

高温合金单晶铸件中条纹晶缺陷的试验研究

马德新^{1,2}, 王 富³, 孙洪元^{1,2}, 徐维台¹

(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: 对几种高温合金铸件中的条纹晶缺陷进行了考察和分析。发现条纹晶多出现于竖直的叶身部位, 叶背多于叶盆, 上部多于下部, 而叶根(榫头)部位极少出现。在竖直的叶身部位的条纹晶多是纵向生长, 但也有的是斜向发展。而处于水平状态的叶冠或缘板上会出现横向的条纹晶缺陷。所有条纹晶都是在基体枝晶组织的基础上形成, 其基本走向由基体枝晶决定, 不论这些枝晶是纵向、斜向还是横向。条纹晶不仅是细长的线形缺陷, 也可能发展为大尺度的三维缺陷, 严重影响单晶铸件的质量。从铸件的微观组织来看, 条纹晶实际上起源于单晶基体上断裂出来的一段枝晶。

关键词: 高温合金; 单晶; 定向凝固; 条纹晶; 晶体缺陷

为了提高航空发动机和燃气轮机的性能, 单晶高温合金被越来越多地用于制造涡轮叶片。由于消除了晶界这一薄弱环节, 单晶组织能使叶片的高温性能显著提高。影响单晶铸件质量的除了普通精密铸件的常规缺陷外, 还有特有的晶体缺陷。单晶铸件中最常见的宏观晶粒缺陷是杂晶^[1-4]和雀斑^[5-9], 经过多年的研究, 对它们的组织特征和产生机理已经有了比较深入的理解, 但对条纹晶这种晶体缺陷却了解不多。

条纹晶(sliver)又称为条带晶, 是高温合金单晶铸件中的一种典型的晶粒缺陷。根据早期的观察, 条纹晶是一种狭长的线型表面缺陷, 在铸件表面上呈细条状, 宽度一般只有1 mm左右, 长度为几到几十毫米。它具有明显的起始位置, 沿着铸件凝固方向垂直向上发展。Carney等^[10]认为, 条纹晶是单晶中的某个枝晶发生了有限的晶体取向偏离, 这种缺陷一般发生在铸件截面发生缩小的部位。史振学等^[11]在实验中观察到条纹晶的一次枝晶与合金基体的一次枝晶方向平行, 条纹的宽度随单晶的生长过程没有变化, 与小角度晶界有明显不同的特征。Aveson等^[12]认为条纹晶是小到中等角度的晶向偏离缺陷, 沿着铸件的垂直轴向延伸。

在高温合金的单晶铸造中, 条纹晶没有像杂晶和雀斑缺陷那么常见。一般认为其仅出现在铸件的浅层表面, 与单晶基体的晶向偏差并不大, 在不严重的情况下这种缺陷可以有条件地被忽略, 以减少经济损失。迄今为止对条纹晶缺陷的研究非常少, 其生成机理至今还不清楚。近年来随着高代次高温合金的应用, 条纹晶缺陷越来越多地出现于单晶叶片铸件中, 成为比较常见和严重的晶粒缺陷, 因此也引起了铸造工作者的高度关注, 并开展相应的研究工作。本文对最近几年工作中观察到的条纹晶缺陷进行了比较系统和详细的总结。在后续的工作中^[13]还将对这种缺陷的生成机理及影响因素进行分析, 以达到对条纹晶缺陷更加深入地了解和有效地控制。

1 试验方法

在生产与实验中使用的合金材料的相应化学成分列于表1, 其中CMSX-4和DD5是以添加3%左右的难熔元素Re为特征的第二代单晶高温合金。

浇注用的陶瓷型壳用常规的熔模法制备, 所有单晶铸件都是利用德国ALD公司制造的真空定向凝固炉铸造而成。使用的基本工艺参数为: 加热器温度和浇注温度

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)

06-0567-07

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)。

收稿日期:

2019-01-22 收到初稿,

2019-03-17 收到修订稿。

表1 所用合金的化学成分

Table 1 Nominal chemical composition of superalloys used in the study

合金	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	其他	Ni
DD5	7.0	7.5	5.0	1.5	6.2	-	6.5	0.15	3.0 Re	余量
CMSX-4	6.5	9.0	6.0	0.6	5.6	1.0	6.5	0.1	3.0 Re	余量
MM247LC	8.2	9.2	9.5	0.5	5.6	0.7	3.2	1.05	0.015 B	

