

引用格式: 张洪雪, 陈晓燕, 马月皎, 等. 型壳面层材料与 DZ125 定向凝固高温合金的润湿性及界面反应[J]. 航空材料学报, 2026, 46(3): 68-76.

ZHANG Hongxue, CHEN Xiaoyan, MA Yuejiao, et al. Wettability and interfacial reactions of shell surface layer materials with DZ125 directional solidification superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(3): 68-76.

型壳面层材料与 DZ125 定向凝固高温合金的润湿性及界面反应

张洪雪¹, 陈晓燕^{2*}, 马月皎³, 王石磊¹, 王延辉¹, 谭亚⁴, 李飞²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司精密铸造厂, 沈阳 110041; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院上海市先进高温材料及其精密成型重点实验室, 上海 200240; 3. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016; 4. 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘要: 采用座滴法对比研究 EC95 粉面层、刚玉粉面层和锆英粉面层 3 种陶瓷型壳面层材料对于 DZ125 定向凝固高温合金的高温化学稳定性及润湿性。观察分析陶瓷表面形貌及其与合金熔体界面反应形貌及组成, 计算合金熔体与陶瓷之间的润湿角, 分析讨论界面反应及润湿性与铸件表面机械粘砂之间的影响关系。结果表明: EC95 粉面层、刚玉粉面层和锆英粉面层 3 种陶瓷型壳的表面粗糙度分别为 3.987、3.391 μm 和 2.085 μm ; 合金与 3 种陶瓷的界面反应产物均以 Hf 的氧化物为主, 伴有少量合金成分; 对于刚玉面层陶瓷, 实验后合金表面几乎完整覆盖一层 Hf 的氧化物, 该氧化物层阻止合金与陶瓷面层的进一步反应, 因而更适用于 DZ125 合金的熔模铸造; DZ125 合金与 EC95 粉面层、刚玉粉面层和锆英粉面层陶瓷的润湿角分别为 84.95°、75.71°和 132.96°, 受界面反应和陶瓷表面粗糙度的影响, 刚玉面层型壳与 DZ125 合金的润湿性更好。

关键词: 熔模铸造; DZ125 定向凝固高温合金; EC95 粉面层; 刚玉粉面层; 锆英粉面层; 界面反应; 润湿性

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000190

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000190

中图分类号: TG244; V252

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)03-0068-09

Wettability and interfacial reactions of shell surface layer materials with DZ125 directional solidification superalloy

ZHANG Hongxue¹, CHEN Xiaoyan^{2*}, MA Yuejiao³, WANG Shilei¹, WANG Yanhui¹,
TAN Ya⁴, LI Fei²

(1. Precision Casting Factory, AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110041, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shichangxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 4. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, Hunan, China)

Abstract: The high-temperature chemical stability and wettability of EC95 powder surface layer, corundum powder surface layer, and zirconium powder surface layer of ceramic shell to DZ125 directional solidification superalloy are comparatively studied by the sessile-drop experiment. The morphology of ceramic surfaces as well as the morphologies and compositions of the interfacial reaction zones between the ceramics and the alloy melt are observed and analysed. The contact angles between the alloy melt and the ceramics are calculated, and the influence of interfacial reactions and wettability on the mechanical penetration defect of the casting surface are discussed. The results show that the surface roughness values of EC95 powder surface layer, corundum powder surface layer, and zirconia powder surface layer ceramics are 3.987, 3.391 μm , and 2.085 μm , respectively. The interfacial reaction products

between the alloy and the three types of ceramics are mainly composed of Hf oxides, accompanied by a small amount of alloying components. For the corundum powder surface layer ceramics, the alloy surface is almost completely covered by a layer of Hf oxide after the experiment. This oxide layer effectively inhibits the further interfacial reaction between the alloy and the ceramic surface layer, making it more suitable for the investment casting of DZ125 superalloy. The contact angles between DZ125 superalloy and EC95 powder surface layer, corundum powder surface layer, and zirconia powder surface layer are 84.95°, 75.71°, and 132.96°, respectively. Due to the influence of interface reactions and ceramic surface roughness, the wettability between corundum surface layer shell and DZ125 alloy is better than other surface layers.

Key words: investment casting; DZ125 directional solidification superalloy; EC95 powder surface layer; alumina powder surface layer; zircon powder surface layer; interfacial reaction; wettability

DZ125 定向凝固镍基高温合金具有优异的中高温力学性能和物理性能, 不含 Re、Ru 等贵金属, 成本较低, 因此广泛应用于航空发动机涡轮叶片^[1-5]。DZ125 薄壁空心叶片采用熔模精密铸造技术制备而成, 陶瓷型壳材料对叶片的表面质量及尺寸精度至关重要^[6-8]。目前, 高温合金陶瓷型壳面层耐火材料主要有 EC95 粉体、刚玉粉、锆英粉、氧化钇粉体、氮化硼粉体等, 黏结剂主要有硅溶胶和硅酸乙酯^[9-12]。

张鸿等^[13]分析了用刚玉型壳浇注 DZ125 合金涡轮叶片的荧光缺陷, 认为表面缺陷主要为集中在叶背的块状反应物, 反应物成分分析显示其主要为富 Hf 和富 Si 的金属氧化物。Yao 等^[14]从反应物和反应热力学角度对比研究刚玉型壳与 DZ125 合金和 DZ417G 合金的界面反应, 认为 DZ125 合金的界面反应机理主要为活性元素 Hf 和型壳氧化物之间的置换反应。类似地, 王丽丽等^[15]研究了 DZ125 定向凝固合金与 SiO₂-ZrO₂ 陶瓷型芯的界面反应, 认为反应产物主要为 HfO₂, 并富集在合金表面, 阻止合金与陶瓷型芯进一步反应。Li 等^[16]研究不同含量 O、N、S 微量元素的 DZ125 合金与 EC95 面层陶瓷型壳的界面反应及润湿性, 认为 DZ125 合金与陶瓷型壳的反应产物主要为 HfO₂ 和 Al₂O₃; 微量元素含量越高, 合金与陶瓷型壳的界面反应越严重, 并且界面处微量元素的吸附使得润湿角减小。杨瑞宁等^[17]详细分析了 DZ125 镍基高温合金中富 Hf 夹杂物的形貌、结构及成分, 表明当 Hf 元素分散不充分时, Hf 元素倾向于向氧化物陶瓷相/熔体的界面聚集, 在高温下与陶瓷中的

