

高温合金单晶铸件中形状因素对雀斑缺陷的影响

马德新^{1,2}

(1. 深圳市万泽中南研究院有限公司, 广东 深圳 518004)

(2. 中南大学 粉末冶金研究院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过对单晶高温合金铸件中雀斑缺陷的观察研究, 发现铸件横截面和纵截面的形状都对雀斑的形成产生很大的影响。铸件横截面形状的影响表现为棱角和曲率效应, 即雀斑容易出现在外凸形的棱角(夹角 $<180^\circ$)和曲面(曲率为正)上, 而不会出现在内凹形的棱角(夹角 $>180^\circ$)和曲面(曲率为负)。其原因在于糊状区液体流动的附壁效应会在铸件外凸和内凹部位分别发生叠加和发散, 从而分别促进和减弱雀斑的生成倾向。另外, 铸件纵截面形状变化对雀斑的影响表现为收扩效应, 即沿凝固方向呈收缩型和扩张型的外表面对雀斑的影响完全相反, 分别起到强烈的促进和抑制作用。结果表明, 上述的铸件形状因素对雀斑的作用远远超过了凝固条件的影响。不同代次单晶高温合金的实验结果表明, 合金中 Re 元素含量的提高能明显增加铸件中的雀斑缺陷。

关键词: 雀斑; 高温合金; 定向凝固; 单晶

中图分类号: TG132.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)12-4357-08

雀斑是高温合金单晶铸件中产生的严重晶粒缺陷之一, 它一般出现在铸件的垂直外表面上, 呈现为平行于重力方向的连续或断续的细长链状, 由许多取向杂乱的细碎晶粒组成^[1-5]。以往的研究表明, 雀斑的产生是由定向凝固过程中糊状区内枝晶间的液体对流引起。一般情况下, 定向凝固是由下而上进行, 由于温度梯度的存在, 糊状区内的液体呈上热下冷的状态, 正常情况下液体的比重为上小下大。但在高温合金部件的定向凝固过程中, W 和 Re 这种密度很大的负偏析元素富集于以枝晶形态形成的固相即 γ 相内, 而 Al 和 Ti 这种密度很小的正偏析元素则富集在枝晶间的残余液体内。随着固相分数的增加, 糊状区中的液体密度变得越来越小。这种元素偏析引起的密度反差甚至超过温度梯度对密度的影响, 使得糊状区液体最终呈上重下轻的非稳定状态。在重力的作用下, 糊状区中会产生通道式的强烈对流, 造成枝晶臂的重熔和折断, 最终形成垂直链状分布的细碎晶粒缺陷, 称之为雀斑。近年来由于高代次高温合金中难熔元素如 W 和 Re 含量的增加, 加剧了糊状区内的元素偏析和密度反转^[6], 单晶铸件中的雀斑缺陷呈现出越来越严重的趋势。

除了合金成分, 凝固条件被认为是影响雀斑的最重要因素。一般认为, 铸件的厚大部位散热困难, 冷却和凝固缓慢, 造成很低的温度梯度和宽大的糊状区。又由

于枝晶间距较大, 对液体流动的阻力较小, 因而容易导致雀斑缺陷的形成。

在过去的实验工作中, 研究人员多是将不同成分的合金在不同的条件下铸成简单形状的铸件(如不同直径的圆棒), 主要目的是研究合金成分和凝固条件对雀斑生成倾向的影响。由于雀斑的产生起源于枝晶间的液体流动, 研究人员也通过建立流体动力学的模型来研究雀斑的产生。通常是用瑞利准数 Ra 来表征糊状区内枝晶间液体的非稳定性, 并作为判定雀斑生成的判据^[7-12]。但过去的实验工作和理论研究, 大都是在简单和理想条件下进行的, 并没有考虑铸件复杂形状的影响, 因而不能得出符合实际的判断, 也无法用来指导单晶铸件的工业生产。

雀斑缺陷的形成是影响高温合金单晶铸件质量的一个关键因素, 研究雀斑的形成规律, 提出减少或消除雀斑形成的方法以提高单晶叶片的合格率和质量, 具有非常重要的意义。作者在前期研究雀斑的工作中发现, 除了合金因素和凝固条件, 铸件的几何形状对雀斑形成有着非常重要的影响^[5,13-18]。本研究利用最近的实验结果, 对铸件形状对雀斑的影响进行了进一步的观察和分析, 以求更加全面和深刻地认识雀斑的形成机理和影响因素, 并采取更加有效的措施减轻甚至消除高温合金单晶铸件中的雀斑缺陷。

收稿日期: 2020-12-20

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)

作者简介: 马德新, 男, 1955年生, 博士, 教授, 深圳市万泽中南研究院有限公司, 广东 深圳 518004, E-mail: madexin@csu.edu.cn

1 实验

实验中使用了多种镍基高温合金，其化学成分列于表 1。其中 CMSX-4 和 DD5 作为第 2 代单晶高温合金，WZ30 作为第 3 代单晶高温合金，分别含有 3% 和 4.95% 的难熔元素 Re。这虽然提高了部件的高温机械性能，但同时也使合金的铸造性能相应变差，具体表现之一就是容易出现雀斑缺陷。

