

DZ40M 合金叶片粘砂缺陷分析及改进措施

刘国库¹, 张海华¹, 张 玲²

(1. 海军驻沈阳地区军事代表室, 辽宁沈阳 110016; 2. 沈阳铸造研究所有限公司 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 采用扫描电镜分析了DZ40M合金与刚玉型壳反应形成的粘砂缺陷, 结果表明: 合金中的C、Cr元素与型壳面层的 α - Al_2O_3 及活性 SiO_2 发生界面化学反应, 产生粉红色反应层。采用EC95粉作为型壳面层材料能减轻DZ40M合金和型壳的界面反应; CTA抑制剂能有效抑制DZ40M合金和型壳面层的界面反应。

关键词: DZ40M合金; 陶瓷型壳; 粘砂; EC95粉; 界面反应

DZ40M合金是在X40合金的基础上, 通过调整添加Al、Ti、Zr等微量元素, 进行微合金化和应用定向凝固技术发展而成的一种定向凝固钴基高温合金^[1]。钴基铸造高温合金实质上是Co-Ni-Cr三元系为基的合金, 由于含有较多的铬(一般在20%以上), 所以抗氧化耐腐蚀性能良好^[2]; 钴基铸造高温合金持久性能的拉逊-米勒曲线变化比较平缓, 所以在更高温度承受的应力要高于镍基铸造高温合金; 同时, 大多数钴基铸造高温合金的初熔温度一般都高于镍基铸造合金, 因此钴基铸造高温合金被应用于航空发动机和燃气轮机的导向叶片。

某发动机高压涡轮空心导向叶片采用DZ40M合金定向凝固铸造工艺制造, 生产过程中铸件表面粘砂严重, 叶片铸件荧光显示夹杂率高, 直接影响了叶片铸件的合格率和生产周期。本研究通过对该导向叶片粘砂缺陷类型及特征的分析, 初步确定粘砂缺陷的形成机制, 并通过对叶片精铸过程中制壳工艺的改进, 减轻了叶片铸件的粘砂缺陷, 提高了叶片的成品率。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用合金材料为DZ40M, 其化学成分见表1。试验用陶瓷型壳面层耐火粉料分别选用320[#]EC95粉和320[#]电熔白刚玉粉, 其粒度分布和化学成分检测结果见表2和表3。制壳用粘结剂材料为硅溶胶, 其技术要求见表4。

表1 DZ40M合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of DZ40M alloy

										$w_B/\%$
C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Ta	B	Zr	Co
0.4~0.5	24.5~26.5	9.5~11.5	7.0~8.0	0.1~0.5	0.7~1.2	0.1~0.3	0.1~0.5	0.008~0.018	0.1~0.3	余量

表2 耐火粉料粒度分布
Table 2 Particle size distributions of refractory powders

种类	D10/ μm	D50/ μm	D90/ μm
EC95粉	2.48	23.07	86.35
电熔白刚玉粉	3.31	19.14	59.31

表3 耐火粉料化学成分
Table 3 Chemical compositions of refractory powders

种类	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O
EC95粉	94.73	5.05	0.03	0.19
电熔白刚玉粉	99.54	—	0.05	0.41

作者简介:

刘 国 库 (1978-), 男, 本科, 主要从事航空及舰船动力研究工作。E-mail: liuguoku81@163.com

通讯作者:

张海华, 男, 硕士。E-mail: zjlworkmail@163.com

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)12-1565-04

收稿日期:

2022-08-11 收到初稿,
2022-08-25 收到修订稿。

表4 硅溶胶技术要求
Table 4 Technical requirements of silica sol

型号	SiO ₂ /%	Na ₂ O/%	密度/(g·cm ⁻³)	pH (25℃±2℃)	运动粘度/(m ² ·s ⁻¹)	SiO ₂ 平均粒子直径/nm
JN-30	30~31	≤0.3	1.19~1.21	9~10	≤7×10 ⁻⁶	9~20

1.2 试验方法

本试验陶瓷型壳的制备过程中,分别采用电熔白刚玉粉、EC95粉和加3%CTA抑制剂的EC95粉为面层耐火粉料进行型壳面层涂制,对比不同面层材料型壳浇注后铸件表面粘砂情况。其中,CTA抑制剂是铬、钛氧化物及活性铝氧化物混合粉料,混合粉料粒度分布D50为8~10 μm。在真空定向凝固炉内进行DZ40M合金高压涡轮空心导向叶片浇注,定向凝固过程的主要工艺参数为:浇注温度1 500℃,上区温度1 460℃,下区温度1 480℃,抽拉速度6 mm/min。浇注后的型壳和叶片铸件取样,利用扫描电镜对型壳表面和叶片铸件表面进行微观形貌和化学成分分析。

