

铸造铝合金在舰船装备应用中存在的问题及发展趋势

陈延伟, 刘佳琳, 赵亚鹏

(中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 河南郑州 450015)

摘要: 主要介绍了国内外舰船装备中应用铝合金铸造技术的基本情况, 包括产品应用类型、典型工艺特点及适用范围等。文中结合多型产品的研制、生产经验和故障归零情况, 对砂型铸造高强铝合金存在的问题进行了分析, 对提高铸造质量方法提出了建议。最后, 面向海军装备未来发展的需求, 就高强铝合金铸造技术在舰船装备领域的应用前景和需解决的问题等进行了探讨。

关键词: 舰船装备; 轻金属; 铸造铝合金

在轻金属材料中, 铝合金具有比强度和比刚度高、塑性好、易于成形和成本较低等优点, 是轻合金中应用最广、用量最多的金属。其中铸造铝合金具有价格低廉、组织各向同性、可以获得特殊的组织、易于生产形状复杂的零件、可以小批量生产也可以大批量生产等诸多优点, 在武器装备研发中, 一直是关注的热点^[1]。

军事工业中常用的铸造铝合金主要有Al-Cu系合金、Al-Mg系合金和Al-Si系合金。Al-Cu系列合金, 如ZL201A、ZL205A等, 强度高、塑性和韧性也较好, 但铸造性能较差, 具体表现为热裂倾向大、流动性较差、补缩困难。此外, 该系列合金抗蚀性能较差, 有晶间腐蚀倾向。其中, 北京航空材料研究院研制出的ZL205A合金, T6的抗拉强度可以达到510 MPa, 是我国研制出的铸造铝合金中强度最高的材料^[2]。Al-Mg系合金, 如ZL305, 具有优良的力学性能, 高的强度、好的延性和韧性, 抗蚀稳定性和切削加工性都好。Al-Mg系合金的主要缺点是裂纹倾向大、易出现氧化夹渣、有自然时效倾向。Al-Si系合金, 如ZL101、ZL114A等, 具有良好的铸造性能、好的抗蚀稳定性和中等的切削加工性能, 具有一般的强度和硬度, 但塑性较低^[3]。目前, 常用的铸造成形工艺有砂型铸造、金属型铸造、压铸(高压铸造)、低压铸造、挤压铸造和熔模精密铸造^[4-5]等。由于铸造铝合金在复杂、薄壁结构件成形中具有独特的优势, 未来在舰船装备中将拥有更广阔的应用前景。

作者简介:

陈延伟(1971-), 男, 硕士, 主要研究方向为舰船自动控制系统及发射装置设计。
E-mail: cyw713@163.com

中图分类号: TG146.21
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2020)04-0329-06

收稿日期:

2019-11-07 收到初稿,
2020-01-22 收到修订稿。

1 铸造铝合金在舰船装备中的应用

伴随武器装备轻量化的要求, 对铸造铝合金, 尤其是具有高强度、良好的耐磨性、耐腐蚀性和铸造性能的铸造铝合金, 需求越来越迫切。相较于铝合金焊接, 铝合金铸造也因其适宜批产、产品一致性好、变形易控制和外形美观等特点得到了广泛的应用。随着相关铝合金铸造工艺的逐渐成熟, 铸造铝合金在舰船装备中的使用也越来越频繁。舰炮和导弹发射装置等武器装备的控制柜、架体、箱体等诸多部件均采用了铝合金铸造的工艺。例如, 图1中托架本体采用铸铝ZL114A材料低压整体铸造成形工艺, 使用树脂砂制作砂型及砂芯。整个过程可以实现液态金属自下而上顺序充型, 充型过程平稳, 不易产生紊流及冲击, 从而避免气孔、二次氧化夹渣等缺陷的产生。在某舰船上, 涉及的起落架、转台、转动箱体(左/右舷箱体)、中箱

体等也都是使用ZL114A材质生产的大型铝合金铸件。在图2中,使用了铸铝ZL201A作为出弹圆盘及炮架的铸造材料,整体切削加工和焊接性能良好,可用于300℃、或在常温下承受较大动、静载荷的工作条件,采用砂型重力铸造成形工艺,经热处理强化后,具有很高的强度、耐热性,同时具有良好的塑性和韧性。除此以外,在舰船武器装备中的随动控制机柜、伺服控制机柜等柜体,以及减速箱箱体、环形架、支撑架等结构件也大量使用了铸铝ZL101材料,铸造性能优良,不易产生热裂和疏松,同时也具有良好的焊接性能,但在使用过程中需涂漆或其他特殊涂料增加其抗蚀性能。