为1 500 ℃，抽拉速度为3 mm/min。在除去型壳和切割浇注系统后对铸件进行宏观腐蚀，检测铸件表面的晶粒缺陷包括条纹晶缺陷。必要时对铸件进行局部切割，并对金相样品的纵截面和横截面进行微观组织检测。对观察到的各种条纹晶缺陷进行分类描述。除了少数铸件是用CMSX-4和MM247LC铸成而需要特别说明外，其余大部分铸件使用的是DD5合金，不再单独说明。

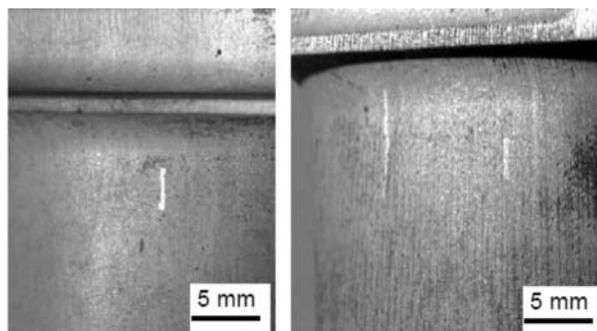
2 结果与分析

2.1 叶身上的条纹晶

经对大量铸件的检测发现，条纹晶多产生在叶片的叶身部位，而且多出现在外凸的背面。图1显示了几个叶身背面的程度较轻的典型条纹晶缺陷，有的单条出现（图1a），有的多条并存（图1b）。大部分的条纹晶较狭细，宽度不到1 mm，而长度则差别很大，有的仅几个毫米（图1），有的则达十几厘米甚至贯穿整个叶片（见2.6节）。

叶身上的条纹晶也会出现在内凹的盆面，但比背面上的要少。图2给出了几例叶盆表面上的条纹晶缺陷，缺陷的宽度较大，这说明内凹的盆面不利于条纹晶的产生但却有利于它的生长和扩展。另外，叶身上的条纹晶，不论是背面还是盆面，更倾向于出现在铸件的上部，而较少出现于中下部。也就是说，条纹晶较多地出现于单晶定向凝固过程的后期，而不是前期或中期。对叶身上条纹晶形成部位的这些特点，将在后面加以分析。

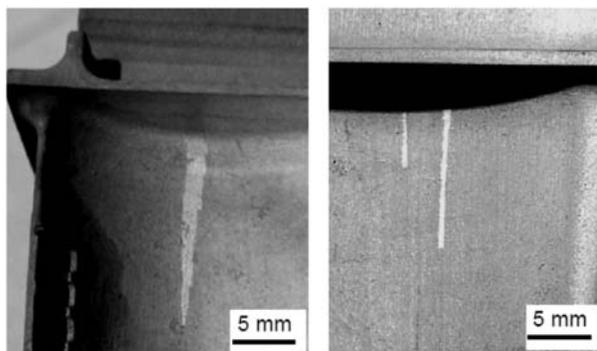
条纹晶的一个重要特点是其走向与叶片基体树枝晶的方向基本相同。图1和图2中的条纹晶基本呈竖直方向，因为在单晶定向凝固中，经选晶器选出的单晶晶粒的[001]方向即树枝晶的主干基本为竖直方向。当叶片中树枝晶的方向不是竖直，如型壳在螺旋选晶器部位出现裂纹导致斜晶长入叶片时，则条纹晶的方向也相应偏斜。图3显示了两例斜向生长的条纹晶，它们的走向与基体上的枝晶方向一致，它们与叶片轴向即垂直方向的偏离角度可从图片上测出，分别约为25°和40°。这说明，条纹晶的走向并非如前人所言^[12]总是沿着铸件的垂直轴向。若基体枝晶是倾斜的，则条纹晶也会相应地斜向生长。但不论枝晶组织是直还是斜，



(a) 单条纹 (b) 多条纹

图1 叶身背面上的条纹晶缺陷

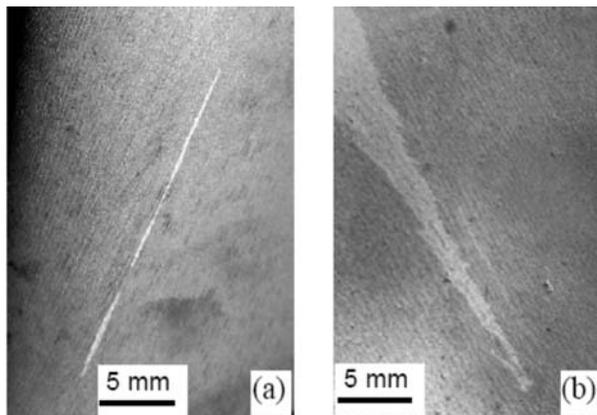
Fig. 1 Sliver defects on the convex sides of blade



