

精密铸造不锈钢铸件的免固溶处理技术应用研究

毛有武¹ 吴树森²

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院, 国家级实验教学示范中心, 武汉 430074; 2. 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术全国重点实验室, 武汉 430074)

摘要 奥氏体不锈钢铸件的高温固溶处理能耗高、周期长, 提高了铸件的生产成本。在熔炼后期加入少量添加剂, 通过添加剂中的微量元素去细化晶粒、改善碳化物分布甚至抑制碳化物析出, 达到不需要进行高温固溶处理(即免固溶处理)即可得到与固溶处理几乎相同的力学性能, 其抗晶间腐蚀能力更高。结果表明, 免固溶处理的不锈钢或合金钢的抗拉强度比传统工艺提高了10%~15%, 铸件的含氧量在传统工艺基础上进一步降低了10%~20%, 且具有脱氢效果。

关键词 不锈钢; 免固溶处理; 添加剂; 力学性能; 精密铸造

中图分类号 TG142; TG249.5

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240400

Application of Solution-free Treatment Technology for Stainless Steel Castings

MAO Youwu¹, WU Shusen²

(1. National Experimental Teaching Demonstration Center, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: The high-temperature solution treatment of austenitic stainless steel castings requires high energy consumption and long processing cycles, which significantly raises the production costs. A small amount of additives was added during the later stage of smelting. The trace elements in the additives can refine the grain structure, improve the distribution of carbides, and even inhibit carbide precipitation, eliminating the need for high-temperature solution treatment and achieving nearly identical mechanical properties to those obtained through solution treatment, with desirable resistance to intergranular corrosion. The results indicate that the tensile strength of stainless steel or alloy steel with solution-free treatment is 10%~15% higher than those of ones by conventional methods, while oxygen content is reduced by 10%~20%. Additionally, the treatment demonstrates a dehydrogenation effect.

Key Words: Stainless Steel, Solution-free Treatment, Additives, Mechanical Properties, Investment Casting

在精密铸造生产中, 奥氏体不锈钢铸件由于型壳温度较高且冷却速度较慢, 容易在凝固过程中析出 $M_{23}C_6$ 碳化物。这些碳化物主要由Cr、C和Fe组成, 属于富铬相, 通常分布在晶界或非金属夹杂物周围。这会导致邻近区域的基体贫Cr, 显著降低铸件的抗晶间腐蚀能力, 并增加硬度, 降低塑性和可加工性^[1-3]。为解决这一问题, 工业上通常采用1 050~1 150℃的高温固溶处理。通过固溶处理, 富铬碳化物能够重新溶解到固溶体中, 并通过快速冷却防止再次析出, 从而有效恢复不锈钢的力学性能和耐腐蚀性能。然而, 高温固溶处理的缺点在于高能耗和长处理周期, 这不仅提高了生产成本, 还降低了生产效率^[4-7]。因此, 寻找替代方法

或优化现有工艺以降低能耗和提高效率, 是当前工业生产的重要课题。

本研究在熔炼后期加入少量添加剂(免固剂), 通过添加剂中的微量元素去细化晶粒、改善碳化物分布甚至抑制碳化物析出, 从而无需对304(CF8)、316(CF8M)等不锈钢进行高温固溶处理(即免固溶处理), 却能够得到与固溶处理几乎相同的力学性能和优异的抗晶间腐蚀性能。

1 试验方法

1.1 试样制备

采用熔模铸造工艺方法进行试样制备, 熔模铸造

收稿日期: 2024-10-07; 修订日期: 2024-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51771080)

第一作者简介: 毛有武, 男, 1965年出生, 高级工程师, E-mail: ywhust@hust.edu.cn

通信作者: 吴树森, 男, 1961年出生, 教授, E-mail: ssw636@hust.edu.cn

引用格式: 毛有武, 吴树森. 精密铸造不锈钢铸件的免固溶处理技术应用研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 789-792.

MAO Y W, WU S S. Application of solution-free treatment technology for stainless steel castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 789-792.

