

ZTA15 钛合金熔模精密铸造浇注用铁基引流工装优化

李义军, 赵云霞

(航空工业贵州安吉航空精密铸造有限责任公司, 贵州安顺 561000)

摘要: 针对ZTA15钛合金铸件在加工过程中产生裂纹、掉块的问题, 对化学成分、力学性能、金相组织进行检测, 并对比正常组织的试样。分析造成该问题的原因, 主要是在熔炼浇注过程中, 将钛液引入铸型的部分铁基引流工装发生熔化, 使铁元素随钛液进入铸件型腔, 造成杂质元素铁含量在铸件局部区域增高, 降低了 β 相的转变温度, 导致铸件在热等静压或去应力退火过程中产生 β 相粗晶, 形成“ β 脆性”。提出了浇注用引流工装的一些优化建议。

关键词: ZTA15钛合金; 精密铸造; 引流工装; 力学性能

钛合金铸造技术发展到现在已经经历了50多年的历程, 由于其具有一系列的优异性能, 因此发展非常快, 成为航空、航天、能源等工业领域不可或缺的材料之一。钛及钛合金铸件可制造出形状复杂、加工余量少的铸件, 用量越来越大, 其生产工艺主要为采用真空自耗电极熔壳炉熔炼, 再通过引流工装将水冷铜坩埚中的钛液引入铸型完成熔炼浇注过程。本文研究了ZTA15钛合金熔模精密铸件在浇注时, 因铁基引流工装结构不合理导致其蓄热、散热能力不足而发生熔化, 污染钛合金液并流入铸型中, 引起的铸件局部铁含量超标过多造成的危害, 并对引流工装提出改进优化建议。

1 在加工过程中发生的异常问题

图1为带浇注系统约消耗金属液400 kg的ZTA15合金熔模精密铸件, 其铸造过程为: 钛锭在真空自耗电极熔壳炉中完成熔炼后, 钛液经铁基引流工装进入铸型中, 完成浇注过程。浇注完成的铸件经X光、渗透检查, 热等静压+去应力退火处理, 化学成分附铸试样及力学性能附铸试棒检测合格后交付客户。部分铸件在加工过程中, 设有内浇道一侧的安装边在机加过程中发现切削面上存在裂纹、掉块现象。

2 铸件本体检测

铸件按GJB2896A—2007 II类验收, 化学成分和力学性能具体要求见表1, 表2。

2.1 化学成分检测

切取铸件产生裂纹、掉块的部位进行化学成分检查(图2), 发现铁含量不合格, 其含量在0.12%~4.65%之间, 个别检测试样超出GJB2896A—2007要求的15倍, 其余元素均满足标准要求。为大致确定铸件铁含量超标的区域, 对铸件进行全面化学成分检查, 最终确定铸件靠近内浇道一端沿轴向方向100 mm左右的范围内不同程度的存在铁含量超标现象, 且超标位置呈无规律分布。

作者简介:

李义军(1982-), 男, 工程师, 主要从事钛合金、铝合金铸造工作。E-mail: liyijun1982@126.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

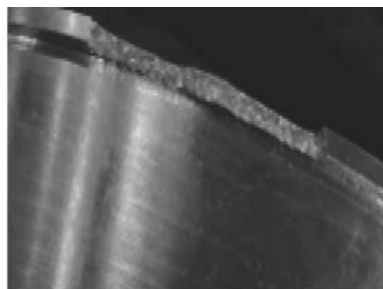
文章编号: 1001-4977(2020)10-1087-06

收稿日期:

2019-12-19 收到初稿,
2020-01-20 收到修订稿。



(a) 铸件示意图



(b) 掉块部位

图1 铸件及加工过程中掉块部位

Fig. 1 3D casting model and drop block position during machining

表1 铸件化学成分要求

Table 1 Chemical composition requirements of casting

 $w_B/\%$

主要成分					杂质元素						
Al	V	Mo	Zr	Ti	Fe	Si	C	N	O	H	其他
5.5~6.8	0.8~2.5	0.5~2.0	1.5~2.5	余量	≤0.3	≤0.15	≤0.13	≤0.05	≤0.16	≤0.01	单个≤0.1 总和≤0.3

表2 铸件力学性能要求

Table 2 Mechanical properties requirements of casting

类别	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	硬度HB	备注
附铸试样	≥885	≥785	≥5	≥12		必检项目
铸件本体	≥840.75	≥745.75	≥4.75	≥11.4	≤341	不要求

注：铸件本体不要求检测，若取检测本体力学性能允许降低标准值的5%。后文描述到的硬度值HB≤341界限值为《中国航空材料手册》查出，GJB2896A—2007不要求检测。

