

引文格式: 赵运兴, 员莹莹, 马德新, 等. 高温合金 CMSX-4 和 DD419 单晶铸件中共晶含量的试验研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 74-80.

ZHAO Yunxing, YUAN Yingying, MA Dexin, et al. Experimental investigation on eutectic fraction in single crystal castings of superalloy CMSX-4 and DD419[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 74-80.

高温合金 CMSX-4 和 DD419 单晶铸件中共晶含量的试验研究*

赵运兴^{1,2}, 员莹莹², 马德新^{1,2}, 徐维台², 徐福泽², 魏冰²

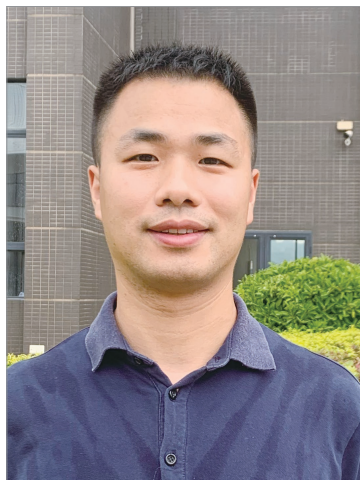
(1. 中南大学粉末冶金研究院, 长沙 410083;

2. 深圳市万泽中南研究院有限公司, 深圳 518045)

[摘要] 使用两种第二代镍基高温合金 CMSX-4 和 DD419 在相同工艺条件下制备相同形状的单晶叶片和试板铸件, 检验铸件的铸态和固溶热处理态组织。结果表明, 两种合金虽然化学成分相似, 但 CMSX-4 合金铸态组织中的 γ/γ' 共晶分数比 DD419 高出约 39%, 固溶热处理后的残余共晶含量也相应更多, 存在残余共晶含量超过技术标准的风险。CMSX-4 合金叶片铸件中共晶组织在不同部位的分布呈现更明显的不均匀性, 这些都对单晶叶片的机械性能产生不利影响。

关键词: 高温合金; 单晶叶片; 共晶组织; 铸态; 热处理态

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.17.074



赵运兴

工程师, 博士研究生, 研究方向为铸造高温合金研究及涡轮叶片制造。

镍基单晶高温合金具有优良的高温性能, 被广泛应用于航空发动机单晶涡轮叶片的制备^[1-3]。单晶高温合金的铸态组织主要由树枝状的 γ 基体和团状的 γ/γ' 共晶组织组成。经固溶热处理后, 合金中的元素分布会趋于均匀化, γ/γ' 共晶组织会减少甚至完全消除。通常情况下, 叶片铸态组织中共晶组织的含量越少, 经热处理后的残余 γ/γ' 共晶组织也就越少, 叶片的高温性能越好^[4-8]。残余 γ/γ' 共晶的含量是单晶叶片质量检测的一项重要指标, 对叶片的不同位置, 一般规定残余共晶的上限是 1%~3%。若铸态组织中 γ/γ' 共晶含量太多, 不但造成后续热处理过程的复杂化, 也会使残余 γ/γ' 共晶超出技术标准, 造成单晶铸件废品率的增加。

CMSX-4 为美国 CM 公司研发的第二代单晶高温合金, 其耐高温能力

高出第一代单晶高温合金 CMSX-2 和 CMSX-3 合金约 18 °C, 在国内航空发动机和燃气轮机的单晶涡轮叶片中有着广泛的应用^[9-10]。DD419 为国产第二代单晶高温合金, 其成分及性能与进口 CMSX-4 合金基本相当, 目前已应用到国产航空发动机单晶叶片的研制。本文对进口合金 CMSX-4 与国产合金 DD419 在相同工艺条件下进行相同形状单晶叶片的铸造试验, 检测其在铸态及固溶热处理态组织中的 γ/γ' 共晶含量, 对比两者的铸造性能, 为单晶叶片生产工艺的合理制定提供相关的依据和支撑。

1 试验方法

试验中所用的进口 CMSX-4 合金和国产 DD419 合金的实测成分见表 1, 对比其中数据可见, 两种合金

* 基金项目: 国家自然科学基金(91860103, 92060104); 深圳市海外高层次人才资金(KQTD2015032716463668)。

表 1 CMSX-4 合金和 DD419 合金的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of CMSX-4 alloy and DD419 alloy (mass fraction) %

合金	Cr	Co	Mo	W	Re	Al	Ti	Ta	Hf	Ni
CMSX-4	6.26	9.51	0.58	6.37	2.82	5.72	0.94	6.51	0.09	余量
DD419	6.36	9.49	0.59	6.23	2.92	5.44	1.02	6.43	0.10	余量

