

Defect Analysis of Titanium Alloy Powder Metallurgy Products

Feng Zhao

Beijing Aerospace Special Equipment Testing Research and Development Co., Ltd., Beijing, 100074, China

Abstract

Titanium alloy powder metallurgy products are widely used in aerospace, medical and bioengineering fields because of their excellent mechanical properties and biocompatibility. However, the defects in the metallurgical process are recognized as one of the constraints. The aim of this study is to analyze and solve the common defects in titanium alloy powder metallurgy products, such as holes, inclusions, cracking and so on. Based on the actual production process of titanium alloy powder metallurgy products, the detection of defects by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and non-destructive testing technology is discussed. The formation process and mechanism of these defects are analyzed in detail, aiming at providing new strategies to solve the quality problems of products. It provides theoretical basis and engineering practice suggestions for improving the processing quality of titanium alloy powder metallurgy products. Through targeted defect improvement methods, the performance of titanium alloy powder metallurgy products can be significantly enhanced to better meet the requirements of various applications.

Keywords

titanium alloy powder metallurgy; defect analysis; production and processing process; solution strategy; mechanical properties

钛合金粉末冶金制品缺陷分析

赵峰

北京航天特种设备检测研究发展有限公司, 中国·北京 100074

摘要

钛合金粉末冶金制品因其优异的机械性能和生物相容性, 广泛应用于航空航天领域、医疗及生物工程等领域, 然而其在冶金过程中的缺陷问题是公认的制约因素之一。本研究的目标是剖析并提出解决钛合金粉末冶金制品中的常见缺陷, 如孔洞、夹杂、开裂等。基于钛合金粉末冶金制品的实际生产加工过程, 论述了采用光学显微观察、扫描电子显微镜 (SEM) 和无损检测技术对缺陷的检测, 详细地分析了这些缺陷的形成过程和机理, 旨在提供解决制品质量问题的新策略, 为钛合金粉末冶金制品加工质量的提升提供理论依据和工程实践建议。通过针对性的缺陷改善方式, 可以显著增强钛合金粉末冶金制品的性能, 更好地满足各类应用的要求。

关键词

钛合金粉末冶金; 缺陷分析; 生产加工过程; 解决策略; 机械性能

1 引言

钛合金粉末冶金制品因其具备优异的机械性能和生物相容性, 被高度重视, 并在航空航天领域、医疗、生物工程等深入应用。然而, 值得注意的是, 钛合金粉末冶金制品在生产加工过程中, 常常会出现孔洞、夹杂、开裂等多样性缺陷, 这在一定程度上限制了其广泛使用及工艺进一步的开发。因此, 对这些缺陷进行深入分析, 探寻其产生的机理和制约因素, 并提出有效的解决策略, 显得至关重要。论文以此为重心, 论述采用金相光学显微观察、扫描电镜及金相实验室分析等技术手段, 对钛合金粉末冶金中的各类缺陷进行详尽的揭示和分析, 以期为进一步提升钛合金粉末冶金制品性能提供可靠的理论依据和实践指导。

【作者简介】赵峰 (1989-), 男, 中国北京人, 硕士, 工程师, 从事金属和复合材料无损检测研究。

2 钛合金粉末冶金制品的概述

2.1 钛合金粉末冶金制品的历史和发展

钛合金粉末冶金制品在现代制造业中占据了重要地位, 其发展历程可以追溯到 20 世纪初期^[1]。早期的研究主要集中在如何利用粉末冶金技术来制备小型和复杂形状的零部件。在 20 世纪 50 年代, 随着技术的进步和对钛合金材料特性的深入了解, 粉末冶金技术在钛合金制品中的应用逐渐扩大。当时, 钛合金制品主要用于航空航天领域, 特别是涡轮叶片和机身部件的制造。

20 世纪 70 年代, 钛合金粉末冶金制品的研究进入了一个新的阶段。在这个时期, 得益于粉末制备技术的进步, 制备出粒度更细、纯度更高的钛合金粉末成为可能。这些粉末在后续的成型和烧结过程中, 能够显著改善制品的机械性能和微观结构^[2]。电子束熔炼和等离子旋转电极工艺的引入, 使得高纯度钛粉末的制备技术得到了快速发展。由于这些技

术进步,钛合金粉末冶金制品的性能有了显著提高,使其在更多领域得到了应用。

进入 21 世纪,随着现代科学技术的不断进步,钛合金粉末冶金制品的发展达到了一个新的高度。3D 打印技术的发展,尤其是粉末床选择性激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM)工艺的应用,极大地推动了钛合金粉末冶金制品的应用。这些新技术的引入,不仅提高了制品的制造精度和复杂结构的成形能力,还在一定程度上减少了传统制造过程中孔洞、夹杂和开裂等缺陷的产生。