是一种近净成形工艺,可以生产各种不锈钢材质的精密、复杂铸件。

(1)壳型制备 壳型制备是熔模铸造的第一步,主要过程包括蜡模成型、组树、制壳、脱蜡和焙烧。

将蜡料压入模具型腔内,其中 Y 型试样宽度为 25 mm,圆柱试样直径为 10~12 mm,冷却后取出轮廓清晰、表面光滑的蜡模。将多个蜡模焊接在浇注系统上,形成模组。

在蜡模表面涂上数层耐火材料,形成具有一定强度和耐火度的型壳。具体步骤包括涂挂和撒砂。这个过程需要重复多次,以确保型壳的厚度和强度。撒砂时,要保持熔模不断回转和上下倒置,以确保涂料和砂料均匀分布。通过高温蒸气使型壳内的蜡模融化并排出,得到可以浇注成型的空腔型壳。最后将型壳在高温下焙烧,以烧掉残留的蜡料和水分,同时提高型壳的强度和透气性。

(2)不锈钢熔炼 在 100~500 kg 中频感应炉中熔炼 304(CF8)、316(CF8M)不锈钢,熔炼过程需要严格控制温度、成分和杂质含量,以确保金属液的质量和性能。

按照产品的材质成分进行配料,或采用 60%~70% 配制的新炉料和 30%~40% 浇冒口,确保金属液的成分符合要求。将配好的金属原料放入熔炼炉中加热至熔化状态。在熔炼过程中,需要不断搅拌和除渣,以确保金属液的均匀性和纯净度。最后对熔炼好的金属液进行直读光谱仪测试,以确保其成分合格。

(3)浇注 浇注过程需要严格控制温度、速度和压头等参数,以确保铸件的质量和性能。

在浇注前,需要对型壳进行预热(800~1 000 ℃),以提高其温度和透气性,有利于金属液的充填和凝固。称取约占金属液质量 0.3% 的免固剂,分 3~4 次撒到金属液表面加入,撇清浮渣,然后将熔炼好的金属液按照规定的速度和压力(主要是浇注高度,即压头)浇入型壳中。在浇注过程中,需要保持金属液的连续性和稳定性,以避免出现浇不足、冷隔等缺陷。待金属液在型壳中冷却凝固后,形成铸件。冷却过程中需要保持型壳的稳定性和透气性,以确保铸件的均匀冷却和收缩。最后将冷却后的铸件从型壳中取出,并进行清理和修整。

1.2 试样的测试

采用氢氧氮联合测定仪(LECO ONH836 型)检测试样机 O、H、N 含量,夹杂物检测按照 GB/T 10561-2023 进行;采用 Gemini SEM300 场发射扫描电镜进行显微组织观察;采用 MTS C45.105EY 力学性能试验机测定抗拉强度、屈服强度及伸长率;按 GB/T 10561-2023

进行抗晶间腐蚀和耐点蚀试验。根据 GB/T 4334-2020 标准,抗晶间腐蚀测试使用尺寸为 80 mm×20 mm×3 mm 的试样,表面经过磨削处理。测试后,晶界优先受到腐蚀,若发生晶间腐蚀,试样在冷弯 90° 时会出现裂纹。耐点蚀测试依据 GB/T 17897-2016 标准,试样尺寸为 40 mm×15 mm×4 mm,测试后表面会出现点蚀。最大点蚀坑的尺寸用于评估耐点蚀性能。

2 免固剂使用效果及分析

2.1 不锈钢的精炼效果及熔体质量

试样的 O、H、N 检测及夹杂物检测结果见表 1。一般冶炼,即按常规进行脱氧、精炼处理,浇注相同的试样。由表 1 可知,采用免固剂后 304 不锈钢熔体中 O、H、N 含量分别降低了 42%、38% 和 30%;夹杂物量也显著降低,见表 1 和图 1。加入免固剂后,由于除气效果好、减少了夹杂物,并控制了碳化物的数量及大小,因此不需要进行固溶处理。对于 316 不锈钢,也具有相似的效果。

