

口腔正畸用形状记忆合金材料的研发进展

李祖安

广州瑞通生物科技有限公司 广东 广州 510000

摘要：随着口腔正畸技术的不断发展，形状记忆合金材料因其独特的形状记忆效应和超弹性，在正畸领域得到了广泛的关注和应用。本文综述了口腔正畸用形状记忆合金材料的基本原理、分类、制备工艺以及性能研究的最新进展。通过对比不同类型的形状记忆合金，分析了它们在力学性能、生物相容性、耐腐蚀性能等方面的优劣，并展望了未来的研究方向和应用前景。

关键词：形状记忆合金；口腔正畸；制备工艺；性能研究

引言：

口腔正畸治疗是通过使用各种矫治器对牙齿和颌骨施加力，以达到矫正错颌畸形的目的。近年来，形状记忆合金因其优异的形状记忆效应和超弹性，被广泛应用于口腔正畸领域。本文旨在探讨口腔正畸用形状记忆合金材料的研发进展，为临床应用提供参考。

1 形状记忆合金材料的基本原理及分类

1.1 形状记忆合金的基本原理

形状记忆合金是一种特殊的合金，能够在经历一定的变形后，在加热到一定温度时恢复到其原始形状。这种现象称为形状记忆效应，其原理与材料内部的相变有关。具体来说，形状记忆合金内部存在着两种相结构：高温下的奥氏体相和低温下的马氏体相。在低温下，合金发生马氏体相变，晶体结构由对称的奥氏体相转变为具有较低对称性的马氏体相，从而产生变形。当加热到一定温度（称为相变温度）时，马氏体相会向奥氏体相逆转变，合金恢复到原始形状^[1]。除了形状记忆效应，形状记忆合金还具有超弹性，即在一定应力作用下，合金能够产生远大于其弹性极限的应变，而在去除应力后能够恢复到原始形状。例如，镍钛合金在室温下可恢复应变高达8%以上。

1.2 口腔正畸用形状记忆合金材料的分类

口腔正畸用形状记忆合金材料主要分为镍钛基形状记忆合金、铜基形状记忆合金和铁基形状记忆合金等。其中，镍钛基形状记忆合金因其良好的形状记忆效应、超弹性、优异的耐腐蚀性和生物相容性，应用最为广泛。镍钛基形状记忆合金又可细分为近等原子比镍钛合金、镍钛铜合金、镍钛钕合金等。铜基形状记忆合金具有较低的相变温度和成本，而铁基形状记忆合金则具有较高的强度和较低的成本。

1.3 不同类型形状记忆合金的性能比较

不同类型的形状记忆合金在相变温度、回复力、

弹性模量、疲劳性能、耐腐蚀性等方面存在差异。例如，镍钛合金的相变温度通常在-10℃到40℃之间，回复力可达到400-800MPa，弹性模量约为50-80GPa，具有良好的耐腐蚀性和生物相容性，疲劳寿命可达到 10^4 次以上。铜基合金的相变温度通常在-200℃到100℃之间，回复力较低，约为200-400MPa，弹性模量与镍钛合金相近，耐腐蚀性略逊于镍钛合金。铁基合金的相变温度范围较宽，回复力较高，可达800MPa以上，弹性模量较高，约为100-200GPa，但耐腐蚀性较差，需要进行表面处理以提高其耐腐蚀性^[2]。这些性能的差异使得不同类型的形状记忆合金适用于不同的口腔正畸应用场景。

2 口腔正畸用形状记忆合金材料的制备工艺

2.1 熔炼工艺

熔炼工艺是制备形状记忆合金的基础，包括真空感应熔炼、电弧熔炼等方法。选择合适的熔炼工艺对合金的性能有重要影响。真空感应熔炼可以有效地减少合金中的杂质含量，提高合金的纯净度，从而改善合金的力学性能和耐腐蚀性。电弧熔炼则可以精确控制合金的成分，获得成分均匀的合金锭。例如，真空感应熔炼可以使氧含量降低到50 ppm以下，从而显著提高镍钛合金的耐腐蚀性。

2.2 加工成型工艺

加工成型工艺包括冷加工、热加工和粉末冶金等方法。通过控制加工工艺参数，可以得到具有不同形状和尺寸的正畸用形状记忆合金材料。冷加工是指在室温

下对合金进行轧制、拉拔等加工，可以细化晶粒，提高合金的强度和弹性模量。热加工是指在合金的再结晶温度以上进行加工，可以改善合金的塑性，减少加工过程中的残余应力。粉末冶金是将合金粉末通过压制、烧结等方法制成致密的材料，可以制备出具有特殊微观结构的形状记忆合金。^[3]。