为了研究铸件形状因素对雀斑形成的影响，实验中浇注的铸件包括简单的圆形试棒、形状复杂的异形铸件以及真实的单晶涡轮叶片。浇注用的陶瓷型壳采用常规的失蜡法制备，单晶铸件在 VIM-IC/DS/SC 真空定向凝固炉中铸造而成。铸造过程完成后进行除壳和切割，通过宏观腐蚀检测铸件中雀斑缺陷出现的位置和形态特征。必要时对出现雀斑的铸件的相关部位进行局部切割，制作金相样品，采用 NIKON MM-400 光学显微镜 (OM) 进行微观组织检测。

2 结果与分析

2.1 铸件横截面形状对雀斑的影响

图 1a 显示了横截面为长方形 (30 mm×5 mm) 的 CMSX-4 合金单晶铸件边角处的表面组织，可见雀斑出现在铸件的直角棱角上而不是平滑的侧面上。这些雀斑缺陷经过宏观腐蚀呈现为断续的串状斑点形态。图 1b 为相应横截面的金相照片，显示了铸件的枝晶组织，雀斑位于铸件的棱角部位 (圆圈处)。雀斑在微观上呈现为破碎的枝晶臂，由于在凝固和对流过程中发生了位置的偏移和方向的扭转，与单晶基体组织不再具有相同的晶体取向，因而在金相组织中显示出不同的衬度。与铸件的侧平面相比，棱角部位的型壳较薄，散热条件好，冷却速率快，有着更好的凝固条件，按照常识不应该生成雀斑。但实验结果却表明，铸件的棱角形状明显促进了雀斑的形成。

图 2a 为采用合金 MAR-M247LC 浇注的单晶铸件的横截面，铸件形状类似于简化的涡轮叶片，外轮廓为不规则多边形。其中棱角 A, C 和 D 为外凸角 (角度小于

表 1 所用合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni-base superalloys used in the work (wt%)

Alloy	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Re	Hf	Ni
MAR-M247LC	8.2	9.2	9.5	0.5	5.6	0.7	32	-	1.05	Bal.
CMSX-6	10	5	-	3	4.8	4.7	2	-	0.1	Bal.
CMSX-4	6.5	9.0	6.0	0.6	5.6	1.0	6.5	3.0	0.1	Bal.
DD5	7.0	7.5	5.0	1.5	6.2	-	6.5	3.0	0.15	Bal.
WZ-30	3.5	6.0	6.5	0.4	5.8	0.15	8.0	4.95	-	Bal.

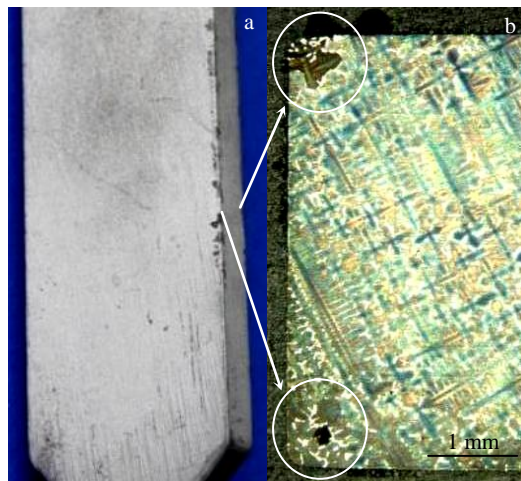


图 1 长方体铸件表面及横截面照片

Fig.1 Surface (a) and cross section (b) images of a rectangular component

180°), 分别对应于叶片的背面、排气边和进气边。这些棱角处是铸件中散热条件最好的部位，但都发现了雀斑缺陷 (图 2b~2d)。其中在 A 和 C 处，作为雀斑的破碎枝晶臂位于铸件表面，可从外表面观察到。而 D 处的破碎枝晶臂则位于铸件表层之下。所以说雀斑被认作表面晶粒缺陷并不准确，它实际上可以出现在表面之下一定的深度。这是因为，在高温合金定向凝固过程中，糊状区液体的流动极易沿着光滑的型壳内壁进行，称之为附壁效应。而型壳内壁的影响可达一定深度，形成一个流通性非常好的边界层。过去的实验工作已经发现，这个流通边界层的深度约为 1.5 mm^[13,19]，在此深度内会形成对流的加速和枝晶臂的冲断，从而形成雀斑。需要指出的是，在现行的高温合金单晶叶片生产中，都是通过铸件的宏观表面腐蚀来检测雀斑缺陷的，但这种方法并不完善，因为雀斑并不完全是表面缺陷，也会存在于铸件表层之下，如图 2d 所示。

图 2a 中铸件的棱角 B 为内凹角 (角度大于 180°)，对应于叶片的盆面，在此部位没有雀斑出现。与其它特征部位 (A、C 和 D) 相比，内凹角 B 处型壳最厚，热辐射角度最小，散热和凝固条件最差。按照通常认识，此处最容易产生雀斑。但事实恰恰相反，B 处是唯一一处无雀斑缺陷的棱角部位。而散热条件更好、冷却速率更快的特征部位 A、C 和 D，却都反常地产生了雀斑。

