● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.03.010

钛合金熔模精密铸件表面荧光显示缺陷形成原因

李伟东[1],周浩浩[2],刘茵琪[1],杨学东[1],史凤岭[2]
(1.洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471000; 2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司,辽宁 沈阳 110043)

摘　要:钛合金熔模精密铸件表面荧光显示缺陷严重制约了产品质量及生产周期。介绍了熔模精密铸造钛合金铸件生产过程以及后处理工艺过程中产生的表面荧光显示缺陷的类型、时间及原因。钛合金熔模精密铸件表面荧光显示缺陷类型主要表现为表面裂纹及表面凹坑;产生缺陷的时间主要为铸造后、补焊后以及真空热处理后 3 个时间节点;产生荧光显示缺陷的原因主要有铸造应力、金属液与型壳发生反应、补焊产生的应力以及真空热处理残余应力释放导致的表面变形产生的应力。

关键词:钛合金;熔模精密铸造;荧光;真空热处理
中图分类号: TG249.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)03-0199-05

Forming Cause of Fluorescence Showed Defects on the surface of Titanium Alloy Investment Casting

LI Weidong[1], ZHOU Haohao[2], LIU Yinqi[1], YANG Xuedong[1], SHI Fengling[2]
(1. Luoyang Shuangrui Precision Casting Titanium Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 2. AECC Shen Yang Li Ming Aero-engine Corporation Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: The defects of fluorescent display on the surface of titanium alloy investment precision castings seriously restrict product quality and production cycle. This article introduces the type, time and reason of the surface fluorescent display defects in the production process of investment casting titanium alloy castings and the post-treatment process. The types of fluorescent display defects on the surface of titanium alloy investment precision castings are mainly surface cracks and surface pits; the time of defects is mainly three time nodes after casting, repair welding and vacuum heat treatment; the main reasons for the fluorescent display defects are Casting stress, the reaction between molten metal and the shell, the stress caused by repair welding, and the stress caused by surface deformation caused by the release of residual stress in vacuum heat treatment.

Key words: titanium alloy; investment casting; fluorescence; vacuum heat treatment

钛在国民经济中已成为继钢、铝之后的第 3 金属,钛及钛合金具有比强度高、耐高温、耐腐蚀等特点,已广泛应用于航空航天、舰船等军用领域。近年来随着科技的发展,钛及钛合金在汽车、医疗、体育、石油、化工等民用领域也得到了应用[1-2]。

工业技术的不断发展,近净成形已然成为金属制造业发展的重要方向。精密铸造是近净成形结构件的重要方式,该成形方式所制备的结构件具有机械加工余量小,金属利用率大等优点,可有效降低结构件的生产成本。由于钛及钛合金活性高,其结构件的成形方式主要是铸造。同时,随着钛合金铸造工艺,特别是熔模精密铸造工艺的成熟与发展以及热等静压技术的广泛应用,钛及钛合金铸件品质已接近或达到了变形钛合金的水平,因此在工业中用钛铸件代替锻件和机加件更为经济适用[3-7]。

但是,钛合金熔模精密铸件在铸造及后处理过程中会出现缩孔、缩松等内部缺陷以及凹坑、裂纹等荧光显示的表面缺陷。尤其是航空用结构复杂的钛合金熔模精密精铸件,在铸造后铸件表面易存在表面凹坑、裂纹等表面缺陷,在荧光检测时表现为荧光显示缺陷。除此之外,铸件在铸造过程中内部产生的缩孔、缩松缺陷在后处理的补焊、修整及退火过程中,补焊点附近区域容易发生开裂,发生延迟开裂且该区域经多次补焊后会仍发生开裂反复的现象,在荧光检测时表现出表面荧光显示缺陷。上述荧光显示缺陷的存在,不仅会导致产品性能降低,也会使成本增加,工期延长,甚至铸件产品的报废。尤其是延迟缺陷,该类荧光显示缺陷具有不确定性,会降低设

收稿日期:2021-01-15
基金项目:钛合金大型复杂薄壁结构件精密铸造技术(2020YFB2008300, 2020YFB2008301)
作者简介:李伟东(1985—),河南开封人,硕士,高级工程师.主要从事钛合金铸造方面的工作.
电话:0379-67256723,Email:liweidong589@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