(a) 例一 (b) 例二

图2 叶身盆面上的几例条纹晶缺陷

Fig. 2 Samples of sliver formed on the concave sides of blades



(a) 例一 (b) 例二

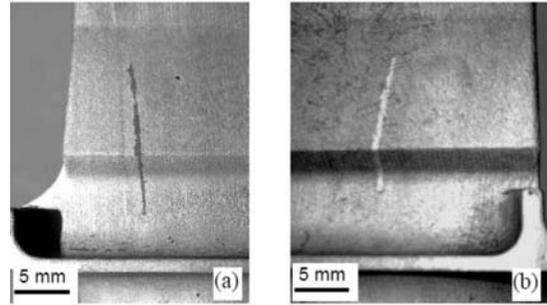
图3 两例斜向生长的条纹晶

Fig. 3 Two samples of tilted slivers

条纹晶与铸件基体之间的晶向偏差都不大。利用劳厄分析仪进行大量测量的结果发现,这种晶向偏差一般在几度到十几度之间。

2.2 叶根上的条纹晶

图4显示了两例产生在叶根上的条纹晶缺陷,与叶身部位比较,在叶片的叶根(榫头)部位极少发现条纹晶缺陷。叶根处不易产生条纹晶缺陷的原因尚不清楚,可能与处于铸件的厚大部位有关。虽然叶根部位本身难以产生条纹晶,但铸件下部产生的条纹晶能够长入叶根,如图9和图10所示。



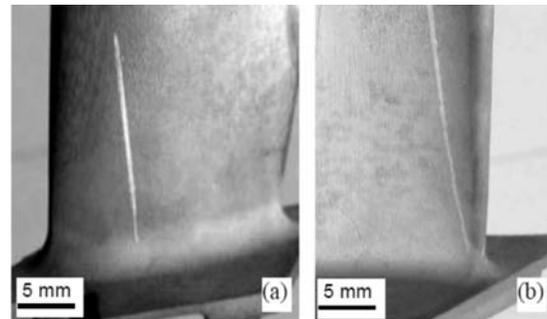
(a) 例一 (b) 例二

图4 两例产生在叶根部位的条纹晶

Fig. 4 Two samples of sliver formed on blade foot

2.3 转接处(R角)产生的条纹晶

叶身和叶根上发现了条纹晶缺陷,这些部位的表面基本为竖直状态,横截面没有发生突然的变化。但有时在铸件的外轮廓发生收缩时,或者说横截面减小时,例如在叶冠或缘板与叶身的转接处,也会产生条纹晶。图5a、b分别展示了叶背和叶盆在各自的转接处产生的条纹晶。此部位的特点是处于斜坡位置,横截面的明显变化在凝固时会产生较大的收缩应力和应变。此处产生的条纹晶继续向上生长进入叶身。前面提到,叶身上的条纹晶更易于出现在铸件的上部,但从图5可看到,在横截面发生变化时条纹晶也会出现在铸件下部。



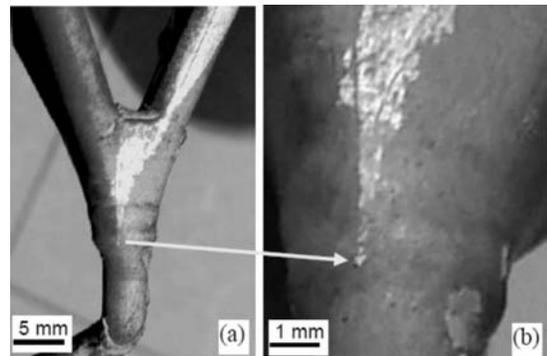
(a) 叶背处 (b) 叶盆处

图5 产生在叶冠与叶身转接处的条纹

Fig. 5 Two samples of sliver formed in the transverse section

2.4 选晶器与铸件连接段的条纹晶

在某单晶铸件的选晶器上端产生的条纹晶缺陷如图6所示,起源处清晰可辨,处于选晶器与铸件之间的连接处,横截面处于扩大状态。条纹晶产生后继续向上生长,进入铸件。从文献[10]和图5可知,条纹晶易发生在铸件收缩的部位。图6中的现象似乎说明条纹晶也易产生在铸件扩张部位,因为铸件形状的变化会带来应力的集中。但条纹晶的起因是多方面的,也可能是其他因素如型壳内壁原因或氧化夹杂引起,这些因素对条纹晶形成的影响,将在第2.7节继续讨论。