Al₂O₃ 和硅溶胶黏结剂中的 SiO₂ 发生反应, 导致铸件表层 HfO₂ 夹杂物的形成。由此可见, 虽然高温合金含有十多种合金元素, 成分复杂, 但是 DZ125 合金界面反应的主导元素基本为 Hf、Al、Si 元素。

DZ125 合金与刚玉型壳界面反应产物及机理的研究已比较明确。王石磊等^[18]研究了 DZ125 合金与刚玉面层型壳之间的界面反应及润湿性, 认为刚玉型壳表面粗糙度小, 为 1.9 μm, 该光滑型壳有利于增强型壳对 DZ125 合金熔体的不润湿性, 因此能够有效抑制合金熔体与型壳之间的界面反应及粘砂。然而, 上述研究选用的研究主体(型壳面层材料)较为单一, 未能对 DZ125 合金熔模铸造常用耐火材料(刚玉粉、EC95 粉、锆英粉等)的应用进行全面对比分析。

因此, 本工作选取 DZ125 镍基高温合金, 分别研究其与常用型壳面层材料 EC95 粉、刚玉粉和锆英粉的界面反应及润湿性; 分析 3 种型壳与 DZ125 合金的润湿性规律及高温化学稳定性特征, 为 DZ125 合金铸造用陶瓷型壳面层材料遴选和铸件表面质量控制提供重要的指导依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

DZ125 高温合金的合金成分如表 1 所示。采用线切割切取边长为 5 mm 的立方体合金试样, 经 150[#]砂纸磨去立方体合金试样表面的氧化皮、线切割痕迹等, 再用 600[#]砂纸对合金试样表面进一步打磨, 此过程须尽量保持试样表面平整。向玻璃烧杯

表 1 DZ125 高温合金化学成分(质量分数/%)
Table 1 Composition of DZ125 superalloy (mass fraction/%)

Co	Cr	W	Mo	Al	Ta	Ti	Hf	B	C	Ni
9.5-10.5	8.4-9.4	6.5-7.5	1.5-2.5	4.8-5.4	3.5-4.1	0.7-1.2	1.2-1.8	0.01-0.02	0.07-0.12	Bal.

中添加丙酮溶液,将上述合金试样放置于丙酮溶液中进行超声清洗 2 min,以洗去合金试样表面残留污渍。

采用陶瓷型壳的原料及工艺制备片状陶瓷,面层材料分别为 325 目 EC95 粉、刚玉粉和锆英粉,黏结剂为 30%(质量分数,下同)硅溶胶,辅以 1% 的消泡剂和润湿剂。具体流程为:在新鲜干净的蜡板上涂挂面层浆料并撒 80~100 目面层砂;待面层干燥后,进行背层、封浆层涂挂及撒砂操作;背层粉体为 325 目刚玉粉,黏结剂为硅溶胶,背层砂料分别为 40~50 目和 10~20 目刚玉砂,砂料粒径随撒砂层数增加而增大;制备好的片状陶瓷经蒸汽脱蜡后,在 950 °C 下焙烧 2 h,得到类似于陶瓷型壳的片状陶瓷,如图 1 所示。其中,EC95 粉面层、刚玉粉面层和锆英粉面层的片状陶瓷以下分别简称为 E 陶瓷、G 陶瓷和 GY 陶瓷。用金刚砂砂轮机将片状陶瓷(厚度 5 mm 以上)切割为边长为 20 mm 的方形试样。经 150[#]砂纸打磨背层,保证试样放置在水平面上时陶瓷上表面处于水平状态,该过程可使用小型水平仪对陶瓷试样是否水平进行测量。向玻璃烧杯中添加丙酮溶液,将上述陶瓷试样放置于溶液中,超声清洗 2 min,以洗去陶瓷表面残留粉尘等。

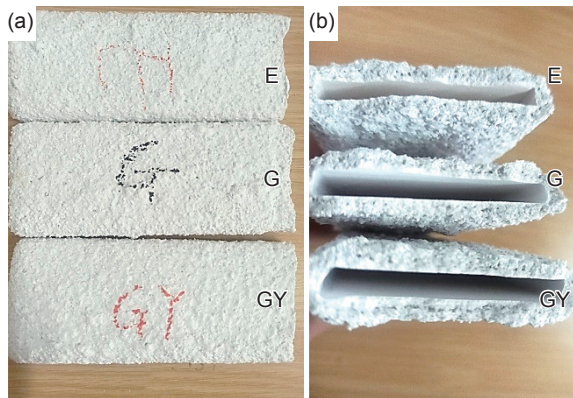


图 1 制备的片状陶瓷 (a)平放;(b)竖放

Fig. 1 Prepared sheet-shaped ceramic (a) horizontal placement; (b) vertical placement