备服役的可靠性,危害性较大[8-10]。

本文作者针对钛合金熔模精密铸造产品荧光显示缺陷问题,开展表面荧光显示缺陷产生的原因分析，确定表面荧光显示缺陷产生的关键因素,以便于开发合适的改进工艺,为实现高品质钛合金熔模精密铸件的制备提供优化方向。

1 荧光显示缺陷描述

为深入了解铸件表面荧光显示缺陷的产生原因及准确掌握预防手段,首先对铸件表面荧光显示缺陷进行跟踪,描述铸件表面荧光显示缺陷的整体情况。主要从荧光显示缺陷的表现形态、荧光显示缺陷产生部位以及荧光显示缺陷产生时间3方面进行描述。

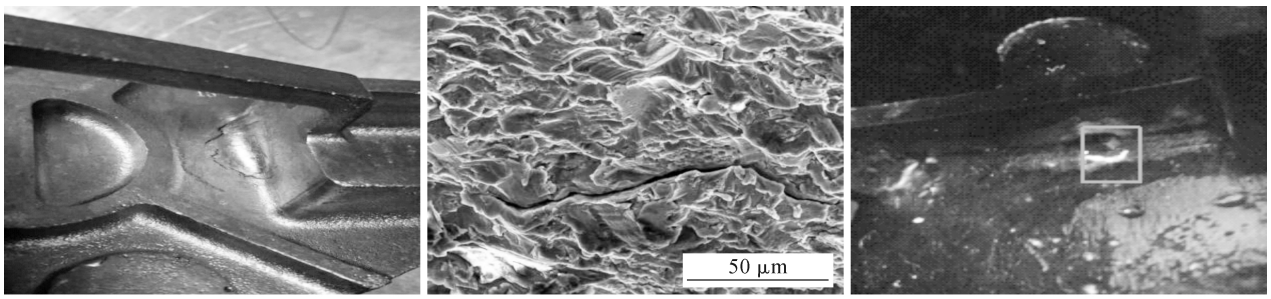
1.1 荧光显示缺陷表现形态

钛合金熔模精密铸件荧光显示缺陷形态主要表现为两种,其一为铸件表面裂纹;其二为铸件表面凹坑(点状形态)。钛合金熔模精密铸件生产过程中,钛合金铸件表面容易产生宏、微观裂纹,如图1示。图1(a)中显示为铸件表面宏观裂纹,裂纹尺寸较大,肉眼明显可见。图1(b)中显示为铸件表面微观裂纹,这种裂纹肉眼难以发现,需要通过荧光等渗透检验的方法发现。图1(c)中显示为铸件表面缺陷在荧光渗透检测下的表现形式，蓝色亮光部位为铸件表面缺陷位置。

图2为钛合金熔模精密铸件表面凹坑缺陷（点状缺陷),该类缺陷形态表现为肉眼可见较小的点状凹坑,如图2(a)示,密集分布于厚大型熔模精密铸件表面。图2(b)为荧光显示表面凹坑缺陷,在荧光检测下该类缺陷表现为蓝色亮光斑点。

1.2 荧光显示缺陷产生的部位

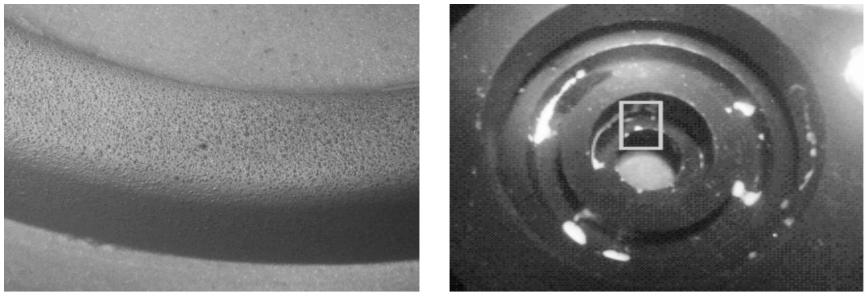
钛合金熔模精密铸件荧光检测显示缺陷主要集中在两个部位,其一,铸件拐角部位易出现表面裂纹及表面凹坑缺陷;其二,铸件内部缺陷经补焊修整后其周边区域存在表面裂纹缺陷。图3(a)为钛合金熔