由上可见，铸件外凸的棱角能强烈促进雀斑的产生，而内凹的棱角则能有效抑制雀斑的形成，这种现象称之为铸件中雀斑的棱角效应。需要指出的是，实际铸件上的棱角并非几何意义上的尖角，而是都有着圆弧过渡，如同图 1 和图 2 中放大的棱角部位所示。所以，棱角效

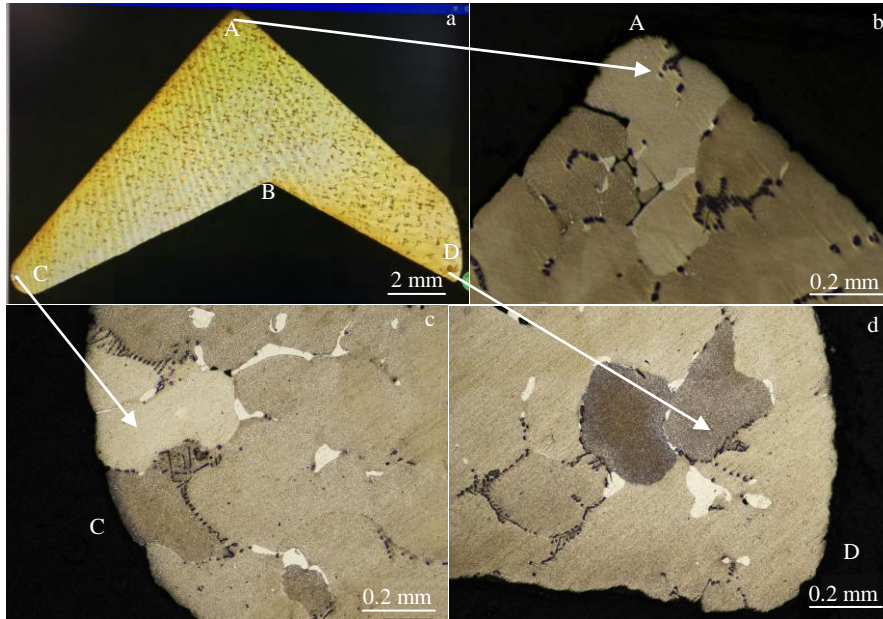


图 2 多边形铸件截面及外凸棱角 A、C 和 D 处的雀斑

Fig.2 Transverse section (a) of a polygonal component exhibiting freckles on the convex edges A (b), C (c), and D (d)

应从严格意义上应称之为曲率效应, 即雀斑倾向会在外凸曲面(曲率>0)处得到明显强化, 而在内凹曲面(曲率<0)处得到显著减弱。

图 3 为用 DD5 合金浇注的单晶涡轮叶片。可见, 雀斑产生在叶身的排气边(图 3a)和进气边上(图 3b), 特别是排气边上的雀斑链更长一些。雀斑不仅粗大, 也基本相连成串, 表明雀斑非常严重。需要指出的是, 叶片边缘特别是排气边并不是铸件中的厚大部位, 而是叶身最尖锐的薄壁处。此处散热条件最好、凝固速率最快, 按照通常认识本不该产生雀斑, 但由于棱角效应或曲率效应的作用反而成了最利于雀斑生长的部位。这再次说

明, 铸件的形状因素对雀斑的作用远远超过了凝固条件的影响。

除了叶片的进气边和排气边, 叶片的背面为外凸形曲面, 曲率为正值, 也会产生雀斑^[6,17]。图 4 显示了一个叶片背面出现雀斑缺陷的例子。但是, 由于叶背曲面平缓, 曲率较小, 所以产生雀斑的现象不像在曲率很大的排气边和进气边(图 3)那样常见。另外, 叶片盆面为内凹形, 曲率为负值, 在此部位从未发现过雀斑。这就如同图 2a 所示, 在内凹的棱角 B(角度>180°)处不会出现雀斑。

图 5 展示了用 CMSX-4 合金铸造的一单晶试棒横截



图 3 单晶叶片铸件排气边和进气边上的雀斑缺陷

Fig.3 Freckles on the trail (a) and leading edge (b) of SC blades

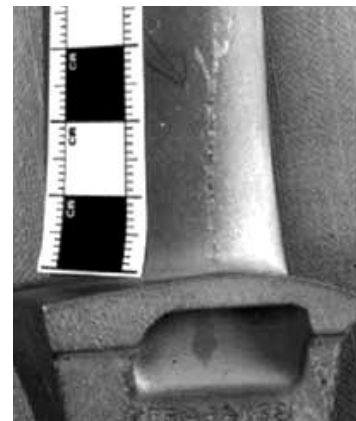


图 4 单晶叶片背面上的雀斑

Fig.4 Freckles of SC blade on the convex side^[6]

