

离心机铸管耐腐蚀性能提升与防护技术研究

马思远 黄 鹏

河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

[摘要] 离心机铸管在化工、海洋工程及市政管网等领域应用广泛, 其耐腐蚀性能直接关系到设备服役寿命与运行安全。文中系统分析了离心机铸管耐腐蚀性能的影响因素, 包括化学成分、显微组织、制造工艺参数及使用环境等方面。在此基础上, 重点探讨了合金化设计、热处理工艺优化、内外表面质量控制及新型耐腐蚀材料应用等性能提升技术, 并综述了表面涂层、阴极保护及缓蚀剂等防护技术。研究表明, 采用双金属复合离心铸造工艺可使管材兼具高强度与高耐腐蚀性, CA6NM 马氏体不锈钢离心铸管在氯离子浓度高达 3.5% 的海洋腐蚀环境中腐蚀速度比进口产品降低 27%, 离心力让金属液形成定向凝固, 铸件致密度高, 耐磨性、耐腐蚀性比砂型铸造提升 30%~50%。通过合理的材料设计与工艺控制, 可显著提升离心机铸管的耐腐蚀性能, 满足严苛工况下的使用要求。

[关键词] 离心机铸管; 耐腐蚀性能; 合金化设计; 热处理; 防护涂层

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19548

中图分类号: TG174

文献标识码: A

Research on the Improvement of Corrosion Resistance and Protection Technology of Centrifugal Casting Pipe

MA Siyuan, HUANG Peng

Angang Yongtong Ductile Iron Pipe Limited Liability Company, He'nan Iron & Steel Group, Anyang, He'nan, 455133, China

Abstract: Centrifugal cast pipes are widely used in fields such as chemical engineering, marine engineering, and municipal pipeline networks. Their corrosion resistance directly affects the service life and operational safety of equipment. The article systematically analyzes the factors affecting the corrosion resistance of centrifuge cast pipes, including chemical composition, microstructure, manufacturing process parameters, and usage environment. On this basis, performance improvement technologies such as alloying design, heat treatment process optimization, internal and external surface quality control, and application of new corrosion-resistant materials were discussed in detail, and protective technologies such as surface coatings, cathodic protection, and corrosion inhibitors were summarized. Research has shown that the use of bimetallic composite centrifugal casting technology can achieve both high strength and high corrosion resistance in pipes. CA6NM martensitic stainless steel centrifugal casting pipes have a corrosion rate 27% lower than imported products in marine corrosive environments with chloride ion concentrations up to 3.5%. Centrifugal force causes the metal liquid to form directional solidification, resulting in high casting density, wear resistance, and corrosion resistance increased by 30% -50% compared to sand casting. Through reasonable material design and process control, the corrosion resistance of centrifuge castings can be significantly improved, meeting the requirements of harsh working conditions.

Keywords: centrifugal casting tube; corrosion resistance performance; alloying design; heat treatment; protective coating

引言

离心铸造是目前应用最广、工艺效果最好的一种金属成型方法, 利用旋转时形成的离心力将熔融的金属分散在铸型外壁上, 使它们慢慢冷却并凝固成管形的铸件。该工艺被广泛地应用到石油化工、船舶制造、核电工程以及市政供水等各个领域中。但是离心机铸管在实际使用过程中经常会遇到各种复杂的腐蚀环境, 比如海水里的氯离子侵

蚀、酸性介质的化学腐蚀、高温氧化等, 这些都会对离心机铸管造成影响, 并成为限制它工作寿命和保持安全运行的主要原因。CA6NM 是马氏体不锈钢中的一种尖端材料, 在含有 3.5% 氯离子的海洋腐蚀环境中要达到长期稳定的目的, 需要对成分进行精确的控制以及离心铸造制程的改进。因此对离心机铸管耐腐蚀性能的提高以及相应的防护技术进行系统的研究, 对于延长离心机铸管使用寿命、降