1.2 实验方法

采用座滴法研究 DZ125 高温合金与 E 陶瓷、G 陶瓷和 GY 陶瓷的界面反应及润湿性。将上述边长为 20 mm 的方形陶瓷试样放置于真空感应定向凝固炉并调整水平,将边长为 5 mm 的块状合金试样放置于陶瓷试样之上。将真空感应定向凝固炉抽真空至 0.5 Pa 后,以 10 °C/min 的升温速率升温至实验温度 1530 °C。合金试样经高温熔化、保温

40 min 后,下拉至真空感应定向凝固炉内冷却区,合金试样快速冷却凝固,形成球冠状合金,如图 2 所示。

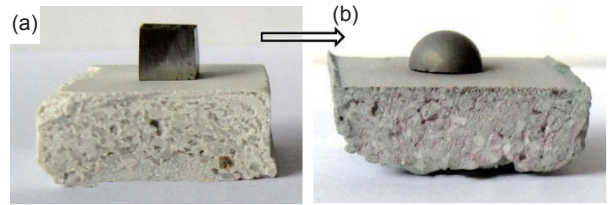


图 2 座滴法实验前(a)和实验后(b)图示

Fig. 2 Schematic graphs before (a) and after (b) the sessile-drop experiment

测量球冠状合金的底部半径 r 、高度 h 及底部直径 d (图 3),利用几何公式,如式(1)~(3)所示,通过计算 β ,得到合金与陶瓷的润湿角 θ :

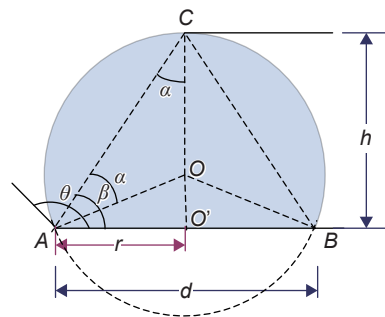


图 3 润湿角相关参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wetting angle related parameters

$$\tan\beta = \frac{h}{r} \quad (1)$$

$$\beta = \arctan \frac{h}{r} = \arctan \frac{2h}{d} \quad (2)$$

$$\theta = 2\beta = 2\arctan \frac{2h}{d} \quad (3)$$

采用型号为 VK-X3000 的材料型正置激光共聚焦显微镜观察陶瓷的二维(2D)、三维(3D)表面轮廓形貌并测量粗糙度;采用型号为 Vega 3 的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察陶瓷试样表面组织及实验后合金试样与陶瓷接触面的合金组织,并分析特征反应产物中元素种类及含量。

2 结果与分析

2.1 片状陶瓷试样的表面形貌及粗糙度

采用扫描电子显微镜观察片状陶瓷试样的表面微观组织,如图 4 所示。图 4(a)、(c)、(e)分别

为 E 陶瓷、G 陶瓷、GY 陶瓷放大 1000 倍的表面形貌；图 4(b)、(d)、(f) 分别为图 4(a)、(c)、(e) 中矩形框内区域放大至 2000 倍的表面形貌。可以看出，E 陶瓷表面 EC95 粉体颗粒尖角较多，且粉体中含有个别片状颗粒及较大粒径的颗粒，因此陶瓷表面不规则形貌的空隙或凹坑较多。G 陶瓷表面刚

玉粉体中小颗粒较多，在大、小颗粒交界处形成形状不规则的凹坑或空隙。GY 陶瓷面层较为致密，烧结更为彻底，大、小颗粒均匀分布，凹坑或空隙尺寸较小。由陶瓷表面微观形貌分析得到，3 种面层陶瓷的区别不仅在于物质本身，而且不同粉体制备的陶瓷表面孔隙率不同，粗糙程度也不同。