(a)表面宏观裂纹　(b)表面微观裂纹　(c)荧光显示裂纹

图1 熔模精密铸件表面裂纹缺陷

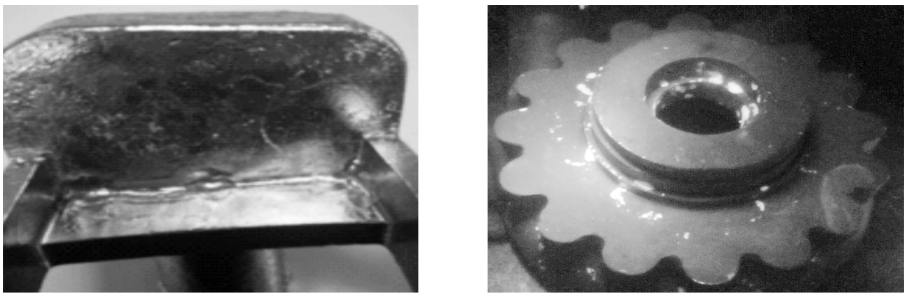
Fig.1 Surface crack defects of investment precision castings



(a)表面凹坑缺陷　(b)荧光显示凹坑缺陷

图2 熔模精密铸件表面凹坑缺陷

Fig.2 Surface pit defects of investment precision castings



(a)拐角处表面裂纹缺陷　(b)荧光显示拐角处表面裂纹及点状凹坑缺陷

图3 熔模精密铸件拐角部位表面缺陷

Fig.3 Surface defects at the corners of investment precision castings

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模精密铸件，其拐角部位存在较多且尺寸较大的裂纹缺陷，见图中划出的及其它拐角区域，同时厚大型钛合金熔模精密铸件其拐角处存在表面凹坑缺陷如图 2(a)。图 3(b)为钛合金熔模精密铸件荧光显示拐角处表面裂纹缺陷以及点状凹坑缺陷，拐角处缺陷较为集中且密集。

图 4(a)为经补焊后的钛合金熔模精密铸件，其补焊区域无明显的表面裂纹缺陷，但补焊热影响区明显存在表面裂纹情况。图 4(b)为钛合金熔模精密铸件荧光显示补焊及其周边区域存在明显的表面裂纹缺陷，但焊接及其周边区域无明显的点状凹坑缺陷。

1.3　荧光显示缺陷产生时间

经过跟踪分析发现钛合金熔模精密铸件表面缺陷产生的时间主要集中出现在以下 3 个工序：铸造工序、热等静压工序以及补焊与热处理工序。如图 5(a)为铸件浇注后荧光检测结果，图片中显示浇注后未经任何处理的铸件其表面存在点状凹坑缺陷，但无明显表面裂纹情况。图 5(b)为铸件浇注后经热等静压处理的铸件，通过荧光渗透检测发现铸件表面出现明显的裂纹情况，且集中出现在铸件拐角部位。图 5(c)为熔模精密铸件经补焊及打磨修整将点状及裂纹缺陷去除后进行真空热处理后的荧光渗透检测结果，图中显示铸件表面无明显点状缺陷，但明显存在裂纹缺陷严重的情况。由此说明铸件热等静压及热处理后均会出现表面裂纹的情况。

2　荧光显示缺陷原因分析

2.1　铸件表面裂纹缺陷影响因素分析

应力的存在是导致熔模精密铸件表面产生裂纹的最直接原因，当应力大于铸件表面材料强度时，铸件表面会发生开裂。影响铸件表面产生裂纹的影响因素主要包括以下 4 个方面：铸件自身结构、缺陷补焊、表面脆性 α 层以及表面脆性氢化物。

(1)铸件自身结构　由于钛具有导热性低、化学活性大、补缩能力差等铸造特性。铸件结构的合理性是高品质钛合金铸件生产的重要条件。铸件的壁厚力求均匀，尽量避免拐角和壁厚突变，避免细长结构以及较高的凸台等结构，以此保证钛液在型腔中流动平稳、与铸型作用产生的气体及时有序的排出，保证均匀完整地充型。结构及壁厚突变所造成的热结区域，势必造成钛合金金属液在该部位凝固过程中得不到有效的补缩造成铸造内应力，极易导致铸件表面裂纹的产生。

(2)缺陷补焊　钛合金由于补缩能力差，铸件内部易出现缩孔、缩松等缺陷，该类缺陷在后处理过程中需钻孔以及补焊处理，补焊区域焊后冷却过程中，焊缝区金属的变形会受到基体金属的束缚，导致较大的焊后残余应力，该应力的存在是铸件焊后产生表面裂纹的主要原因。除此之外，补焊后热处理使铸件内残余应力得到释放，在残余应力释放过程中，当铸件热胀冷缩及变形产生的应力大于铸件材料表面