2.2 力学性能检测

切取铸件铁超标的部位，先检查原始试样的硬度值，然后按GB228—2002加工成 $\Phi 5$ mm标准试样进行室温拉伸试验，检查抗拉强度、屈服强度、伸长率和断面收缩率是否存在异常，发现试样拉伸结果差异很大（表3）：硬度达到HB 444的试样1、试样2其抗拉强度勉强达到885 MPa的50%，伸长率低于5%的一半，屈服强度和断面收缩率未测出，材料呈现出较大的脆性；硬度低于HB400的试样，除试样6和试样7其抗拉强度和屈服强度较高，伸长率偏低外，其余试样的强度和塑性基本能达到标准要求。对铁超标的安装边沿圆周方向间隔约100 mm检测硬度，发现硬度值的变化规律是由硬度最大点向两侧逐渐降低至符合钛合金铸件硬度值的HB≤341，但同一个纵向截面个别相邻（安装边厚度仅15 mm）的两个测试点的硬度值却差异很大，这间接反应了铸件超标铁元素分布存在很大的不均匀性（图3）。

2.3 金相组织分析

从化学成分分析结果已经知道铸件铁含量超标。

铁是 β 相共析型稳定元素，具有很强的 β 相稳定能力。铸件局部铁含量异常增高后，会降低该部位的 β 相转变温度，并扩大 β 相区，其 β 相含量相对于其他化学成分合格的部位异常升高。因此，在金相分析时在故障铸件上截取了化学成分合格的试样和铁超标的试样进行对比观察。

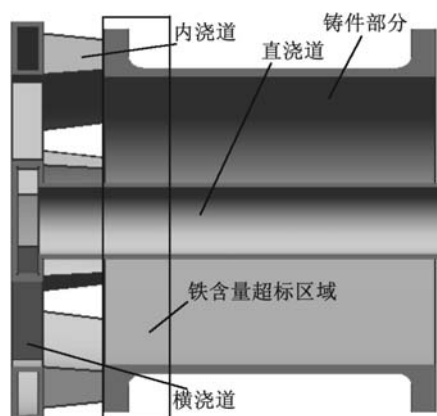


图2 铸件铁超标区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the zone with high Fe content in casting

图4为在高倍显微镜下采用定量金相分析法测定试样的 β 相含量及裂纹成因金相组织分析结果,其中试样3和试样4为化学成分合格的试样,其 β 相含量分别约为20%和40%;试样1和试样2的 β 相含量约为85%和70%;有裂纹的试样1其裂纹源萌生在中部,向表面延伸,呈穿晶走向,为冷裂纹。试样1和试样2的 β 相含量分别比 β 相含量较高的试样4高出45%和30%,高出接近1倍。

从金相组织分析结果可知,铁含量升高导致了铸

件局部 β 相的异常升高,但试样2在机加切削过程中未产生裂纹甚至掉块现象,需要更深层次的分析研究。

3 铸件力学性能异常分析

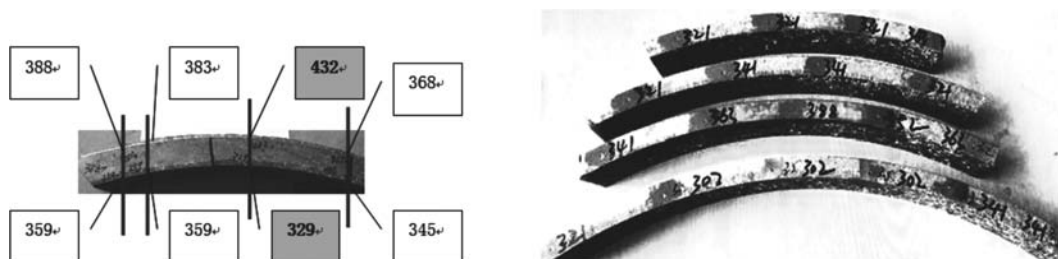
3.1 铸件结构和工艺方案分析

钛合金的铸态组织受冷却速度影响较大，铸造 $\alpha + \beta$ 钛合金自高温慢速冷却时，片状 α 变得宽而短，晶粒组织具有网篮状特征；当合金自高温快速冷却时， α 片状变得长而尖，晶粒组织会呈现出马氏体组

表3 ZTA15铸件常温力学性能检测结果

Table 3 Test results of mechanical properties of ZTA15 casting in different zones at room temperature