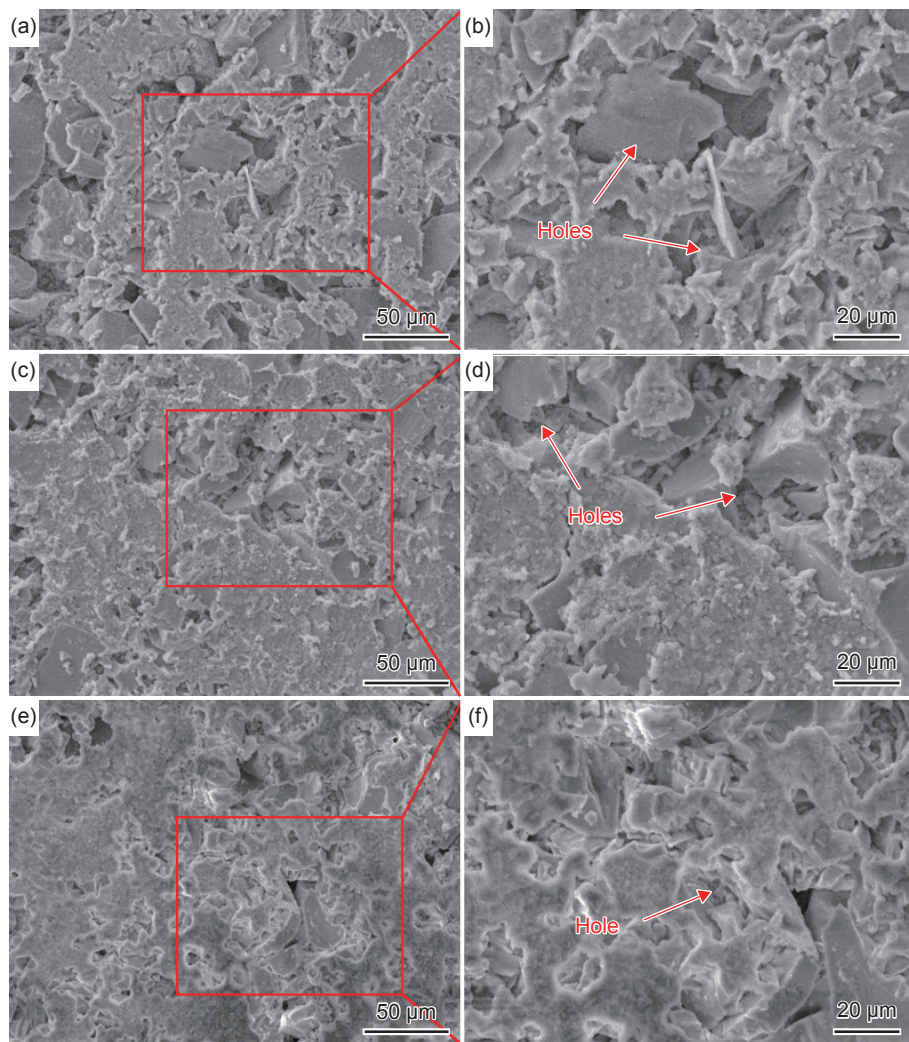


图 4 不同陶瓷的表面微观组织 (a)E 陶瓷；(b)图(a)中局部放大图；(c)G 陶瓷；(d)图(c)中局部放大图；(e)GY 陶瓷；(f)图(e)中局部放大图

Fig. 4 Microstructures of different ceramic surfaces (a) E ceramic; (b) local magnification in Fig. (a); (c) G ceramic; (d) local magnification in Fig. (c); (e) GY ceramic; (f) local magnification in Fig. (e)

进一步采用材料型正置激光共聚焦显微镜观察 E 陶瓷、G 陶瓷和 GY 陶瓷二维和三维表面宏观形貌，如图 5 所示，并测试陶瓷表面粗糙度，结果见表 2。可以看出，3 种陶瓷表面非密实状态，呈现凹坑，凹坑的大小及多少与面层粉体粒度级配以及面层浆料的粉液比有关，形成具有一定粗糙度的表面。E 陶瓷和 G 陶瓷表面粗糙度较大，分别为 $3.987 \mu\text{m}$ 和 $3.391 \mu\text{m}$ ；GY 陶瓷表面粗糙度较小，为 $2.085 \mu\text{m}$ 。陶瓷表面粗糙度对铸件精确复制蜡

型形状及尺寸和铸件表面质量提升起到十分关键的作用。

2.2 不同型壳材料与 DZ125 合金的界面反应

图 6 为座滴实验后合金及陶瓷的宏观形貌。可以看出，DZ125 合金在 E 陶瓷和 G 陶瓷上呈半球状，合金上表面有金属光泽，合金下表面无金属光泽，分布有灰色或浅黄色物质，对应的陶瓷表面圆形区域有反应物分布。DZ125 合金在 GY 陶瓷上呈球状，合金上表面无金属光泽，下表面呈现较

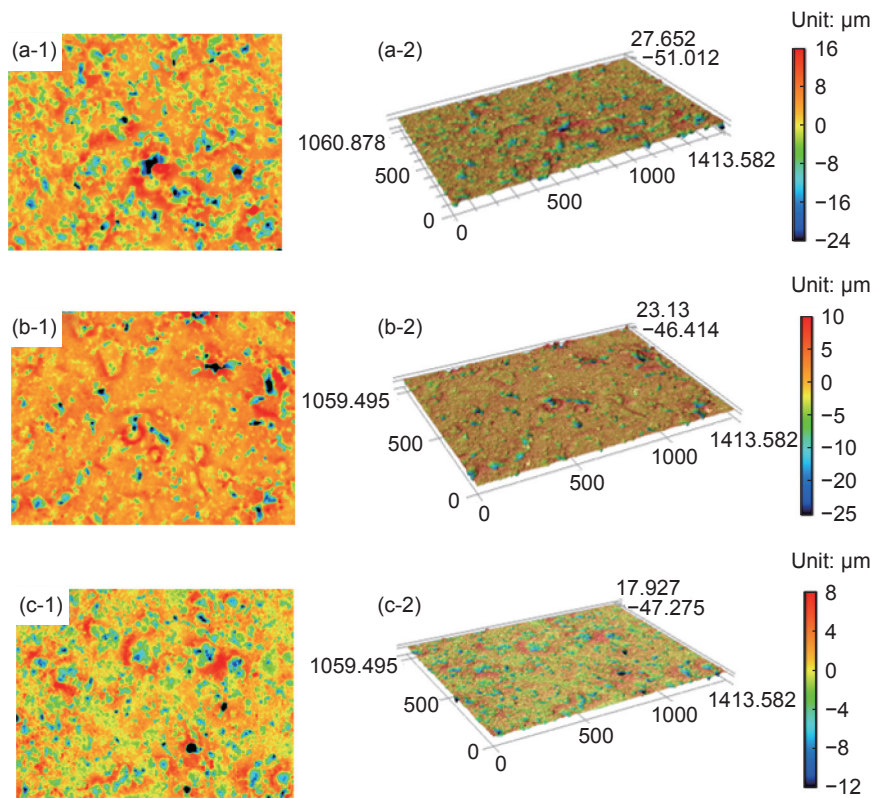


图5 E陶瓷(a)、G陶瓷(b)和GY陶瓷(c)表面2D(1)和3D(2)宏观形貌

Fig. 5 Surface 2D (1) and 3D (2) macro-topography of E ceramic (a), G ceramic (b), and GY ceramic (c)

表2 不同陶瓷表面粗糙度

Table 2 Surface roughness of different ceramics

Ceramic	Surface layer material	$R_a/\mu\text{m}$
E	EC95 powder	3.987
G	Corundum powder	3.391
GY	Zirconium powder	2.085

