

高温合金铸件合金贫化控制研究

Control of Alloy Depletion for Superalloy Castings

张利冲 郑少辉 王佳华 康志强 张冉 夏峰林 曹嘉铭 徐富春 许文勇 / 中国航发航材院

铸件合金贫化层厚度超标是影响高温合金铸件产品生产和交付的主要问题，取得控制/消除贫化层厚度的技术突破对于确保产品的质量至关重要。

由中国航发航材院承制的发动机铸件产品（如图1所示）是中国航发高温合金部件进军国际市场、融入世界航空产业链的重要代表性产品。铸件的合金材料为IN718 高温合金，该合金在很宽的中低温范围内具有较高的强度、塑性及优良的耐腐蚀性，因此被广泛用于航空发动机的叶片、机匣以及其他结构件。但是，在当前的技术规范下，由于合金贫化层厚度超标导致的不合格率占比高达97.2%（合金贫化是一种基体中主要合金元素低于下限，基体强度显著低于正常水平的显微组织缺陷），严重影响了产品质量及合格交付，因此，突破控制/消除贫化层厚度的技术至关重要。创新团队针对影响IN718高温合金铸件质量的合金贫化层厚度超标问题，运用质量工具梳理影响因素，通过热等静压对比试验和化学分析，完成合金贫化形成机理的分析研究，通过确保炉内气氛合格和确定合适保温温度等综合性控制方法，将IN718合金铸件因热等静压后合金贫化导致的不合格率降至目标值10%以下，保证了产品的顺利交付。



图1 航空发动机和高温合金铸件

出导致高温合金铸件合金贫化的影响因素，如图2所示，具体包括未按工艺操作、气体污染、炉体污染、工装污染、铸件贫化、铸件表面粗糙度、热等静压温度、吸气材料、气体置换次数、现场环境、5S标准

和检测方法、设备等13个影响因素，涵盖人员、机器、用料、工艺、环境、测试等6个方面。通过大量的热等静压工艺试验，创新团队最终确定了两个关键因素，即热等静压温度和气体污染；随后开展热等静压温度

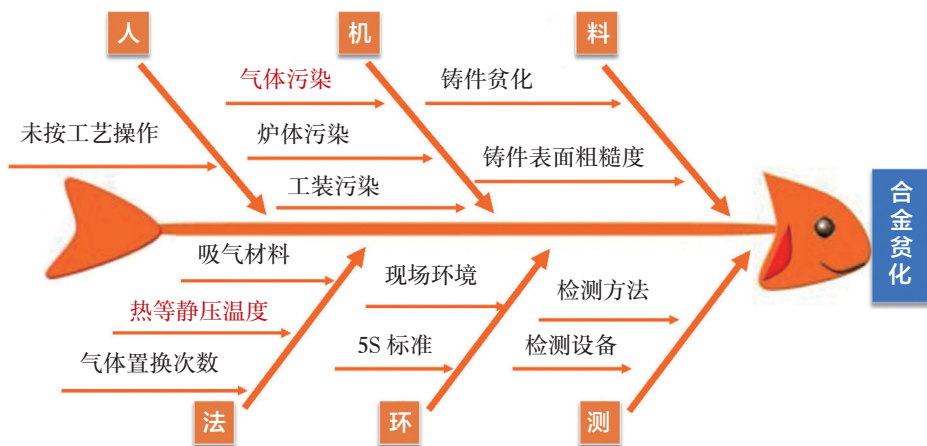


图2 合金贫化的研究思路

质量改进方案的制订与实施

针对合金贫化问题，创新团队首先运用质量管理工具（鱼骨图）梳理

调整和炉内气氛纯度改善等现场优化措施，以期达到减轻甚至消除合金贫化的目的；最终通过若干炉次热等静压验证试验，对优化后热等静压工艺的稳定性进行验证，使高温合金铸件合金贫化层厚度满足技术标准要求，圆满实现了预期目标，保障了产品的按时交付。

结果分析及质量改进效果

创新团队首先排除了材料本身合金贫化层超标的影响因素，然后从热等静压温度和气体污染两个方面，探讨合金贫化的形成机理，探明了导致合金贫化的根本原因。在此基础上，开展了现场工艺改进和质量稳定性验证，优化热等静压工艺和改善炉内气氛，使高温合金铸件合金贫化层厚度满足技术标准要求。

材料本身合金贫化排除

通过对铸态试样和热等静压之后的试样横截面显微组织进行观察，可以发现，材料铸态试样表面凹凸不平，表面及近表面未观察到黑色夹杂物，经腐蚀后，铸态试样表面未观察到白亮带，说明基本不存在合金元素的贫化，能满足技术标准要求；而热等静压态试样表面凹凸不平现象更加明显，表面及近表面存在大量黑色夹杂物，部分物质呈现规律分布，经腐蚀后热等静压态试样表面观察到非常明显的白亮带，表明存在严重的合金元素贫化，试样的贫化层深度范围为45~90 μm，不满足技术标准要求。对比上述现象可见，铸态试样没有出现合金贫化，但是热等静压后的试样存在明显的合金贫化，由此可以确定合金贫化是在热等静压过程中出现的，排除了材料本身对试验结果的影响。