2.2 钛合金粉末冶金制品的特性和应用

钛合金粉末冶金制品优异的特性,使其在航空航天、化工、医疗、生物工程和汽车工程等多个领域得以广泛应用。

钛合金以其卓越的比强度和比刚度,耐高温性、抗疲劳性和优良机械性能,使其成为航空航天领域的理想材料,提高了航空航天器的性能和寿命。钛合金粉末冶金在化工领域,钛合金的抗腐蚀性能保证了设备在腐蚀环境中长期稳定运行。在医疗领域,钛合金因其优异的生物相容性,广泛用于牙科植入物和骨科植入物中,能够与人体组织很好地融合,减少排斥反应,提高植入物的耐久性。钛合金因其优异的加工性能和成形能力使得在复杂形状的制品制造过程中,能够更好地满足设计需求,增加了工程应用的灵活性。钛合金粉末冶金制品还在汽车工业中逐渐展现出巨大的潜力,其减重效果不仅提升了燃油效率,更显著地改善了整车性能。

由此可见,钛合金粉末冶金制品在航空航天领域、化工、医疗、生物工程以及汽车等领域的广泛应用,充分展示了其在现代工业中的重要地位和巨大潜力。

3 钛合金粉末冶金制品的缺陷分析

3.1 孔洞夹杂开裂等缺陷的形成机理

钛合金粉末冶金制品在冶金过程中经常出现孔洞、夹杂、开裂等多种缺陷,这些缺陷在很大程度上限制了制品的质量和性能。

孔洞主要形成于粉末颗粒之间在压制和烧结过程中未能完全致密化的结果,尺寸大小可能达到 100~180 μm ,这表示孔洞缺陷的尺寸相对较小,但足以对材料的力学性能和结构完整性产生显著影响。烧结过程中,空隙没有被充分填充导致孔洞的产生,这种现象可能是由于烧结温度和时间的不充分或粉末颗粒尺寸不均匀所引起的,挤压过程中施加的压力不足也可能造成孔洞。

夹杂则主要来源于粉末冶金过程中,原材料或环境中的杂质在高温条件下与钛基体发生反应,形成诸如氧化物、氮化物或碳化物等夹杂物,夹杂物的尺寸可以从微米级到毫米级不等。较小的夹杂物可能只有几个微米,而较大的夹杂物可能达到数毫米甚至更大。这些夹杂物在钛合金基体内的存在,会影响晶粒的均匀生长和材料的机械性能。

开裂缺陷通常是由于钛合金的脆性性质与粉末冶金工

艺参数不匹配引起的,具体的裂纹尺寸取决于多种因素,如裂纹的类型(如穿晶裂纹、沿晶裂纹等)、材料厚度、加工条件等。因此,很难给出一个通用的尺寸范围。

烧结过程中由于热应力集中或者冷却过程中冷却速率不均匀,可能导致钛合金粉末冶金制品发生开裂,在显微镜下观察,可以发现微观裂纹的尺寸通常在几十微米到几百微米之间。这些裂纹可能起始于材料中的夹杂物、孔隙或其他缺陷,并随着应力的积累而扩展。在一些严重的情况下,微观裂纹可能相互连接形成宏观裂纹,这些宏观裂纹的尺寸可以从几百微米到几毫米不等。特别是在烧结冷却阶段,不均匀的热膨胀和冷缩会导致内应力的产生,当内应力超过了材料的抗裂强度,就会发生裂纹。

各类缺陷的形成机理复杂且多样,充分理解这些缺陷的形成过程对于改进粉末冶金工艺、提升钛合金产品品质具有重要意义。金相光学显微观察、扫描电子显微镜(SEM)和无损检测等技术手段在钛合金粉末冶金制品缺陷检测的应用有助于深入剖析缺陷形成的微观机理,为进一步的优化策略提供理论依据。

3.2 金相光学显微观察和扫描电子显微镜(SEM)技术的使用

金相光学显微观察和扫描电子显微镜(SEM)在分析钛合金粉末冶金制品缺陷中具有重要作用。金相光学显微镜主要用于初步观察样品表面,通过此技术可以快速识别出孔洞、裂纹和夹杂物等宏观缺陷的存在。在低倍放大下,光学显微镜能够提供样品的大面积视图,帮助确定缺陷的分布和基本形貌。

扫描电子显微镜(SEM)则进一步放大了观测细节,能够在高分辨率下提供样品表面和内部结构的清晰图像。SEM可以揭示出微观形态的细节,如孔洞的形状和尺寸,裂纹的拓展路径,以及夹杂物的成分类别和分布特征。通过能谱分析(EDS)与SEM结合使用,能够有效识别出夹杂物的化学成分和元素分布,为深入了解夹杂物的来源和形成机制提供依据。

结合金相光学显微镜和SEM的观察结果,可以对钛合金粉末冶金制品的缺陷进行多角度分析。这些技术手段不仅能够有助于识别和评价缺陷,还能为优化粉末冶金工艺和提升制品质量提供可靠的数据支持和科学依据。

3.3 无损检测技术的使用

射线检测技术通过射线穿透制品,利用不同材料对射线的吸收能力差异来检测制品内部孔洞、夹杂物等缺陷。射线CT技术利用X射线照射样品,并通过计算机算法重构出样品的三维内部结构,实现对制品内部结构的高分辨率观察。这种技术有助于发现微小缺陷,并评估制品的制造精度,为制品的质量控制提供重要依据。超声检测也是一种重要的内部缺陷无损检测手段,它利用超声波在材料中的传播特性来检测制品内部的缺陷。对于钛合金材料而言,超声检测对