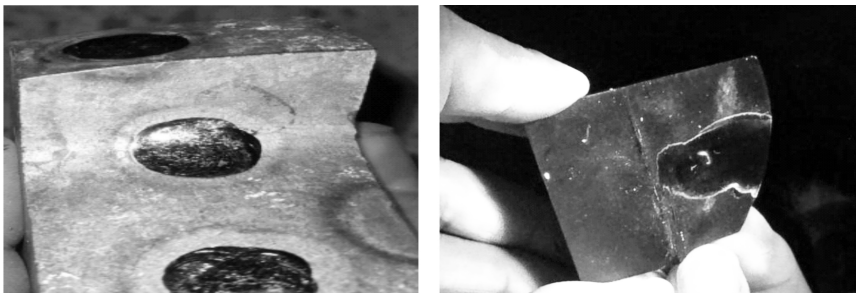
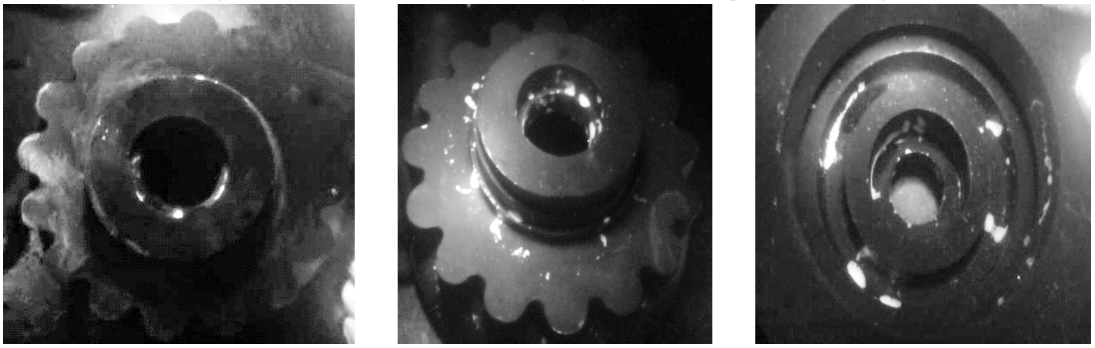


图 4　熔模精密铸件焊接周边部位表面缺陷

Fig.4　Surface defects around the welding of investment precision castings



(a)铸造态　　(b)热等静压态　　(c)补焊及热处理后

图 5　钛合金熔模精密铸造铸件不同生产阶段产生的表面荧光显示的缺陷

Fig.5　Fluorescence showed defects on the surface of titanium alloy investment casting formed at different production stage

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

强度时,从而致使铸件表面产生开裂情况。

(3)表面脆性α层　钛合金金属液具有较高的活性,极易与成型其铸件用的熔模陶瓷型壳发生反应,同时陶瓷型壳传热慢,金属液与陶瓷型壳接触时间长,上述因素均易导致铸件在铸造过程中吸氧、氮等元素形成表面脆性α层。钛合金铸件表面脆性α层的存在易使铸件变脆、变硬,材料塑性降低。铸件在应力和热力不平衡的条件,空位和位错都会发生移动和聚集,当它们的浓度达到一定的临界值后,就会形成临界裂纹。在应力的继续作用下,就会不断地扩展形成宏观的裂纹。图 6 显示钛合金熔模精密铸件表面存在脆性α层。

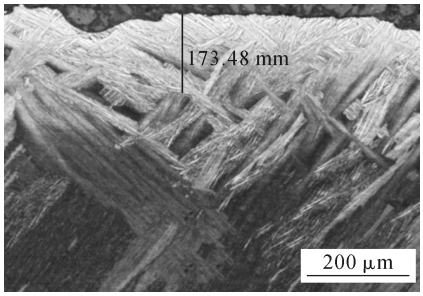


图 6 钛合金熔模精密铸件表面脆性α层
Fig.6 Brittle α layer on the surface of titanium alloy investment precision casting