为均匀分布的黄色物质,对应的陶瓷表面圆形区域呈亮白色。

进一步采用扫描电子显微镜观察界面反应区域合金试样底部形貌、组织及特征反应产物。图7为DZ125合金试样与E陶瓷、G陶瓷及GY陶瓷高温接触40 min后合金试样底部形貌。图7(b)、(d)、(f)分别为图7(a)、(c)、(e)中矩形框内区域

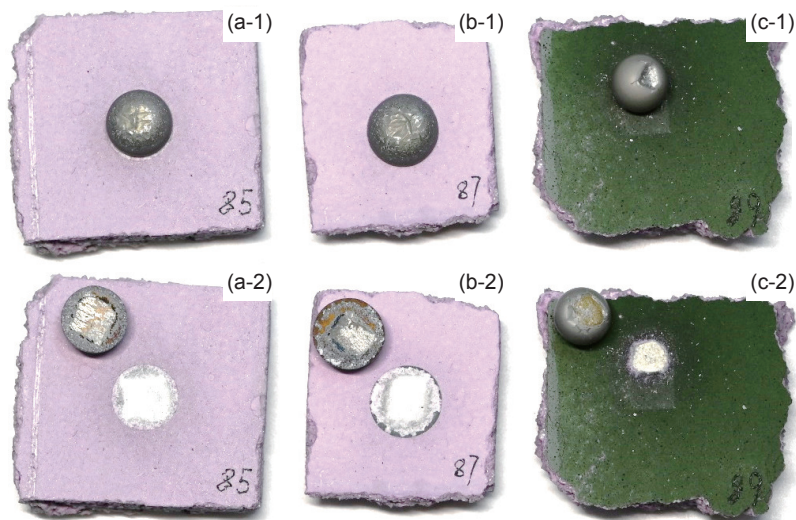


图6 座滴实验后E陶瓷(a)、G陶瓷(b)和GY陶瓷(c)表面及合金试样上表面(1)和下表面(2)形貌

Fig. 6 Morphologies of surfaces of E ceramic (a), G ceramic (b), and GY ceramic (c) as well as top (1) and bottom (2) surfaces of alloy specimens after the sessile-drop experiment

的放大形貌,图中取代表特征组织的点进行元素种类与含量的分析,取点位置在图中用“+”标记,并在其旁边标记为1~10,以便区分。各合金试样特征点组织元素的种类及含量如表3所示。

由图7(a)可以看出,合金底部连续或不连续地分布在反应区,反应产物呈灰色,不同于合金组织;且合金周边一圈的反应产物堆积更密集。图7(b)表明,反应产物呈亮白色颗粒状堆积,颗粒大小为微米级,形成DZ125合金与E陶瓷反应产物的特征区。对该特征区选取1~4点进行元素种类及含量分析,结果见表3。可以看出,该区域主要富集Hf元素,Hf元素质量分数大于83%,另外有O和Ni元素。Hf是镍基高温合金中重要的晶界强化和枝晶间强化元素。Hf元素在 γ 相中溶解度比在 γ' 相中小,因此Hf为 γ' 相主要强化元素^[19-21]。

同时,Hf是很强的碳化物形成元素,Hf元素能阻止碳化物($M_{23}C_6$ 或 M_6C)沿晶界析出。尽管如此,Hf元素在合金中有负面作用,Hf元素在合金中含量较高时,容易富集在合金熔体表面,产生所谓的“趋肤效应”^[22],另外,高温下Hf元素能与陶瓷发生界面反应,使合金表面出现反应层缺陷,DZ125高温合金中Hf元素质量分数为1.2%~1.8%,与E陶瓷的反应产物为 HfO_2 ,这与Hf元素的“趋肤效应”及其与型壳的反应有关,合金中少量Ni元素伴随着Hf元素在表面富集而形成氧化物。

由图7(c)可以看出,合金底部几乎覆盖一层连续的反应产物,仅少量不平整区域露出合金组织,形成DZ125合金与G陶瓷的反应特征区。对该特征区选取5、6点进行元素种类及含量分析,结果见表3。可见,与图7(b)中1~4点的成分类似,5、