2 舰船装备中铝合金铸造典型缺陷问题分析

舰船装备在海洋工作环境下,环境温度变化范围大,同时需要长时间受到海水的腐蚀,要求铝合金铸件具有较好的耐腐蚀性能,并且在环境温度下有较好的力学性能及较小的膨胀系数。而铸造铝合金的使用过程中,难免会出现因铸造质量问题而产生故障的情况。下面结合多型产品的研制、生产和故障归零情况,对铸造铝合金应用中存在的典型问题进行分析。

2.1 气孔问题

2.1.1 问题描述

某型发射装置托架本体铸件加工时在水密防护罩安装面发现缺陷,缺陷位置如图3所示,缺陷尺寸见图4,铸件材料为ZL114A。

2.1.2 原因分析

根据缺陷位置分析,气孔缺陷在水密防护罩安装面上,该面铸造时由冷铁面形成,根据缺陷位置的工艺特点,通过对合金液、浇注温度和充型速度、铸型材料、铸造工艺、充型卷气情况、型腔表面烘烤情况、型腔表面存在发气异物情况进行复查和分析后得出,该缺陷应是型腔表面存在油污造成的。对冷铁表面进行检查发现,其中部分冷铁表面存在油污。在风铲清理型砂过程中,需不断添加机油,因此导致清理后的部分冷铁表面残存少量机油,油污与金属液接触后产生气体,气体进入到铸件中,形成气孔缺陷。

2.1.3 改进措施

(1)改进检验方式。托架本体铸件的水密防护罩安装面位置连续出现内部缺陷,并且通过增加超声波探伤检验的方式,也未能完全检验出该位置的内部缺陷。因此,针对该问题,尝试采用斜向照射、双层透射的方式进行X光探伤检验,透射方式如图5所示。



图1 铸造托架本体

Fig. 1 Support bracket casting

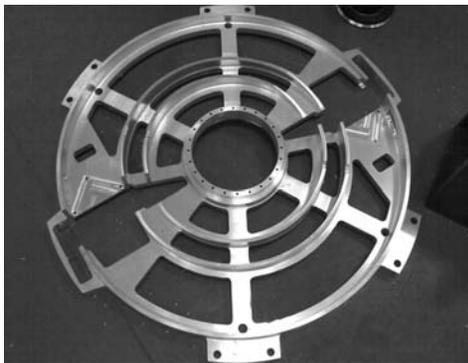


图2 出弹圆盘铸件

Fig. 2 Bullet discharging disc casting



图3 托架本体铸件缺陷位置图

Fig. 3 Casting defect location of support bracket

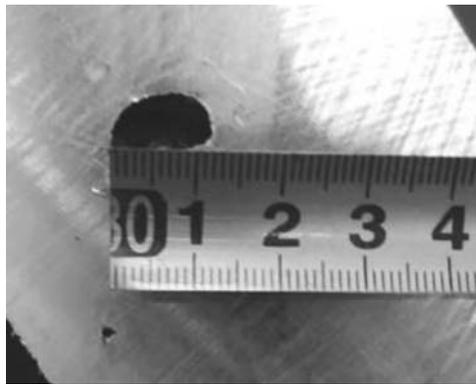


图4 托架本体原始缺陷尺寸图

Fig. 4 Defect size of support bracket

(2) 加强造型控制。针对气孔缺陷, 采取了如下措施: 在冷铁使用前进行喷砂处理, 去除冷铁表面油污等异物, 再将冷铁进炉加热, 去除冷铁缝隙中的油污; 增加冷铁表面质量专职检验人员, 在造型前对所有冷铁表面进行检验, 并填写冷铁质量检验记录; 组型前安排专人对所有冷铁表面进行检验, 确保冷铁表面没有油污等异物。

2.2 疏松问题

2.2.1 问题描述

在某对空射击试验前, 图2中出弹圆盘铸件装弹出现异常, 现场操作人员在对左路供弹系统进行装弹时, 发现装弹阻力比以前增大, 对阻力增大部位进一步检查, 发现在出弹圆盘靠近弹底的一个铆钉位置, 出现一条裂纹, 外导引相对出弹圆盘体移位, 导致供弹通道变窄, 装弹阻力增大。经检查, 发现表面留有敲击痕迹(图6), 并且裂纹呈“Z”字形扩展(图7)。铸件材料为ZL201A。