(4)脆性氢化物　氢在钛合金中能生成氢化物在较小的应力下就能开裂,氢是氢化物和基体界面形成冷裂纹的重要因素之一，并使之具有延迟性。通常把氢引起的延迟裂纹称为氢致裂纹或氢诱发裂纹。现代的延迟理论认为,焊缝金属中的氢含量、接头承受的应力水平及合金的塑性储备,三者对延迟裂纹的产生是相互联系的。

2.2　铸件表面凹坑缺陷影响因素分析

(1)铸造性气孔　钛合金金属液活性强,其易与型壳材料发生化学反应,尤其是型壳材料惰性及致密度差的情况下反应尤为严重。其一,钛合金熔模精密铸造型壳用面层浆液主要由惰性较高的氧化钇粉与二醋酸锆组成,背层浆液为惰性相对较差的莫来粉及硅溶胶组成,面层致密度差的情况下在干燥过程中易出现开裂致使面层不能完全覆盖蜡模表面的情况,导致惰性较差的背层浆液浸入蜡模表面。金属液在高温下与惰性较差的背层型壳材料发生反应致使铸件表面存在反应性气孔。其二,熔模精密铸件结构复杂,厚大型铸件拐角处壁厚较大为热结部位,该部位散热慢,金属液与型壳反应时间长,从而加剧了铸件表面反应性气孔的产生。

(2)焊接性气孔　钛合金的焊接主要有激光焊、传统的钨极气体保护焊以及熔化极气体保护焊。钛合金焊接过程中易产生气孔,一类是由于保护气体不纯(含氧、氢或水)或母材受到污染而产生的气孔，另一类则是由于焊接过程中匙孔不稳定而导致的工艺性气孔。焊接过程中匙孔内的金属蒸气向外喷发致使匙孔开口处的蒸气形成湍流，将保护气体卷入匙孔底部；同时金属蒸汽的强烈喷发和表面张力梯度的变化导致匙孔壁面出现褶皱，随着匙孔的波动这些褶皱闭合而将保护气体封闭在熔池内形成气泡。除此之外,由于焊接速度过快,熔池的凝固速度也很快，来不及逸出的气泡被快速凝固的熔融金属捕获而残留在焊缝中,形成气孔如图 8。

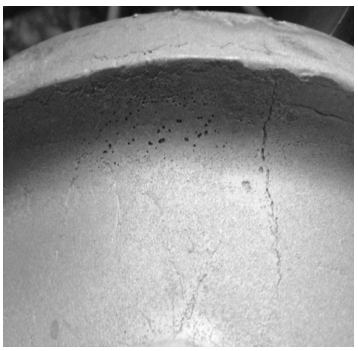


图 7 钛合金熔模精密铸件表面铸造性气孔
Fig.7 Surface holes formed during casting for titanium alloy investment precision castings

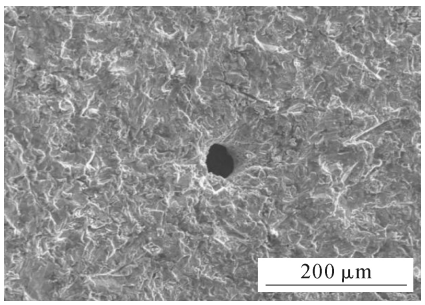


图 8 钛合金熔模精密铸件表面焊接引入性气孔
Fig.8 Surface holes introduced during surface welding for the titanium alloy investment precision castings

3　结论

(1)钛合金熔模精密铸件表面荧光显示缺陷类型主要表现为两种形态即表面裂纹及表面凹坑;钛合金熔模精密铸件荧光检测显示缺陷主要集中在两个部位,其一,铸件拐角部位易出现表面裂纹及表面凹坑缺陷;其二,铸件内部缺陷经补焊修整后其周边区域存在表面裂纹缺陷；经过跟踪分析发现钛合金熔模精密铸件表面缺陷产生的时间主要集中出现在以下 3 个工序:铸造工序、热等静压工序以及补焊与热处理工序。

(2)应力的存在是导致熔模精密铸件表面产

(下转第 210 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结论

(1)浸入式水口板间漏钢的原因是水口面氧化,引发水口面氧化的主要原因有水口面耐氧化性差、水口面精度低、水口烘烤工艺不合理,中间包上下水口不对中、快换机构液压缸速度慢、板间氩气压力低、快换机构精度差、快换浸入式水口操作不规范等。

