响材料的性能和使用。图 2 显示了典型的孔隙形貌、数量和分布。喷射距离小于 400 mm 时，孔隙几乎都呈球状，在所观察的视野中也呈较均匀的分布，随喷射距离增加，孔隙的尺寸增大。然而，当喷射距离为 500 mm 时，孔隙变得相当细密，数量急剧增加，孔隙率增大。研究结果还表明，通常离心喷射沉积合金的致密度高于气体雾化喷射成形合金的致密

1.2 喷射沉积参数的选择

通常采用园环状衬板进行等距离沉积成形。为了考察喷射距离的影响，本试验采用几块半弧形衬板分别置于铜盘四周的 200、300、400 和 500 mm 处，在真空条件下依次完成不同喷射距离的沉积成形过程；主要喷射成形参数为石墨喷嘴直径 4 mm，熔液下注流动速率 5 ~ 6 kg/min，水冷铜盘旋转速度 3 000 r/min。

1.3 孔隙率测定和组织观察

在经不同喷射距离沉积的各块合金材料上截取其中心部位制成金相样品进行孔隙率分析和组织观察。孔隙率测定采用 Quantimet 500 型图像分析系统进行，试样已很好地抛光但未加浸蚀。在试样的整个测试截面上，一个视场紧接着一个视场逐个测定孔隙率，一般测定 20 个视场，最后取平均值。组织显示采用 Kroll II 试剂浸蚀，试样在浸蚀前和浸蚀后分别在光学显微镜下进行孔隙观察、组织观察和拍照。

2 试验结果与分析

2.1 喷射距离对合金孔隙率的影响

在钛铝金属间化合物的成形过程中，无论

度。

更进一步地,真空条件下的离心喷射沉积合金的孔隙率要比氩气保护沉积的合金的孔隙率小(如表1所示)。因而显示了真空条件下离心喷射沉积成形具有更优的应用潜力。

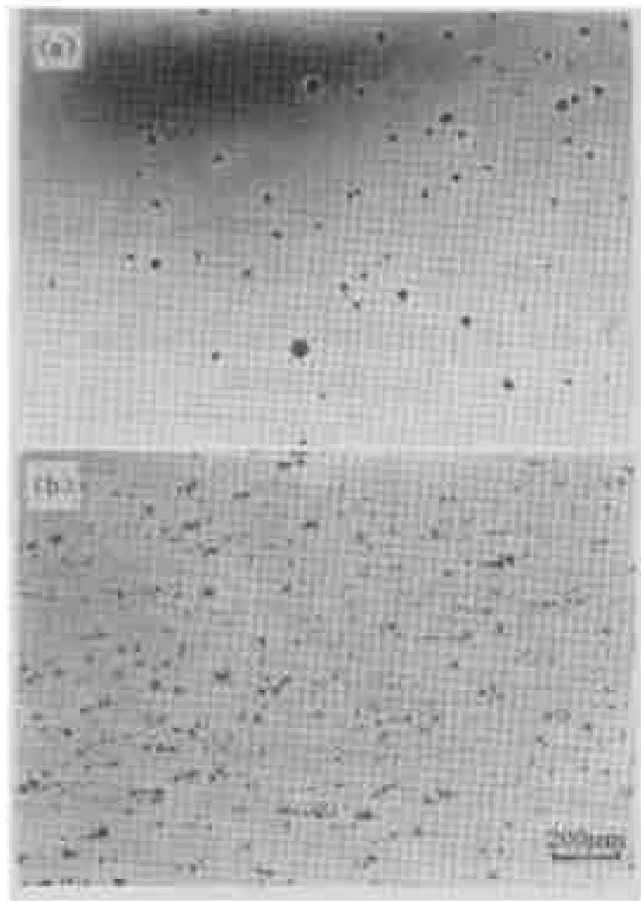


图2 Ti-48Al-2Mn-2Nb合金离心
喷射沉积的孔隙特征

(a) —喷射距离 300 mm;

(b) —喷射距离 500 mm

离心喷射沉积过程中,主要借助高速旋转铜盘产生的离心力使熔融的金属雾化成小液滴飞溅至接收基底上沉积并成形。受离心力控制的雾状小液滴到达沉积基底时的状态与离心力的大小、液滴的尺寸以及液滴的飞行过程(包括飞行距离及冷却速度等)有关。当小液滴飞向衬底时,发生互相撞击,并且可以与先期沉积、已开始凝固或半液态的液滴撞击,如果液滴之间有较充裕的时间和空间互相融合并凝固形成合金,就不易产生孔隙。在离心喷射过程中,同一时间内,由旋转铜盘溅射出来的熔体