(a) 条纹晶 (b) 局部放大

图6 选晶器上端发现的条纹晶(a)及局部放大(b)

Fig. 6 Sliver formed on the top of selector

2.5 缘板和叶冠上的条纹晶

图7展示了一个用CMSX-4合金浇注的实心单晶叶片,在叶身向缘板过渡后产生的两处条纹晶。与前述不同,这种条纹晶不是竖直生长,而是在水平的缘板上横向分布。此叶片的凝固过程是从叶身到缘板,由于缘板边角冷却很快,而与叶身的转接处则散热困难,所以在缘板的凝固过程中枝晶从外沿的边角向内部的转接处横向生长。图中的两条条纹晶互相垂直,但都与基体枝晶的生长方向相同。条纹晶出现的位置接近转接处边缘,此处的横截面发生突然扩大,凝固时也会受到较大收缩应力和应变,这可能是横向条纹

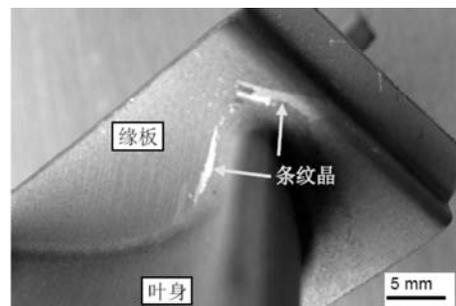


图7 缘板上形成的横向条纹晶

Fig. 7 Lateral slivers formed on platform

晶产生的重要原因。

图8展示了两个叶片的叶冠表面（凝固时朝上）上的条纹晶，此叶片的凝固顺序是从水平的叶冠到竖直的叶身。与图7不同的是，图8中的横向条纹并不是沿着转接带，而是从叶冠边缘朝着转接带生长过去，这是因为基体枝晶的生长正是沿着这个方向。

上述现象再次说明，条纹晶的走向并非如文献[12]所说总是沿着铸件的垂直轴向，即使在垂直表面上，条纹晶也可能斜向生长。而在水平状态的平面部位，则会产生横向生长的条纹晶。总之，条纹晶的走向总是与枝晶组织生长方向基本一致，不论这个方向是垂直的、倾斜的、还是水平的。

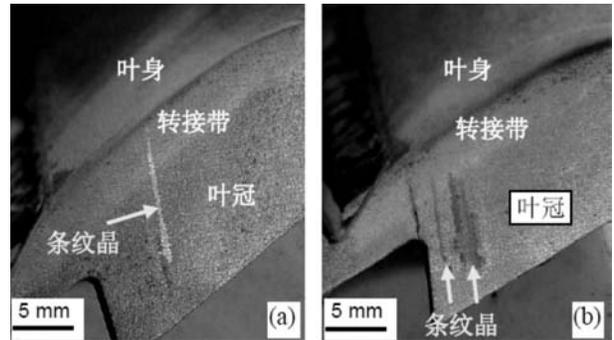
2.6 条纹晶的生长

图9a显示了一个用CMSX-4合金浇注的实心单晶叶片叶身背面上的条纹晶。它从底部与选晶器的连接处起源，穿过整个叶身和缘板，一直发展到叶根顶部。在叶身部位条纹晶有变宽的趋势，但在上部叶根又变细。条纹最宽处约3 mm，基本保持了典型条纹晶缺陷的特点。

图9b显示的是一个空心单晶叶片叶背上的条纹晶。它从叶身下部起源，穿过叶身中上部后再穿过缘板一直发展到叶根顶部。在叶身上条纹晶明显变宽，在上部叶根有所收敛。条纹最宽处超过10 mm，已不再是典型的线形缺陷。但经过劳厄分析仪的测量发现，这类条纹晶的晶向并不会随着宽度的变化而变化。

图10显示了一个与图9b同样形状的空心叶片，条纹从叶冠底面起源，在叶冠朝上的表面长出（图10a），并从转接处进入叶身背面后，由狭细的条纹晶扩展到整个叶背及上部的叶根宽度（图10b）。最后这个条纹晶几乎完全取代了原来的单晶基体。利用劳厄分析仪对图中叶片不同高度的晶体取向进行了测量，条纹晶与基体间的晶向差保持为约 10.6° 。这说明，这种晶向差在条纹晶产生时就已经确定，并不随条纹晶的发展而发生明显变化。

