

某 ZTA15 钛合金零件铸造表面质量异常分析

殷建锋^{1,2,3}, 冯新^{2,3}, 李佳¹, 赵文侠², 南海^{2,3}

(1. 北京百慕航材高科技股份有限公司, 北京 100094; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: **目的** 以铸造表面存在黑色斑点的某 ZTA15 钛合金零件为研究对象, 研究零件铸造表面外来物质的成分、结合方式及其形成原因。**方法** 利用扫描电子显微镜对零件铸造表面及截面形貌进行观察, 利用能谱分析仪对零件铸造表面及截面成分进行分析。**结果** 零件铸造表面主要存在棕刚玉颗粒和碳黑颗粒两种外来物质, 棕刚玉颗粒嵌入铸件基体, 碳黑颗粒附着于铸造表面。**结论** 零件铸造表面黑色斑点是碳黑颗粒显示, 附着于铸造表面的碳黑颗粒对零件表面质量及镀层质量有影响, 碳黑颗粒产生于零件表面油污清洗不洁净真空热处理后析出, 热处理前采用超声波清洗+冷水洗+热水洗+吹干的方法清洁零件, 可改善零件热处理后的表面质量。

关键词: 钛合金; 表面; 棕刚玉; 碳黑

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.017

中图分类号: TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0093-06

Surface Quality Abnormality of a ZTA15 Titanium Alloy Part

YIN Jian-feng^{1,2,3}, FENG Xin^{2,3}, LI Jia¹, ZHAO Wen-xia², NAN Hai^{2,3}

(1. Baimtec Materials Co., Ltd., Beijing 100094, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: A ZTA15 titanium alloy part with black spots on the casting surface were used as the research objects to study composition, combination form and forming reasons of foreign substances on the surface of the part. The morphology of the surface and cross section of the part were observed with a scanning electron microscope. The component of the surface and cross section of the part were analyzed with an energy spectrum analyzer. The results show that there were mainly two kinds of foreign substances on the casting surface, including brown corundum particles and carbon black particles. The brown corundum particles were embedded on the casting surface. The carbon black particles were attached to the casting surface. The black spots on the surface of the parts were the color displayed by the carbon black particles, and the carbon black particles attached to the casting surface of the part have an effect on the surface quality and the quality of the coating. The carbon black particles are precipitated after vacuum heat treatment with unclean cleaning of oil pollution on the casting surface of the part. The cleaning method of ultrasonic cleaning + cold water wash + hot water wash + blow dry before heat treatment can improve the surface quality of parts after heat treatment.

KEY WORDS: titanium alloy; surface; brown alumina; carbon black

钛合金密度小、比强度高、耐腐蚀性强、力学性能良好, 是一种优良的结构材料, 已广泛应用于航空、

航天、化工等领域^[1]。钛具有很高的化学活性, 能与几乎所有的铸型材料发生界面反应, 铸造钛合金表面

收稿日期: 2018-04-20

作者简介: 殷建锋 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为钛合金精密铸造。

易产生污染层,污染层的存在往往会使铸件表面产生裂纹,表面污染层还明显影响到材料的疲劳性能、断裂韧性和冲击性能^[2],通过酸洗、喷砂等方式可以有效去除表面污染层^[3]。钛合金机械加工过程中,表面易沾染油污,除油工序是保证零件洁净以及保证零件热处理时不会因油污使材料表面产生污染的重要步骤,使毛坯和零件能均匀地涂敷保护涂料和润滑剂,保证零件的焊接质量^[4]。荧光检验是钛合金零件广泛采用的表面缺陷检验方法,荧光检验对于钛合金零件表面状态要求较严,零件表面残留的污物对荧光检验影响很大^[5],因此,钛合金零件的表面质量对材料的检测、后处理、材料性能及使用寿命有着重要影响,对钛合金零件表面状态的研究具有重要意义。文中以铸造表面存在黑色斑点的某 ZTA15 钛合金零件为研究对象,利用扫描电子显微镜、能谱分析仪对零件铸造表面形貌和成分

