

超声赋能 CMT 增材制造镍基合金：组织演变与性能优化的深度剖析

一、引言

1.1 研究背景与意义

在现代工业领域，材料的性能对产品的质量和应用效果起着决定性作用。镍基合金作为一种重要的金属材料，凭借其优异的高温强度、良好的耐腐蚀性以及出色的抗疲劳和抗热冲击能力，在航空航天、能源、化工等众多关键领域得到了广泛应用。在航空航天领域，镍基合金常用于制造航空发动机的涡轮叶片、燃烧室等热端部件，这些部件在高温、高压、高转速的极端条件下工作，对材料的性能要求极高，镍基合金能够满足这些严苛的工作条件，确保发动机的高效、稳定运行，从而提升飞行器的性能和安全性；在能源领域，镍基合金可用于制造核电站的蒸汽发生器传热管、燃气轮机的高温部件等，保证能源设备在复杂环境下长期可靠地运行，为能源的稳定供应提供保障；在化工领域，镍基合金凭借其良好的耐腐蚀性，可用于制造反应釜、管道等化工设备，有效抵御各种腐蚀性介质的侵蚀，延长设备的使用寿命，降低生产成本。

然而，传统的镍基合金制造工艺存在一定的局限性，如加工工序复杂、材料利用率低、难以制造复杂形状的构件等。随着科技的不断进步，增材制造技术应运而生，为镍基合金的制造带来了新的机遇。增材制造技术，又被称作 3D 打印技术，它通过逐层堆积材料的方式来制造三维实体构件，能够突破传统制造工艺的限制，实现复杂结构零件的直接制造，具有高度的设计自由度和材料利用率，还能显著缩短生产周期，降低生产成本。在航空航天领域，采用增材制造技术可以制造出具有复杂内部冷却结构的涡轮叶片，提高叶片的冷却效率和使用寿命，同时减轻叶片的重量，提升发动机的性能；在医疗器械领域，增材制造技术能够根据患者的个性化需求，制造出定制化的植入物，提高植入物与患者身体的适配性，降低手术风险。因此，增材制造技术在众多领域展现出了巨大的应用潜力，成为了材料制造领域的研究热点。

冷金属过渡 (Cold Metal Transfer · CMT) 增材制造技术是一种新型的金属增材制造技术，它以 CMT 焊接技术为基础，具有低热输入、低飞溅、良好的搭桥能力等优点，在制造薄壁结构和复杂形状零件方面具有独特的优势。通过精确控制焊接过程中的热输入和熔滴过渡，CMT 增材制造技术能够有效减少零件的变形和残余应力，提高零件的精度和质量。然而，CMT 增材制造技术在制备镍基合金时，仍存在一些问題，如组织不均匀、气孔、裂纹等缺陷，这些问題会影响镍基合金的性能和可靠性，限制了其在高端领域的应用。

为了解决 CMT 增材制造镍基合金存在的问題，超声辅助技术被引入其中。超声辅助 CMT 增材制造技术是在传统 CMT 增材制造技术的基础上，引入超声波振动。超声波具有高频振荡、能量集中等特点，在增材制造过程中，超声波振动能够对金属熔池产生强烈的搅拌作用，促使熔池中的气泡和夹杂物流向低能量状态，从而减少组织缺陷的产生；同时，超声波还能促进合金元素的均匀分布，细化晶粒，提高合金的致密性和均匀性，进而改善镍基合金的综合性能。在其他金属材料的增材制造中，超声辅助技术已被证明能够有效改善材料的组织和性能，在铝合金的增材制造中，超声辅助可以显著减少气孔和裂纹等缺陷，提高铝合金的力学性能和耐腐蚀性能。因此，研究超声辅助 CMT 增材制造镍基合金的组织与性能具有重要的理论和实际意义。

从理论方面来看，深入研究超声辅助 CMT 增材制造镍基合金的组织形成机制和性能变化规律，有助于揭示超声波与金属熔池相互作用的本质，丰富和完善增材制造过程中的凝固理论和材料微观结构演变理论，为新型金属材料的设计和开发提供理论基础；从实际应用方面来看，通过优化超声辅助 CMT 增材制造工艺参数，改善镍基合金的组织 and 性能，能够提高镍基合金构件的质量和可靠性，扩大其在航空航天、能源、化工等高端领域的应用范围，推动相关产业的技术进步和发展，具有显著的经济效益和社会效益。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 镍基合金的研究进展