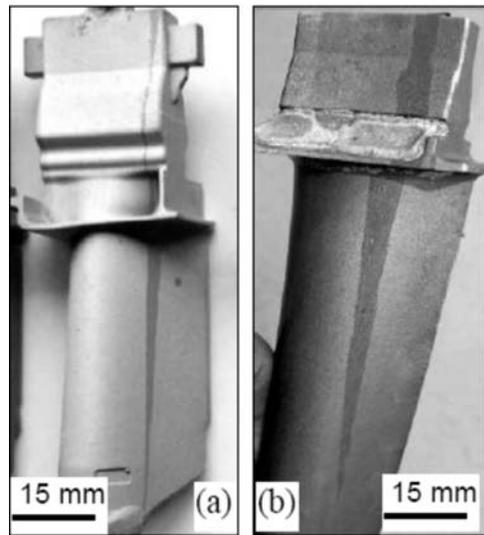
需要指出的是，在图10这种情况下，条纹晶已从底部的线形缺陷发展到中上部的三维大尺度缺陷，已经不再具有条纹晶的特征，而更像是杂晶缺陷。因此可以认为这种晶体缺陷应定义为以条纹晶起源而形成的杂晶缺陷。典型的杂晶是在凝固界面之前的液体中形核长大，其晶向是随机和杂乱的，与基体毫无关系。而图10中的杂晶则是源于条纹晶，与基体的晶向偏差不大，在几度到十几度之间。本质上属于小角度和中等角度的晶界缺陷。但因为表现为完整的三维晶粒，因此更像是杂晶晶粒缺陷。



(a) 单条条纹晶 (b) 多条条纹晶

图8 叶冠上形成的单条或多条横向条纹晶

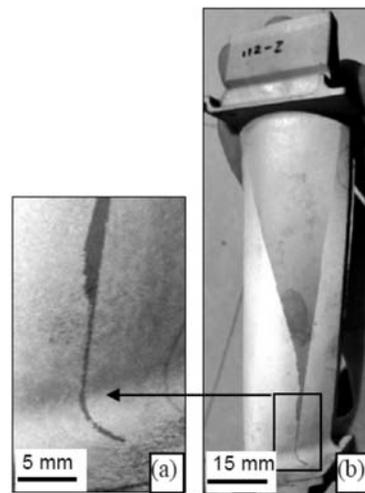
Fig. 8 Lateral slivers formed on blade shroud



(a) 实心单晶叶片 (b) 空心单晶叶片

图9 叶片中超长发展的条纹晶缺陷

Fig. 9 Blades with long slivers



(a) 叶冠 (b) 叶背

图10 发展到整个叶片的严重条纹缺陷

Fig. 10 Serious sliver defect developed to the total blade

2.7 条纹晶的起源点

图11显示了某转子叶片叶背上的条纹晶，它的起点位于一个用于固定型芯的铂金丝芯撑。此点由于在将铂金丝插入蜡模时多堆了一些蜡，致使陶瓷型壳的内表面形成小凹坑，与此相应，铸件表面就多出一个金属凸包。可以想象，正是这种铂金丝芯撑或金属凸包与型壳之间的作用，导致了条纹晶缺陷的生成。

图12显示了用MM247LC合金浇注的某燃机空心导向叶片及其叶身背面上的条纹晶，此缺陷以细条起始向上连续扩展，直到上部缘板处，最大宽度 ≥ 20 mm。仅从表面看这种缺陷就已经由条状（一维）发展为片状（二维）。值得注意的是，它的起点也是一个铂金丝芯撑。

图13是两例叶片表面上金属凸包引起的条纹晶，显示了其对条纹晶起源的影响。实际上史振学等在文献[11]中已报道，通过在蜡模上扎孔洞并在铸件表面形成相应金属凸包的方法会明显增加条纹晶产生的几率。他们认为型壳内表面的凹凸会有利于新晶粒的形核长大而引起条纹晶的生成。但实际原因应是由于合金凝固收缩时受到型壳的阻力增加，引起了表面晶的断裂。

这种由型壳内壁和铸件表面缺陷引起条纹缺陷的机制，将在后续工作中进行分析和讨论。需要指出的是，大部分条纹晶的起源处为光滑表面（图1到图10），并未像图11到图12那样发现有表面的凹凸。这说明条纹缺陷的产生比较复杂，需要进一步的研究。