进行了分析,对导致铸造表面产生黑色斑点的质量异常原因进行分析,并提出了表面质量改进措施。

1 试验材料和方法

试验材料取自某批次铸造表面存在黑色斑点的 ZTA15 钛合金零件, ZTA15 钛合金仿制于俄罗斯 BT20Л 铸造钛合金,其名义成分为 Ti-6Al- 2Zr-1Mo-1V,属于近 α 型钛合金^[6],其化学成分见表 1^[7],毛坯为熔模精密铸造+热等静压+退火+喷砂状态,零件为机加工+退火状态。喷砂材料为棕刚玉砂,牌号 A,规格 54[#],化学成分见表 2,喷砂压力为 0.2~0.4 MPa,喷砂时间为 8~10 s。

零件铸造表面外观见图 1,表面显示密集黑点。取样位置见图 2,1[#]、3[#]试样为铸造表面,2[#]试样为机

表 1 ZTA15 合金的化学成分(质量分数)
Tab.1 Chemical composition of ZTA15 alloy (mass fraction) %

Ti	Al	Zr	Mo	V	Fe	Si	C	N	H	O	其他
余量	5.5~7.0	1.5~2.0	0.5~2.0	0.8~2.0	≤0.25	≤0.15	≤0.10	≤0.15	≤0.015	≤0.15	≤0.30

表 2 棕刚玉砂的化学成分(质量分数)
Tab.2 Chemical composition of brown corundum sand (mass fraction) %

牌号	规格	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	磁性物
A	54 [#]	95.62	2.70	0.35	0.68	0.11	0.33	0.0156



图 1 零件铸造表面外观
Fig.1 Casting surface of parts



图 2 取样位置
Fig.2 Sampling position

加工表面,通过线切割取样,1[#]、2[#]试样经过超声波清洗、研磨、抛光、腐蚀处理后在扫描电子显微镜下观察样品纵向微观组织形貌,3[#]试样经过超声波清洗处理后在扫描电子显微镜下观察样品表面形貌,并使用能谱分析仪对 1[#]、2[#]、3[#]试样进行成分分析。

2 结果与讨论

2.1 微观分析

1[#]和 2[#]试样的微观组织形貌见图 3 和图 4,3[#]试样表面微观形貌见图 5。可以看出,1[#]试样表面凹凸不平,有颗粒状物体嵌入进基体(图 3b 和 3c 中白色箭头标注),也有颗粒状物体附着于铸造表面(图 3d 中白色箭头标注),2[#]试样表面平整度较高,未发现有颗粒状物质嵌入基体,近表面的微观组织正常,3[#]试样表面有较多的颗粒状物质嵌入到基体(图 5c 中白色箭头标注),同时表面也有颗粒状物体附着于铸造表面(图 5d 中白色箭头标注)。

2.2 能谱分析

1[#]试样能谱成分分析结果见图 6,图 6a 结果显示 1[#]试样外表面 Al 和 O 含量较高,表明试样表面局部嵌入了以氧化铝为主的颗粒物,图 6b 结果显示 1[#]试

样的表面(纵向)存在厚度约 $0.3\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 的白亮层,从线扫描的结果来看,Al 和 O 元素的含量偏高。图 6c 结果显示 1[#]试样表面嵌入物成分与基体成分明显不同,point 1 处主要成分为 Al, O 元素,含有少量的 Ti, Mg, V, Mo 元素,可以判断嵌入物为棕刚玉颗粒,point 1 和 point 2 位置均不含 C 元素,图 6d 结果显示 1[#]试样表面颗粒物主要成分为 C 元素,并含有少量的 Ti, Al 等合金元素,可以判断颗粒物为碳黑。

2[#]试样的纵向截面能谱线扫描成分分析结果见图 7,结果显示表面区域氧元素含量偏高,存在厚度

约 $0.5\ \mu\text{m}$ 的氧化层。3[#]试样表面能谱成分分析结果见图 8,结果显示,point 1 和 point 2 处为颗粒状嵌入物,主要成分为 Al, O, C 元素,并含有少量合金元素,表面嵌入物主要为棕刚玉颗粒,其表面有少量碳污染,结合 6a—6c 分析结果可知,棕刚玉颗粒嵌入铸件基体,在铸造表面分散分布;point 3 处主要成分为 Ti, Al, O, C 元素,并含有少量合金元素,表面为基体材料、棕刚玉粉和碳污染的混合状态,point 4 处为颗粒主要成分为 C 和 O 元素,含有少量的 Ti, Al 等合金元素,颗粒物主要为碳黑,结合 6d 分析结果可知,碳黑颗