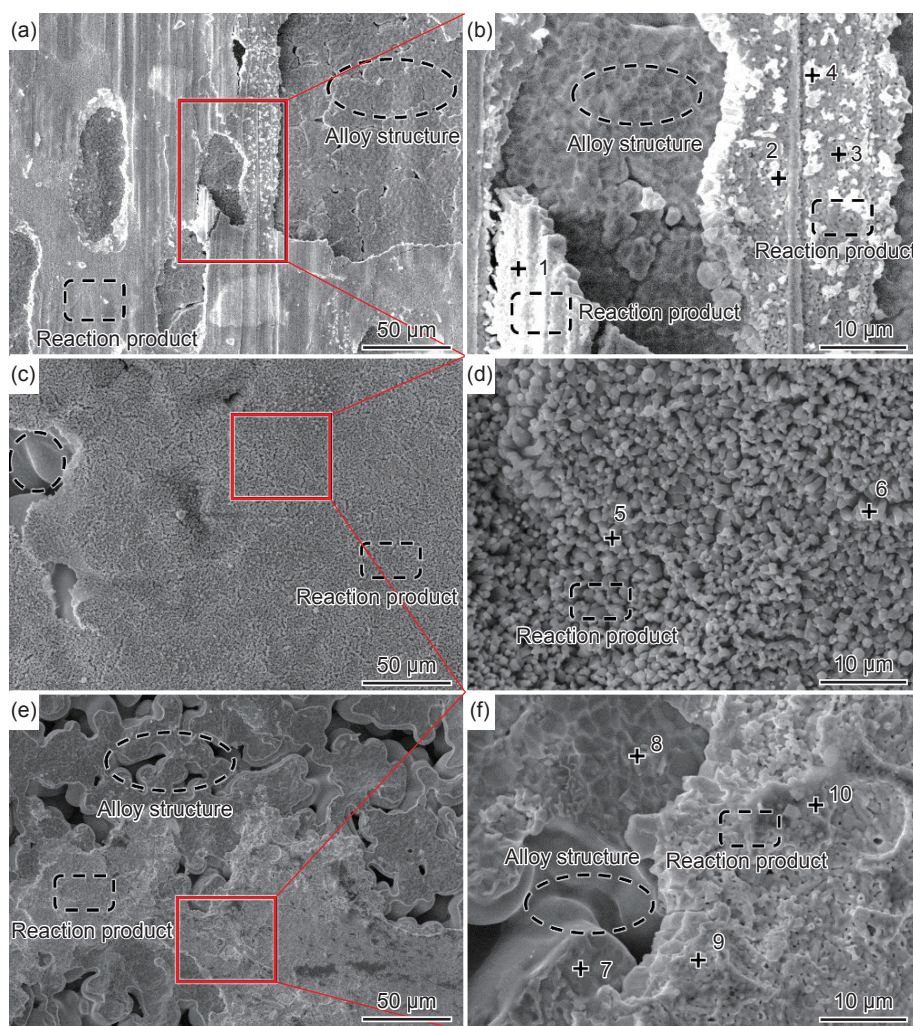


图7 DZ125合金试样与不同陶瓷反应后的底部微观形貌 (a)E陶瓷;(b)图(a)中局部放大图;(c)G陶瓷;(d)图(c)中局部放大图;(e)GY陶瓷;(f)图(e)中局部放大图

Fig. 7 Bottom microstructure morphologies of DZ125 alloy specimens after reaction with different ceramics (a) E ceramic; (b) local magnification in Fig. (a); (c) G ceramic; (d) local magnification in Fig. (c); (e) GY ceramic; (f) local magnification in Fig. (e)

表3 图7中特征点的元素种类及含量(质量分数/%)
Table 3 Elemental species and concentration of characteristic points in Fig. 7 (mass fraction/%)

Characteristic point	Al	O	Ti	Cr	Co	Ni	Zr	Hf	Ta	W
1	—	14.31	—	—	—	1.35	—	84.33	—	—
2	—	11.93	—	—	0.48	2.84	—	84.75	—	—
3	—	13.43	—	—	0.49	3.07	—	83.01	—	—
4	0.12	15.24	—	—	—	1.06	—	83.58	—	—
5	—	14.98	—	—	0.45	4.47	—	75.53	—	—
6	—	14.57	—	—	—	2.03	—	83.40	—	—
7	5.07	—	1.45	3.45	9.23	66.67	—	2.68	5.75	5.83
8	3.79	—	1.34	3.59	9.32	65.36	1.56	3.68	5.16	5.02
9	—	8.99	—	—	—	0.56	—	90.45	—	—
10	—	9.09	—	—	—	0.49	—	90.42	—	—

6点所在区域也由 Hf、O、Ni 元素组成,伴有微量 Co 元素。对于刚玉型壳,其成分为 Al_2O_3 ,具有高温化学稳定性,合金表面氧化物的产生主要为活性元素吸收型壳中 O 元素而形成。此外,陶瓷面层浆料中黏结剂为硅溶胶,硅溶胶中 SiO_2 容易被合金中 Hf、Al、Cr 等活性元素置换而形成氧化物。总之,合金与 G 陶瓷高温反应后,表面几乎完整地覆盖一层 HfO_2 ,几乎不可见裸露的合金组织。换言之,该反应层可能阻止合金中其他元素与型壳面层发生反应。

由图 7(e)可以看出,合金表面裸露的组织较多,呈灰色且明显可见枝晶组织,亮色反应产物在合金表面零星分布,形成 DZ125 合金与 GY 陶瓷的特征反应区,二者反应程度较轻。由表 2 可见,GY 陶瓷表面粗糙度为 $2.085 \mu\text{m}$,较 E 陶瓷和 G 陶瓷表面粗糙度小,粗糙度大小可能与 GY 粉体配制浆料的粉液比、流动性、涂挂性等有关。图 7(f)不同区域中选取 7~10 点进行元素种类及含量分析,由表 3 可知,7 和 8 所处位置为合金组织,含有 Al、Ti、Cr、Co、Ni、Hf、Ta、W 元素,各元素含量与表 1 中合金成分基本一致。9 和 10 所处位置为反应产物,Hf 元素质量分数大于 90%,另有 O、Ni 元素。

由图 7 可以看出,DZ125 合金与 3 种陶瓷的反应区特征如下:(1)合金与 3 种陶瓷的反应产物以富 Hf 的氧化物为主,夹杂部分合金成分;(2)合金与刚玉粉面层陶瓷的反应产物最为连续,合金表面覆盖一层 Hf 的氧化物,该层氧化物可能阻止合金与型壳面层进一步反应;(3)合金与锆英粉面层陶瓷的反应产物中 Hf 元素含量最高,大于 90%,相较于 EC95 陶瓷、刚玉陶瓷,Hf 元素的大量吸收可能