面的一部分，试棒外径为 30 mm，内部插入了内径和厚度分别为 10 和 2.5 mm 的陶瓷管作为型芯。外凸形的外表面 A 出现了雀斑（图中用圆圈标出）。从图 5 可以看出，插入的陶瓷管使铸件内部形成了朝内和朝外的相互面对的 2 个内表面（B 面和 C 面），因而造成了雀斑产生的不同条件。在弧形陶瓷管的内凹面即相应铸件的外凸面 C 产生了雀斑。而在陶瓷管的外凸一侧形成的铸件相应的内凹面 B，则没有雀斑出现。这再次说明，雀斑易于出现在曲率为正的铸件外凸表面（如 C 处），而不是曲率为负的内凹表面（如 B 处），不管这些表面是由型壳形成的外表面还是由型芯形成的内表面。实际上，图 5 中出现雀斑缺陷的试棒外表面 A 相应于叶片背面，向外凸出，曲率为正。而没有雀斑的内表面 B 相应于叶片的盆面，向内凹进，曲率为负。这再次验证了铸件表面曲率对雀斑的影响。

2.2 铸件纵向形状对雀斑的影响

图 6 为 CMSX-4 圆棒型铸件表面，外形在沿凝固方向分别出现台阶式的突然收缩（图 6a）和突然扩张（图 6b）。在图 6a 中，比较粗大的下部并无雀斑出现，但当圆棒直径缩小时，却在变细后的部位形成了雀斑。值得注意的是，这个雀斑链只延续生长了约 10 mm 的距离。这说明雀斑确实是由铸件形状的突然缩小而激发引起的。在图 6b 中，圆棒下部细小部分的表面有一条雀斑链，而在变粗后的圆棒表面，并没有马上产生新的雀斑。按照常识，铸件越粗大越易形成雀斑，但本实验的结果却说明，铸件由细突然变粗不但不会促进新雀斑形成，反而会对原有雀斑的生长产生抑制作用。

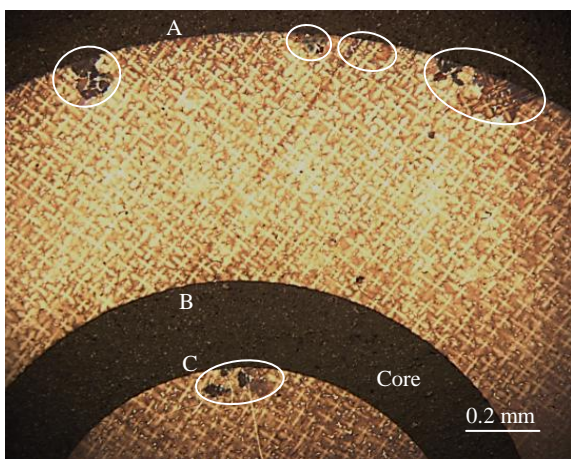


图 5 带芯试棒的横截面上的雀斑分布

Fig.5 Freckle distribution of the cylindrical sample with ceramic core on the transverse section

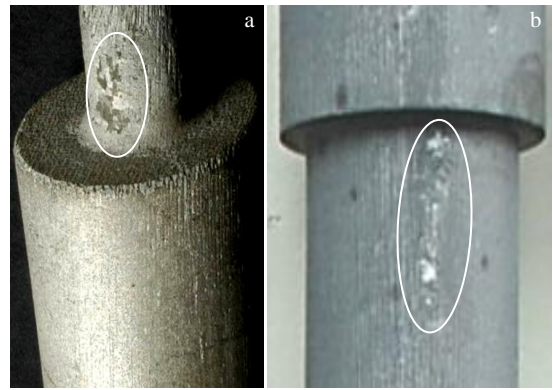


图 6 铸件外形的突然收缩和扩张对雀斑的影响

Fig.6 Freckles occurred at the abrupt contracting (a) and expanding (b) sections

需要指出的是，上述的收缩和扩张效应不但表现在外表面形状突然变化时，也表现在它逐渐变化时。当铸件的外形在沿着凝固方向出现逐渐扩张或收缩时，同样会对雀斑分别产生明显的抑制和促进作用。图 7 中的 CMSX-4 铸件的下半部为下细上粗的倒锥体，外表面在纵向上以一定角度向外倾斜，呈逐渐扩张型，表面上无雀斑产生。这说明扩张型的外表面明显不利于雀斑的形成，尽管铸件变得非常厚大。而图 7 中的铸件上半部为下粗上细的正锥体，锥体外表面在纵向上向内倾斜，呈逐渐收缩型，表面出现了严重的雀斑缺陷，而且雀斑的形貌由长链状变成树根状。这说明收缩形的外表面更利于雀斑的形成。总之，铸件外形扩张时能有效抑制和消除雀斑的产生（扩张效应），而外形收缩时能对雀斑的产生起到强烈的促进作用（收缩效应），这就是铸件纵向形状对雀斑的收扩效应。

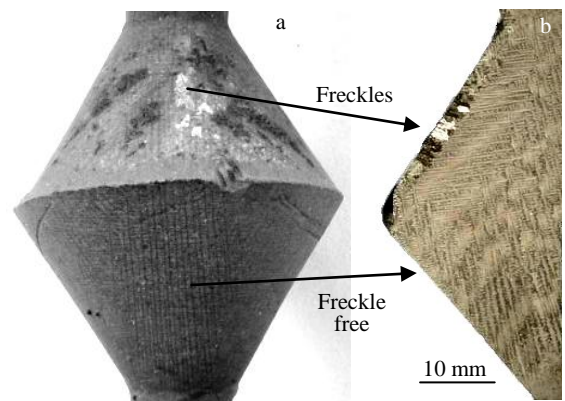


图 7 锥形铸件表面和纵截面上的雀斑分布

Fig.7 Freckle distribution on the surface (a) and longitudinal section (b) of casting