(2)通过优化水口面材质、提高水口面精度、改进水口烘烤工艺、确保上下水口对中、提高快换机构液压缸速度、保证板间氩气压力在 0.01 MPa 以上,杜绝氩气管路跑漏气、保证快换机构精度和冷却效果、规范快换浸入式水口操作等措施,避免了漏钢事故。

参考文献:

[1] 徐伟,赵建平,王帅,等. 快换浸入式水口板件漏钢的原因分析及控制措施[J]. 连铸,2019,44(4):6-9.
[2] 梁保青,赵臣瑞,王全喜. 钢包下水口松动原因分析及改进措施[J]. 耐火材料,2015,19(增刊 2):368-369.
[3] 管令宇. 降低宽板坯连铸机的漏钢率 [J]. 连铸,2010,1(4):16-18.
[4] 周卫胜,刘前芝,汪波. 钢包滑板间漏钢原因及防范措施[J]. 耐火材料,2005,39(3):225-226.
[5] 雅贞,张岩. 新编连续铸钢工艺及设备[M]. 北京:冶金工出版社,2007.
[6] 黄燕飞,梅金波,叶俊辉,等. 常见的钢包滑动水口漏钢原因分析及改进措施[J]. 耐火材料,2009,43(2):157-158.
[7] 闫永垒. 降低钢包滑板漏钢事故率的实践 [J]. 甘肃冶金,2015,37(5):38-39.
[8] 王飞日,王新志,刘海强,等. 板坯浸入式水口穿钢的原因分析与对策[J]. 河南冶金,18(4):40-42.
[9] 蔡开科,程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京:冶金工艺出版杜,2007.
[10] 赵建平,吕海富,王帅,等. 连铸板坯表面夹渣缺陷的成因及控制[J]. 铸造技术,2020,41(8):793-796.
[11] 吴春,滕铁力,柳勇,等. 快换水口用滑动面材料的研制[J]. 山东冶金,2008,30(4):33-34.
[12] 朱纪衡,郑海平,陈红伟,等. 影响钢包滑动水口漏钢的因素及改进措施[J]. 河南冶金,2006,S2:152-153,178.

(上接第 202 页)

生裂纹的最直接原因,当应力大于铸件表面材料强度时,铸件表面会发生开裂。影响铸件表面产生裂纹的影响因素主要包括以下 4 个方面:铸件自身结构、缺陷补焊、表面脆性 α 层以及表面脆性氢化物。

(3)钛合金熔模精密铸件荧光所显示的凹坑缺陷,主要有两个方面引起的。其一,钛合金金属液在高温下与惰性较差的型壳材料发生反应致使铸件表面存在反应性气孔。其二,钛合金熔模精密铸件在补焊修整过程中,产生的焊接引入性气孔。

参考文献:

[1] 苏鹏,刘鸿羽,赵军,等. 钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状[J]. 铸造,2012,61(12):1401-1404.
[2] 张文毓. 国外钛合金的研究与发展 [J]. 世界有色金属,2009(7):64-66.
[3] 阎峰云,陈基东,马孝斌. 钛合金熔模铸造技术[J]. 中国铸造装备与技术,2009(2):1-5.
[4] 谢华生,刘时兵,苏贵桥,等. 我国钛合金精铸件铸造技术的发展及应用[J]. 特种铸造及有色合金,2008(增刊 1):462-464.
[5] 肖树龙,陈玉勇,朱红艳,等. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造现状及发展 [J]. 稀有金属材料与工程,2006:35(5)678-681.
[7] 张慧芳,张治民. 钛合金成型技术[J]. 陕西科技,2008(3):156.
[8] 张帅峰,张建新,于冰冰,等. 铸造钛合金 α 层对补焊裂纹的影响[J]. 热加工工艺,2020,49(3):67-70.
[9] 孙冰冰,郭绍庆,肇恒跃,等. ZTC4 钛合金氩弧焊补焊工艺及组织性能研究[J]. 电焊机,2016,46(7):97-100.
[10] 张庆云,陆业航,李众城,等. TC4 钛合金紧固件的 α 层[J]. 中国有色金属学报,2010,20(S1):1036-1038.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章:1 铸铁件均衡凝固与有限补缩;2 铸铁件冒口补缩设计及应用;3 压边浇冒口系统;4 浇注系统大孔出流理论与设计;5 铸件均衡凝固工艺;6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7 浇注系统当冒口补缩设计方法;8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页,特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net