中各种元素的含量非常相似。

使用上述两种合金,在进口的 VIM-IC/DS/SC (ALD) 真空定向凝固炉中,以同样的浇铸工艺,在同样的 Al_2O_3 基陶瓷型壳中分别浇注了一批某型号的双联导向单晶叶片和厚度为 5 mm 的带凸台单晶试板,如图 1 所示。具体浇铸工艺为:模壳加热器保温温度 1550 °C,抽拉速率 3.5 mm/min。铸造完成后除去模壳,切除浇注系统。取其中 1 片叶片铸件,按照技术标准规定的共晶检测方法做纵向剖面,如图 1 (a) 所示,在上部的缘板部位 A 和中部的叶身部位 B 选取若干视场,检测相应的铸态组织。对于单晶试板,在距离试板底部 25 mm 位置处取截面进行检测,如图 1 (b) 所示。采用型号为 NIKON MM-400 的光学显微镜 (OM) 观察铸态金相组织,检测其中的 γ/γ' 共晶含量。另各取 1 件叶片和试板铸件在 15.0VPT-4022/24HVIQ 型真空热处理炉中按照以下制度进行固溶热处理:1280 °C/1 h+1290 °C/2 h+1300 °C/2 h+1308 °C/4 h+氩气冷淬;然

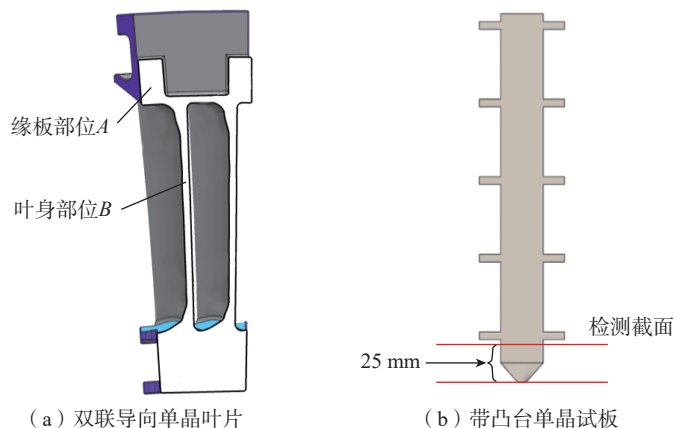


图 1 叶片和试板铸件形状和检测位置示意图
Fig.1 Blade and plate shape and inspection position

后按同样方法在叶片及试板检测位置选取若干视场,用光学显微镜 (OM) 观察其热处理态下的残余 γ/γ' 共晶含量。同时,为了验证检测结果的可靠性,对采用 CMSX-4 和 DD419 合金铸造并热处理的相同型号的双联导向单晶叶片的批量产品中的残余共晶情况进行了统计和比较。

2 试验结果

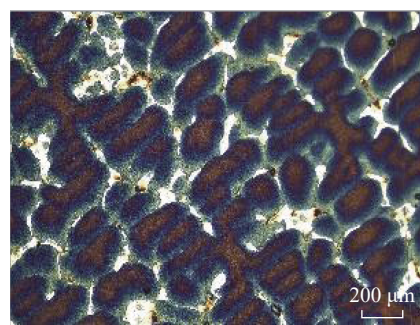
2.1 铸态组织的共晶含量

图 2 为 CMSX-4 合金浇注的单晶叶片铸态组织的金相图,其中图 2 (a) 的样品取自叶片缘板部位 A,图 2 (b) 取自叶片叶身部位 B。其中亮白色的团块状组织为 γ/γ' 共晶组织,可以看到 CMSX-4 合金铸件中共晶组织含量较多,其中部位 A 比叶身部位 B 的共晶组织更多些。

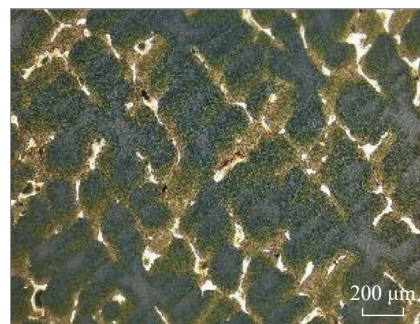
在上述叶片的部位 A 和 B 中分别随机选取了 4 个视场,定量检测了各视场中亮白色 γ/γ' 共晶组织的面积分数作为铸态组织中共晶分数 f_E (也称共晶含量),检测结果如表 2 所示。