试样编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	硬度HB	取样部位	备注
试样1	469	无	2.0	无	444	安装边	裂纹、掉块部位
试样2	428	无	1.2	无	444	安装边	裂纹、掉块部位
试样3	853	808	9.2	29.5	352	安装边	加工后无异常部位
试样4	858	811	11.9	15.7	383	安装边	加工后无异常部位
试样5	892	846	7.1	15.3	378	安装边	加工后无异常部位
试样6	1134	1101	3.9	4.3	372	内部凸台	加工后无异常部位
试样7	1105	1080	2.6	5.1	372	内部凸台	加工后无异常部位
试样8	884	836	6.0	13.2	364	内部凸台	加工后无异常部位
试样9	879	822	7.7	20.8	370	内部凸台	加工后无异常部位
本体性能	≥840.75	≥745.75	≥4.75	≥11.4	≤341		

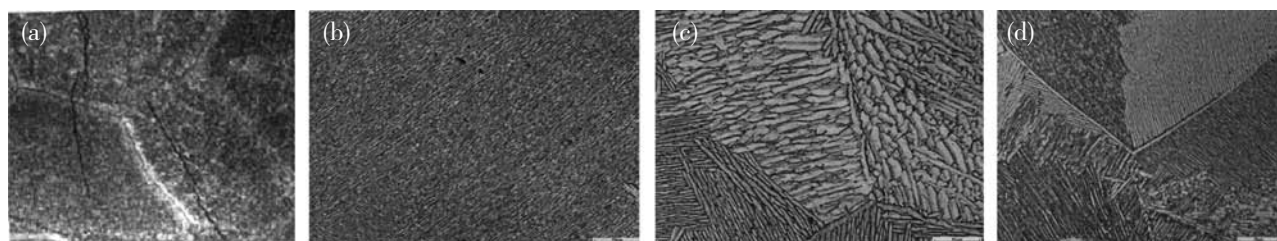


(a) 安装边同一断面两侧硬度检测结果

(b) 安装边圆周方向硬度检测结果

图3 铸件安装边硬度检测结果

Fig. 3 Hardness test results of casting installing side



(a) 试样1: 出现裂纹但未掉块试样, β 相含量约为85%, 裂纹源萌生在中部, 向表面延伸, 呈穿晶走向; (b) 试样2: 铁含量超标但未发生裂纹和掉块试样, β 相含量约为70%; (c) 试样3: 化学成分合格的ZTA15试样金相形貌, β 相含量约为20%; (d) 试样4: 化学成分合格的ZTA15试样金相形貌, β 相含量约为40%

图4 ZTA15铸件金相形貌

Fig. 4 Metallographic structure of ZTA15 casting in cold cracking zone and in zones with different percentages of β phase

织特征。通常,大片状的 α 相会使得合金退火后的塑性比铸态时要降低。钛合金铸件中局部会存在晶粒粗大的魏氏组织^[3],尤其是厚大热节及内浇道过热部位,虽然通过热等静压会有一定的改善,但也难以彻底消除,其力学性能会比细晶区略差(表4)。表4为参考文献[1]中给出的附铸试样和浇道位置力学性能对比试验数据,虽然不能用表中数据判定浇道位置的力学性能一定无法达到标准要求(对比表1数据),但其反应了一个趋势:ZTA15钛合金壁厚较小的附铸试棒细晶区多,其力学性能比存在较多粗晶区的部位力学性能高,但只要化学成分合格,其仍具有良好的塑性。因而,晶粒粗大只是起

到轻微的促进作用,不是决定性因素。

3.2 铁含量超标对 ZTA15 铸件力学性能的影响

图5是单一元素对纯钛力学性能的影响趋势图。随着Fe含量的增加,钛的强度升高,塑性下降^[1]。从图中看出,当铁含量达到8%时,钛仍具有近8%的伸长率。当然,ZTA15钛合金受Al、V、Mo、Zr等合金元素及其他杂质元素影响,其塑性不可能达到8%。铁超标的本体力学性能测试试样中只有试样6、试样7符合此趋势,试样1、试样2差异很大,其他试样的铁超标部位在加工试样过程中被去除而趋于正常值。

表4 ZTA15附铸试样与浇道位置试样的力学性能

Table 4 Mechanical properties of cast-on samples and ingate position of ZTA15 casting

试样类型	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
同炉附铸试样	960	860	10	15.5
同炉附铸试样	965	895	10.5	16.5
浇道位置试样	785	760	8	13
浇道位置试样	800	755	7.5	12.5
ZTA15标准数据	≥885	≥785	≥5	≥12
本体性能	≥840.75	≥745.75	≥4.75	≥11.4