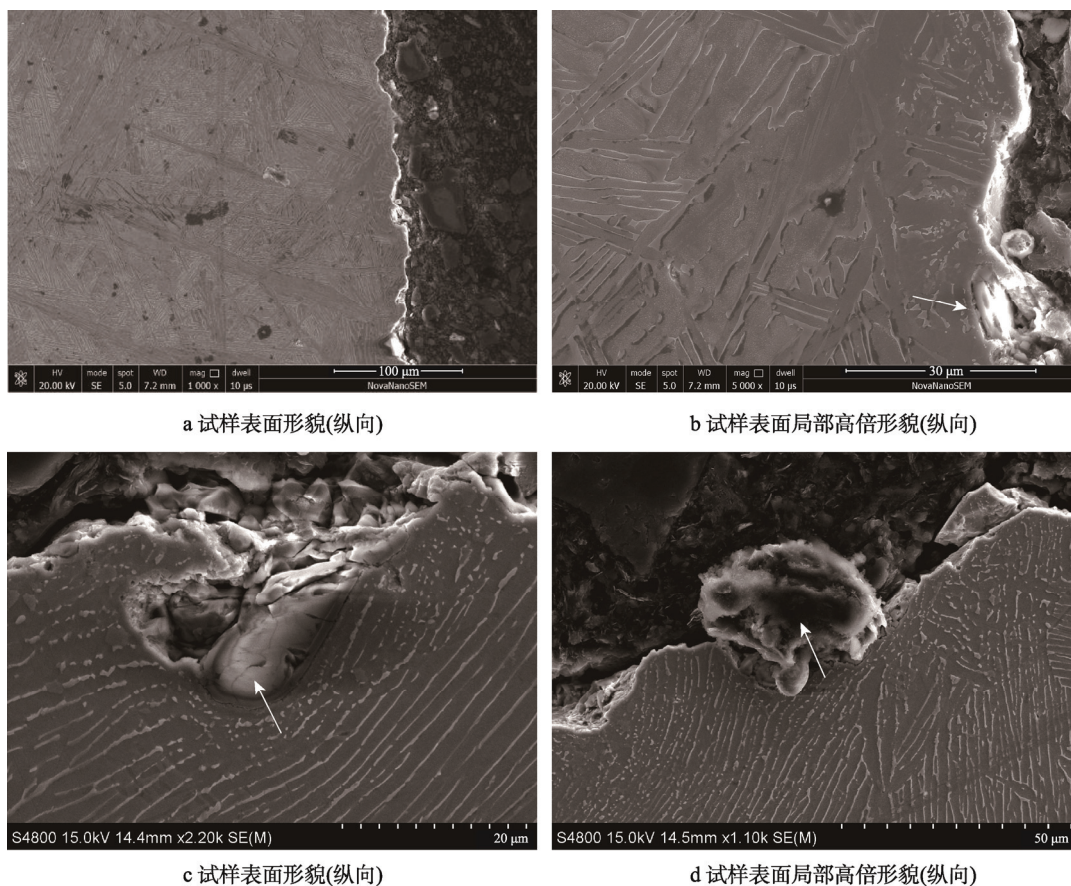


图 3 1[#]试样 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphology of sample 1[#]