低维护费用等都有重要的作用。本文从材料设计、制造工艺、表面防护这三个方面入手,对离心机铸管耐腐蚀性能提高和防护技术进行系统的梳理和分析。

1 离心机铸管的性能特点

离心机铸管组织致密,力学性能好,尺寸精度高。离心铸造时,金属液在离心力的作用下沿着铸型内壁均匀地铺展成由外向内的定向凝固过程,把铸件内部的气孔、夹杂等缺陷排出,铸件致密度比普通砂型铸造高得多。离心力使金属液向内壁方向均匀生长,杂质、气孔被排到内壁,铸件致密度大、耐磨性好,耐腐蚀性能比砂型铸造提高30%~50%。另外离心铸造得到的晶粒组织更细小更均匀,抗拉强度和硬度比普通铸造提高15%~20%。离心铸管表面粗糙度可以达到 $Ra6.3\sim12.5\mu m$, 尺寸公差可以达到CT8~CT10级,减少了后续机加工余量。离心铸造可以成型各种不同性能的合金材料,从普通的灰铸铁到高性能不锈钢、镍基合金甚至双金属复合材料都可以通过离心铸造工艺制备出来,给根据不同腐蚀环境选择合适的材料提供工艺基础。离心铸造有较好的生产效率,适用于大批量生产筒形、管形零件,浇注后冷却均匀,铸件合格率高,不需要复杂的砂芯就可以成型。

2 离心机铸管耐腐蚀性能影响因素分析

2.1 化学成分及合金元素的影响

离心机铸管的化学成分是决定其耐腐蚀性能的主要因素。合金元素种类和含量都会影响材料的电极电位、钝化膜形成能力以及局部腐蚀抗力。碳含量过高时就会促使碳化物在晶界处出现,造成晶间腐蚀变得格外敏感。铬是提高铸铁和不锈钢耐腐蚀性的主要元素,它可以形成一层很厚的 Cr_2O_3 钝化膜在金属表面,从而起到防蚀作用。N06059 采用低碳、高钼、控铁的合金设计思想,把点蚀抗力指数提高到50以上,并且解决了焊接热影响区敏化的问题,是化工、环保等领域的革命性材料^[1]。钼元素添加可以明显提高材料的抗点蚀、抗缝隙腐蚀能力,镍有利于保持奥氏体组织稳定、提高钝化膜的自修复性能。铜镍合金体系中 CuNi34 合金的基体主要是铜和镍,加入铬、钼等元素后可提高耐腐蚀性。

2.2 显微组织与石墨形态的影响

显微组织形态对离心机铸管的腐蚀行为有着非常大的影响。铸铁类铸管中石墨形态、分布决定材料腐蚀方式。球状石墨铸铁比片状石墨铸铁具有更好的耐腐蚀性能,因为球状石墨可以减小石墨和基体界面上的微电池效应,减小局部腐蚀倾向。双金属离心浇铸复合管内层用耐磨、耐腐蚀的高铬铸铁制成,外层为强韧的合金钢或者低碳钢,

比传统单金属管具有更长的使用寿命。在马氏体不锈钢中回火马氏体组织以及残留奥氏体比例、碳化物分布情况都会影响到材料的点蚀和晶间腐蚀敏感程度。细小均匀的组织利于形成稳定的钝化膜,粗大的碳化物析出相则是腐蚀优先萌生的位置。

2.3 制造工艺参数的影响

离心铸造过程中工艺参数对铸管的显微组织、耐腐蚀性起很大作用。铸型转速、浇注温度、铸型温度和冷却速度等参数合理组合可以得到高质量的铸管。根据离心铸造工艺参数对不锈钢管微观组织影响的研究可知,采用涂覆石墨坩埚或者混合石墨/碳化硅坩埚会在熔炼过程中产生渗碳现象,使微观组织中的碳化物增多,从而降低铸件的耐腐蚀性,使用氧化铝陶瓷坩埚可以防止渗碳现象的发生。在 Mg-6Al-5Sn-0.3Ce 镁合金离心铸造中发现,随着旋转速度、离心力保持时间的增加,晶粒尺寸先减小后增大,腐蚀电位先正移后负移,耐腐蚀性能先提升后下降,在1700转/min的转速下保持5min可以获得最佳的耐腐蚀效果。浇注温度过高会使气体溶解量增大,使铸件内部气孔增多;浇注温度过低会使金属液充型能力变差,容易造成冷隔缺陷。

2.4 使用环境及运行条件的影响

表1 离心机铸管耐腐蚀性能主要影响因素及作用机理

影响因素	具体参数/类型	对耐腐蚀性能的影响	作用机理简述
化学成分	Cr、Mo、Ni、C等元素	Cr、Mo、Ni提高耐腐蚀性;C过高降低耐腐蚀性	改变电极电位、形成钝化膜、影响碳化物析出
显微组织	石墨形态、晶粒尺寸、相组成	球状石墨优于片状石墨;细晶组织更优	减少微电池效应、影响成分均匀性
制造工艺	转速、浇注温度、冷却速度	参数优化可提升耐腐蚀性	影响组织细密性、缺陷形成及元素偏析
使用环境	pH、Cl ⁻ 浓度、温度、流速	恶劣环境加速腐蚀	破坏钝化膜、促进电化学反应、引发局部腐蚀