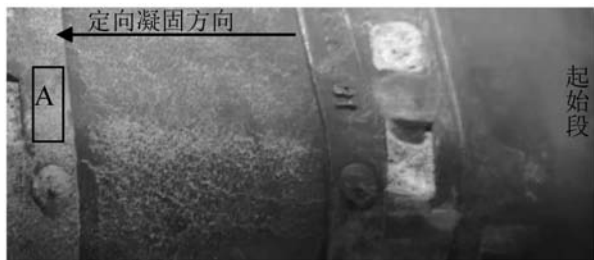
2 结果与分析

2.1 叶片铸件粘砂缺陷分析

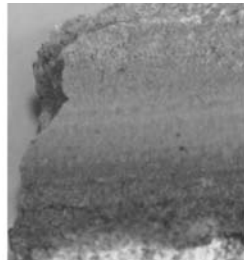
DZ40M合金定向高压涡轮空心导向叶片批产过程中,陶瓷型壳的面层耐火粉料为电熔白刚玉粉。对不同浇注批次的叶片铸件表面粘砂缺陷进行了数据统计,发现铸件清壳后粘砂率为100%。图1a为叶片浇注清壳后的铸件表面,可见叶片凝固起始段无明显粘砂情况,这是由于金属熔体与型壳接触时间短,二者

相互作用不明显;随着凝固时间的延长,粘砂开始产生,并且粘砂的颜色由与型壳面层相近的白色转变为粉红色,浇注后型壳表面变成灰色并伴有一层粉红色物质(图1b)。

利用扫描电镜对型壳表面进行分析,图2a是型壳表面SEM图,图2b、c是EDS分析结果。从结果可以看出,浇注后的型壳表面出现了非制壳元素C和Cr。对叶片铸件粘砂较重的区域(图1a中A处)取样,并利用扫描电镜进行化学成分分析,检测结果如图3所示。铸件中金属元素发生了变化,Cr元素严重缺失,Al元素含量增加,并出现了大量的非合金元素Si。结合型壳和铸件表面EDS分析结果,高温下合金的活性元素C、Cr在型壳与合金的界面发生了化学反应^[3-4],引起了型壳表面和铸件表面元素的变化。DZ40M合金是固溶强化和碳化物沉淀强化的钴基合金,合金中C元素含量高达0.4%~0.5%,大量的C元素提高了定向凝固过程中合金与型壳界面的反应活性。在真空高温条件下,C将型壳中的游离态的SiO₂和α-Al₂O₃还原成SiO和Al₂O, SiO和Al₂O与合金中的Cr元素反应生成粉红色的氧化物粘砂层, Si、Al浸入到合金内部增加了铸件表面Si、Al的含量。



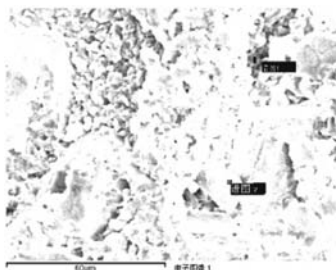
(a) 清壳后的铸件表面



(b) 浇注后的型壳

图1 叶片铸件和型壳

Fig. 1 Blade casting and shell



(a) SEM图



(b) 谱图1



(c) 谱图2

图2 型壳试样扫描电镜分析结果

Fig. 2 SEM analysis results of the shell samples

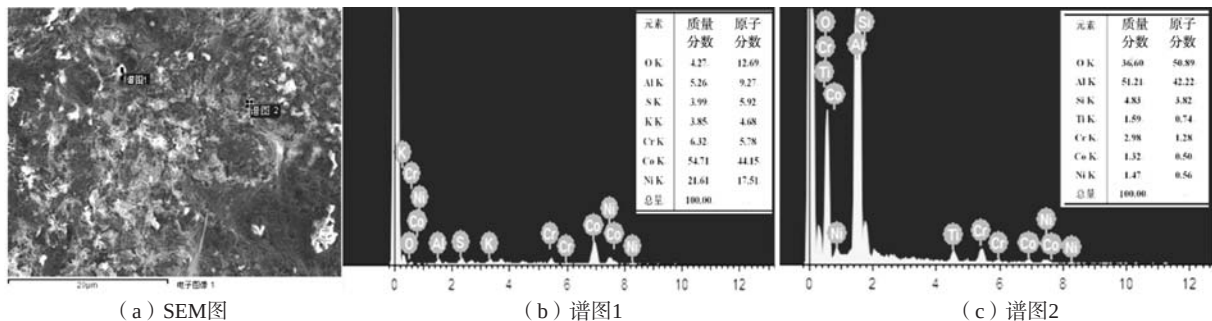


图3 叶片铸件试样扫描电镜分析结果
Fig. 3 SEM analysis results of the blade casting

2.2 粘砂改进措施

根据EDS分析结果，DZ40M合金叶片粘砂主要是合金元素C、Cr与型壳面层材料电熔白刚玉的 α - Al_2O_3 及硅溶胶中的活性 SiO_2 反应，因此粘砂的改进方向一是减少型壳中的活性物质，二是预先加入反应产物，以抑制反应速率。本试验采用EC95粉代替电熔白刚玉粉作为面层耐火粉料，进行陶瓷型壳的制备。EC95粉是 Al_2O_3 含量 $\geq 94\%$ 的高纯电熔莫来石材料，高温下的反应活性小于电熔白刚玉粉。采用EC95粉型壳浇注的DZ40M合金叶片铸件，清壳后表面如图4b所示。与原工艺刚玉面层型壳浇注的铸件表面（图4a）相比，叶片铸件表面粘砂情况大大减轻，已经没有大面积的粘砂，并且粘砂主要以白色为主，凝固后期局部粘砂呈