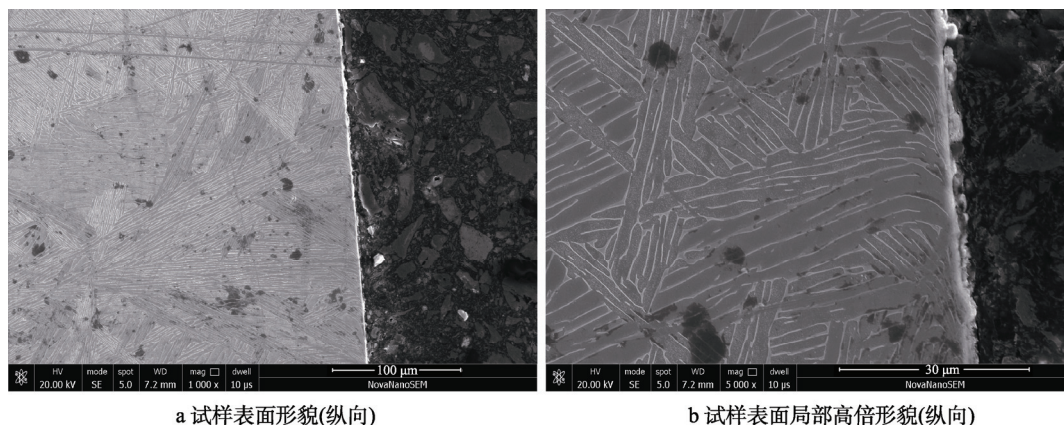


图 4 2[#]试样 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology of sample 2[#]

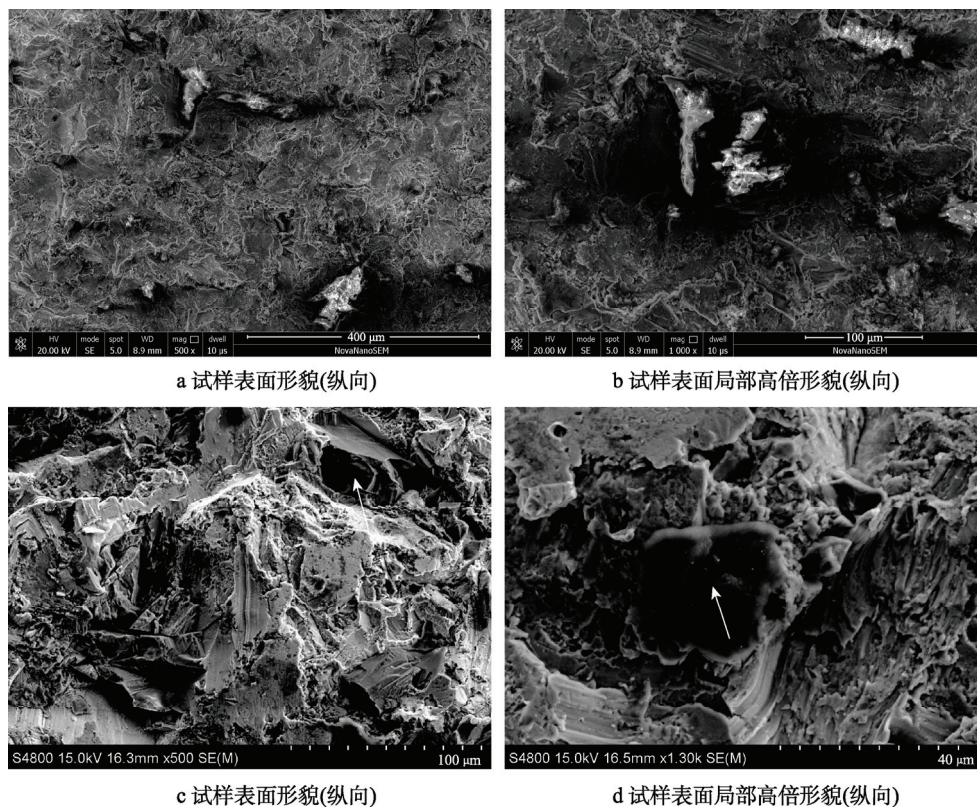


图 5 3[#]试样 SEM 形貌
Fig.5 SEM morphology of sample 3[#]