2.2.2 原因分析

在出弹圆盘体前期的铸造工艺中, 由于冒口的位置和高度选择不合适, 铸件凝固过程中补缩不及时, 加之原冷铁激冷效果差, 铸件凝固时间长, 导致铸件本体在冒口附近的铆钉位置晶粒粗大, 晶界上T相晶粒过大, 铸件存在疏松(图8、图9)。

从铸件质量来看, 力学性能的抗拉强度、伸长率不满足标准规定要求, 部分硬度不满足要求, 冲击值较低, 是本次出弹圆盘铆接孔处出现开裂的内因; 而铆接过程中的锤击冲击和铆钉变形不均匀, 上部造成很大的拉应力, 因此材料基体受到损伤, 产生微裂纹, 在射击过程中受冲击振动导致裂纹逐渐扩展, 是裂纹扩展的外因。

2.2.3 改进措施

根据以上问题定位, 通过从以下几个方面采取措施进行改进。

(1) 增加冒口高度、冒口根部尺寸加大, 提高补缩的压力、延长补缩时间和扩大补缩面积, 改善疏松缺陷; 改进冷铁, 使浇注过程中冷却速度加快, 细化晶粒, 避免晶界上T相晶粒过大, 提高铸件本身的力学性能; 调整冒口位置, 避开铆接区域, 避免铆接部位冒口根部热量集中, 导致的冒口晶粒粗大, 力学性能偏低。

(2) 铆接方式由人工改为机铆, 避免铸件本体受过大的敲击力作用造成材质受损, 同时保证铆钉变形均匀、整体墩粗, 避免铆钉上部变形过大产生应力和下部有间隙造成不良的受力状态, 并保证铆接质量的

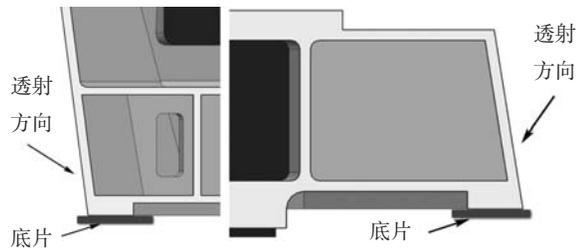


图5 水密防护罩安装面X光探伤示意图
Fig. 5 X-ray destructive detection at installation surface of watertight shield

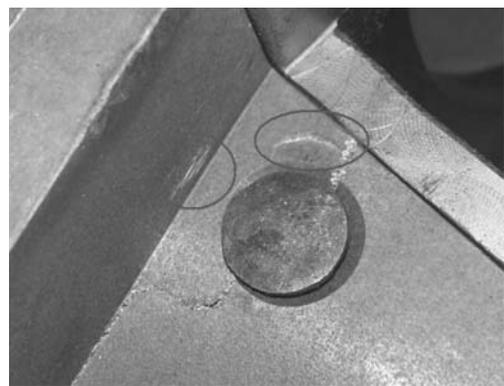


图6 铆接敲击痕迹
Fig. 6 Knock marks of riveting

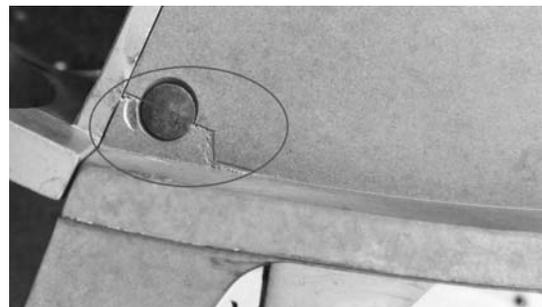


图7 “Z”字形裂纹
Fig. 7 Zigzag crack

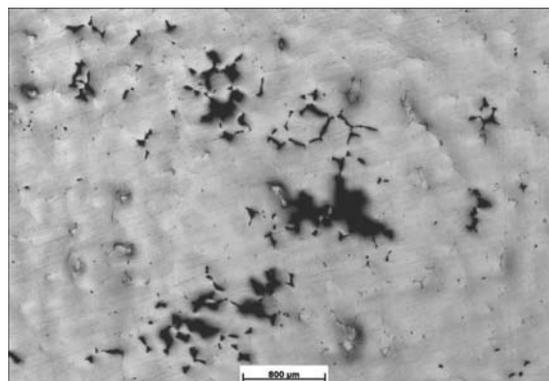


图8 基体疏松形貌
Fig. 8 Loose morphology of matrix

一致性。

2.3 延迟裂纹问题

2.3.1 问题描述

某型舰炮摇架、托架在使用10多年后出现裂纹，裂纹位置如图10所示，铸造材料为ZL305。摇、托架裂纹出现的位置主要分布在摇架齿弧下部、托架靠近软导引一侧下部；发现裂纹的时间比较集中，产品使用环境基本相同。初步可以判断此种裂纹为延迟裂纹，基本与外部工作应力无关，需较长的时间后才会产生。

