

高温合金单晶铸件中的杂乱共晶缺陷

马德新^{1,2}, 王 富³

(1. 深圳万泽中南研究院, 广东深圳 518045; 2. 中南大学, 湖南长沙 410083; 3. 西安交通大学, 陕西西安 710049)

摘要: 对镍基高温合金铸态组织中的 γ/γ' 共晶体及其形成机制进行了研究。发现含有碳元素的高温合金如CM247LC的 γ/γ' 共晶析出分为三种模式, 分别为在 γ 相上形核生成 γ 基共晶、在MC碳化物上形核生成MC 基共晶和从液体中形核形成自由共晶。其中后两种模式形成的 γ/γ' 共晶体的晶向是杂乱随机的, 从而在单晶基体组织中形成大角度的晶界。对不含碳元素的高温合金如CMSX-4, 其 γ/γ' 共晶的析出只有两种模式, 即在 γ 相上形核和从液体中自由形核结晶, 分别形成与 γ 相一致或完全无关的晶体取向。不管哪种合金, 其铸态组织都含有随机杂乱取向的共晶组织, 使得宏观上为单晶的铸件在微观上却是多晶体。

关键词: 高温合金; 定向凝固; 单晶; 杂乱共晶; 晶粒缺陷

镍基高温合金由于其良好的高温性能被广泛应用于航空发动机和工业燃机的涡轮叶片。早期用精密铸造工艺制成的高温合金叶片为等轴晶组织, 利用定向凝固的方法可以获得柱晶或单晶组织的叶片, 分别消除了与主应力轴垂直的横向晶界和所有的晶界, 使叶片高温性能有了明显提高。高温合金单晶叶片作为特殊的精铸产品, 除了要避免通常的铸造缺陷如尺寸超差和夹杂缺陷外, 其主要问题是在凝固过程中保持单晶的完整性, 避免产生晶向不同的晶粒。单晶铸件中最常见的晶粒缺陷是杂晶、雀斑和条纹晶等, 它们都是在铸件表面起源, 都可以通过铸件表面的宏观腐蚀而被检测出来。

除了上述宏观晶粒缺陷, 本文作者在研究铸件内部组织时发现, 单晶铸件中也存在着微观的内部晶粒缺陷, 破坏了铸件的单晶完整性。这些内部晶粒缺陷不能通过常规的方法检测出来, 这给产品的使用带来严重的隐患。其中一种微观晶粒缺陷是杂乱取向的枝晶碎臂(简称碎臂晶), 主要出现在铸件的截面突然扩张之处如叶片缘板和叶冠的边角内部^[1-2]。还有一种是铸件中的 γ/γ' 共晶团组织, 也是潜在的微观晶粒缺陷。一般认为, 这些共晶组织是以先行相 γ 枝晶为基体析出, 因而具有与 γ 枝晶相同的晶体取向^[3-5]。但作者发现事实并非如此, 有些 γ/γ' 共晶团的晶向与 γ 基体并不一致^[6-7]。 γ/γ' 共晶组织是在凝固过程后期从枝晶间残余液体中析出, 是单晶高温合金铸态组织的重要组成部分。随着高代次单晶高温合金的发展, γ/γ' 共晶团在铸态组织中的体积分量也呈上升趋势, 例如在第二代和第三代单晶合金CMSX-4和CMSX-10的铸态组织中, γ/γ' 共晶团的体积分量占比分别超过了12%和25%^[8]。若 γ/γ' 共晶团的晶向与 γ 基体完全不同, 就形成了单晶铸件内部总量可观的晶向杂乱的细小晶粒, 破坏了铸件的单晶完整性。在本工作中, 对此种微观晶粒缺陷进行分析研究。

1 试验方法

本试验使用了两种高温合金, 分别是不含碳元素的CMSX-4和含低碳的CM247LC, 其化学成分列于表1。首先在大型真空定向凝固炉中将合金铸成多根直径20 mm的单晶试棒, 抽拉速度为3 mm/min, 与生产用的速度相似。将部分试棒用小

作者简介:

马德新(1955-), 男, 教授, 国家特聘专家, 从事高温合金单晶叶片制造技术的研发。E-mail: d.ma@gi.rwth-aachen.de

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)12-1342-08

基金项目:

广东省引进创新创业团队项目(607264877417); 深圳科技创新委员会项目(20170308111659935); 国家自然科学基金项目(91860103)。

收稿日期:

2019-03-04 收到初稿,
2019-04-13 收到修订稿。

型定向凝固炉进行不同抽拉速度的定向凝固试验，在凝固过程中将试棒快速降入炉子下面的液体内进行冷淬，使糊状区中枝晶组织生长的状态得到冻结。除了对试棒进行纵向切片，还在冷淬的糊状区内截取多个横截面，用来考察凝固过程中的相变过程特别是凝固后期共晶组织的析出过程。将样品研磨和抛光后进行腐蚀，用光学显微镜（OM）进行组织观察。并对某些样品进行必要的扫描电镜（SEM）观察和电子背散射衍射（EBSD）晶向检验。