可以看到,在铸态条件下部位 A 每个视场的共晶含量都高于部位 B 的各个视场。部位 A 和 B 两处的平均共晶含量分别为 8.09% 和 6.51%,可见尺寸厚大的缘板部位 A 比起薄壁部位的叶身部位 B 会产生更多的共晶组织。这一方面是因为 A 处的散热和凝固速率较慢,元素偏析更严重,利于产生大块的共晶团;另一方面是因为部位 A 位于叶片上端,共晶由于上聚效应会在部位 A 产生富集^[11-12]。

采用同样的方法对国产 DD419 合金叶片的缘板部位 A 和叶身部位 B 的铸态组织进行了观察,图 3 展示了两处的典型铸态组织。可以看到,在铸态条件下,作为第二代单晶高温



(a) 缘板部位 A



(b) 叶身部位 B

图 2 CMSX-4 合金叶片的铸态组织
Fig.2 As-cast microstructure of CMSX-4 alloy blade

表 2 CMSX-4 合金和 DD419 合金叶片铸态组织中共晶分数 f_E 测量结果

Table 2 Measurement result of eutectic fraction f_E in as-cast structure of CMSX-4 alloy and DD419 alloy blades

合金	缘板部位 A					叶身部位 B					总平均
	视场 1	视场 2	视场 3	视场 4	平均	视场 1	视场 2	视场 3	视场 4	平均	
CMSX-4	8.28	8.43	7.50	8.16	8.09	6.19	7.08	6.55	6.21	6.51	7.30
DD419	5.55	5.47	5.35	5.68	5.51	4.98	4.71	5.18	5.11	5.00	5.25

合金的 DD419 中共晶组织含量也较多。在部位 A 和 B 分别随机选取了 4 个视场,进行了共晶分数 f_E 的定量检测,结果如表 2 所示。可以看到,在叶片缘板部位 A 的共晶平均含量为 5.51%,高于叶身部位 B 的 5.00%。

从图 4 可以看到,叶片的缘板部位 A 中 CMSX-4 合金的平均共晶含量远高于 DD419 合金。而在叶身部位 B 中 CMSX-4 合金的平均共晶含量也明显高于 DD419 合金。若将每种叶片 A 处和 B 处的数据进行综合平均,得到 CMSX-4 和 DD419 合金铸态组织中共晶平均含量分别为 7.30% 和 5.25%,前者为后者的 1.39 倍。

为了验证上述叶片中检测结果的可靠性,采用相同的检测方法对相同工艺浇铸的 1 组试板铸件的铸态共晶含量进行了检测,金相图如图 5 所示。可以看到,采用 CMSX-4 合金浇铸的试板铸件图 5 (a) 中共晶含量明显高于 DD419 合金的试板(图 5 (b)),这与叶片的检测结果相同。在两种合金试板铸件的检测截面上分别随机选取 8 个视场进行共晶含量 f_E 的定量检测,检测结果如表 3 所示。

可以看到,在铸态条件下, CMSX-4 合金试板中几乎每个视场的共晶含量都高于 DD419 合金试板。对于试板铸件,合金 CMSX-4 与 DD419 的平均共晶含量分别为 7.10% 和 5.62%,前者为后者的 1.26 倍。再次表明,两种合金的成分虽然非常相似,但 CMSX-4 合金铸态组织中的共晶含量要明显高于 DD419 合金。