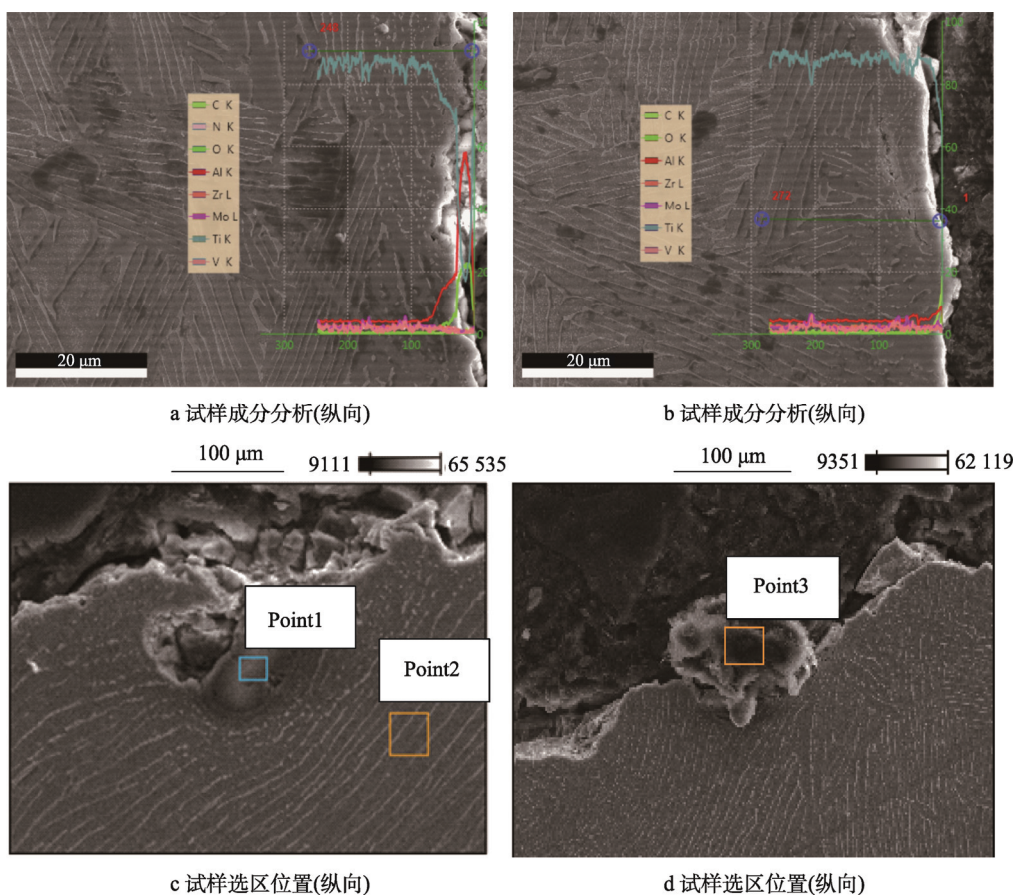


图 6 1[#]试样能谱扫描成分分析
Fig.6 Analysis of energy spectrum scanning components of sample 1[#]

粒物附着于铸件表面，在铸造表面分散分布，相比于零件机加工表面无碳黑颗粒，零件铸造表面粗糙度大，碳黑颗粒与基体的结合力强^[8]。

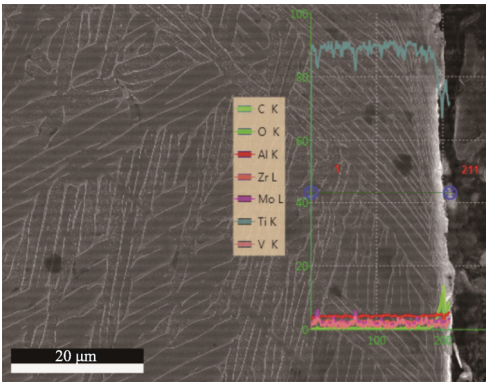


图 7 2[#]试样能谱线扫描成分分析
 Fig.7 Analysis on energy spectrum scanning components of sample 2[#]

2.3 原因分析及改进措施

ZTA15 钛合金零件生产工艺流程如下：① 铸造工序→② 喷砂→③ 入库→④ 粗加工→⑤ 汽油清洗→⑥ 退火→⑦ 精加工→⑧ 汽油清洗→⑨ 表面镀层→⑩ 零件。现场发现：产品在⑥退火后铸造表面出现黑点斑点，完成⑦精加工后，在⑧汽油清洗工序黑色斑点无法清除彻底，影响⑨表面镀层质量。研究结果表面，零件铸造表面主要存在棕刚玉颗粒和碳黑颗粒两种外来物质，棕刚玉颗粒来源于②喷砂工序，碳黑颗粒产生的原因是：产品完成④粗加工后，零件铸造表面沾染的油污在⑤汽油清洗工序中清洗不洁净，导致铸造表面残留的油性物质在⑥退火工序真空热处理后析出，零件机加工表面没有碳黑颗粒，零件铸造表面存在分散的碳黑颗粒，附着于铸造表面的碳黑颗粒与基体结合力较强，当覆盖数量不断增多就会形成积碳，碳黑颗粒对零件表面质量及镀层质量