2 试验结果及分析

2.1 合金 CMSX-4 中的共晶组织

图1显示了合金CMSX-4铸态组织中的两种典型 γ/γ' 共晶体。图1a中的共晶团为近似半圆形，共晶核心

处在 γ -枝晶臂端部，可认为是以 γ -相为基底形成的共晶体，在图中标为 E_γ ，其晶体取向与 γ -相基底相同。而图1b中的 γ/γ' 共晶团近似为圆形，共晶核心处在圆的中心，通过检验可认定这样的共晶团是从液体中自由形核并长大，在图中标为 E_L ，其晶体取向与 γ -相基底没有关系。通过后边的检测分析可知，这两种不同的形核机制会影响共晶组织晶向和整个铸件组织的单晶完整性。

在用大型定向凝固炉铸造CMSX-4的单晶铸件时，曾通过人为的控制使铸件中产生明缩孔，将正在生长的枝晶组织暴露出来，以实现高温合金凝固过程中枝晶形貌的三维观察分析。图2a显示了对局部组织的扫描电子显微镜照片，由于得不到周围液体的补缩，枝晶无法继续生长，保持了当时的状态。枝晶间的残

表1 所用镍基高温合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of Ni-base superalloys used in this work

合金	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	其他	$w_B/\%$
CMSX-4	6.5	9	6	0.6	5.6	1	6.5	0.1	Re 3	余量
CM247LC	8.03	9.41	9.87	0.5	5.49	0.74	2.9	1.36	C 0.09	余量

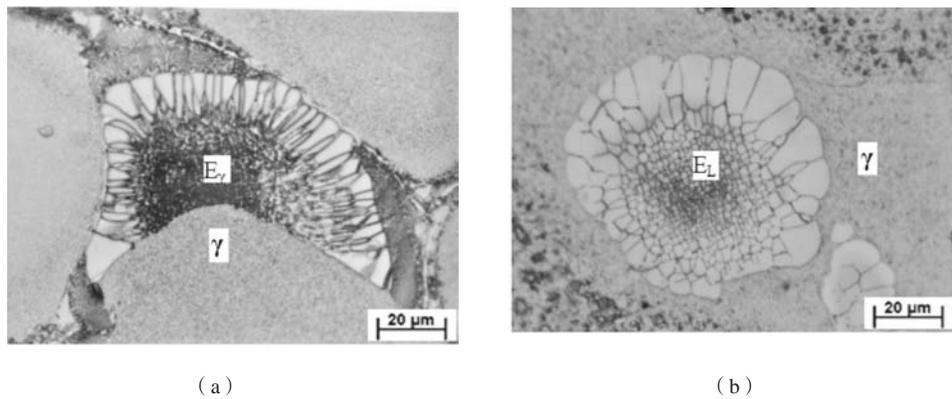
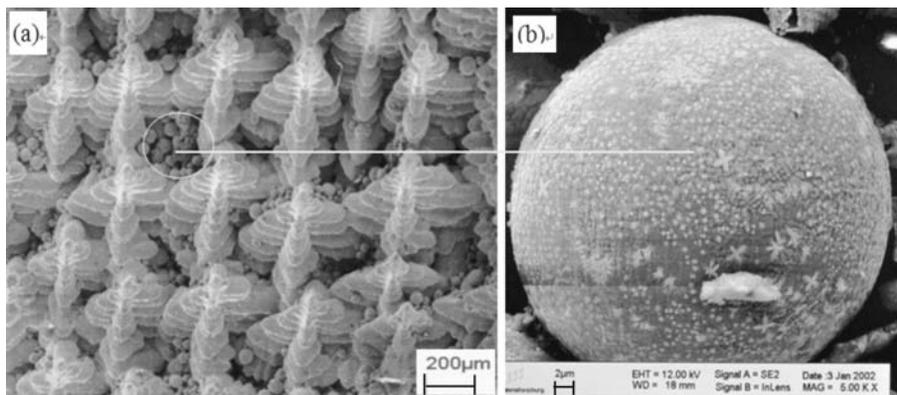


图1 CMSX-4 试棒中的两种共晶组织
Fig. 1 Two types of eutectic structure in CMSX-4 sample



(a) 枝晶组织 (b) 枝晶间共晶球

图2 合金CMSX-4 铸件枝晶组织和枝晶间共晶球的SEM图

Fig. 2 SEM micrographs showing the exposed dendrites in a CMSX-4 casting and a eutectic sphere

余液体由于合金元素的偏析而富含 γ' 生成元素,结果就自由形成许多小球形状的 γ/γ' 共晶团(图2b)。这些共晶团与图1b中的相似,是从液体中自由形核长大,其核心与枝晶臂没有接触,所以与基底 γ 相枝晶并没有晶向上的匹配关系。