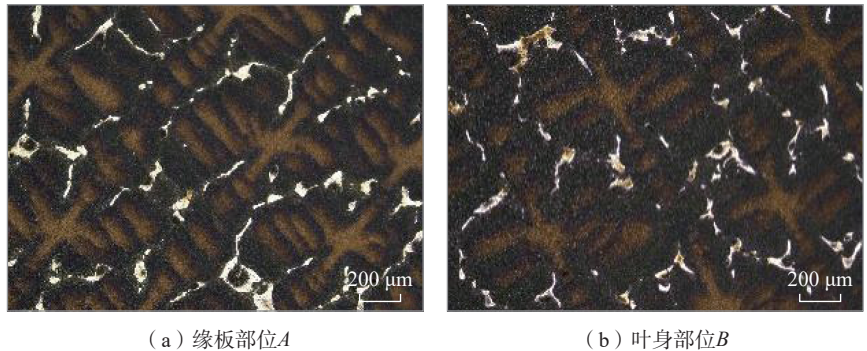


图 3 DD419 合金叶片的铸态组织
Fig.3 As-cast microstructure of DD419 alloy blade

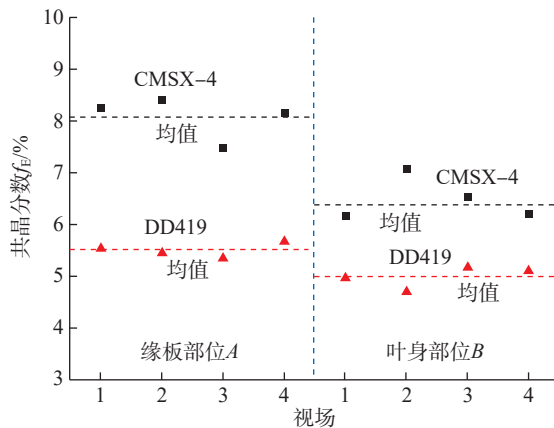


图 4 CMSX-4 合金和 DD419 合金叶片中铸态共晶含量对比
Fig.4 Comparison of eutectic fraction in as-cast blade of CMSX-4 alloy and DD419 alloy

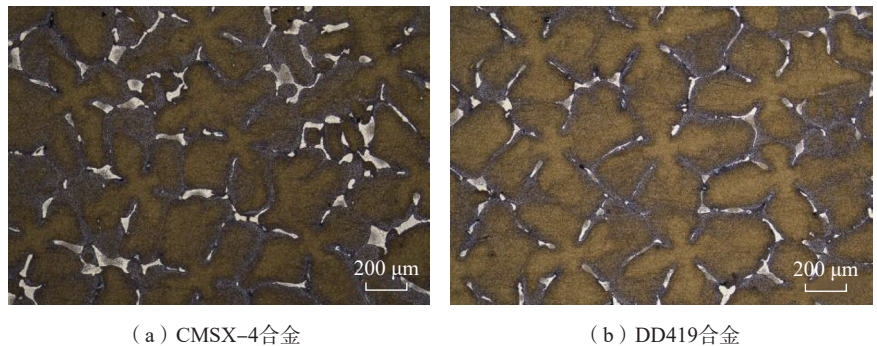


图 5 CMSX-4 合金及 DD419 合金单晶试板铸态金相组织
Fig.5 As-cast microstructure of CMSX-4 alloy and DD419 alloy plate

表 3 CMSX-4 合金和 DD419 合金试板铸态组织中共晶分数 f_E 测量结果
Table 3 Measurement result of eutectic fraction f_E in as-cast structure of CMSX-4 alloy and DD419 alloy plates %

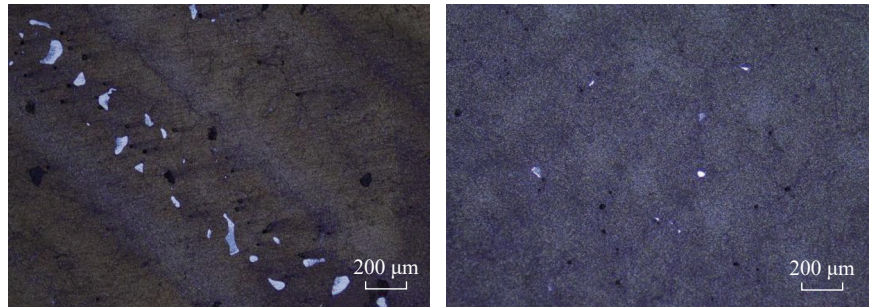
合金	视场								均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	
CMSX-4	7.42	6.88	8.71	6.76	6.82	6.83	6.92	6.42	7.10
DD419	6.64	5.27	6.36	5.59	5.29	5.63	4.52	5.67	5.62

2.2 热处理后的共晶含量

图 6 (a) 和 (b) 分别为固溶热处理后的 CMSX-4 合金叶片在缘板部位 A 和叶身部位 B 的金相组织图。可以看到, 叶片经固溶热处理后, 共晶组织显著减少, 特别是叶身部位 B, 仅有少量残余共晶存在。

同样, 对 DD419 合金叶片铸件固溶热处理后的组织进行了检测, 如图 7 所示。由于这种合金铸态组织的共晶含量本来就相对较少, 经固溶热处理后, 仅叶片缘板部位还存在少量的残余共晶, 而叶片叶身部位的共晶组织已经完全回溶, 没有发现残余共晶。