表 1 免固剂使用前后的效果对比

Tab.1 Effect comparison before and after use of solid free solvent

冶炼形式	钢种	$\varphi_B/\%$				是否固溶
		O	H	N	夹杂物	
一般冶炼	304 不锈钢	0.012	0.001 3	0.050	I 型 3.0	是
加免固剂	304 不锈钢	0.007	0.000 8	0.035	0	否
一般冶炼	316 不锈钢	0.013	0.001 4	0.046	I 型 2.0	是
加免固剂	316 不锈钢	0.009	0.000 7	0.036	0	否

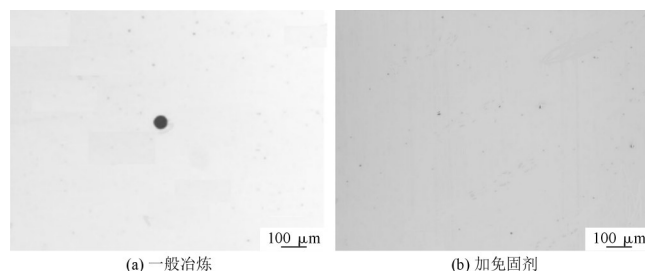


图 1 免固剂前后 304 不锈钢的显微组织及夹杂物形貌

Fig.1 Microstructure and inclusion morphology of 304 stainless steel before and after use of solid free solvent

使用免固剂前后的 SEM 微观组织见图 2。可以

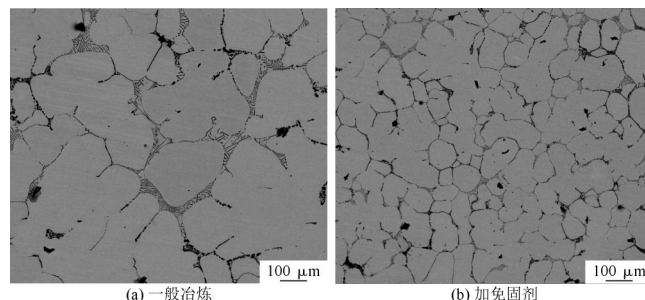


图 2 免固剂使用前后 304 不锈钢试样的 SEM 组织

Fig.2 SEM microstructure of 304 stainless steel specimens before and after use of solid free solvent

看见,未添加免固剂时,晶粒较粗大(见图2a),晶界的化合物多,有针状的较大的化合物;添加免固剂后,晶粒尺寸减小了38%,且晶界处化合物细小而分散。

免固剂具有晶粒细化效果的主要原理是,添加剂中含有Yb、Sm、Dy、Er、V、Ti、Nb、Mg和Ba等微量元素,添加剂中的微量元素如V、Nb可形成Nb(C、N)或V(C、N),起异质形核作用,使铸钢晶粒细化,改善碳化物分布,甚至抑制碳化物析出,这也为免固溶处理提供了条件和保障。

2.2 力学性能

304和316不锈钢分别用Al+Si-Ca脱氧并进行固溶处理,以及加免固剂处理的力学性能见表2和表3。由表2及表3可知,仅加入免固剂而未进行固溶处理时,304和316不锈钢力学性能都达到了性能指标要求。

表2 304不锈钢经固溶处理或免固处理的力学性能

序 号		w _B /%						抗拉 强度/ MPa	屈服 强度/ MPa	伸长 率/ %
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe			
1	加免 固剂, 铸态	0.075	0.45	0.84	18.70	9.30	余量	530	210	55
2	加免 固剂, 铸态	0.075	0.47	0.83	18.80	9.10	余量	510	240	56
3	未加, 固溶 处理	0.068	0.45	1.04	18.50	9.05	余量	504	245	52
304不锈钢标准性能								485	205	35