2.8 条纹晶的微观观察

前面各个图片展示了宏观深腐蚀后的铸件表面，显示了条纹晶缺陷作为独立“晶粒”存在于铸件表面，破坏了基体的单晶完整性。为进一步研究条纹晶的微观组织，将带有条纹晶缺陷的铸件表面进行浅磨，除掉表层的氧化皮，抛光后进行微观腐蚀，在光学显微镜下观察叶片的微观组织。

图14显示的是用CMSX-4合金浇注的一个实心单晶铸件表面层下的微观组织（a）及局部放大（b），显示出铸件基体的铸态组织为典型的枝晶组织。此处的条纹晶较短，仅约3 mm，实际上为断裂的一段枝晶。与基体的竖直枝晶组织相比，这段条纹晶的走向明显偏斜，显示出在一次晶向上的差别。另外，这个条纹晶围绕枝晶轴也应有一定程度的偏转，从而造成与基体枝晶在亮度上的较大差别。需要指出的是，条纹晶的断裂处界限清晰可辨，但并没有发现裂纹，说明在枝晶断裂时凝固过程并没有结束，断裂处得到了残余液体的及时补充和充分的焊合。这说明条纹晶的起源既不是在凝固界面之前的纯液体里，也不是在完全凝固后的固相中，而是在液固两相共存的糊状区内。

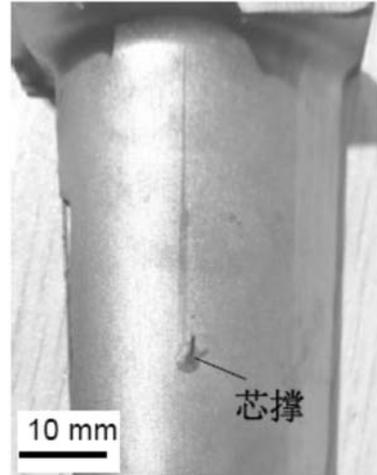
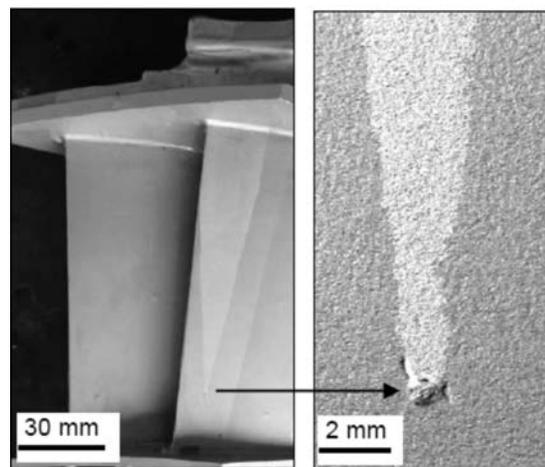


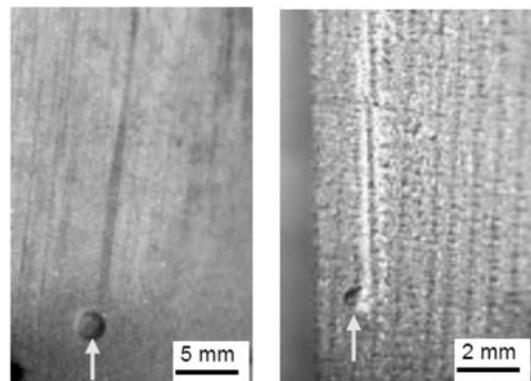
图11 动叶片上起源于铂金丝芯撑部位的条纹晶
Fig. 11 Sliver defect, originated from a Pt pinning wire



(a) 条纹晶全貌 (b) 起源放大

图12 某燃机导向叶片上的条纹晶及局部放大，起源为铂金丝芯撑部位

Fig. 12 Sliver defect formed in an industry turbine vane, originated from a Pt pinning wire



(a) 例一 (b) 例二

图13 两例叶片表面上凸包引起的条纹晶

Fig. 13 Two samples of sliver defects caused by convex hulls

图15a显示另一个CMSX-4实心单晶铸件的表面层下的枝晶组织，由于条纹晶较长，在生长过程中枝晶的数目由1个发展为2个。但条纹晶中枝晶轴的方向基本与基体枝晶相平行，互相之间的偏离很小，说明在一次晶向上基本一致。图14b显示的是同一铸件上端的横截面，并框出了条纹晶组织的位置。可以看出条纹晶由2个枝晶组成，深度约为1个枝晶间距。由于条纹晶围绕枝晶轴发生了转动，其二次臂取向与基体枝晶有所偏离，显示出两者在二次晶向上的偏差。需要指出的是，图15中的条纹晶与基体枝晶的取向差别主要是二次晶向而不是一次晶向，所以两者的亮度虽然在纵截面上（图15a）不同，但在横截面上（图15b）却无差别。也就是说，在横截面上无法根据微观组织的颜色和亮度来判断条纹晶的存在。