表 3 选区元素含量（原子数分数）
 Tab.3 Content of regional elements (fraction of number of atoms) %

	C	N	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Fe	Zr	Mo	Sn
Point 1	0.00	0.00	57.78	0.17	41.04	0.00	0.00	0.81	0.13	0.00	0.00	0.07	0.00
Point 2	0.00	0.00	0.00	0.00	9.56	0.00	0.00	85.52	3.14	0.13	1.21	0.44	0.00
Point 3	88.43	0.00	8.22	0.00	0.26	2.53	0.10	0.02	0.14	0.21	0.00	0.07	0.02

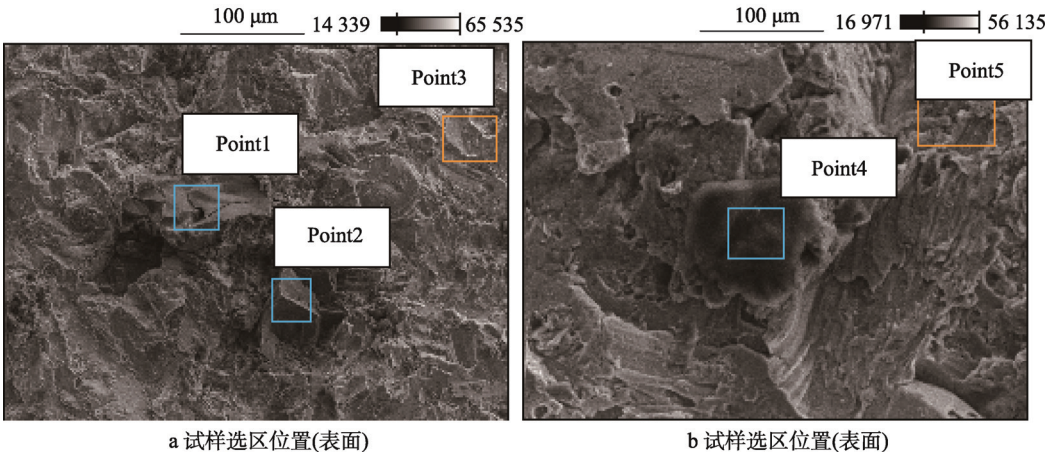


图 8 3[#]试样能谱线扫描成分分析
 Fig.8 Analysis on energy spectrum scanning components of sample 3[#]

表 4 选区元素含量（原子数分数）
 Tab.4 Content of regional elements (fraction of number of atoms) %

	C	N	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Fe	Zr	Mo	Sn
Point 1	20.97	0.00	55.56	0.00	22.79	0.07	0.02	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Point 2	17.83	0.00	53.95	0.04	27.06	0.08	0.15	0.73	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00
Point 3	25.25	0.00	33.63	0.16	9.62	0.29	0.06	29.91	0.40	0.11	0.00	0.00	0.00
Point 4	71.55	0.00	23.10	0.14	2.65	0.13	0.16	1.59	0.04	0.11	0.08	0.43	0.00
Point 5	0.00	0.00	58.86	0.32	22.52	0.15	0.07	16.34	0.64	0.24	0.45	0.29	0.13

有影响。有研究表明,积碳层与零件表面结合强度高,与一般油污、锈蚀和漆层相比,清除更加困难^[9],目前传统的清洗方法如超声波清洗、化学溶剂法、水射流清洗法等^[10]难以把积碳表面清理干净,而采用表面去余量的吹砂、酸洗等^[3]方法虽然可以去除表面积碳,但是对零件表面粗糙度及尺寸有影响,为了不影响零件表面质量,乔玉林等^[10]开展了钛合金表面积碳的激光清洗试验,在优选工艺参数下,可以得到较好质量的清洁表面,零件表面C含量接近于0,为文中零件表面碳黑的去除指出了一种处理方向。

零件表面碳黑产生的根本原因是热处理前的清洗不到位,如要获得高质量的表面状态,零件表面的油污要彻底清洗干净,应采用超声波清洗+冷水洗+热水洗(去离子水)+吹干的方式替代汽油清洗的方式,超声波清洗槽内金属清洗剂规格为KX-2,体积分数为2%~4%,零件清洗干净后保存和运输过程中应注意表面防护,防止零件二次污染。