对CMSX-4合金试棒横截面的微观组织进行了金相分析,发现铸态组织主要由 γ 相枝晶和 γ/γ' 共晶团组成,分别占有约89%和11%的体积分量。对试棒横截面进行了晶体取向测量,结果如图3的反极图所示。 γ 相枝晶的轴向晶向基本集中在靠近[001]的区域。而 γ/γ' 共晶团则分两类,其中一类是以 γ 相基底长大的共晶,标为 E_γ ,其晶向与 γ 相基底差别不大,也分布在[001]的区域。值得注意的是第二类共晶即 E_L ,由于是从合金液体中自由形核长大,其晶体取向是随机的,因而在图3中呈无规律分布,不同程度地偏离了铸件轴向[001]的方向。

2.2 合金 CM247LC 中的共晶组织

在合金CM247LC中,由于添加了少量碳元素,所以铸态组织不仅包括 γ 相枝晶和 γ/γ' 共晶团,还多出了初生碳化物MC相。在定向凝固过程中MC相在 γ 枝晶尖端稍后的液体中析出,而且在不同的凝固速度下

呈现不同的组织形貌(图4)。在凝固速度较慢时MC为较粗大的块状或锚状形态(图4a、b),随着速度增大转变为细小的条片状或花瓣状(图4c、d),嵌在 γ 相基体中,形成一种耦合生长的MC/ γ 共晶团组织,这种形态的碳化物也称之为汉字状。

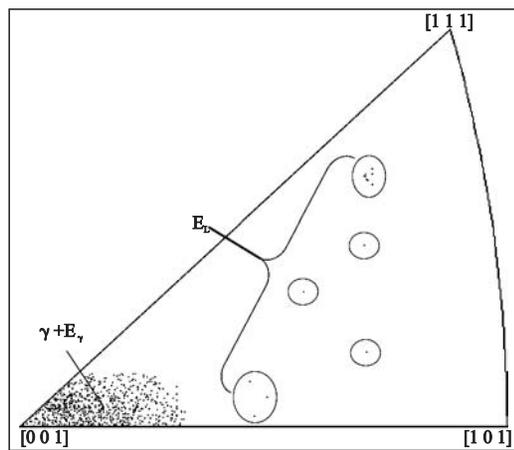


图3 合金CMSX-4试棒截面的反极图,显示了各种组织的晶向分布

Fig. 3 Inverse pole figure of a CMSX-4 sample, exhibiting the corresponding crystal orientations

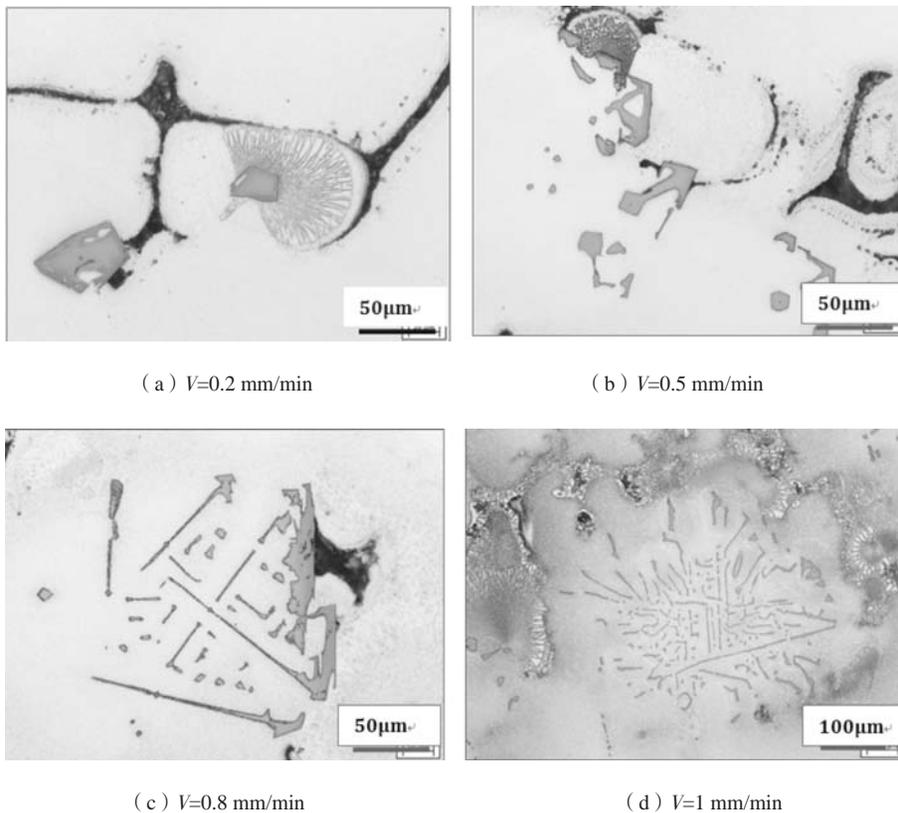


图4 CM247LC合金试棒横截面上的碳化物MC在各种抽拉速度V下的组织形貌

Fig. 4 MC morphologies under different withdrawal rates at transversal sections of CM247LC samples