图 8a 和图 8b 分别为 CMSX-4 和 DD5 合金叶片铸件上的雀斑缺陷。这些雀斑并不是产生在铸件的厚大部位即冷却和凝固最缓慢之处, 而是在铸件外形收缩变窄的地方, 这正是铸件纵向形状变化的收缩效应对雀斑的形成产生了促进作用。总的来说, 雀斑极易产生于铸件的收缩部位, 却很难出现在扩张部位, 不管这种外形变化是突然的还是逐渐的。这再次说明, 在雀斑的生成机理上, 铸件的形状因素产生的影响要远远超过凝固条件因素。

图 9a 为一个 CMSX-4 合金单晶叶片, 在几处典型部位出现了雀斑缺陷。在下部厚大的榫头部位没有雀斑形成, 但在细腰状的过渡段(图 9b)出现了雀斑。表明雀斑是由于外形的收缩而产生, 又随着外形的扩展而消失, 这再次验证了铸件外形对雀斑的收扩效应。在缘板到叶身的转接部位(图 9c)也是由于外形的突然收缩促进了雀斑的出现。这些都与传统理念中铸件厚大部位比薄壁处更易产生雀斑的现象和说法完全相反, 再次说明铸件尺寸的缩小反而能促进雀斑的产生。在叶身部位由于铸件宽度逐渐收窄, 进排气边都稍微向内倾斜呈收缩状态, 在横截面轮廓的曲率作用和纵向轮廓的收缩作用的双重影响下, 雀斑得以延续向上生长(图 9d)。直到上部的叶身到叶冠的转接部位, 因纵向外形不再收缩而是突然扩张, 因而雀斑的生长也就被终止。总之, 从纵向上来看, 铸件外形的收扩效应对雀斑的产生发挥了显著作用。从横向截面来看, 雀斑产生在较尖锐的棱角边缘处, 而不是平滑的表面上, 这也验证了前述的铸件外形的曲率效应。

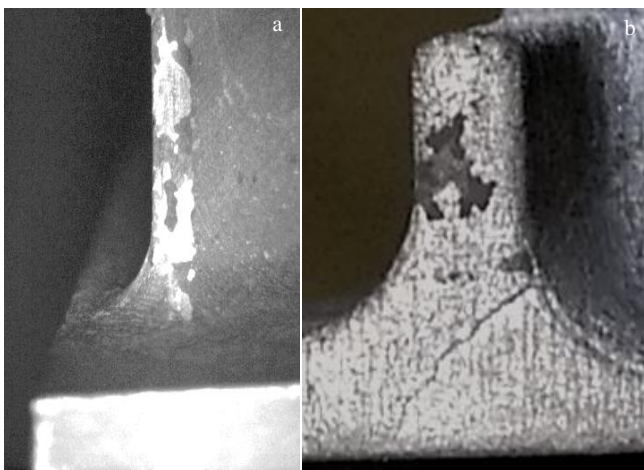


图 8 CMSX-4 和 DD5 合金叶片上的雀斑缺陷

Fig.8 Freckles on the blades of CMSX-4 (a) and DD5 (b)

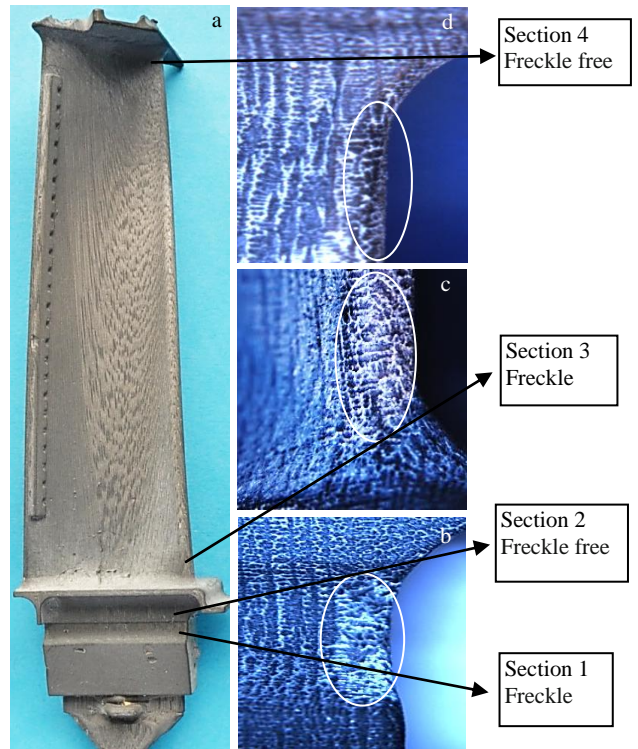


图 9 CMSX-4 合金叶片照片及典型部位的雀斑分布

Fig.9 Image of the CMSX-4 alloy blade (a) and magnification of some typical sections (b~d) showing freckle formation on contracting section 1 (b) and 3 (c), instead of on expanding section 2 (b) and 4 (d)