镍基合金的研究历史悠久，在过去几十年中取得了显著的进展。早期的研究主要集中在镍基合金的成分设计和基本性能的研究上，通过添加不同的合金元素，如铬 (Cr)、钼 (Mo)、钴 (Co)、钛 (Ti)、铝 (Al) 等，来改善合金的高温强度、耐腐蚀性和抗氧化性能。在 20 世纪中叶，镍基合金中添加 Cr

元素，有效提高了其在高温环境下的抗氧化能力，使其能够在航空发动机等高温部件中得到应用。随着研究的深入，人们逐渐认识到合金元素之间的相互作用以及微观组织结构对合金性能的重要影响，开始注重微观组织结构的调控和优化。

近年来，随着材料科学和计算技术的飞速发展，镍基合金的研究进入了一个新的阶段。一方面，通过先进的实验技术，如高分辨透射电子显微镜（HRTEM）、原子探针层析成像（APT）等，能够深入研究镍基合金的微观结构和原子尺度上的成分分布，揭示合金性能与微观结构之间的内在联系。利用 HRTEM 观察镍基合金中 γ' 相（一种金属间化合物，是镍基合金的主要强化相）的形貌和尺寸分布，发现 γ' 相的尺寸和分布对合金的高温强度和蠕变性能有显著影响。另一方面，借助计算材料学方法，如第一性原理计算、分子动力学模拟等，可以在理论层面上预测合金的性能，指导合金成分的设计和优化，大大缩短了合金研发的周期和成本。通过第一性原理计算，可以预测不同合金元素在镍基合金中的固溶强化效果和对 γ' 相稳定性的影响，为合金成分的优化提供理论依据。

在应用方面，镍基合金在航空航天、能源、化工等领域的应用不断拓展和深化。在航空航天领域，为了满足新一代航空发动机对更高推重比和更低油耗的要求，镍基合金的性能不断提升，新型镍基合金材料不断涌现，如单晶镍基合金、粉末冶金镍基合金等，这些合金具有更高的高温强度、更好的抗疲劳性能和更低的密度，能够有效提高发动机的性能和效率。在能源领域，随着核能、太阳能、风能等新能源的快速发展，镍基合金在这些领域的应用也越来越广泛，在核电站中，镍基合金用于制造蒸汽发生器传热管、堆芯结构材料等，要求其具有良好的耐腐蚀性和抗辐照性能；在太阳能光热发电系统中，镍基合金用于制造高温集热管和储热装置，需要具备高温稳定性和良好的导热性能。

1.2.2 CMT 增材制造技术的研究进展

CMT 增材制造技术作为一种新型的金属增材制造技术，近年来受到了广泛的关注和研究。该技术起源于 CMT 焊接技术，其基本原理是在传统熔化极气体保护焊的基础上，通过精确控制焊接电流和送丝速度之间的协同关系，实现了熔滴的无短路过渡，大大降低了焊接过程中的热输入和飞溅，提高了焊接质量和稳定性。将 CMT 焊接技术应用于增材制造领域，通过逐层堆积的方式，可以制造出各种复杂形状的金属零件。

在 CMT

增材制造技术的研究中，工艺参数的优化是一个重要的研究方向。研究人员通过大量的实验和数值模拟，研究了焊接电流、电压、送丝速度、焊接速度、层间温度等工艺参数对增材制造过程中熔池形态、温度场、应力场以及零件成形质量和性能的影响规律，以确定最佳的工艺参数组合。研究发现，适当降低焊接电流和送丝速度，可以减小熔池的尺寸和热输入，从而减少零件的变形和残余应力；而提高焊接速度则可以提高生产效率，但过高的焊接速度可能会导致熔池不稳定，出现未熔合等缺陷。通过优化工艺参数，可以实现 CMT 增材制造零件的高精度和高质量成形。

此外，CMT 增材制造技术在材料适用性方面也得到了广泛的研究。目前，该技术已经成功应用于多种金属材料的增材制造，如铝合金、钛合金、不锈钢、镍基合金等。不同材料在 CMT 增材制造过程中的行为和性能表现有所差异，因此需要针对不同材料制定相应的工艺方案和参数。对于铝合金，由于其导热性好、熔点低，在 CMT 增材制造过程中需要适当提高热输入，以保证熔池的充分熔化和层间结合；而对于镍基合金，由于其熔点高、流动性差，需要更加精确地控制工艺参数，以防止出现裂纹、气孔等缺陷。