虽然MC的体积分量不大,但在合金的凝固过程中起了很重要的作用。一般认为碳元素可以净化合金、减轻难熔元素的偏析,生成的碳化物可以减少液体对流从而减轻雀斑缺陷,还可以强化那些难以避免的小角度晶界。实际上我们发现碳化物对 γ/γ' 共晶的形成也起着重要的作用^[6-7]。在图4a和4b中可以看到, γ/γ' 共晶的核心部位有MC存在,这不是偶然现象,特别是在低速凝固的铸态组织中,大部分的 γ/γ' 共晶组织都以碳化物MC为基底析出。图5显示了CM247LC合金在0.2 mm/min的抽拉速度下凝固并被液淬后的横截面照片。图5a横截面处于 γ/γ' 共晶反应刚开始的位置,显示了 γ/γ' 共晶团在MC基底上形核的状态。由于形核是在瞬间发生,紧接着是 γ/γ' 的快速生长,所以核心部位的共晶组织非常细密。图5b照片上显示的共晶体已经进入稳定的片状生长阶段。特别值得注意的是,这些 γ/γ' 共晶团的核心不是依附在 γ -枝晶上,也不是从枝晶间的液体中产生,而是以初生碳化物MC为基底形成,因此记为EC。由于生长速率逐渐降低,共晶片层变得越来越粗大,形成花瓣状的组织。

这样看来,与CMSC-4合金中两种共晶形核模式(以 γ 枝晶为基底的 E_γ 和从液体中形核的 E_L)相比,CM247LC合金中还多了一种以碳化物MC为基底的共晶析出模式,生成EC共晶。由于MC是从液体中自由形核,具有随机的晶向,在此基底上形核长大的 E_C 共晶也应该只与MC的晶向相匹配,而与 γ 枝晶的晶向无关。因此,在含有碳元素的高温合金如CM247LC中,存在着三种模式的共晶析出机制和相应的晶体取向,下面结合图6分别描述如下。

(a) 以 γ 相为基形核。图6a1展示了一个以此种模式形成的 γ/γ' 共晶团 E_γ ,是以最先析出的 γ 枝晶为基底而形核长大。从金相组织上看,均匀单一的 γ 相基体与片状结构的 E_γ 共晶团具有不同的组织形貌,

它们之间存在鲜明的分界线。但从图6a2的扫描电镜背衍射(EBSD)图中可看到,两者呈现完全相同的红颜色,已经分不清它们之间的界限,这说明两者具有完全相同的晶体取向。在相应的反极图(图6a3)中已经具体地显示出它们的确切晶向,即所有组织的晶向斑点都集中分布在靠近[001]方向的同一位置,这说明图6a1中金相组织的两大组成部分,即 γ 相基底和 E_γ 共晶团,其晶体取向完全相同。或者说,共晶 E_γ 完全继承了其基底 γ 相的晶体取向,两种组织之间具有很好的单晶完整性。

(b) 以碳化物为基形核。图6b1展示了一个以碳化物MC为基底形核长大的共晶团 E_C 。碳化物MC为灰色锚状体, E_C 为片状共晶团,而基体 γ 相具有均匀的浅色衬底。这三种组织具有各自的形貌特征,每两者之间形成了相应的分界线。但从图6b2的EBSD图中可看到,与 γ 相的红色不同,碳化物MC和 E_C 共晶都呈现了蓝颜色,表明这两种组织具有相同的晶体取向。在相应的反极图(图6b3)中, γ 相的晶向仍然位于[001]附近。但MC和 E_C 共晶团的晶向则偏离了很远。这说明,由于MC是在液体中自由形核,具有完全随机的晶体取向,而 E_C 共晶团在MC上形核结晶,则完全继承了MC的晶向,从而也远远偏离了 γ 相基底靠近[001]的晶向。从微观上来看,铸件的组织已不再是单晶体,在 γ/γ' 共晶团和 γ 基底之间已形成了大角度的晶界。

(c) 从液体中自由形核。根据这种模式,凝固过程中 γ/γ' 共晶体是直接从液体中形核,并不依附于某种固相。图6c1展示的就是一个这样的共晶团 E_L ,其核心和 γ 枝晶没有接触,因而也不受其它晶向的影响。如图6c2所示, E_L 共晶团和 γ 枝晶显示了不同的颜色,而从图6c3中可看出两者之间的晶向偏差也非常大。在这种情况下,铸件的组织也不再是单晶体, γ 相的基