3 讨论

雀斑已成为高温合金定向凝固和单晶铸造中的重要组织缺陷, 但它的产生机理和影响因素至今仍未得到合理的解释和表征。早先的研究认为雀斑的产生主要受该处凝固条件的影响, 温度梯度和凝固速率太低会造成更长的凝固时间及更宽的糊状区宽度, 从而引起糊状区内液体的对流和雀斑的产生。但在本工作中, 作者通过设计不同形状的铸件, 研究形状对雀斑形成的影响, 找出了形状因素对雀斑形成的影响规律和机制, 为后续实际叶片的制备提供了指导。

3.1 铸件横截面形状的棱角效应和曲率效应

高温合金定向凝固过程中, 雀斑一般出现在铸件的表面, 雀斑的产生具有明显的表面效应。这种表面效应与铸件表面的几何形状有着密切的关系, 在横截面上表现为表面的棱角效应或曲率效应。前述实验中发现的雀斑出现的位置特征, 可以用图 10 中的多边形和弯曲表面的铸件横截面表示。对于多边形横截面的铸件(图 10a), 雀斑容易出现在角度小于 180°的外凸边角 A、C 和 D 处, 而不是角度大于 180°的内凹角 B 处。与此相对应, 对于

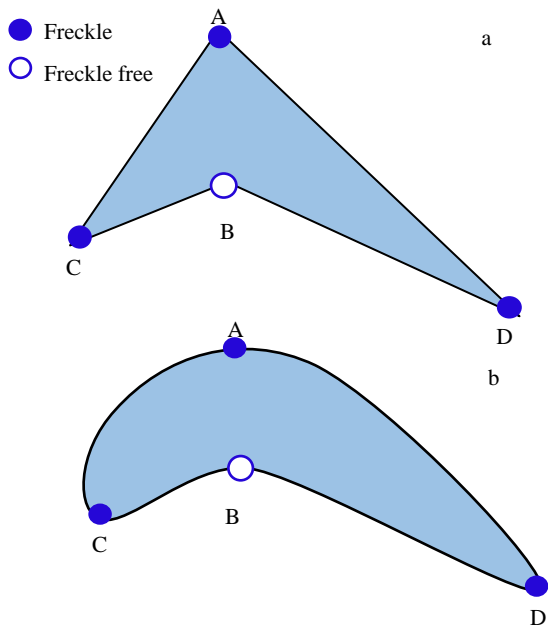


图 10 多边形和相应叶片铸件横截面各特征处的雀斑状况
 Fig.10 Freckle formation of casting on the characteristic positions of polygon (a) and corresponding blade (b)

具有弯曲表面的铸件，雀斑容易出现在曲率为正的铸件外凸曲面（图 10b 中的 A、C 和 D 处）而不是曲率为负的内凹曲面 B 处。这是因为引起雀斑的液体对流与铸件的表面形状有着重要的关系。

高温合金定向凝固过程中，铸件外表面有着比内部更利于雀斑形成的条件，原因是液体沿着光滑的模壳内壁流动的阻力要远小于枝晶臂互相交错的糊状区内部。由于壳壁提供了阻力很小的界面，糊状区液体流动极易沿着这个界面进行，称之为液体流动的附壁效应。附壁效应的影响可达一定深度，形成一个流通性非常好的边界层^[13,19]。在铸件外凸的边角和曲面（图 10a 和图 10b 中的 A、C 和 D 处），相邻的流通边界层会互相叠加，使对流条件变得更好。特别是在 C 和 D 处，铸件外表面形状尖锐外凸，相应液体被大幅度弯折的壳壁即外表面包围，附壁效应即表面效应得到显著叠加，所以会出现严重的雀斑缺陷。所以在一定程度范围内，壳壁夹角角度越小，或曲率越大，相邻表面靠得越近，附壁效应叠加效果会越显著，流通边界层的叠加效果会越明显。在图 10b 的 A 处，铸件表面外凸的幅度不大，曲率虽然为正但远小于 C 和 D 处，所以出现雀斑的机率并不很高。而图 10a 和图 10b 中的 B 处分别为内凹的边角和曲面，此处邻边的流通边界层不仅没有叠加，反而呈现发散状态，导致此处对流条件最差，不仅不如其它所有的凸角处，甚至还不如无夹角的平表面(夹角等于 180°)。这就

合理地解释了前面所述的棱角效应和曲率效应（即铸件外凸部位比平表面和内凹部位更倾向于产生雀斑）。综上所述，雀斑出现的棱角效应或曲率效应实际上是糊状区液体流动的附壁效应在铸件外凸部位叠加增强或在内凹部位发散减弱的结果。