粉白色，但面积不大。

为进一步解决粘砂问题，在EC95面层粉料中加入3%的CTA抑制剂进行型壳制备，DZ40M合金叶片铸件清壳后表面如图4c所示。铸件表面无粘砂缺陷，铸件表面呈明亮的金属色，CTA抑制剂明显抑制了铸件的粘砂。这是因为CTA抑制剂粉料的粒度小于基体EC95粉，能在型壳面层中起到填隙作用，提高型壳面层的表面粗糙度。同时，抑制剂中含有氧化铝、氧化钛，在型壳烧结过程中能起到矿化剂的作用，它们的加入使型壳面层生成了一些硬度高、高温机械强度大的莫来石相，减少了型壳面层中的活性离态的 SiO_2 和 α - Al_2O_3 的含量，预先加入的铬氧化物也抑制了合金中Cr元素的反应。

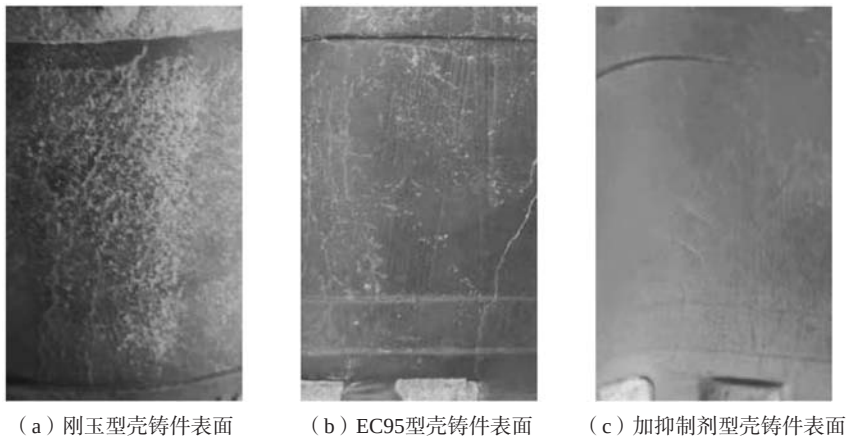


图4 铸件表面宏观图
Fig. 4 Macrograph of the surfaces of the castings

3 结论

(1) DZ40M合金在面层材料为电熔白刚玉粉的陶瓷型壳中浇注后形成粉红色粘砂层，其成因主要是合金中C、Cr元素与型壳面层的 α - Al_2O_3 及活性 SiO_2 发生界面化学反应。

(2) EC95面层型壳高温下的反应活性小于电熔白刚玉粉面层型壳，能减轻DZ40M合金和型壳面层的界面反应。

(3) 在EC95面层中加入3%的抑制剂能有效抑制DZ40M合金和型壳面层的界面反应。

参考文献:

- [1] 姜文辉, 管恒荣, 胡壮麒. 定向凝固钴基高温合金DZ40M的热处理研究 [J]. 航空材料学报, 2001 (3): 1-5.
- [2] 郭建亨. 高温合金材料学 (下册) [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 116-124.
- [3] 姚建省, 李鑫, 王丽丽, 等. Al_2O_3 型壳与DD6单晶合金的界面反应 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018 (3): 840-845.
- [4] 陈晓燕, 金喆, 白雪峰, 等. C对一种镍基高温合金与陶瓷型壳界面反应及润湿性的影响 [J]. 金属学报, 2015 (7): 853-858.

Analysis and Improvement Measures of Burning-On Defect in DZ40M Alloy Blades

LIU Guo-ku¹, ZHANG Hai-hua¹, ZHANG Ling²

(1. Military Representative Bureau of Naval in Shenyang, Shenyang 110016, Liaoning, China; 2. Shenyang Foundry Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The burning-on defects of DZ40M alloy and fused corundum shell were analyzed by means of SEM and EDS. The results showed that C and Cr elements in the alloy reacted with $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and active SiO_2 in the shell first layer to produce pink reaction. EC95 shell can reduce the interface reaction between the DZ40M alloy and shell. CTA inhibitor can effectively inhibit the interface reaction between the DZ40M alloy and shell.

Key words: DZ40M alloy; ceramic shell; burning-on; EC95 powder; interface reaction