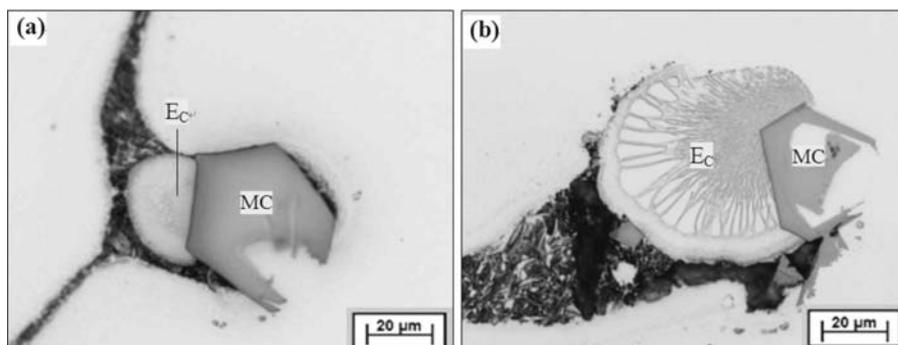
(a) 共晶 E_C 的形核(b) 共晶 E_C 的长大图5 以MC碳化物为基底的共晶 E_C 的形核和长大过程

Fig. 5 Nucleation (a) and growth process (b) of eutectic islands on the existing MC carbides substrate

体上已形成了大角度的晶界和碎小的共晶杂晶。这使得宏观上为单晶组织的高温合金铸件在微观尺度上却是多晶体。

需要指出的是,图6中的三个样品(a, b和c)都选取于同一铸件,所以它们的基体组织 γ 枝晶属于同一晶粒,具有相同的晶体取向。在图6中三个相应的EBSD图(图6a2、b2和c2)中,基体 γ 相都显示出相同的颜色(红色)。在相应的三个反极图(图6a3、b3和c3)中,显示出 γ 相的晶体取向都在[001]附近,朝基本相同的方向偏离了基本相同的角度。但是三个样品截面中的三种 γ/γ' 共晶体却因为完全不同的形核机制,造成了完全不同的晶体取向。图6a1中的共晶体

E_γ 与基体 γ 相的晶向完全一致,在EBSD图(图6a2)中显示了完全相同的颜色,在反极图(图6a3)中显示了完全相同的位置。而图6b1和图6c1中的 γ/γ' 共晶体(E_C 和 E_L)与基体的晶向偏离很大,原因是它们分别在具有随机晶向的基底MC上形核或者直接从液体中自由形核。由此看来,在后两种情况下, γ/γ' 共晶体的晶向是随机形成的,与基体 γ 相没有匹配关系。这说明,这个在宏观上为单晶的高温合金铸件在微观上却是多晶体。所谓的单晶只是对 γ 相而言,并不包括其他各相如碳化物和 γ/γ' 共晶体。特别是 γ/γ' 共晶在整个铸态组织中具有不小的体积分数,这就严重影响了铸件的单晶完整性。