ZTA15的 β 相转变温度约为985℃左右^[4]。铁含量急剧增加会降低 β 相转变温度,如果相变点温度降到足够低,那么铸件在退火(600~800℃)及热等静压(900±10)℃保温2~4h过程中,可能会使 β 相长大为粗晶组织,产生“ β 脆性”。试样1和试样2的断口形貌为解理断裂,而不是正常的韧窝断裂形貌。将试样进行电镜扫描分析,发现两个试样的断裂截面微观化学成分个别点的铁含量高达9%,试样断裂的裂纹源萌生部位源于内部的细小孔洞缺陷。铸件的冶金质量按Ⅱ级验收,允许存在一些不超出标准要求的细小气孔和夹渣缺陷,铸件虽然进行了热等静压处理,但可能也会存在极少数贯穿铸件并与外界连通的气孔未被压合的现象。

由此,可判断出铸件在加工过程中产生裂纹、掉块的主要原因为:

(1) 铸件铁含量超标引起铸件强度升高,塑性降低,甚至在热等静压过程中产生了“ β 脆性”。

(2) 铸件内腔存在不超出GJB2896A—2007标准要求的细小孔洞,在切削过程中,因材料变脆,在切削应力作用下由内部萌生出裂纹源,并迅速向表面扩展,产生裂纹甚至掉块现象。

4 铸件铁含量超标原因分析

多件铸件本体上出现大面积铁含量不合格,一定

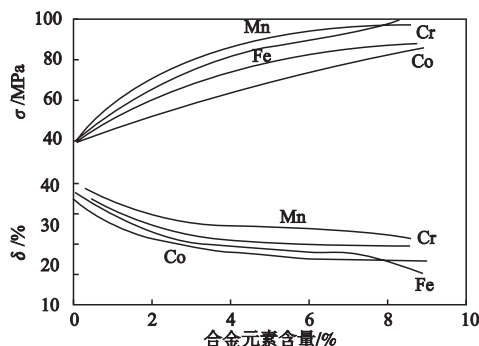


图5 共析型 β 相稳定元素对钛合金铸件力学性能的影响

Fig. 5 Effect of eutectoid β phase stable element on mechanical properties of Ti casting

是钛锭含铁量不合格或熔炼浇注过程中金属液受到铁污染导致的。因此,检查了熔炼浇注用钛合金锭的质量保证书及化学成分复验报告,其铁含量是合格的。因此造成大面积铁含量不合格的原因是出现在熔炼浇注过程。铸型是采用氧化钼+铝矾土+硅溶胶制得,采用的都是非金属耐火材料。铸型与钛液接触的氧化钼粉、砂对杂质元素铁含量控制很严格,要求控制在0.2%以下。而熔炼用的水冷铜坩埚为铜材质,且在熔炼过程中会形成一层固态钛合金凝壳保护金属液不与铜坩埚接触,没有铁的来源。经现场调研,发现是将金属液从水冷铜坩埚中引入铸型的部分铁基工装发生

了熔化, 熔化后的铁元素随钛液进入铸型导致铁元素超标, 并找到了其熔化的实物(图6)。对浇注系统进行取样检查化学成分(表5), 都发现存在铁元素超标的现象, 其中型壳与熔化的铁基工装对接处铁含量最高, 达到9.59%。

早期的钛合金铸件工业化生产, 使用的引流工装多为廉价、易得的铁基材料: 铸铁、碳素钢、不锈钢等。虽然它们的熔点(约1 300~1 400 ℃)低于钛合金的熔点(约1 668 ℃), 但鉴于钛合金熔液会在流经的通道上迅速形成一层凝壳从而保护其不受到污染的流动、凝固特性, 当工装结构设计合理, 蓄热、散热能力足够时, 是不会发生熔化的, 并可以重复使用10多次^[2], 这也是钛合金铸造工艺中存在金属型铸造和使用金属工装引流理论依据。随着铸造设备熔炼能力的提升, 钛合金的熔炼浇注量已能达到500 kg, 甚至1 t, 而钛合金铸造技术也在不断发展, 促使钛合金铸件不断朝着大型化, 整体的方向设计。铸件的充型时间较长, 有的金属液消耗极大的铸件充型时间可能超过1 min。铸造过程的浇注时间越长, 对铁基引流工装

的储热、散热能力要求越高, 一旦后续填充的钛液将引流工装上的凝壳熔化, 且引流工装表面温度达到其熔点发生熔化, 就会使铁元素随钛液进入铸型中, 存在污染铸件的重大风险。因此, 使用铁基引流工装生产金属液需求量大的钛合金铸件时, 关注其结构设计是否合理, 是否有足够的蓄热、散热能力保证钛液不受污染变得尤为重要。