于内部冶金缺陷尤为有效，能够精确识别并定位缺陷位置。通过综合应用这些无损检测手段，我们可以较为全面评估钛合金粉末冶金制品的质量，确保制品的可靠性和稳定性。

4 钛合金粉末冶金制品的优化策略

4.1 针对性的缺陷改善方法

为解决钛合金粉末冶金制品中的常见缺陷，需采取针对性的改善方法^[1]。孔洞的产生主要由于粉末或成型过程中的气体侵入，解决此类缺陷的一种有效方法是采用真空烧结或氢气还原工艺，从而减少气体残留。控制烧结温度和保温时间也有助于改变孔洞的形成，提升材料的致密度。针对夹杂物问题，原材料的纯度十分重要。在生产中，选择高纯度的钛粉末能够有效减少夹杂物的含量。通过在粉末冶金过程中加入适量的碳、氮等元素，可以在冶炼环境中形成保护气氛，防止杂质的侵入。进一步的净化处理如电渣重熔（ESR）可显著降低制品中的氧氮含量，提高材料的纯净度。

对于开裂现象，其预防关键在于热处理工艺的优化。均匀的加热和缓慢的降温过程可避免因热应力引发的开裂。采用等温退火处理可以减小热应力，增强材料的韧性。通过优化粉末的粒径分布，使成型后的半成品颗粒紧密排列，有助于减少开裂缺陷的发生。

以上方法在实际生产中经过验证，实践效果显著。真空烧结和氢气还原工艺明显提升了制品的致密度，减少了孔洞缺陷的出现。高纯度原材料的使用及适当的净化处理显著降低了夹杂物含量，使材料更加纯净。优化的热处理工艺有效预防了开裂问题，提高了制品的韧性和整体性能。

4.2 钛合金粉末冶金制品的质量优化

在钛合金粉末冶金制品的质量优化过程中，必须充分考虑不同缺陷的具体特性和来源。高质量的钛合金制品依赖于严格控制的粉末筛选、均匀的粉末分布以及优化的烧结工艺。通过精细筛选钛合金粉末，以减少粉末颗粒之间的大小差异及不规则形状，能够有效降低孔洞和夹杂的发生概率。

采用先进的粉末压制技术，如等静压法，可在高压环境下实现粉末的均匀致密化，进而减少内部空隙和微裂纹的形成。与此烧结工艺的优化也是提升质量的重要步骤。通过对烧结温度和时间等参数的精确控制，可以促进钛合金颗粒之间的有效扩散和结合，从而显著降低缺陷的数量和性质。

在烧结后处理过程中，引入热等静压（HIP）工艺，能够进一步消除内部残余孔隙和微裂纹，提升材料的整体致密度和机械性能。表面处理技术如喷丸和抛光工艺的引入，可以有效改善制品表面质量和疲劳强度。

整体而言，通过系统性地优化粉末选择、压制成型、烧结及后续处理工艺，能够大幅提升钛合金粉末冶金制品的品质，满足更高要求的应用需求。

4.3 制品加工质量的提升对于整体性能的影响

钛合金粉末冶金制品的加工质量对其整体性能有显著影响。高质量的加工工艺能有效减少孔洞、夹杂、开裂等缺陷的产生，从而提升材料的力学性能和稳定性。优化后的制品表现出更高的抗拉强度、延展性和疲劳寿命，显著增强了其在严苛环境下的工作可靠性。高精度的加工过程也改善了制品的生物相容性，使其在医疗和生物工程领域的应用更加广泛。

5 结语

论文以钛合金粉末冶金制品的缺陷问题为研究对象，通过论述金相光学显微观察、扫描电子显微镜（SEM）和无损检测技术手段详细地研究了钛合金粉末冶金制品中常见的孔洞、夹杂、开裂等缺陷的形成过程和机理，提出了有效的解决策略。然而，必须承认的是，论文未能涵盖所有种类的钛合金粉末冶金制品，且处理机能也因设施或技术环境的差异而异，因此需要后续研究者根据实际状态进行针对性分析与改进。同时，尽管本文已提出相应改善措施，但缺陷的产生不能完全避免，仍需寻找更为系统而深入的解决方案。未来可以进一步对钛合金粉末冶金制品其余类型的缺陷进行更为深入的研究，以期在理论和方法上达到更全面和深入的理解，从而提高钛合金粉末冶金制品的加工质量，更好地满足其在航空航天、化工、医疗、生物和汽车工程等领域的应用需求。

参考文献

- [1] 周鹏. 钛合金粉末冶金技术研究[J]. 中国金属通报, 2019(5).
- [2] 陈学文. 钛合金粉末冶金制备工艺及力学性能研究[J]. 冶金与材料, 2020, 40(3).
- [3] 张强, 蔡永丰, 李晓静, 等. 钎合金粉末冶金研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(1): 44-54.