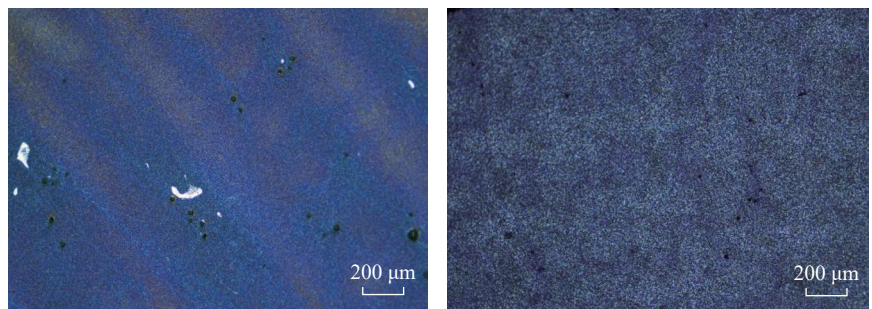
在固溶热处理后的 CMSX-4 和 DD419 合金叶片的缘板与叶身部位分别随机选取 4 个视场, 进行共晶含量检测, 结果如表 4 所示。可以看到, CMSX-4 合金中残余共晶的含量明显多于 DD419 合金。在叶片的缘板部位, CMSX-4 合金的平均残余共晶含量为 1.45%, 远高于 DD419 合金中的 0.48%。在叶身部位, CMSX-4 合金残余共晶为 0.14%, 而 DD419 合金的共晶组织已经完全固溶, 各个视场中均未发现残余共晶。将 A 处和 B 处的数据进行综合平均, CMSX-4 叶片中的残余共晶为 0.80%, 而 DD419



(a) 缘板部位 A (b) 叶身部位 B

图 6 CMSX-4 合金叶片的热处理态组织

Fig.6 Heat treated microstructure of CMSX-4 alloy blade



(a) 缘板部位 A (b) 叶身部位 B

图 7 DD419 合金叶片的热处理态组织

Fig.7 Heat treated microstructure of DD419 alloy blade

合金中仅为 0.24%, 前者为后者的 3.3 倍。可见, 不论是在叶片铸件的缘板还是叶身部分, 固溶热处理后 CMSX-4 合金中残余共晶含量都明显高于合金 DD419 (图 8)。

同样, 为了验证上述检测结果的

可靠性, 对用相同工艺浇注及热处理后的试板铸件, 采用相同的检测方法检测了残余共晶的含量, 金相图如图 9 所示。可以看到, CMSX-4 合金试板中残余共晶的含量明显高于 DD419 合金试板, 这与叶片的检测

表 4 CMSX-4 合金与 DD419 合金热处理态叶片共晶分数 f_E
Table 4 Eutectic fraction of heat treated blade of CMSX-4 alloy and DD419 alloy %

合金	缘板部位 A					叶身部位 B					总平均
	视场 1	视场 2	视场 3	视场 4	平均	视场 1	视场 2	视场 3	视场 4	平均	
CMSX-4	1.20	1.69	1.41	1.48	1.45	0.22	0.13	0.15	0.06	0.14	0.80
DD419	0.56	0.36	0.61	0.39	0.48	0	0	0	0	0	0.24

结果一致。

固溶热处理后,在两种合金试板的检测截面分别随机选取 8 个视场进行残余共晶含量检测,结果如表 5 所示。可以看出,试板铸件中 CMSX-4 合金残余共晶含量平均值为 0.11%,远高于 DD419 合金中的残余共晶含量(0.01%)。

为了进一步验证检测结果的可靠性,在进行试验工作的同时,也对批量生产的相同型号的双联导向单晶叶片的有关质量检查情况进行了统计。根据客户需求,采用 CMSX-4 和 DD419 合金分别生产了 6 个熔批共 705 件单晶叶片铸件。作为产品的一项重要技术指标,需要检测铸件中的残余共晶含量。根据要求在热处理后,在每种合金的每个熔批中随机抽取 1 片叶片进行解剖,在双联导向单晶叶片相同的部位采用相同的方式进行了残余共晶含量的检测。经统计,在抽查的 6 件 CMSX-4 合金叶片样品中,残余共晶含量的平均值为 0.79%,而 DD419 合金的 6 件叶片中残余共晶含量仅为 0.36%,前者为后者的 2.2 倍。由于进行的热处理制度相同,可以推断,两种合金铸态组织中的共晶含量存在差别,再次验证了不论是在铸态条件下,还是在经过相同的热处理后, CMSX-4 合金铸件中的共晶含量明显高于 DD419 合金。

3 讨论

3.1 合金种类与共晶含量

在镍基高温合金单晶叶片的凝固过程中,先是 γ 相以柱状树枝晶的形态从合金熔体中长出,随着固相分数的不断增加,被排入到液体的 γ' 相形成元素 Al+Ti+Ta 的含量也不断增加。当液相中的 Al+Ti+Ta 的含量超过共晶成分饱和度时,枝晶间的残余液体中开始产生 γ/γ' 共晶。从表 1 可以看到,虽然 CMSX-4 和 DD419 合金的化学成分非常相似,