5 改进措施

通过以上分析, 可以得出浇注金属液消耗量大的铸件时, 合理的铁基引流工装设计, 提高蓄热、散热能力, 是避免钛液受铁元素污染的关键。因此, 通过增加引流工装的厚度和结构改进, 提高其蓄热、散热能力, 并将无法优化的蓄热、散热能力差的部件改为石墨或陶瓷材料后, 对重新浇注的浇注系统、铸件取样分析, 未发现铁超标现象, 铸件本体的化学成分, 力学性能均能达到标准要求, 铸件在加工过程中也没有再出现裂纹, 掉块的现象。

表5 铁基引流工装熔化后铸件浇注系统铁含量分析结果

Table 5 Analysis results of Fe content in pouring system regions after Fe-based tooling melting

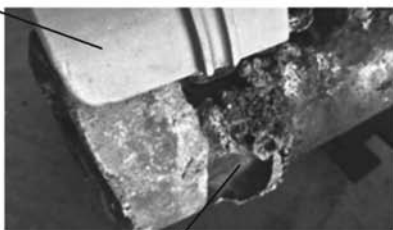
$w_B/\%$

项目	试样1	试样2	试样3	试样4	试样5	试样6	试样7	试样8	试样9	试样10	试样11
直浇道	0.56	0.22	0.27	9.59	0.35	0.18	0.36				
环形浇道	0.15	0.15	0.19	0.16	2.00	1.57	0.32	2.84	2.13	0.32	1.09
内浇道	0.77	0.25	0.45	1.88	0.47	0.24	1.52	0.37	0.92	0.16	0.35



(a) 浇注系统示意图

模组与工装间的金属连接器



熔化后的形态

(b) 连接器熔化的浇道



(c) 完好的浇道

图6 浇注用连接器熔化示意图

Fig. 6 The melted connector for pouring

6 结束语

ZTA15铸件在加工过程中产生裂纹、掉块是因为与内浇道连接的安装边铁含量超标过多, 降低 β 相转变温度, 在热等静压和热处理退火过程中产生了“ β 脆性”导致。铸造过程使用的铁基工装发生熔化后铁元素进入钛液中, 并进入铸件型腔是导致铁超标的直接原因。

当采用自动熔炼及浇注的设备生产昂贵且回炉料无法直接回收使用的钛合金或高温合金等金属铸件时, 若需要使用到引流工装将金属液导入铸型, 因其生产成本较高, 应多关注引流工装是否满足铸造工艺的需求。因此, 在设

计和制作金属液消耗量偏大的铸造用引流工装时,应考虑以下几点。

(1) 铸造用引流工装尽量选用与浇注金属不起化学反应的、熔点高于浇注合金的耐高温非金属耐火材料,彻底消除隐患。

(2) 选用铁基或其他金属工装时,在考虑强度的同时,要更关注蓄热、散热能力是否足够。

(3) 铸件在浇注完成后,拆卸铸型和清壳落砂过程中,一定要仔细观察引流工装是否存在熔化现象。

参考文献:

- [1] 莫晓飞,姜涛,柴万录,等. ZTA15激光焊接试片性能异常原因分析 [J]. 铸造, 2015 (3): 233-242.
- [2] 谢成木. 钛及钛合金铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 耿浩然. 铸造钛、轴承合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [4] 何伟,杜小平,马红征,等. TA15钛合金相变点的测定 [J]. 机械工程与自动化, 2014 (4): 104-105.

Improvement of Fe-Based Draught Tooling for Pouring of ZTA15 Alloy in Investment Casting

LI Yi-jun, ZHAO Yun-xia

(AVIC Guizhou Anji Aviation Investment Casting Co., Ltd., Anshun 561000,Guizhou,China)

Abstract:

In view of the cold cracking and drop block defects that occur during the machining of ZTA15 alloy investment castings, the chemical composition, mechanical properties and metallographic structure of the castings were tested, and comparison with the normal sample was carried out. It was found that, in the process of pouring ZTA15 alloy melt into the mold cavity, part of the iron-based draught tooling that introduced titanium liquid into the mold was melted, thus the iron element entered the mold cavity with titanium liquid together, resulting in the increase of the impurity element iron content in local regions of castings and the reduction of the transition temperature of β phase. Consequently, the β phase coarse crystals were formed in the castings during hot isostatic pressure or stress relief annealing, causing " β brittleness". Finally, some improvement advises are recommended for the structure design and material selection of the draught tooling.

Key words:

ZTA15 alloy; investment casting; draught tooling; mechanical properties