在设备研发方面，随着 CMT 增材制造技术的发展，相关的设备也在不断改进和完善。目前，市场上已经出现了多种商业化的 CMT 增材制造设备，这些设备在自动化程度、精度控制、稳定性等方面都有了很大的提高，能够满足不同用户的需求。同时，一些研究机构和企业也在致力于开发新型的 CMT 增材制造设备，如多丝 CMT 增材制造设备、CMT 与其他技术复合的增材制造设备等，以进一步提高增材制造的效率和质量。

1.2.3 超声辅助增材制造技术的研究进展

超声辅助增材制造技术是在传统增材制造技术的基础上，引入超声波振动，利用超声波的空化效应、声流效应和机械效应等，来改善增材制造过程中材料的凝固组织和性能。该技术的研究始于 20 世纪末，近年来得到了快速的发展。

在超声辅助增材制造技术的研究中，超声波对金属熔池的作用机制是一个关键的研究内容。研究表明，超声波在金属熔池中传播时，会产生强烈的空化效应，即在熔池中形成大量的微小气泡，这些气泡在超声波的作用下迅速膨胀和崩溃，产生局部的高温、高压和强烈的冲击波，能够有效地破碎熔池中的树枝晶，促进晶粒细化；同时，超声波的声流效应会使熔池中的液体产生强烈的对流，加速合金元素的扩散和均匀分布，减少成分偏析；此外，超声波的机械效应还可以使熔池中的气泡和夹杂物流向低能量状态，从而减少气孔和夹杂等缺陷的产生。

在应用方面，超声辅助增材制造技术已经在多种金属材料的增材制造中得到了应用，如铝合金、钛合金、镁合金等，并取得了良好的效果。在铝合金的超声辅助激光增材制造中，超声波的引入显著细化了晶粒，提高了合金的强度和韧性；在钛合金的超声辅助电子束增材制造中，超声振动有效地减少了零件的残余应力和变形，提高了零件的尺寸精度和表面质量。这些研究成果表明，超声辅助增材制造技术能够有效地改善金属材料的组织和性能，具有广阔的应用前景。

然而，目前超声辅助增材制造技术在实际应用中仍面临一些挑战。一方面，超声波在金属材料中的传播特性较为复杂，受到材料的性质、超声波的频率和功率等多种因素的影响，如何精确控制超声波的作用参数，以实现对其增材制造过程的有效调控，仍然是一个需要深入研究的问题；另一方面，超声辅助增材制造设备的研发还不够成熟，设备的稳定性和可靠性有待提高，成本也相对较高，这在一定程度上限制了该技术的大规模应用。

1.2.4 研究现状总结与不足

综上所述，镍基合金、CMT 增材制造技术和超声辅助增材制造技术在各自的领域都取得了一定的研究成果。镍基合金在成分设计、微观结构调控和应用领域拓展等方面不断取得进展；CMT 增材制造技术在工艺参数优化、材料适用性研究和设备研发等方面得到了广泛的关注；超声辅助增材制造技术在作用机制研究和应用探索方面也取得了一定的成果。

然而，当前对于超声辅助 CMT 增材制造镍基合金的研究还相对较少，存在以下不足之处：一是对于超声辅助 CMT 增材制造镍基合金的微观组织形成机制和演变规律的研究还不够深入，缺乏系统的理论分析和实验研究，难以准确揭示超声波与镍基合金熔池相互作用的本质；二是在工艺参数优化方面，虽然已经开展了一些研究，但由于影响因素众多，目前尚未形成一套完整的工艺参数优化体系，难以实现对镍基合金组织和性能的精确调控；三是对于超声辅助 CMT 增材制造镍基合金的性能研究还不够全面，主要集中在力学性能方面，而对于其耐腐蚀性能、疲劳性能、高温性能等其他重要性能的研究相对较少，无法全面评估该技术制备的镍基合金在实际应用中的可靠性和适用性。因此，有必要进一步深入研究超声辅助 CMT 增材制造镍基合金的组织与性能，以填补相关领域的研究空白，推动该技术的发展和应用。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本研究旨在深入探究超声辅助 CMT 增材制造镍基合金的组织与性能，具体研究内容如下：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/89612225012011100>