使反应产物不连续,产物量较少,合金表面金属光泽区较多。

2.3 不同型壳材料与 DZ125 合金的润湿性

根据 Aksay 理论,固-液两相润湿性的改善主要由于界面反应自由能的变化,自由能降低是熔体在固体基板上铺展的驱动力。并且,反应越强烈,润湿性越好。该理论用公式具体表达为^[23]:

$$\sigma_{sl} = \sigma_{sl}^0 + \Delta G_r \quad (4)$$

式中: σ_{sl} 为体系的固-液界面能; σ_{sl}^0 表示未发生反应的固-液界面能; ΔG_r 为固-液界面发生反应生成单位面积的产物时所产生的吉布斯自由能变化值。考虑固体表面粗糙度,润湿角 θ 计算公式见式(5)^[24]:

$$\cos \theta = m(\sigma_{sv} - \sigma_{sl})/\sigma_{lv} \quad (5)$$

式中: m 为基板(陶瓷)表面粗糙度; σ_{sv} 和 σ_{lv} 分别为固-气界面能和液-气界面能。

由图 3 及式(1)~(3)测量计算 $1530 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 DZ125 合金与陶瓷的润湿角,结果见表 4。可以看出,合金在 G 陶瓷上的润湿角最小,在 GY 陶瓷上的润湿角最大,分别为 75.71° 和 132.96° 。3 种面层陶瓷的表面粗糙度不同,且反应产物的连续程度不

表 4 DZ125 合金与陶瓷润湿角测试结果

Table 4 Test result of wetting angle between DZ125 alloy and ceramics

Ceramic surface layer	Wetting angle/($^\circ$)
EC95 powder	84.95
Corundum powder	75.71
Zirconium powder	132.96

同,表现为体系最终的润湿性不同。

润湿性对于高温合金铸造过程的影响主要在于,为保证合金熔体在陶瓷型腔内完整充型,要求合金熔体与陶瓷型壳及型芯具有一定的润湿性,否则导致叶片欠铸等铸造缺陷^[8]。然而,良好的润湿性往往会促进铸件表面的机械粘砂。机械粘砂是液态金属或合金渗入型壳表面的孔隙,铸件凝固后,在铸件表面形成的金属混合砂粒的黏附层,此过程并无新相形成。产生机械粘砂应满足的力学条件是合金液对型壳压力 P_c 大于临界压力,可用式(6)表示^[25]:

$$P_c \geq P_g - \frac{2\lambda \cos\theta}{r} \quad (6)$$

式中: P_g 为陶瓷型壳面层孔隙中气体压力,其作用是阻碍合金液向陶瓷型壳内渗透; λ 为合金熔体的表面张力; r 为陶瓷型壳面层中孔隙的半径。一般而言, P_g 数值不大,可以忽略^[25]。对于固定的陶瓷型壳, λ 以及 r 的值不变。因此,影响临界压力的因素仅为润湿角 θ , θ 减小时,临界压力减小,从而引发或加剧合金液向陶瓷面层孔隙渗透的粘砂过程。合金熔体的物理入侵使界面处温度梯度更高,引起应力集中^[9]。

由此可见,陶瓷型壳面层粗糙度、型壳面层与合金的界面反应共同影响铸件表面的机械粘砂,强烈的界面反应不仅使界面处形成不同于合金组织的新相,改变合金表面成分,还会通过影响润湿性而进一步引发或促进合金表面机械粘砂缺陷的产生。对于铸造高温合金,优选具有良好高温稳定性、化学稳定性、适宜润湿性的面层材料,对于铸件表面质量提升、尺寸精度控制和铸造生产成本把控至关重要。

3 结论

(1)片状陶瓷试样的表面形貌及粗糙度研究表明, EC95 面层陶瓷表面不规则形貌的凹坑或空隙较多,粗糙度为 $3.987 \mu\text{m}$; 刚玉面层陶瓷表面小颗粒较多,分布不规则的凹坑或空隙,粗糙度为 $3.391 \mu\text{m}$; 锆英粉面层陶瓷表面较为致密,凹坑或空隙尺寸较小,粗糙度为 $2.085 \mu\text{m}$ 。

(2)不同型壳材料与 DZ125 合金的界面反应研究表明,合金与 3 种陶瓷的界面反应产物均以 Hf 的氧化物为主,伴有少量合金成分;对于刚玉粉面层陶瓷,实验后合金表面几乎完整覆盖一层 Hf 的氧化物,该氧化物层可能阻止合金与陶瓷面层

进一步反应,因此更适用于 DZ125 合金熔模铸造。

(3)不同型壳材料与 DZ125 合金的润湿性研究表明, EC95 粉面层、刚玉粉面层和锆英粉面层陶瓷与 DZ125 合金的润湿角分别为 84.95° 、 75.71° 和 132.96° ,润湿性受界面反应和陶瓷面层粗糙度的影响,因此刚玉粉面层陶瓷与 DZ125 合金的润湿性更好。

参考文献:

- [1] NING T, ZHANG S K, ZHANG P, et al. Influence of solution temperature on microstructure and high temperature creep properties of DZ125 nickel-base alloy[J]. *Materials at High Temperatures*, 2021, 38(3): 186-196.
- [2] HU X A, YANG X G, SHI D Q, et al. Constitutive modeling of a directionally solidified nickel-based superalloy DZ125 subjected to thermal mechanical creep fatigue loadings[J]. *Rare Metals*, 2019, 38(10): 922-936.
- [3] WANG Q, LIU F R, SONG J X, et al. Influence of HfO₂ inclusions on precipitate evolution and endurance deformation behavior in DZ125 superalloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 944: 148875.
- [4] BOONLERT N, WANG Z W, CHEN K, et al. Cooling rate and solution temperature dependent γ' coarsening mechanism in DZ125 Ni-based superalloy[J]. *Materials Characterization*, 2025: 115429.
- [5] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
HUANG Q Y, LI H K. *Superalloys*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [6] 李义军. 钛合金熔模铸件荧光缺陷频繁出现的机理研究[C]//第十九届中国铸造协会年会论文集. 北京: 中国铸造协会, 2023: 284-291.
LI Y J. Research on mechanism of frequent fluorescence defects of investment casting titanium alloys[C]// Proceedings of the 19th Annual Meeting of the China Foundry Association. Beijing: China Foundry Association, 2023: 284 -291.
- [7] 郑亮, 张国庆, 张利冲, 等. 高温合金制备工艺精确定制: 策略、方法与验证[J]. *航空材料学报*, 2025, 45(5): 1-25.
ZHENG L, ZHANG G Q, ZHANG L C, et al. Precise tailoring of manufacturing processes for superalloys: strategy, methodology and validation[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2025, 45(5): 1-25.
- [8] 丁宁, 孙佳怡, 董龙沛, 等. 熔模铸造过程镍基高温合金与陶瓷材料界面反应研究进展[J]. *铸造技术*, 2022, 43(9): 823-829.
DING N, SUN J Y, DONG L P, et al. Research progress of interface reaction between Ni-based superalloy and