从图15a还可看出，在条纹晶下端的起源处有一团黑色夹杂。而图16显示的也是一个CMSX-4合金实心铸件的叶片表面下的纵截面，在条纹晶的低端起源处，发现有絮状的氧化膜围绕着枝晶的断裂处。可以想象，正是由于这些各种形态的夹杂物完全或部分地切断了枝晶主干，使得它在承受凝固收缩等各种应力时会发生撕裂或错动。因此这些夹杂就成了条纹晶的重要起源之一。

在以前的工作中已经注意到氧化夹杂对条纹晶的影响。Carney和Beech^[1]发现氧化物夹杂较多的铸件条纹晶缺陷也多，认为氧化物夹杂形成了枝晶中的薄弱部位，但他们认为是液体对流的冲击造成了条纹晶。文献[11]指出，条纹晶起始位置经常有型壳材料的镶嵌，但却认为这些镶嵌触发了新晶粒的形核长大造成了条纹晶的形成。

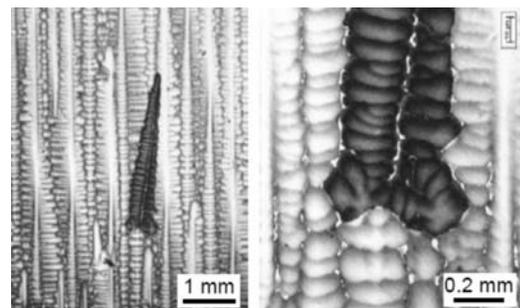
根据我们的观察和分析，认为是当凝固进行到最后阶段时，生长中的枝晶因为凝固收缩的作用受到了越来越大的应力，若此应力超过了枝晶干的强度极限便会发生断裂。枝晶的断裂最容易发生在枝晶特别薄弱的部位如嵌入了氧化夹杂之处，如图15a和图16所示。另一种引起枝晶断裂的原因则是收缩应力在某点过分的集中，例如型壳内壁的凹坑与金属凸包发生粘连，严重阻碍了枝晶的自由收缩，如图11到图13所示。

总之，从铸件的微观组织特点来看，条纹晶实际上起源于单晶基体上断裂出来的一段枝晶。枝晶断裂的原因：一是因为枝晶某些部位特别薄弱，例如嵌入了氧化夹杂；二是因为收缩应力过分集中，例如在铸件截面发生突变处或型壳内壁与铸件表面发生严重粘连处。条纹晶不像一般的小角度晶界缺陷那样，逐渐与单晶基体发生了晶向偏离，也不是从液体中独立形核长大的新晶粒，具有杂乱和随机的晶向。关于条纹

晶形成的机理，将在后续的工作中继续探讨和分析。

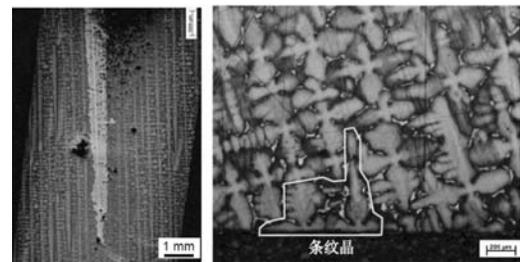
3 结论

(1) 单晶叶片铸件中的条纹晶缺陷多出现于竖直的叶身部位，叶背多于叶盆，上部多于下部，在叶根（榫头）部位极少出现。在竖直的叶身部位除了纵向的条纹晶，也发现了斜向条纹晶。在水平状态的叶冠



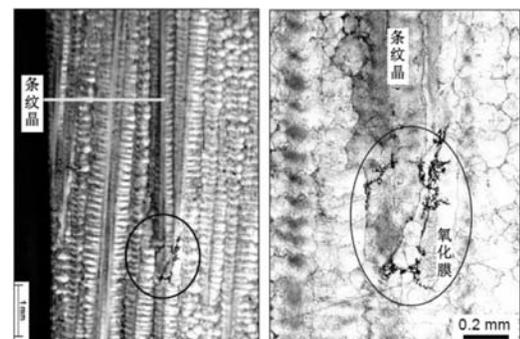
(a) 条纹晶微观组织 (b) 局部放大

图14 某铸件表层的短小条纹晶的微观组织
Fig. 14 Microstructure of a small sliver defect near the casting surface