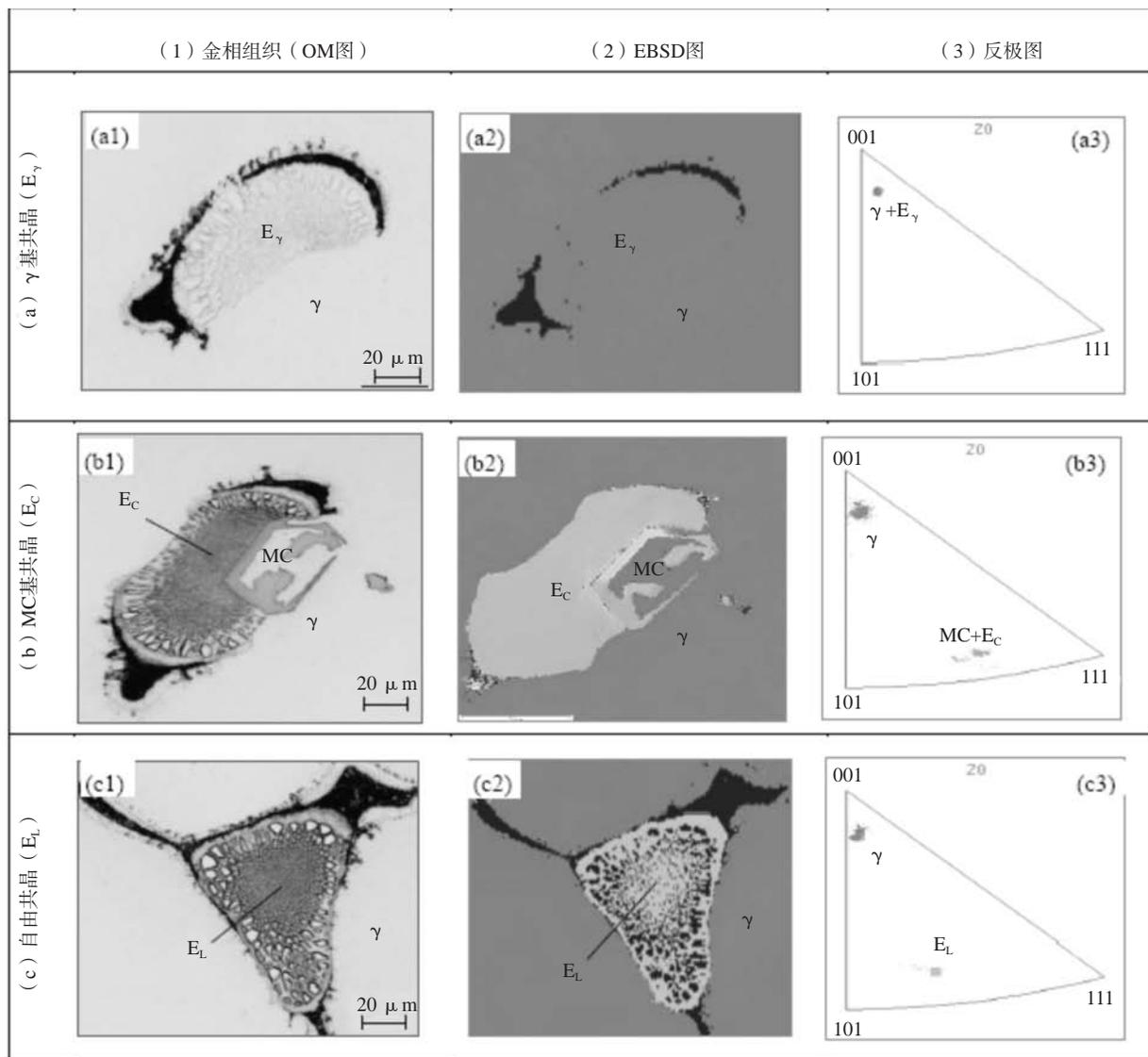


图6 三种模式形成的共晶组织(a: E_γ , b: E_C , c: E_L)的OM图及EBSD图和相应的反极图

Fig. 6 Microstructure, EBSD mapping and inverse pole figures of three types of eutectics

3 讨论

在单晶合金的发展中, 由于大角度晶界的消失, 晶界强化元素如C、Hf、B和Zr被大大减少甚至完全去掉, 以提高热处理中合金的初熔温度。但最近以来, 一定量的碳元素又被加入一些商用单晶高温合金中, 目的是用来净化合金、减轻难熔元素的偏析和强化那些难以避免的小角度晶界。镍基高温合金作为复杂的多元体系, 其凝固过程呈现为复杂的多相析出过程。一般认为, 随着温度下降到合金的熔点以下, 熔体中首先出现树枝状的 γ 相。若合金中含有一定的碳元素, 在 γ 枝晶间会形成MC碳化物。在凝固过程的后期, 会在残余液体中出现 γ/γ' 共晶组织。人们比较了解这些相的凝固顺序, 但并不清楚它们在形成过程中的相互作用。特别是枝晶间液体中的碳化物和 γ/γ' 共晶团, 一般认为它们分别在凝固过程的前期和后期先后析出, 互相之间并没有生长机理上的依附关系。而对于 γ/γ' 共晶组织, 一般认为是以先行相 γ 枝晶为基体析出, 与 γ 枝晶有着相同的晶体取向^[3-5]。但从本工作的结果发现, γ/γ' 共晶团的析出还有另外两种不同的机制, 决定了它的晶向与 γ 基体并不一定有匹配关系。

根据试验结果, 含有碳元素的镍基高温合金如CM247LC的定向凝固过程可用图7来示意。随着凝固前沿的推进, 合金熔体由于温度降至熔点以下而进入糊状区(忽略枝晶尖端的生长动力学过冷)。糊状区可分为几个部分, 作为凝固过程的相应阶段。

首先是在糊状区上部的液相L中, γ 相作为领先相

以枝晶形貌长出, 表现为 $L \rightarrow \gamma$ 的单相凝固。在随后的第二阶段除了 $L \rightarrow \gamma$ 的继续进行, 还出现了初生MC碳化物从液体中自由析出长大($L \rightarrow MC$)。这个阶段占了整个凝固过程的绝大部分, 但主要表现为 γ 枝晶的持续长大和粗化, MC碳化物只占很小的分量。在凝固的最后阶段, 以 γ/γ' 共晶组织的析出($L \rightarrow \gamma/\gamma'$)为主要特征。

如前所述, γ/γ' 共晶组织的析出有三种模式, 一是在 γ 相上形核长大, 生成 γ 基共晶, 即图7中的 E_γ , 具有与 γ 基底相同的晶体取向。第二种模式是在MC碳化物上形核, 生成MC基共晶, 即图7中的 E_c , 晶向由碳化物决定而与 γ 相无关。第三种模式是共晶团从液体中自由形核结晶, 生成具有随机的晶体取向的共晶, 即图7中的 E_L , 晶向也与 γ 相无关。

对不含碳元素的高温合金如CMSX-4, 其定向凝固过程可简化为两个阶段, 即 γ 枝晶和 γ/γ' 共晶的析出($L \rightarrow \gamma$ 和 $L \rightarrow \gamma/\gamma'$), 图7中碳化物的生成即 $L \rightarrow MC$ 过程不再存在。而 γ/γ' 共晶的析出也只有两种模式, 分别为在 γ 相上形核和从液体中自由形核结晶, 分别形成与 γ 相的晶体取向完全一致(E_γ)或完全无关的共晶团(E_L)。图7中MC基共晶即 E_c 的形核长大过程则不会发生。