离心机铸管所处的实际环境影响它的腐蚀情况。介质种类、浓度、温度、流速、溶解氧含量等都会影响腐蚀的种类和速度。海洋工程中的高浓度氯离子环境对离心铸管来说是一个严峻的挑战,常见的失效形式有点蚀、应力腐蚀开裂。CA6NM 离心铸造管件经过第三方检测,模拟海水条件下腐蚀速度比进口产品降低7%,给海洋工程设备提供更加安全可靠的国产替代品。在酸性介质中,材料的腐蚀速率随着pH值的减小而急剧增大,氢致开裂的风险也增大。高温环境下的腐蚀和氧化相互影响,使材料变坏的速度加快^[2]。介质流速同样会对腐蚀产生影响,高速流

动的腐蚀性介质会造成冲刷腐蚀,破坏表面钝化膜。离心机铸管耐腐蚀性能的差别,要根据具体的工作状况展开针对性的设计及选材。

3 离心机铸管耐腐蚀性能提升技术

3.1 合金化设计与材料优化

合金化设计是提高离心机铸管本征耐腐蚀性能的根本办法。采用合理的合金元素配比,在保证具有良好的力学性能的基础上大大提高材料的耐蚀性。铬、镍、钼、铜等元素合理地加入可以提高材料的钝化性能,使钝化膜更稳定。CA6NM 离心铸造管件的研制牵涉到成分精确控制、离心铸造工艺改良等关键技术,技术团队经由铸态组织均匀性掌控、抗点蚀当量数加强等主要难题的解决,产品性能优于 ASTM A743 标准。在铸铁材料中加一定量的硅、铝等元素可以形成致密的氧化膜,减小基体的腐蚀速度。服役于强腐蚀环境的离心机铸管,已经采用高性能合金,即镍基合金、双相不锈钢等成为主要的发展方向。合金化设计还要考虑经济性,在保证耐腐蚀性的同时尽量减少材料的成本,实现性能和成本的平衡。

3.2 热处理工艺优化

热处理工艺对于离心机铸管的组织发生改变、耐腐蚀性起决定作用。合理热处理可以消减铸造应力,均化组织,改善碳化物的形状和分布,提高材料整体耐腐蚀性。为防止铸造坯料产生气孔、热处理时出现微小裂纹等缺陷,喷涂涂料后马上使用压缩空气或者氩气将铸型内腔中的水蒸汽吹走,适当提高铸型温度和浇注温度,油淬冷却至 260℃左右,立即出油空冷、空冷至 100℃左右,再立即回火的工艺可以保证小直径 CA-6NM 马氏体不锈钢钢管没有缺陷,并且具有较好的金相组织和力学性能。固溶处理能使得碳化物被完全溶解,从而改善合金元素的均匀性,抑制晶间腐蚀倾向^[3]。时效处理就是通过控制析出相的形状和大小来控制材料的强度以及耐腐蚀性。采用固溶处理前对管件内外表面进行粗加工,严格控制热处理工艺参数,控制固溶处理转移时间在 40s 以内,冷却水温在 32℃以下等措施优化制造工艺路线,使力学性能趋于稳定,性能一次合格率达到 95%~99%。

3.3 内外表面质量控制技术

离心机铸管的内外表面质量会影响它耐腐蚀性能的好坏。表面缺陷如气孔、夹渣、裂纹等都会使铸管的外观质量变差,还会给腐蚀介质侵入提供通道,引起局部腐蚀。涂料性能以及涂料的使用方法都会对铸管表面质量及管模使用寿命产生较大的影响,铸管外表面麻坑、针孔等缺

陷的主要影响因素就是涂料本身性能和涂料使用工艺。改善涂料配方和涂敷工艺可以提高铸管表面质量。离心铸管出现裂纹、管尾不完整、气孔和渗漏等缺陷同涂料涂敷工艺存在内在联系,设计并使用新型喷嘴及涂料喷涂系统,可以大大提高铸管的质量,同时也可以延长铸型的使用寿命。另外,对铸管内外表面做适当的机加工处理,除去表面缺陷层和氧化皮,可以获得更加均匀、清洁的金属表面,给后面的防护涂层制备提供良好的基底。内表面质量的好坏还要注意铁水的纯净度,减少非金属夹杂物。