但 CMSX-4 合金中的 Al+Ti+Ta 含量为 13.17%,要高于 DD419 合金中的 12.89%。特别是最重要的 γ' 相形成元素 Al 的含量在 CMSX-4 合金中为 5.72%,要高于 DD419 中的 5.44%,这就决定了 CMSX-4 合金铸态组织中的 γ/γ' 共晶含量要高于 DD419 合金。但是这两种合金中的 γ' 相形成元素的差别微小(Al 含量仅相差 5.1%, Al+Ti+Ta 含量仅相差 2.2%),却导致了合金铸态组织中 γ/γ' 共晶含量的明显差别(表 2 和 3),这

其中的机理还需要进一步研究。

本文的研究结果表明, CMSX-4 和 DD419 合金铸态组织中共晶含量的不同,导致两者在经过相同的固溶热处理后残余共晶含量相差 2 倍多。而在高温合金单晶叶片的生产制造过程中,对残余共晶含量的要求是比较严格的。叶片在服役过程中,若叶片中的残余共晶含量较高,残余共晶往往是裂纹萌生的起点,造成叶片发生断裂失效。本文研究的导向叶片中, CMSX-4 合金叶片经热处理

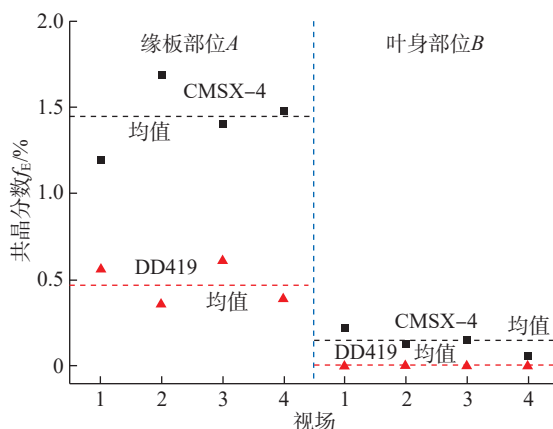
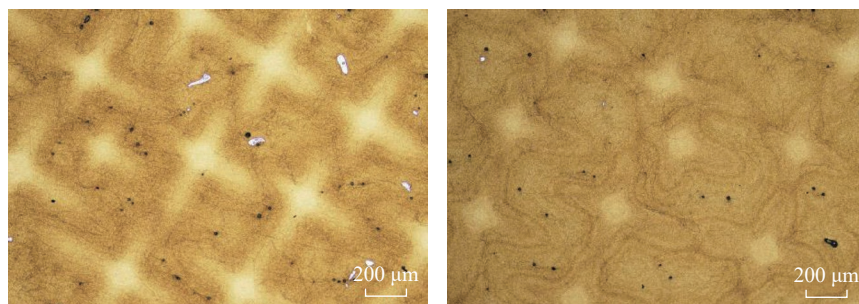


图 8 CMSX-4 合金和 DD419 合金叶片铸件热处理后共晶含量对比

Fig.8 Comparison of eutectic fraction of heat treated blade of CMSX-4 alloy and DD419 alloy



(a) CMSX-4合金 (b) DD419合金

图 9 CMSX-4 合金及 DD419 合金试板热处理后金相组织

Fig.9 Heat treated microstructure of CMSX-4 alloy and DD419 alloy plate

表 5 CMSX-4 合金与 DD419 合金热处理态试板共晶含量

Table 5 Eutectic fraction in heat treated plate of CMSX-4 alloy and DD419 alloy %

合金	视场								均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	
CMSX-4	0.16	0.09	0.03	0	0.09	0.13	0.34	0.02	0.11
DD419	0	0.01	0	0.01	0.01	0.02	0	0.02	0.01

后,虽然残余共晶含量的总量在标准规定的范围之内(小于3%),没有造成叶片报废,但残余共晶含量明显高于合金 DD419 的叶片,这使其机械性能会受到一定的影响。

本文作者在制备尺寸更大的另一种型号的叶片时发现,部分 CMSX-4 合金叶片的厚大缘板部位在经固溶热处理后,出现残余共晶总量超出标准的情况。如图 10(a)所示,该 CMSX-4 合金叶片在缘板厚壁处的残余共晶组织含量为 3.90%,超出了标准规定值 3.00%,从而造成了该叶片的报废。而在同样条件下制备的 DD419 合金叶片在同一部位的残余共晶含量仅为 0.14%,如图 10(b)所示,为合格产品。这说明,使用 CMSX-4 合金生产单晶叶片时,有可能因残余共晶超标而报废,而采用 DD419 合金时则不存在该风险。