众所周知, 晶体结晶时大多是以已有固相为基底, 因为这样的异质形核要比在液体中均质自由形核容易得多。但在本工作中的两种合金中却都发现了从枝晶间残余液体中自由形核的共晶团, 这种现象难以解释。另外, 在合金CM247LC的凝固过程后期, 在 $\gamma/$

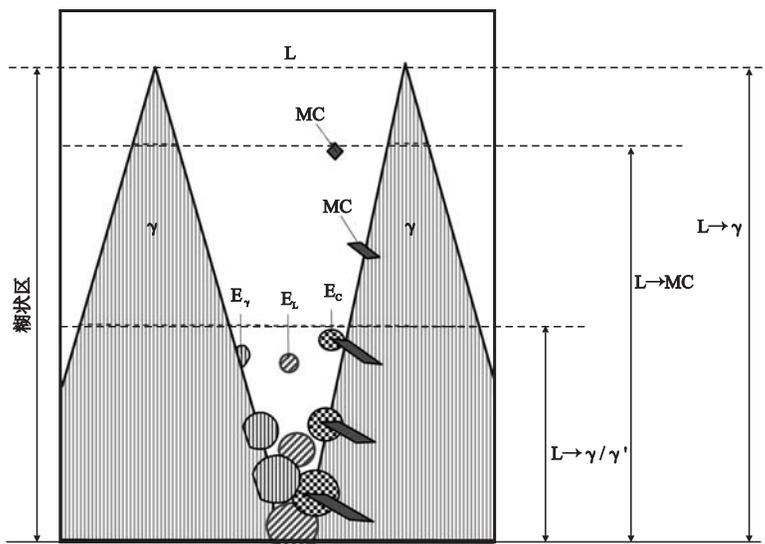


图7 凝固过程及三种共晶析出模式示意图

Fig. 7 Schematic illustration of three nucleation modes of eutectics

γ' 共晶反应开始前, 固液相区中已存在 γ 相枝晶和初生MC两种先行相, 其中 γ 相占了绝大多数的体积和表面积分量。更为重要的是, γ/γ' 共晶团中的 γ 和 γ' 相与 γ -枝晶具有几乎完全相同的晶体结构和化学性质, 所以先行析出的 γ 相应是 γ/γ' 共晶形核的最佳基底, 如同大家都认为的那样^[3-5]。相比之下, MC不但数量极少, 其化学性质和晶体结构都与 γ/γ' 显著不同。但事实上如前所示, γ/γ' 在糊状区中的析出却更偏向于选择MC而不是 γ -枝晶作为结晶核心。这可能是在初生MC碳化物长大时, 由于元素Al、Ni、Co和Cr不被容纳, 被排除在MC周围形成富集。其中Al和Ni为 γ' 相形成元素, Ni、Co和Cr为 γ 相形成元素, 造成了 γ' 和 γ 两相共生的良好条件。特别是当凝固速率低时, MC呈大尺寸块状, 排出大量的 γ' 和 γ 形成元素, 且不易扩散, 容易使MC周围的液体成分超过饱和度而发生 γ/γ' 共晶反应。这种化学势的优势在先行相 γ 枝晶的界面上并不具有, 因其自身消耗了 γ 相形成元素, 使得液体成分难以达到 γ/γ' 共晶反应所需要的饱和度。当然, 上述解释只是一种猜测, 还需进一步验证。总之, 对MC碳化物优先成为 γ/γ' 共晶反应核心并引起共晶团杂乱取向这一现象, 还需进行更深入的研究, 以给出合理的解释。

本试验中使用了较低的凝固速率, 以通过较缓慢的凝固过程得到较粗大的铸态组织, 从而能够方便地观察共晶体析出的具体过程。在较高的凝固速度条件下, MC碳化物将变得细小和分散, 对 γ/γ' 共晶反应的促进作用应该变小。但我们对较高拉晶速度 (3 mm/min) 下凝固的CM247LC合金的铸态组织的研究中发现, 共晶团析出仍然遵循上述的三种模式, 仍存在着杂乱共晶团缺陷^[7]。

总之, 所谓的高温合金的单晶凝固只保证了基体 γ 相的单晶一致性, 而 γ/γ' 共晶体的晶向却无法控制。由于 γ/γ' 共晶在整个铸态组织中具有不小的体积分量, 使得铸件的单晶完整性受到较大的影响。即使在相应于生产条件下的拉晶速度的凝固过程中, 以MC

为基底形核和从液体中自由形核的 γ/γ' 共晶也依然存在。也就是说, 通常所说的所谓“单晶”铸件中虽然所有枝晶的生长方向都是一致的, 在宏观上并无杂晶和雀斑等晶粒缺陷及其形成的晶界, 但在微观上却不是单晶组织, 因为枝晶间存在着杂乱取向的 γ/γ' 共晶体, 成为尺寸虽然微小但晶向偏差却非常大的杂晶晶粒。