(a) 纵截面 (b) 横截面

图15 某铸件表层的条纹晶微观组织
Fig. 15 Longitudinal and cross sections of a sliver defect near the casting surface



(a) 表面层下的条纹晶 (b) 起源处放大

图16 一个叶片上的条纹晶及局部放大，显示了起源处的氧化膜
Fig. 16 Longitudinal and cross sections of a sliver defect, originated from an oxide film

或缘板部位则会出现横向的条纹晶缺陷。但所有条纹晶都是在基体枝晶组织的基础上形成，其基本走向由基体枝晶决定。

(2) 经劳厄分析仪测量，条纹晶与铸件基体之间的晶向偏差不大，一般在几度到十几度之间。

(3) 条纹晶过去被认为是细长的线形缺陷，现在发现它可以发展为大尺寸的三维缺陷，成为严重影响单晶铸件质量的宏观晶粒缺陷。

(4) 从铸件的微观组织来看，条纹晶实际上起源于从单晶基体上断裂出来的一段枝晶。枝晶断裂的原因一是因为枝晶某些部位特别薄弱，例如嵌入了氧化夹杂，二是因为收缩应力过分集中，例如在铸件截面的突变处或型壳内壁与铸件表面发生严重粘连处。

参考文献:

- [1] PAUL U, SAHM P R, GOLDSCHMIDT D. Inhomogenities in single-crystal components [J]. *Mat. Sci. Eng.* 1993, A173: 49-54.
- [2] MEYER Ter Vehn M, DEDECKE D, PAUL U, et al. Undercooling related casting defects in single crystal turbine blades [C]// *Superalloys*, 1996, Eds. R.D. Kissinger et al, TMS, 1996: 471-479.
- [3] 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.
- [4] 马德新, 张琼元, 王海洋, 等. 工艺条件对镍基高温合金DD483的单晶叶片中杂晶缺陷的影响 [J]. *铸造*, 2017, 66 (5): 439-444.
- [5] GIAMEI A F, KEAR B H. On the nature of freckles in nickel base superalloys [J]. *Metall. Trans.* 1970 (1): 2185-2192.
- [6] MA D, WU Q, BÜHRIG-POLACZEK A. Some new observations on freckle formation in directionally solidified superalloy components [J]. *Metall. Mater. Trans.* 2012, 43B: 344-353.
- [7] TIN S, POLLOCK T M. Predicting freckle formation in single crystal Ni-base superalloys [J]. *J. Materials Science*, 2004, 39: 7199-7205.
- [8] AUBURTIN P, WANG T, COCKCROFT S L. Freckle formation and freckle criterion in superalloy castings [J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2000, 31: 801-811.
- [9] 马德新. 定向凝固的复杂形状高温合金铸件中的雀斑形成 [J]. *金属学报*, 2016, 52 (4): 426-436.
- [10] CARNEY C A, BEECH J. The origin of sliver defects in single crystal turbine blades [C]// *Solidification Processing 1987*, Institute of Metals, London, 33-36.
- [11] 史振学, 刘世忠, 李嘉荣. 单晶高温合金定向凝固过程中条带的形成机制 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42 (13): 31-33.
- [12] AVESON J W, TENANT P A, FOSS B J, et al. On the origin of sliver defect in single crystal investment castings [J]. *Act. Mat.* 2013, 61: 5262-5171.

Study on Sliver Defects in Single Crystal Castings of Superalloys

MA De-xin^{1,2}, WANG Fu³, SUN Hong-yuan^{1,2}, XU Wei-tai¹

(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:

This paper presents the observations on the sliver defects in the single crystal (SC) castings of some Ni-based superalloys. It was found that the slivers occurred most frequently on the blade bodies, especially on their convex sides and upper positions. In comparison, fewer slivers were observed in blade foot. Beside the vertical ones, tilted slivers were also observed. On the horizontally positioned platforms, however, lateral slivers were formed because of the matrix dendrites grown in the same direction. That means the alignment of the slivers is not always along the axis of the blades, but determined by the orientation of the local matrix dendrites, no matter it is vertical, tilted or lateral. Sometimes a narrow sliver can develop into 3-dimensional defect of large scale, hence becoming a serious grain defect in SC casting. In the metallographic detection, sliver grain can be identified to be mis-alignments of isolated, individual primary dendrite stems on the SC matrix. The mechanism of sliver formation should be further studied in the next work.

Key words:

superalloy; single crystal; directional solidification; sliver; grain defects