2.3.2 原因分析

ZL305的强化是通过热处理固溶形成单一的 α -Al过饱和相，该状态在自然时效时会析出 β 相。该型舰炮摇、托架在铸造时，由于大型铸件存在的偏析，在微观上导致局部区域富Mg贫Zn，增大了Mg形成 β 相沿晶界时效析出的倾向；在随后长期使用过程中（自然时效）弱化了晶界，降低了晶粒之间的结合力，造成了构件的脆性增大；当表层的拉应力值（内应力）超过该处材料的抗拉强度时，表面产生裂纹，裂纹微观形貌见图11；当构件表面漆层失效时，表层受到海洋环境腐蚀，产生了点蚀坑（图12），成为了另外一部分裂纹的萌生点，在构件内应力的作用下，点蚀坑产生微裂纹，并沿着弱化的晶界扩展，最终形成了宏观裂纹。

因此，铸件摇、托架开裂的原因为材料因时效脆性增加、内应力值（拉应力）偏大，以及环境腐蚀介质三者共同作用引起。

2.3.3 改进措施

通过质量攻关和规范化操作过程，使摇、托架的宏观缺陷显著降低；同时优化、规范浇注系统、冒口及冷铁工艺，降低了局部成分偏析和改善内应力的分布，降低了构件产生应力腐蚀裂纹的机率；采取自然时效后加工工艺，摇、托架开裂的比例有大幅降低。分析认为自然时效后再加工对减少裂纹的产生有一定的效果。

3 铝合金铸造技术高质量发展对策

近年来，国内外的舰船装备为追求零部件结构合理、质量轻量化等，将原来由几个简单铸件、锻件、机械加工零件组合而成的部件，通过优化设计，改用一个整体铸件来代替。这些铸件一般具有如下特点^[5]：