表3 316不锈钢经固溶处理或免固剂处理的力学性能

序 号		w _B /%						抗拉 强度/ MPa	屈服 强度/ MPa	伸长 率/ %
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe			
1	加免 固剂, 铸态	0.081	0.48	0.87	18.70	10.50	余量	535	261	52
2	加免 固剂, 铸态	0.075	0.61	1.20	18.50	10.30	余量	540	256	53
3	未加, 固溶 处理	0.070	0.80	1.24	18.52	10.50	余量	542	275	45
4	未加, 固溶 处理	0.067	0.71	1.14	18.61	10.45	余量	560	287	35
316不锈钢标准性能								485	205	30

2.3 抗腐蚀性性能

不锈钢的晶间腐蚀是一种局部腐蚀现象,发生在晶界区域,原因是在某些条件下,不锈钢中的Cr在晶界

处被优先消耗,形成贫铬区,从而降低了该区域的耐腐蚀性。当不锈钢在450~850℃加热时,C和Cr会在晶界处形成Cr₂₃C₆,这会消耗掉晶界附近的Cr。Cr是形成不锈钢钝化层的关键元素,Cr含量的降低会导致这些区域的耐腐蚀性下降。此外,杂质元素如Si、P、B等沿晶界偏聚也会增加腐蚀敏感性。

在不锈钢熔炼后期加入免固剂处理后,304和316不锈钢在弯曲90°时均未出现裂纹,显示出良好的抗晶间腐蚀性能。这是因为免固剂处理能够抑制M₂₃C₆的析出,细化晶粒,增加晶界表面积,降低杂质元素偏聚浓度,从而提高抗晶间腐蚀能力。

不锈钢的点腐蚀是一种局部电化学腐蚀,通常发生在不锈钢表面的特定小区域,形成深而窄的腐蚀坑。其特点包括局部化腐蚀、自催化效应、材料敏感性以及对环境因素的显著依赖。点腐蚀的机理主要涉及钝化膜的局部破坏,尤其是在氯离子浓度较高的环境中,钝化膜被破坏后,腐蚀反应在阳极区域加速进行,导致腐蚀坑的形成和发展。点腐蚀的危害包括对结构完整性的损害、增加泄漏风险、提升维修成本以及缩短设备的使用寿命等,因此理解和防护点腐蚀对于延长不锈钢设备的使用寿命至关重要。

对于304和316不锈钢,加入免固剂处理后,其最大点蚀坑尺寸在0.5~1.0mm之间,而未加免固剂的固溶处理试样的点蚀坑尺寸为2.1~2.5mm。由此可见,免固剂处理显著提高了耐点蚀性能,提升幅度为1.5~3倍。免固剂通过中和有害元素、脱氧脱硫,并抑制M₂₃C₆析出,从而显著增强不锈钢的耐点蚀能力。图3为添加免固剂生产的不锈钢铸件。

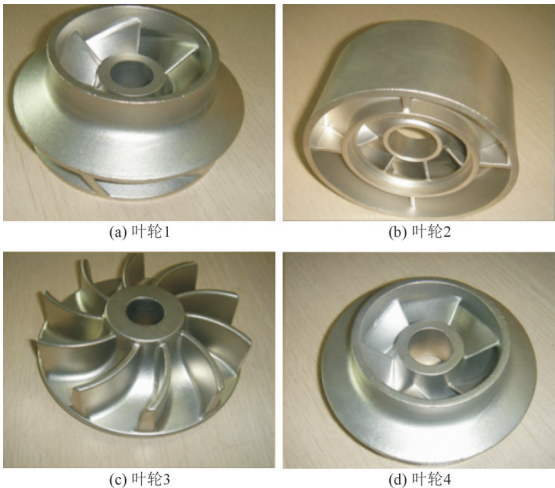


图3 采用免固剂(添加剂)生产的不锈钢叶轮铸件

Fig.3 Stainless steel castings produced with solution-free solvent

3 结 论

(1)通过添加免固剂,304和316奥氏体不锈钢无需进行固溶处理,即可获得与固溶处理相近的力学性能。