- ceramic materials during investment casting[J]. *Foundry Technology*, 2022, 43(9): 823-829.
- [9] 石振威, 郑伟, 卢玉章, 等. 镍基高温合金定向凝固用陶瓷型壳粘砂反应[J]. *材料研究学报*, 2021, 35(4): 251-258.
- SHI Z W, ZHENG W, LU Y Z, et al. Sand-buring reaction of ceramic shell for directional solidification of nickel-based superalloy[J]. *Chinese Journal of Materials Science*, 2021, 35(4): 251-258.
- [10] 晷贇. Re 和 Y 元素对高温合金熔体与陶瓷材料界面反应的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- ZI Y. Effect of Re and Y elements on interface reactions between superalloy melts and ceramic materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [11] 王迪, 李九霄, 董安平, 等. 熔模铸造型壳用材料研究进展[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(4): 205-216.
- WANG D, LI J X, DONG A P, et al. Research progress of materials for investment casting modelling shells[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(4): 205-216.
- [12] 李爱农, 潘宇飞, 何博, 等. 熔模铸造用型壳材料的优选[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(5): 106-111.
- LI A N, PAN Y F, HE B, et al. Optimization of shell materials for investment casting[J]. *Hotworking Technology*, 2018, 47(5): 106-111.
- [13] 张鸿, 刘永娜, 刘大钊, 等. DZ125 合金涡轮叶片荧光缺陷分析及解决方法[J]. *铸造*, 2020, 69(6): 632-635.
- ZHANG H, LIU Y N, LIU D Z, et al. Analysis and solution of fluorescent defects in DZ125 alloy turbine blade[J]. *Foundry*, 2020, 69(6): 632-635.
- [14] YAO J S, TANG D Z, LIU X G, et al. Interaction between two Ni-base alloys and ceramic moulds[J]. *Materials Science Forum*, 2013, 747: 765-771.
- [15] 王丽丽, 李嘉荣, 唐定中, 等. SiO₂-ZrO₂ 陶瓷型芯与 DZ125, DD5 和 DD6 三种铸造高温合金的界面反应[J]. *材料工程*, 2016, 44(3): 9-14.
- WANG L L, LI J R, TANG D Z, et al. Interfacial reactions between SiO₂-ZrO₂ ceramic core and DZ125, DD5, DD6 casting superalloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(3): 9-14.
- [16] LI Y, TAN Y, WANG D G, et al. Effect of trace impurity elements on the wettability and interfacial reaction between DZ125 alloy and ceramic shell[J]. *Corrosion Science*, 2023, 221: 111370.
- [17] 杨瑞宁, 刘静波, 刘昌奎, 等. 定向铸造镍基高温合金 Hf 夹杂的特征及成因[J]. *材料工程*, 2023, 51(10): 51-58.
- YANG R N, LIU J B, LIU C K, et al. Characteristics and formation mechanism of Hf inclusions in directionally casted Ni-based superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(10): 51-58.
- [18] 王石磊, 李治辉, 张洪雪, 等. Al₂O₃ 型壳与 DZ125 高温合金的润湿性及界面反应研究[J]. *铸造技术*, 2024, 45(6): 565-573.
- WANG S L, LI Z H, ZHANG H X, et al. Research on wetting behaviors and interfacial reactions between Al₂O₃-based ceramic shells and DZ125 superalloys[J]. *Foundry Technology*, 2024, 45(6): 565-573.
- [19] SHI Z X, LI J R, LIU S Z, et al. Effect of Hf Content on the microstructures and stress rupture properties of DD6 Single crystal superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39: 1334-1338.
- [20] ZHANG H P, JIAN J I A, ZHANG Y W, et al. Effect of Hf and Ta on creep deformation behaviors of PM Ni-based superalloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35(3): 849-862.
- [21] MA L, WANG D, ZHANG G, et al. Effect of Hf on microstructure and creep properties of nickel-based bicrystal superalloy with different grain boundaries misorientations[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025: 148371.
- [22] 郑运荣. 含铪铸造镍基高温合金富 Hf 熔体的趋肤效应[J]. *航空材料*, 1988, 8(2): 1-7.
- ZHENG Y R. Skin effect of Hf-rich melts in Hf-bearing cast nickel based superalloys[J]. *Aeronautical Materials*, 1988, 8(2): 1-7.
- [23] AKSAY I A, HOGE C E, PASK J A. Wetting under chemical-equilibrium and nonequilibrium conditions[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1974, 78(12): 1178-1183.
- [24] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.
- [25] JIANG J R, LIU X Y. Dimensional variations of castings and moulds in the ceramic mould casting process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 189(1/3): 247-255.

收稿日期: 2024-10-10; 录用日期: 2025-02-27

通讯作者: 陈晓燕(1986—), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为高温合金熔模精密铸造, 联系地址: 上海市闵行区东川路 800 号材料 B 楼 410 室(200240), E-mail: 379486755@qq.com

(本文责编: 陈 卉)