3 结论

1) 零件铸造表面主要存在棕刚玉颗粒和碳黑颗粒两种外来物质,棕刚玉颗粒来源于铸件喷砂工序,棕刚玉颗粒嵌入铸件基体,在铸造表面分散分布;碳黑颗粒产生于零件铸造表面油污清洗不洁净真空热处理后析出,碳黑颗粒物附着于铸造表面,在铸造表面分散分布,碳黑颗粒对零件表面及镀层质量有影响。

2) 为了避免表面碳黑的产生,零件清洗工序应采用超声波清洗+冷水洗+热水洗(去离子水)+吹干的方式替代汽油清洗的方式,零件清洗干净后保存和运输过程中应注意表面防护,防止零件二次污染。

参考文献:

- [1] 王新英,谢成木.国内外钛合金精密铸造型壳材料的发展概况[J].特种铸造及有色合金,2001,21(3):40—42.
WANG Xin-ying, XIE Cheng-mu. Development of Shell Materials of Titanium Alloy Precision Casting at Home and Abroad[J]. Journal of Special Casting and Nonferrous Alloys, 2001, 21(3): 40—42.
- [2] 李晓飞,吕志刚,崔旭龙.钛合金精密铸件表面污染层生成机理及检测方法[C].中国铸造协会精铸分会第十一届年会论文集,石家庄,中国铸造协会精铸分会,2009.
LI Xiao-fei, LYU Zhi-gang, CUI Xu-long. Formation Mechanism and Detection Method of Surface Pollution

Layer of Titanium Alloy Precision Casting[C]. A Collection of the Eleventh Annual Meetings of the China Foundry Association Precision Casting Branch, Shijiazhuang, The China Foundry Association Precision Casting Branch, 2009.

- [3] 谢成木.钛及钛合金铸造[M].北京:机械工业出版社,2005.
XIE Cheng-mu. Titanium and Titanium Alloy Casting[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005.
- [4] 梅正蓉.钛合金清洗[J].材料保护,1988(1):21—26.
MEI Zheng-rong. Cleaning of Titanium Alloy[J]. Journal of Material Protection, 1988(1): 21—26.
- [5] 周嘉梁,王婵.钛合金复杂结构铸件荧光检验的工艺改进[J].无损检测,2011,33(8):24—26.
ZHOU Jia-liang, WANG Chan. The Process Improvement of Fluorimetric Test for Titanium Alloy Castings of Complex Structure[J]. Journal of Nondestructive Testing, 2011, 33(8): 24—26.
- [6] 黄旭,朱知寿,王红红.先进航空钛合金材料与应用[M].北京:国防工业出版社,2012.
HUANG Xu, ZHU Zhi-shou, WANG Hong-hong. Advanced Aeronautical Titanium Alloy Materials and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [7] 中国航空材料手册.钛合金、铜合金[M].北京:中国标准出版社,2001.
China Aviation Material Handbook. Titanium Alloy, Copper Alloy[M]. Beijing: China Standard Press, 2001.
- [8] 黄艳斐,朱岳麟,熊常健,等.航空发动机喷嘴结焦积碳的性质[J].北京航空航天大学学报,2011,37(6):753—756.
HUANG Yan-fei, ZHU Yue-lin, XIONG Chang-jian, et al. Properties of Aircraft Engines' Nozzle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(6): 753—756.
- [9] 姚帅帅,贾秀杰,王兴,等.面向再制造的熔盐清洗积碳机理研究及工艺优化[J].功能材料,2015,46(18):18121—18128.
YAO Shuai-shuai, JIA Xiu-jie, WANG Xing, et al. Mechanism Research and Process Optimization on Molten Salt Cleaning Carbon Deposition of Remanufacturing Parts[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(18): 18121—18128.
- [10] 乔玉林,黄克宁,梁秀兵,等.清洗速度对激光清洗钛合金积碳表面的形貌与组成的影响[J].应用激光,2017,37(6):859—864.
QIAO Yu-lin, HUANG Ke-ning, LIANG Xiu-bing, et al. Influence of Cleaning Speed on the Surface Morphology and Composition of Carbon Deposited Titanium Alloy by Laser Cleaning[J]. Journal of Application Laser, 2017, 37(6): 859—864.