（1）复杂：铸件轮廓结构复杂，内部多腔、凸台，薄、厚断面过渡突然；

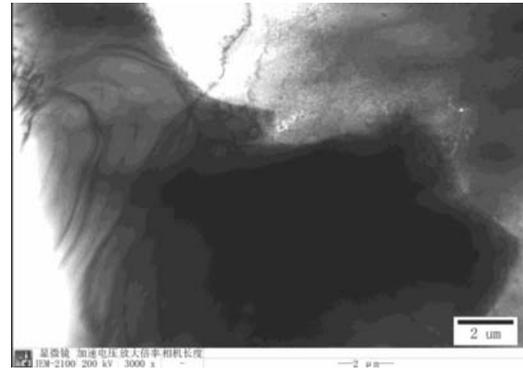


图9 晶界块状T相

Fig. 9 Massive T-phase at grain boundary

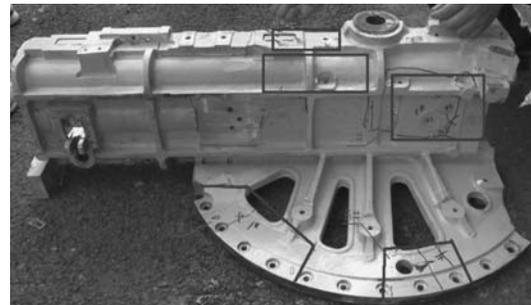


图10 铸造摇架裂纹示意

Fig. 10 Cracks in cradle casting

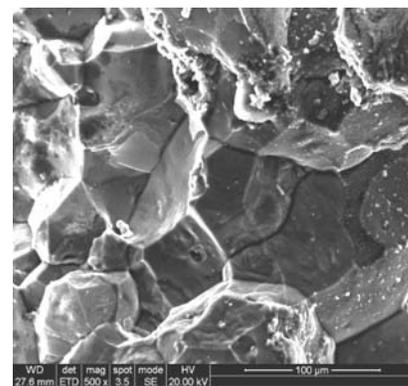


图11 裂纹微观形貌

Fig. 11 Morphology of crack

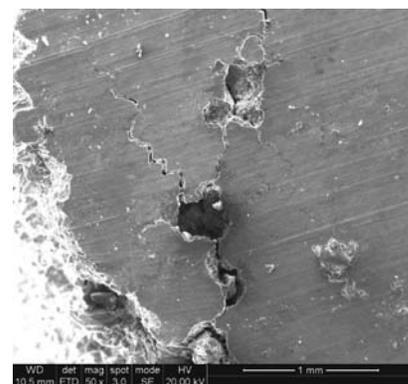


图12 零件表面腐蚀坑

Fig. 12 Corroded pits on the surface of part

(2) 薄壁: 铸件最小壁厚一般小于4 mm, 局部甚至薄至2 mm以下, 这些薄壁部位往往是铸件的内部部分, 由复杂曲面构成, 无法加工成形;

(3) 精密: 铸件的内部和外形往往要求一次成形, 使其接近零件或部件的最终形状, 少加工或不加工, 称之为近净形化技术或近无余量技术 (Near Net Shape Casting);

(4) 本体性能要求高: 铸件本体指定部位解剖力学性能要求高于国标, 同时在海洋复杂环境条件下, 对铸件的耐海洋腐蚀性能提出了较高要求;

(5) 内部质量要求高: 某些铸件的指定部位内部质量要求达到 I 类铸件要求, 100% 进行 X 射线探伤, 100% 进行荧光探伤。

传统的重力铸造方法经常会产生欠铸、冷隔等缺陷, 导致铸件的整体性能降低, 不能满足舰载装备的技术指标要求。而舰船装备对性能要求的提高, 也会使现有铸造铝合金材料难以满足高性能的需求。因此, 在以下几个方面仍需要进行进一步的研究。

3.1 加强对铝合金环境适应性问题的研究

舰船装备在使用过程中, 工作环境十分恶劣, 铸造铝合金材料需要在 $-40 \sim 70$ °C 的温度变化范围内保持良好的力学性能, 同时不能产生过大的变形, 而高温、高湿、高盐的环境也对铸件的耐腐蚀性能提出了挑战。因此, 拥有较好的耐腐蚀性、优良的铸造性能和较高的力学性能的铸造材料依旧是未来研究的重点。此外, 更加完善的表面处理技术也是解决铸造铝合金材料环境适应性问题的另一方式, 现阶段已经可以通过微弧氧化技术在材料表面形成一层陶瓷镀膜, 对于舰船装备的抗腐蚀性能将会有质的提升。

3.2 加强对成形技术的研究

现阶段对提高合金性能方面, 有许多研究者进行了大量的研究工作, 但作为铸造铝合金使用过程中最重要的一环, 有关于高强铝合金成形的研究则略显不足。因此, 特别需要对合金成形性能以及成形技术方面进行深入研究。

在商业应用中, Al-Cu 系合金使用较多。Al-Cu 系合金的切削性能优良, 热处理后的力学性能高, 但铸造较为困难, 流动性差, 容易发生裂纹、缩孔等缺陷。成形性能差严重影响了高强韧铸造铝合金在舰船装备中的应用。为了解决这一问题, 众多的研究者在提高材料的铸造性能, 完善材料的成形技术等方面做出了大量的贡献, 也取得了一定的成绩。可能应用于高强韧铸造铝合金的成形技术主要有低压铸造、反压(差压)铸造、挤压铸造(液态模锻)、半固态挤压

成形、半连续铸造、气滑铸造、超声铸造和磁流铸造等, 虽然有一些技术还没有完全实现商业化应用, 但仍为成形技术的未来发展奠定了理论基础。

3.3 开发新的高强韧材料

对于新的高强韧材料的研究, 人们关注的重点往往在合金化方面, 也取得了许多成果。随着一些新的合金元素的出现, 其在高强韧铸造铝合金中的作用机理可以进行相应的研究, 如新开发的 Sc, Li 等元素。除此以外, 高强韧铸造铝合金材料的纯净化技术也应得到足够的重视。研究表明, 铝合金的组织具有遗传特性, 而原材料的纯净性势必会影响高强韧铝合金的性能, 不仅影响高强韧铝合金合金化研究, 同时也影响高强韧铝合金在舰船装备中的应用。在纯净化技术的研究方面, 我国与其他发达国家仍有较大差距, 因此, 在继续推进合金化研究的同时, 铝合金纯净化技术理应得到人们更多的重视。