3.2 共晶在铸件中的非均匀分布

本研究还发现,叶片上部的厚大缘板部位的共晶含量要高于中部的叶身部位,一方面是因为共晶组织的形成除了受合金成分影响外,还受铸件局部凝固条件影响。作为 γ/γ' 相的形成元素,Al、Ti 和 Ta 为典型的正偏析元素,凝固过程中富集于枝晶间的残余液体中,凝固后富集于以 γ/γ' 共晶形式析出的 γ' 相中。在尺寸和壁厚较大的缘板部位,由于散热和凝固速率较慢,会出现较宽的糊状区和粗大的枝晶组织,元素偏析更严重,

利于产生大块的共晶团。

另一方面,叶片上部缘板处共晶较多的原因是共晶组织的上聚效应^[11-12]。在 γ 相柱状枝晶向上生长过程中,富集在残余液体中的 Al+Ti+Ta 元素除了溶入枝晶间析出的 γ/γ' 共晶外,也会由于溶质浓度的差别而向上部的液体区扩散。此外,由于 Al 和 Ti 的密度很小,导致枝晶间残余液体因 Al 和 Ti 浓度的提高而发生密度反转即密度减小^[13-21],并在重力作用下向上对流,导致 γ/γ' 共晶组织在铸件上端如上部缘板处富集。合金 CMSX-4 不但比 DD419 具有更高含量的共晶组织,而且其共晶组织在铸件中非均匀分布的现象也更为明显。

4 结论

虽然高温合金 CMSX-4 与 DD419 的化学成分相似,但是前者铸态和热处理后组织中的 γ/γ' 共晶含量明显高于后者。因此采用合金 CMSX-4 生产单晶叶片时有可能因残余共晶含量超过技术标准而报废,而采用 DD419 合金时风险则减小很多。本研究还发现,高温合金叶片上部厚大的缘板部位共晶含量要高于中部的叶身部位,特别是在合金 CMSX-4 中更为严重。这一方面是因为铸件厚壁处散热和凝固较慢,元素偏析更严重,利于产生大块的共晶团;另一方面是由于共晶的上聚效应导致共

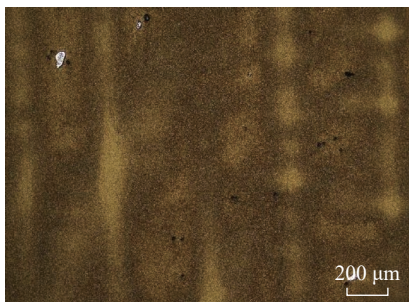
晶在铸件上端产生富集。

参考文献

- [1] 孙晓峰,金涛,周亦青,等.镍基单晶高温合金研究进展[J].中国材料进展,2012,31(12):1-11.
SUN Xiaofeng, JIN Tao, ZHOU Yizhou, et al. Research progress of nickel-base single crystal superalloys[J]. Materials China, 2012, 31(12): 1-11.
- [2] 郭建亭.高温合金材料学-中册-制备工艺[M].北京:科学出版社,2008.
GUO Jianing. Materials science and engineering for superalloys[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [3] CARON P, KHAN T. Evolution of Ni-based superalloys for single crystal gas turbine blade applications[J]. Aerospace Science and Technology, 1999, 3(8): 513-523.
- [4] 张琰斌.第三代镍基单晶高温合金固溶处理研究及工艺优化[D].西安:西北工业大学,2018.
ZHANG Yanbin. Study on the solution heat treatment and processing optimization of third generation Ni-base single crystal superalloys[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [5] YAN X W, GUO X, LIU Y L, et al. Numerical simulation of dendrite growth in Ni-based superalloy casting during directional solidification process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(2): 338-348.
- [6] 贾志宏,朱翔,马铭泽,等.热处理对定向凝固 CMSX-6 合金组织及拉伸性能的影响[J].有色金属(冶炼部分),2014(6):63-67.
JIA Zhihong, ZHU Xiang, MA Mingze, et al. Effects of heat treatment on microstructure and tensile properties of directional solidification CMSX-6 alloy[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(6): 63-67.
- [7] 田素贵,张超,薛永超,等.枝晶间距对镍基单晶合金蠕变性能的影响[J].沈阳工业大学学报,2013,35(4):378-384.
TIAN Sugui, ZHANG Chao, XUE Yongchao, et al. Influence of dendrite spacing on creep properties of single crystal nickel-based superalloys[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35(4): 378-384.
- [8] 张少华,卢玉章,郑伟,等.一次枝晶间距对 DD26 单晶高温合金持久各向异性的影响[J].材料导报,2016,30(14):6-9.
ZHANG Shaohua, LU Yuzhang, ZHENG



(a) CMSX-4



(b) DD419

图 10 采用 CMSX-4 合金和 DD419 合金制备的某型叶片固溶热处理后金相组织
Fig.10 Solution heat treated microstructure of CMSX-4 and DD419 blades

Wei, et al. Effect of primary dendrite arm spacing on the anisotropic stress rupture properties in a nickel-base single crystal superalloy DD26[J]. Materials Review, 2016, 30(14): 6–9.