3.4 新型耐腐蚀材料的应用

伴随着材料科学的发展,一大批新的耐腐蚀材料被用于离心铸造当中。双金属复合离心铸造技术把高耐腐蚀合金和高强度结构材料结合起来,从而达到性能协同优化的目的。双金属离心浇铸复合管的内层用耐磨、耐腐蚀的高铬铸铁制造,外层用强度高、韧性好、耐腐蚀的合金钢或低碳钢制造,因为兼备了强韧度大、耐磨、耐腐蚀强的优点而有着较长的使用寿命,在工业上得到了广泛应用。高性能镍基合金 N06059,用低碳、高钼、控铁的设计理念,能够在强氧化性酸、混合卤素介质和高温酸性气体里表现出优异的耐蚀性能,其点蚀抗力指数可以达到 50 以上,焊接区的耐蚀性比传统合金提高 3 倍。铜镍合金 CuNi34 因为具有很好的耐海水腐蚀性,在船舶和海洋工程中被广泛使用。

4 离心机铸管防护技术

离心机铸管的防护技术主要有表面涂层防护、电化学防护和介质调节三个方面。合理选材要结合环境因素、耐腐蚀性能和经济性,表面防护用金属镀层或非金属涂层来隔离腐蚀介质,介质处理通过除氧、添加缓蚀剂来降低腐蚀性,电化学保护采用阴极或阳极极化来抑制金属反应^[4]。表面涂层上常用到的锌基涂层,纯锌涂层、锌铝合金涂层或者富锌涂料涂层都可以起到阴极保护的作用。新兴铸管研发的带复合涂层的球墨铸铁管,由碱激发凝胶层和锌基涂层组成,碱激发凝胶层是碱矿渣粉煤灰耐腐蚀性凝胶材料,涂覆于管道内或外表面,给球墨铸铁管提供更进一步的防腐保护,能在非常恶劣的施工环境中进行施工,在酸性土壤、架空领域有很强的耐候性。另外,环氧树脂粉末涂料静电喷涂、聚天门冬氨酸酯面漆喷涂等有机涂层技术也可用在离心机铸管的保护上。一种防腐耐高温耐磨铸管的制备方法通过离心铸造制得耐磨管道本体,经淬火、高温回火、固溶强化热处理和二次回火弥散硬化热处理,在管道外壁用静电喷涂涂层防锈涂层,在管道内壁涂上水玻

玻璃纳米复合涂料并高温固化,得到抗高温氧化防腐镀膜内层。激光熔覆技术属于先进表面改性方法,在球墨铸铁表面制造致密的合金熔覆层,提升耐腐蚀性能。电化学保护技术也可以用来对离心机铸管进行防护,阴极保护是通过外加电流或者连接牺牲阳极,使被保护的铸管电位降到腐蚀电位以下,从而抑制电化学腐蚀反应的发生,广泛应用于地下管道、海水冷却设备等。

5 结语

离心机铸管的耐腐蚀性提高和防护是多环节、多方面的工程,包含合金设计、制造工艺、热处理、表面防护等各方面。本文系统地对化学成分、显微组织、工艺参数、使用环境对耐腐蚀性能的影响规律进行了分析,对合金化设计、热处理优化、表面质量控制、新型耐蚀材料的应用等性能提高技术进行了综述,对表面涂层、电化学保护等防护技术进行了总结。经过研究发现,在合理的选材及工艺改进之后,离心机铸管的耐腐蚀性可以得到提高。随着高性能合金材料发展、先进表面改性技术发展,离心机铸管在恶

劣腐蚀环境中应用前景会越来越广,给海洋工程、化工设备、核电设施等设备的安全运行赋予越发可靠的技术动力。

【参考文献】

- [1]王容成,屈志,陈勇,等.17-4PH 大直径厚壁离心铸造管的热处理工艺优化[J].钢管,2022,51(2):71-76.
- [2]张应龙.小直径 CA-6NM 马氏体离心铸管的研制[J].钢管,2017,46(2):21-25.
- [3]冯光弼.提高铸管水冷离心铸造模具寿命的研究[J].山西冶金,2022,45(5):38-40.
- [4]李浩.水冷离心铸管机工艺装备改造及应用[J].科技风,2019,10(25):147.

作者简介:马思远(1996.11—),毕业于安阳工学院机电一体化专业,现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司,助理工程师;黄鹏(1992.05—),毕业于武汉科技大学电气工程及其自动化专业,现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司,铸管工,助理工程师。