3.4 开发配套的分析、检测和控制设备

高强韧铸造铝合金的性能与合金的纯度密切相关, 因此需要对生产加工过程中的气体成分、杂质含量以及熔炼铸造工艺等进行控制, 开发配套的分析、检测和控制设备至关重要。例如能快速分析气体成分及含量和合金微量元素的分析设备, 能快速检测熔炼过程中变质效果的检测设备, 能快速调节控制熔炼温度的温控设备等。

此外, 为保证产品质量及节省成本, 在生产流程的早期阶段及时检测出缺陷是很必要的, 未来的研究重点将集中在快速高效地处理超声波信号, 准确地获取缺陷的高质量射线图象, 以及利用先进的计算机技术实现铸件缺陷真正的自动化检测及质量评价。另外, 考虑将多种检测方法, 如超声波探伤法、X 射线透照法或射线层析摄影法等结合起来^[6-7], 达到最佳的检测结果也是有待开拓的研究领域。

3.5 3D 打印与铸造工艺相结合

随着 3D 打印技术的不断发展, 越来越多的产品可以通过 3D 打印技术进行生产和制造, 尽管 3D 打印技术仍存在许多的问题, 但其整体制造、一体成形的特点既解决了复杂零件难以整体制造的问题, 同时也减少了后续加工造成的材料浪费。将 3D 打印技术与铸造工艺相结合, 如通过 3D 打印技术直接打印蜡模, 或通过 3D 打印技术制造出难以成形的随形冷却模具镶嵌块, 不仅可以节省相关模具制造的时间和费用, 同时也能提升产品的铸造质量, 实现舰船装备等领域大型复杂异形关键零件的快速、低成本整体制造^[8]。因此, 加快

3D打印等新型制造工艺与传统铸造工艺的结合,才能更好地推进铸造技术的发展。

4 结束语

由于铝合金铸造工艺的特点,特别是对铝合金大型铸件,铸件内部无法完全避免孔洞、疏松、夹杂等

基体金属结构不连续缺陷,对形状复杂的大型铸件至今国内还没有办法完全消除缺陷。但是,通过积极的改进、开发新的铸造工艺,加强对新材料的研究,同时完善铸件配套设备的研发,将会使铝合金铸造技术在未来舰船装备中得到更广泛的发展和应用。

参考文献:

- [1] 黄晓艳,刘波.轻合金是武器装备轻量化的首选金属材料[J].轻合金加工技术,2007,35(1):12-15.
- [2] 王英杰,姚惟斌,熊艳才,等.ZL205A热壳精密铸造工艺研究[J].材料科学与工艺,1999,7(增刊):170-172.
- [3] 李元元,郭国文,罗宗强,等.高强韧铸造铝合金材料研究进展[J].特种铸造及有色合金,2000(6):45-47.
- [4] 冯志军,翟虎,闫卫平,等.薄壁铝合金铸件铸造技术的进展[J].航空制造技术,2009,21:32-34.
- [5] 郑亚虹,王自东.复杂薄壁精密铝合金铸件铸造技术进展[J].铸造,2010,59(8):796-799.
- [6] 徐丽,刚铁,张明波,等.铸件缺陷无损检测方法的研究现状[J].铸造,2002,51(9):535-540.
- [7] 林莉,杨平华,张东辉,等.厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J].机械工程学报,2012,48(4):12-20.
- [8] 杨德建,刘仁洪.大型复杂金属零件3D打印技术及研究进展[J].兵工自动化,2017,36(2):8-12.

Existing Problems and Development Prospect of Application of Cast Aluminum Alloys to Warship Equipment

CHEN Yan-wei, LIU Jia-lin, ZHAO Ya-peng

(713 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, Henan, China)

Abstract:

Aluminum alloy has the characteristics of low specific gravity, high performance and convenient processing, and thus has received extensive attention. Compared with the welding process, casting process has the advantages of wide adaptability, great consistency and beautiful appearance. With the maturity of the aluminum alloy casting technology in large scale and complex structure, the conditions for the wide application to warship equipment have been created. This paper mainly introduces the basic situation of aluminum alloy casting technology used in warship equipment, including the type of product application, typical technology characteristics and the scope of application. The problems existing in high strength cast aluminum alloy are analyzed, and suggestions for improving casting quality are put forward. Finally, the paper discusses the development prospect and problems of high strength aluminum alloy casting technology in the field of naval equipment for the future development of naval equipment.

Key words:

warship equipment; light metal; cast aluminum alloy