可以认为是均匀的;但喷射距离不同时,到达衬底的熔体体积是不同的。随喷射距离增加,喷射出射角度张大,到达衬底单位面积上的合金量减少,而且愈远愈少,小液滴也愈细小分散,沉积的合金厚度愈薄;这一方面意味着合金的结晶、冷却速度加快,另一方面意味着小液滴的飞行时间长、到达基底时已基本固化。因此,后续的小液滴可能未来得及与先沉积的合金融合并填满液滴交接的空间就已凝固,或未来得及补缩,因而,产生了大量的、比较细小密集的孔隙。但是,如果喷射距离太小,则到达基底的液滴大部分呈液态,此时,合金来不及凝固,将发生纵向流动而无法沉积。

试验结果表明,喷射沉积距离选择在 200 ~ 300 mm 之间是比较合适的。

2.2 喷射距离对组织结构的影响

通常,TiAl基合金经喷射成形的组织基本上呈层片状结构。喷射成形工艺对层片状的组成、尺寸、形貌等都有很大的影响。图3显示了TiAl基合金离心喷射沉积时不同喷射距离成形的合金的典型组织形貌。喷射距离为300 mm时,呈完全的层片状结构,随喷射距离增加(400、500 mm)层片结构更加清晰明显,层片领域之间的界面比较明显并趋于平直。而喷射距离为200 mm时,层片状的结构不太清晰,存在着许多小块状的 $Ti_3Al(\alpha_2)$ 相析出,层片状领域也不是无方向的随机分布,而是向一定的方向发展,这种结构与铸造凝固所形成的组织有点类似,结晶以树枝状的方式向自由表面延伸,在某些区域表现出“人字形轮胎”花样。不同喷射成形距离所引起的组织结构的差异,与试样的沉积厚度和冷却过程的传导散热作用有很大的关系。在喷射沉积成形时,沉积和凝固是一个连续的过程,一直有新的金属液滴不断地到达沉积表面,在先沉积凝固的合金表层上重新建立起新的液态金属薄层。这种先沉积液态金属层的凝固和新液态金属层的建立都是在瞬间完成的并且建立了一种动态平衡,使这一液态金属薄层始终保持一定的厚度,直至沉积结束^[5]。

当喷射距离较近时, 金属液体沉积厚度大, 凝固速度相对缓慢且接近于平衡凝固, 结晶时有一定的时间和温度梯度使其以树枝状的方式凝固和发展, 并因沿基底的传导散热而使其凝固显示一定的方向性。随喷射距离增加, 沉积层变薄, 冷速加快, 形成层片状结构, 且晶粒尺寸减小。