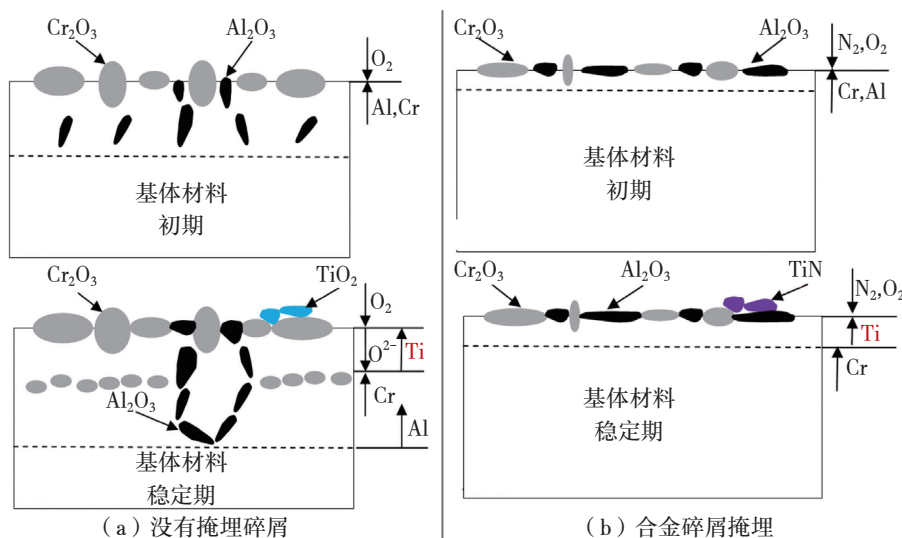


图3 合金贫化形成机理

热等静压温度对合金贫化的影响

通过对不同热等静压温度对合金贫化的影响结果分析可知，当热等静压温度由1170℃降低至1150℃时，合金贫化层厚度略有降低（由71 μm降低至64 μm），尚未符合标准。因此，创新团队进一步扩大了热等静压温度区间，包括1140℃、1150℃、1160℃、1180℃和1195℃等5个温度点，发现温度对合金贫化确实会有较大影响。通过降低热等静压温度，可以将合金贫化导致的不合格率由97.2%降至43%。

气体污染对合金贫化的影响

由于合金贫化均出现在铸件表面，因此，创新团队采用掩埋碎屑的方法对试验条件进行控制。研究发现，掩埋碎屑后合金贫化层厚度由26 μm显著降至6 μm，表明掩埋碎屑对合金贫化影响巨大，充分证实了掩埋碎屑的有效性。为了明确导致厚度差异的根本原因及合金贫化的形成机理，创新团队对掩埋碎屑的试样和没有掩埋碎屑的试样进行了能谱分析(EDS)、X射线光电子能谱分析(XPS)

和电子探针显微分析(EPMA)。最终，创新团队揭示了合金贫化形成机理，如图3所示：氧分压不同造成氧化机制不同，导致合金贫化层厚度不同。

质量改进效果

通过上述步骤可以最终得出结论：合金贫化与热等静压温度和炉内气氛相关，通过调整热等静压温度和炉气清洁，能够控制甚至消除合金贫化。根据以上结论，创新团队制订了技术改进方案。技术方案实施完成后，创新团队连续跟踪了300个试验件热等静压后对应的金相测试结果，不合格数量只有5个，不合格率由最初的93%降低至1.7%。热等静压后不合格率小于10%，达到预期目标值。通过进一步的分析还发现，在1.7%的不合格率中，合金贫化导致的不合格率已经归零，大幅度提高了铸件质量，圆满实现了质量改进目标，顺利完成了合金铸件的按时交付。

项目应用及推广

通过优化洗炉次数，确保炉内气氛合格和进行温度梯度对比试验，确定合



图4 钛合金支板



图5 热等静压设备

适保温温度等方法，降低了IN718合金热等静压后铸件的不合格率。项目改善成功之后，累计完成高温合金铸件的正式订单产品6炉次共计72件，创造了20多万元的经济效益；项目还可推广应用至钛合金支板等产品，如图4所示，每年直接创造经济价值超过500万元；同时，项目形成了装炉标准化作业文件，通过修改工艺规程，保证了产品质量的稳定性。

该项目的完成提升了产品质量，所采取的措施和方法对于提升其他同类产品的质量提供了方法和思路。该项目的完成使中国航发航材院成为国内第一家拥有通过美国国家航空航天和国防合同方授信项目（NADCAP）特种工艺认证的国产热等静压机的机构，如图5所示，同时也是亚洲地区第一家以高温合金铸件为载体通过NADCAP认证的单位，提升了航材院开拓国际市场的竞争力。

结束语

依托高温合金铸件热等静压后合金贫化层控制/消除项目，创新团队采用热等静压工业试验和化学分析等手段，揭示了高温合金铸件合金贫化的形成机理，建立了合金贫化层厚度控制的技术规范，为控制/消除合金贫化开辟了新的思路，也为其他同类产品（如钛合金支板等）的质量控制和提升提供了方法。同时，完善了大型薄壁铸件合金贫化的控制体系，有力提升了中国航发航材院对于大型薄壁铸件质量的控制水平，为我国航空发动机的自主研制提供可借鉴和参考的数据。 **航空动力**

（张利冲，中国航发航材院，在读博士，主要从事航空发动机高温结构材料的研究）