3.2 铸件纵向形状的收扩效应

图 11 为 2 个典型的铸件纵截面，沿凝固方向分别发生了逐渐和突然的扩张和收缩。在铸件由下向上的定向凝固过程中，当铸件外形发生逐渐或突然扩张时（图 11a 和图 11b 的 B 截面），雀斑就会被抑制甚至消除。而当铸件外形突然或逐渐收缩时（图 11a 和图 11b 的 A 截面），就会促进雀斑的生成。

下面分析一下铸件外形扩张对雀斑的抑制机理。凝固过程中当枝晶生长进入扩张区时，原先沿壳壁垂直向上的液流会失去所依附的光滑界面而进入枝晶臂交错的铸件内部，并由于阻力的剧烈增加而使流速大大减缓，从而使雀斑的形成变得非常困难。即使原先已经有表面雀斑沿铸件表面生长，也会因失去了壳壁的依附而无法继续。因而铸件外形的扩张会抑制雀斑的形成，甚至阻断已有雀斑的继续生长。

铸件外形收缩时的情况则相反（图 11a 和图 11b 的 A 处），能够形成产生雀斑的有利条件。这是因为糊状区内的对流需要在一定的体积中进行。虽然雀斑链本身细长，但每条隧道式对流的形成都需要周围一定体积液体的密度反差作为动力。糊状区体积越大，能够产生隧道式对流的总驱动力就越大，所以铸件内部的对流驱动力实际上要大于铸件表面，只是因为内部阻力太大而不能

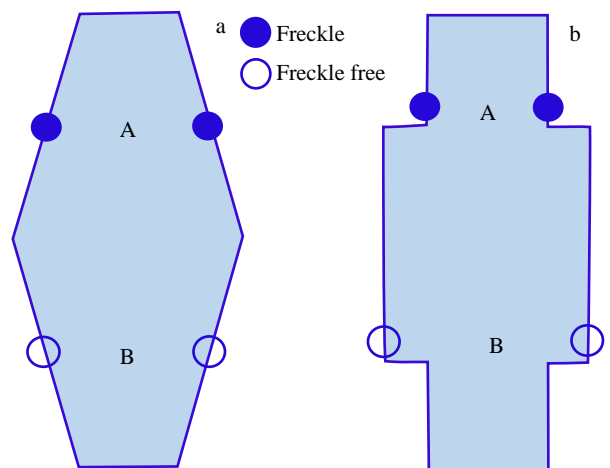


图 11 铸件外形纵向缓慢和突然变化对雀斑影响的示意图
 Fig.11 Schematic diagrams of freckle formation affected by on continuous (a) and abrupt change (b) in longitudinal geometry

形成有效对流。铸件收缩前的尺寸大, 内部液体上浮的推动力也大。在遇到截面收缩时, 突然或逐渐出现的光滑壳壁使得流动阻力大幅减小, 促使液体对流速度骤然提高, 极易超过临界值而造成雀斑的产生。综上所述, 铸件收缩型的表面起着汇集作用, 能够形成更强烈的液流, 为雀斑的产生提供有利的条件。

值得注意的是, 在上面的观察分析中, 仅考虑了铸件横截面和纵截面的形状因素就能合理解释雀斑出现的位置特征, 根本无需考虑凝固条件的影响。实际上, 若按照常理, 散热条件差和凝固速率低有利于雀斑形成, 反而与生产和实验中的雀斑现象(图 1 到图 9)相矛盾。这说明铸件形状对雀斑的作用(曲率效应和收扩效应)要远大于凝固条件的影响。

3.3 合金种类的影响

本工作主要研究铸件形状因素对雀斑形成的影响, 但合金的成分对雀斑形成也具有重要影响。图 12 为采用合金 CMSX-6、DD5 和 WZ30 (成分见表 1) 浇注的试棒(直径 15 mm)经腐蚀后的典型表面组织。CMSX-6 为不含 Re 的第 1 代单晶高温合金, 所有试棒中均未出现雀斑缺陷(图 12a)。DD5 为 Re 含量为 3% 的第 2 代单晶合金, 所有试棒仅在顶部出现了较短的雀斑链(图 12b)。而 WZ30 为第 3 代单晶合金, Re 含量为 4.95%, 所有试棒的中上部均布满了严重的雀斑缺陷(图 12c)。

上图中的 3 种合金的试棒具有完全相同的形状和尺寸, 在同样的模壳和定向凝固炉中采用相似的工艺参数

(浇注温度、炉腔温度, 抽拉速度) 铸造而成。但合金成分的不同造成了雀斑缺陷程度的明显不同, 其中合金元素 Re 含量的差别起了决定性作用。高代次单晶合金中添加了越来越多的难熔元素特别是 Re, 在提高材料高温机械性能的同时, 使其单晶铸造性能大幅降低, 特别是雀斑缺陷更加严重, 如图 12 所示。

4 结 论

1) 高温合金单晶铸件外表面的几何形状严重影响雀斑的产生, 称之为雀斑形成的形状因素, 其作用甚至超过凝固条件的影响。

2) 铸件形状对雀斑的影响在横截面上表现为棱角效应或曲率效应, 即在外凸形的棱角和曲面有利于形成雀斑, 而内凹形的棱角和曲面则对雀斑起到抑制作用。其原因在于对流的附壁效应在铸件的外凸形部位得到强化, 而在内凹形部位得到减弱。