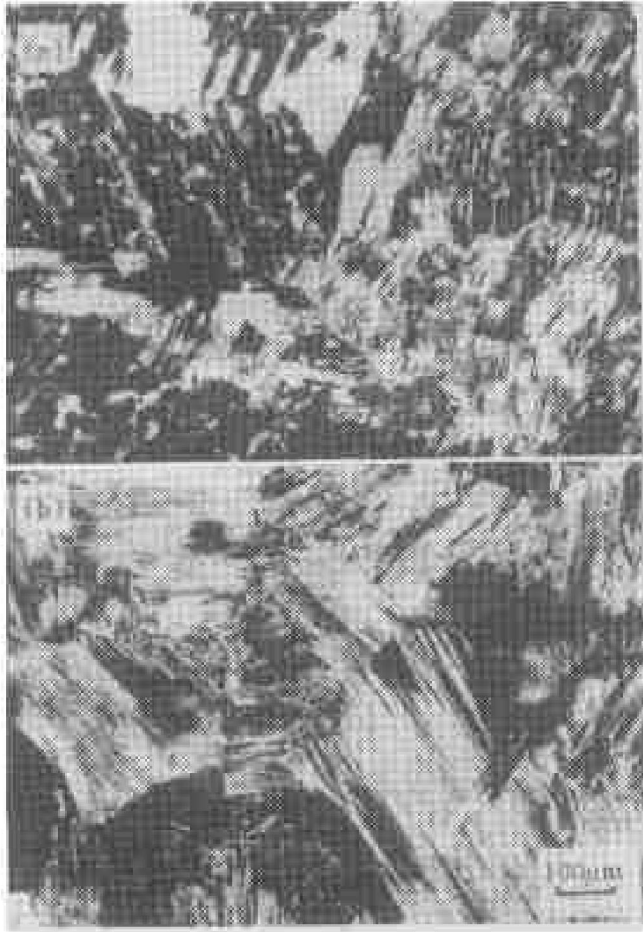


图3 Ti-48Al-2Mn-2Nb 合金离心
喷射沉积的组织特征

- (a) —喷射距离 200 mm;
(b) —喷射距离 300 mm

2.3 离心喷射沉积工艺的先进性

由于离心喷射沉积实现了熔炼和成形的一体化, 从组织控制的角度看, 这种技术可形成随机取向、组织细小的结构, 又具有和保持了部分快速凝固的组织; 并且, 该方法既简化了设备和工艺流程, 还可实现近型成形, 因此, 在应用于制备金属间化合物时更具特色和优势。与传统的铸锭或浇铸方法相比, 它解决了合金成分偏析、成分不准确、组织粗大和难以

加工成形等问题; 与常规的粉末冶金方法相比, 它不需要在快速冷凝制粉后再次固化成型, 可致杂质含量低、致密性好、工艺简化, 更主要地是克服了粉末固化成型引起的严重氧化、在较大尺寸成型时压实以及设备等方面存在的困难。又由于它是借助于离心力雾化熔融的金属, 因此, 与目前常用的气体雾化喷射成形技术相比, 它不需要雾化器、扫描器 and 高压气体的辅助, 可采用真空条件下喷射成形, 既简化了设备, 又可避免氩气辅助喷射成形时给合金组织结构带来的一些额外的影响。尽管这种成形工艺和方法还有待进一步探索和完善, 离心喷射沉积技术可能为改善金属间化合物的脆性并使其实用化提供一种新的思路和途径却是肯定的。

3 结论

(1) 在 TiAl 基合金离心喷射沉积过程中, 喷射沉积距离是影响合金组织的重要因素之一。

(2) 在所采用的真空离心喷射沉积工艺下, 喷射距离从 200 mm 增加到 500 mm 时, 合金的孔隙率增加, 孔隙趋于细小且密集分布。

(3) 当喷射距离为 300 mm 时, 合金组织呈完全的层片状结构, 随喷射距离增加, 层片领域之间的界面更加明显和平直。而喷射距离为 200 mm 时, 在层片状组织中还呈现树枝状结晶结构, 并有一定方向性。

参考文献

- 1 Kim Y W. JOM, 1989, 41(7): 24.
- 2 Kim Y W. JOM, 1994, 46(7): 30.
- 3 曲选辉等. 稀有金属材料与工程, 1991, 20: 3.
- 4 陈文哲. 见: 中国科协第二届青年学术年会执委会编, 材料科学技术进展与展望. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- 5 Lavernia E J *et al.* Materials Science and Engineering, 1988, 98:381.

EFFECTS OF SPRAYING DISTANCES ON THE STRUCTURE OF GAMMA TITANIUM ALUMINIDES PREPARED BY CENTRIFUGAL SPRAY DEPOSITION

Chen Wenzhe

Department of Materials, Fuzhou University, Fuzhou 350002

Jacobs M H, Loretto M H

IRC in Materials, University of Birmingham, UK

ABSTRACT The effects of spray forming distances during centrifugal spray deposition process on the structure of a gamma titanium aluminide (Ti-48Al-2Mn-2Nb) were investigated. The ingot of alloy was first melted in a plasma melting furnace, and then remelted and spray-formed onto the inside of a set of moveable mild steel substrates over different spraying distances from 200 mm to 500 mm respectively, by means of centrifugal spray deposition under vacuum condition. The results showed that there exist pores in the as-sprayed alloys, the porosity levels increase as the spray forming distances increasing from 200 mm to 500 mm, and more and finer pores are found with the increasing of spray forming distances; the typical lamellar structure was obtained, but the configuration of alloy is changeable, which is related to the spray forming distances.

Key words TiAl centrifugal spray deposition porosity

(编辑 赖海辉)