另外需要注意的是, 在对铸件进行固溶热处理时 γ/γ' 共晶难以全部溶掉, 而是有相当部分的残留。这些晶向杂乱的残余 γ/γ' 共晶体会给“单晶”部件的高温性能带来隐患。而且在热处理过程中, 这些微小的杂晶晶粒虽然可能减少甚至消失, 但也可能作为再结晶的核心, 长大成较大的内部杂晶晶粒。因此对于 γ/γ' 杂晶在热处理中的行为, 也需要我们做进一步的研究。总之, 如何使高温部件的晶体组织成为名副其实的单晶, 从而实现高温性能的最佳化, 应当引起我们的注意。

4 结论

对含有碳元素的高温合金如CM247LC, 其定向凝固过程可分为三个阶段, 分别为 γ 枝晶, 碳化物MC和 γ/γ' 共晶的析出。而 γ/γ' 共晶的析出可分为三种模式, 分别为在 γ 相上形核生成 γ 基共晶, 在MC碳化物上形核生成MC基共晶, 和从液体中形核成自由共晶。其中后两种模式形成的 γ/γ' 共晶体具有随机和杂乱的晶向, 与基底 γ 相无关。对不含碳元素的高温合金如CMSX-4, 其定向凝固过程可简化为两个阶段, 即 γ 枝晶和 γ/γ' 共晶的析出。而 γ/γ' 共晶的析出也只有两种模式, 分别为在 γ 相上形核和从液体中形核, 分别形成与 γ 相一致或完全无关的晶体取向。由此可以推断, 不管是哪种镍基高温合金, 其铸态组织都含有杂乱取向的共晶组织, 使得宏观上为单晶的铸件在微观上却是多晶体。这些微观晶粒缺陷在热处理过程中很难被消除, 因而会对“单晶”部件的高温性能带来隐患, 对此需要进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 马德新. 高温合金叶片单晶凝固技术新发展 [J]. 金属学报, 2015, 51 (10): 1179-1190.
- [2] WANG F, WU Z, MA D, et al. Three-dimensional dendrite growth within the shrouds of single crystal blades of a nickel-based superalloy [J]. Metall. Mater. Trans. 2017, A 48: 5924-5939.
- [3] ZHU X Y, ZHANG S N, XU L Y, et al. Superalloys with low segregation [C]// Superalloys 1988, Eds. Duhal DN et al., TMS, 1988: 703-712.
- [4] WARNKEN N, MA D, MATHES M, et al. Investigation of eutectic island formation in SX superalloys [J]. Mater. Sci. Eng. A 2005, 413-414: 277-286.

- [5] SEO S M, LEE J H, YOO Y S, et al. Solute redistribution during planar and dendritic growth of directionally solidified Ni-base superalloy CMSX-10 [C]// *Superalloys 2008*, Eds. Reed RC et al., TMS, 2008: 277–286.
- [6] 马德新, 王富, 温序晖, 等. 高温合金CM247LC单晶定向凝固过程中初生MC碳化物对 γ/γ' 共晶反应的影响 [J]. *金属学报*, 2017, 53 (12): 1603–1610.
- [7] WANG F, MA D, BÜHRIG-POLACZEK A. Eutectic formation during solidification of Ni-based single-crystal superalloys with additional carbon [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2017, A 48 (11): 5442–5448.
- [8] SEO S, LEE J, YOO Y, et al. A comparative study of the γ/γ' eutectic evolution during the solidification of Ni-base superalloys [J]. *Metall. Mater. Trans.* 2011, A42: 3150–3159.

Randomly Orientated Eutectic Grains in Single Crystal Castings of Superalloys

MA De-xin^{1,2}, WANG Fu³

(1. Wedge Central South Research Institute, Shenzhen 518045, Guangdong, China; 2. Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract:

In the present work, the γ/γ' eutectics in the as-cast structure of Ni-based superalloys and their formation mechanisms were investigated. For the superalloys with carbon addition such as CM247LC, three different nucleation modes of γ/γ' eutectics at the final stage of solidification are found: nucleation on the existing γ dendrites and on the MC carbides respectively, as well as nucleation directly in the interdendritic liquid. The γ/γ' eutectics nucleated through the latter two modes have different crystallographic orientation from the γ dendrites. For the superalloys without carbon addition such as CMSX-4, the γ/γ' eutectics nucleate either on the existing γ dendrites or from the interdendritic liquid, revealing the same crystal orientation with γ matrix or the independent random orientations, respectively. As a result, there always exist the randomly orientated eutectic grains in the solidification structure of Ni-based superalloys. It indicates that the macroscopically defined SC castings are, in reality, polycrystalline at a microscopic scale.

Key words:

superalloy; directional solidification; single crystal; randomly orientated eutectics; grain defects