3) 铸件形状对雀斑的影响在纵向上表现为收扩效应, 即凝固过程中外表面的收缩能强烈促进雀斑的产生, 而外表面的扩张则不利于雀斑的生成。其原因在于铸件的收缩部位为对流提供了更好的附壁条件, 而扩张部位则使对流失去了附壁条件。

4) 不同代次单晶高温合金的实验结果表明, 合金中 Re 元素含量的提高能明显增加铸件中的雀斑缺陷。

参考文献 References

- [1] Giamei A F, Kear B H. *Metallurgical Transactions*[J], 1970, 1: 2185
- [2] Copley S M, Giamei A F, Johnson S M *et al.* *Metallurgical Transactions*[J], 1970, 1: 2193
- [3] Auburtin P, Wang T, Cockcroft S L. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2000, 31B: 801
- [4] Tin S, Pollock T M. *Journal of Materials Science*[J], 2004, 39: 7199
- [5] Ma D, Wu Q, Buhrig-Polaczek A. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2012, 43B: 344
- [6] Reed R C. *Superalloys: Fundamentals and Applications*[M]. London: Cambridge University Press, 2006: 140
- [7] Auburtin P. *Determination of the Influence of Growth Front Angle on the Freckle Formation in Superalloys*[M]. Canada: University of British Columbia, 1998: 46
- [8] Auburtin P, Cockcroft S L, Mitchell A. *Superalloys 1996*[C]. Warrendale: TMS, 1996: 443
- [9] Beckmann C, Gu J P, Boettinger W J. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2000, 31: 2545
- [10] Yang W, Chen W, Chang K M *et al.* *Metallurgical and Materials*

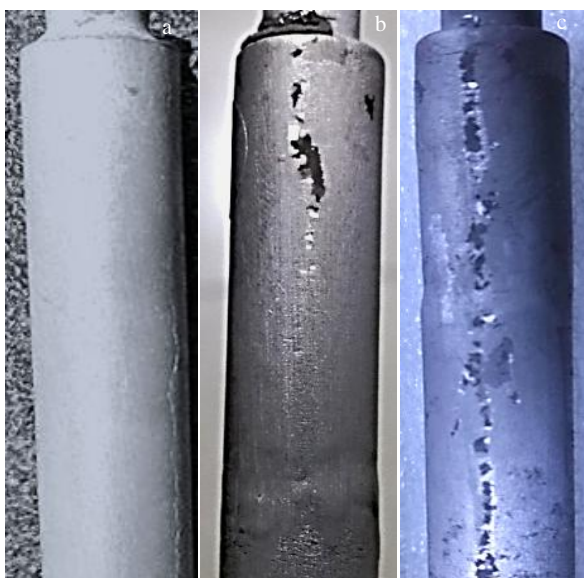


图 12 合金 CMSX-6, DD5 和 WZ30 试棒上的雀斑

Fig.12 Freckles on the surface of the alloy CMSX-6 (a), DD5 (b), and WZ30 (c)

- Transactions A*[J], 2001, 32A: 397
- [11] Tewari S N, Tiwari R, Magadi G. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2004, 35A: 2927
- [12] Feng Q, Carroll L J, Pollock T M. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2006, 37A: 1949
- [13] Ma D, Buhrig-Polaczek A. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2012, 43: 671
- [14] Ma D, Buhrig-Polaczek A. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2014, 45: 1435
- [15] Hong J P, Ma D X, Wang J *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 648: 1076
- [16] Hong J P, Ma D X, Wang J *et al.* *Materials*[J], 2016, 9(11): 929
- [17] Ma Dexin(马德新). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2016, 52(4): 426
- [18] Ma D X, Dong Z H, Wang F *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2020, 51(1): 88
- [19] Ma D X, Sahm P R. *Aluminium*[J], 1996, 72: 905

Effect of Casting Geometry on the Freckle formation During Single Crystal Solidification of Superalloys

Ma Dexin^{1,2}

(1. Wedge Central South Research Institute, Shenzhen 518004, China)

(2. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Freckles are presently one of the main casting defects in the single crystal (SC) components of superalloys. In the present work, a series of SC components with complex geometry, including turbine blades, were directionally solidified. On the transverse sections of the components with curved contour, freckles are exclusively found on the outward curving surfaces having positive curvature ($\text{angle} < 180^\circ$), because the surface effect zones of the neighboring sides are overlapped, providing more favorable convection condition. In comparison, the surfaces with negative curvature ($\text{angle} > 180^\circ$) remained freckle free, because the surface effect of the neighboring sides is divergent from each other. In the longitudinal direction, the freckle formation can be promoted by contracting contour and suppressed by expanding one. It is found that the casting shape has more significant influence on the freckle formation than the local thermal condition. The results of the different generations of single crystal superalloys show that the increase of Re content can significantly increase the freckles in the casting.

Key words: freckle; superalloy; directional solidification; single crystal

Corresponding author: Ma Dexin, Ph. D., Professor, Wedge Central South Research Institute, Shenzhen 518004, P. R. China, E-mail: madexin@csu.edu.cn