[9] REED R C. The superalloys[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

[10] 航空发动机设计用材料数据手册编委会. 航空发动机设计用材料数据手册: 第4册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

Editorial Board of Material Data Manual for Aeroengine Design. Material data manual for aeroengine design: Volume 4[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[11] 马德新, 赵运兴, 魏剑辉, 等. 单晶高温合金叶片铸件中的共晶上聚现象分析[J]. 铸造, 2021, 70(11): 1302–1306.

MA Dexin, ZHAO Yunxing, WEI Jianhui, et al. Upward accumulation analysis of eutectics in single crystal superalloy blade castings[J]. Foundry, 2021, 70(11): 1302–1306.

[12] 马德新, 赵运兴, 徐维台, 等. 高温合金单晶铸件中共晶组织分布的表面效应[J]. 金属学报, 2021, 57(12): 1539–1548.

MA Dexin, ZHAO Yunxing, XU Weitai, et al. Surface effect on eutectic structure distribution in single crystal superalloy castings[J]. Acta

Metallurgica Sinica, 2021, 57(12): 1539–1548.

[13] GIAMEI A F, KEAR B H. On the nature of freckles in nickel base superalloys[J]. Metallurgical Transactions, 1970, 1(8): 2185–2192.

[14] COPLEY S M, GIAMEI A F, JOHNSON S M, et al. The origin of freckles in unidirectionally solidified castings[J]. Metallurgical Transactions, 1970, 1(8): 2193–2204.

[15] AUBURTIN P, COCKCROFT S L, MITCHELL A. Liquid density inversions during the solidification of superalloys and their relationship to freckle formation in castings[C]//The Minerals, Metals and Materials Society. Canada: University of British Columbia, 1996, 443–450.

[16] BECKERMANN C, GU J P, BOETTINGER W J. Development of a freckle predictor via Rayleigh number method for single-crystal nickel-base superalloy castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31(10): 2545–2557.

[17] MA D X, BÜHRIG-POLACZEK A. The geometrical effect on freckle formation in the directionally solidified superalloy CMSX-4[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014,

45(3): 1435–1444.

[18] 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.

MA Dexin. Freckle formation during directional solidification of complex castings of superalloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(4): 426–436.

[19] HONG J P, MA D X, WANG J, et al. Freckle defect formation near the casting interfaces of directionally solidified superalloys[J]. Materials, 2016, 9(11): 929.

[20] HONG J P, MA D X, WANG J, et al. Geometrical effect of freckle formation on directionally solidified superalloy CM247 LC components[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 648: 1076–1082.

[21] MA D X, ZHOU B, BÜHRIG-POLACZEK A. Investigation of freckle formation under various solidification conditions[J]. Advanced Materials Research, 2011, 278: 428–433.

通讯作者: 马德新, 教授, 博士, 研究方向为铸造高温合金。

Experimental Investigation on Eutectic Fraction in Single Crystal Castings of Superalloy CMSX-4 and DD419

ZHAO Yunxing^{1,2}, YUAN Yingying², MA Dexin^{1,2}, XU Weitai², XU Fuze², WEI Bing²

(1. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Wedge Central South Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518045, China)

[ABSTRACT] Using two types of the second generation superalloys CMSX-4 and DD419, the single crystal blades and plates with the same shape were produced under the same process conditions. The as-cast and solution heat treated microstructures of the blade castings were detected and analyzed. It was found that the γ/γ' eutectic fraction in as-cast structure of CMSX-4 alloy is about 39% higher than that in alloy DD419, in spite of the similar chemical compositions of the both alloys. After solution heat treatment, the residual eutectic in CMSX-4 alloy was observed to be higher than that of DD419 alloy, revealing more risk to exceed the technical standard. Besides the significant higher eutectic fraction, CMSX-4 exhibits also more non-uniform distribution of eutectic in different blade positions, so that the mechanical properties of the CMSX-4 castings is further negatively influenced.

Keywords: Superalloy; Single crystal blade; Eutectic structure; As-cast state; Heat treated state

(责编 晓月)