2.3 热处理工艺

热处理工艺是改善形状记忆合金性能的关键步骤。通过热处理，可以调整合金的相变温度、回复力、弹性模量等性能参数。常见的热处理工艺包括固溶处理、时效处理和退火处理。固溶处理是将合金加热到高温，使合金中的析出相充分溶解到基体中，然后快速冷却，以获得过饱和固溶体。时效处理是将固溶处理后的合金在较低温度下保温一段时间，使过饱和固溶体中析出细小的第二相，从而提高合金的强度和弹性模量。退火处理是将合金加热到一定温度并保温一段时间，以消除加工过程中的残余应力，改善合金的塑性。例如，通过固溶处理和时效处理，可以将镍钛合金的相变温度调整到0℃到40℃之间，满足口腔正畸的应用需求。

2.4 表面处理工艺

表面处理工艺包括电镀、阳极氧化、化学镀等方法，可以提高形状记忆合金的耐腐蚀性能和生物相容性。电镀是在合金表面沉积一层金属镀层，如铬、镍等，可以提高合金的耐腐蚀性和耐磨性。阳极氧化是在合金表面形成一层氧化膜，可以提高合金的耐腐蚀性和生物相容性。化学镀是通过化学还原反应在合金表面沉积一层金属镀层，可以获得均匀的镀层。例如，通过在镍钛合金表面沉积一层钛氧化物薄膜，可以显著提高其耐腐蚀性和生物相容性，使其更适用于口腔正畸应用。

3 口腔正畸用形状记忆合金材料的性能研究

3.1 力学性能

3.1.1 相变温度

相变温度是形状记忆合金的重要性能指标，指材料发生奥氏体相和马氏体相转变的温度，影响其在口腔正畸中的应用。例如，镍钛基形状记忆合金的相变温度通常在-10至40之间，适用于人体口腔环境。通过调整合金成分和进行热处理，可以控制相变温度。例如，镍钛铜合金的相变温度比近等原子比镍钛合金低，更适用于低温环境。相变温度的精确控制对于确保矫治器在不同温度下都能发挥预期作用至关重要。

3.1.2 回复力

回复力决定了形状记忆合金在正畸治疗中的矫正

效果。回复力是指材料在变形后恢复原状时产生的力。不同类型的形状记忆合金具有不同的回复力。例如，镍钛基形状记忆合金的回复力可达400-800MPa，能够提供足够的矫治力。回复力的大小和持续时间对正畸治疗的效率和效果有重要影响。回复力过小可能导致矫治效果不佳，而回复力过大则可能引起患者不适。

3.1.3 弹性模量

弹性模量影响材料的刚度和变形能力。弹性模量是指材料在弹性形变范围内，应力与应变之比。镍钛基形状记忆合金的弹性模量在30-80GPa之间。弹性模量越高，材料的刚度越大，变形能力越弱^[4]。在正畸应用中，需要根据矫治需要选择合适弹性模量的材料。例如，在需要较大矫治力的部位，可以选择弹性模量较高的材料；而在需要较大变形的部位，则可以选择弹性模量较低的材料。

3.2 生物相容性

3.2.1 细胞毒性试验

细胞毒性试验用于评估材料对细胞生长的影响。常用的细胞毒性试验方法包括MTT法和XTT法。例如，将镍钛合金材料浸提液与L929细胞共同培养，观察细胞存活率和增殖情况。结果显示，镍钛合金浸提液的细胞毒性评级为0或1级，表明其具有良好的生物相容性。细胞毒性试验的结果对于评估材料是否适合用于人体植入至关重要。

3.2.2 溶血试验

溶血试验用于评估材料是否会引引起血液成分的破坏。例如，将镍钛合金材料浸提液与血液混合，观察红细胞溶解情况。结果显示，镍钛合金的溶血率低于5%，符合生物相容性要求。溶血试验的结果对于评估材料是否适合用于接触血液的医疗器械至关重要。

3.2.3 皮下植入试验

皮下植入试验用于评估材料在体内环境下的生物相容性。例如，将镍钛合金材料植入大鼠皮下，观察植入部位的组织反应。结果显示，镍钛合金植入后未引起明显的炎症反应和毒性反应。皮下植入试验的结果可以反映材料在体内长期使用时的生物相容性。

3.2.4 口腔黏膜刺激性试验

口腔黏膜刺激性试验用于评估材料对口腔黏膜的刺激程度。例如，将镍钛合金材料与口腔黏膜细胞共同培养，观察细胞形态和功能变化。结果显示，镍钛合金对口腔黏膜细胞无明显刺激性。口腔黏膜刺激性试验的结果对于评估材料是否适合用于口腔医疗器械至关重

要。

3.3 耐腐蚀性能

3.3.1 电化学腐蚀

电化学腐蚀是评估材料在口腔环境中耐腐蚀性能的重要方法。例如，通过测量镍钛合金在模拟口腔环境溶液中的极化曲线，可以确定其腐蚀电位和腐蚀电流密度。结果显示，镍钛合金的腐蚀电位约为 $-0.2V$ ，腐蚀电流密度低于 $10^{-6}A/cm^2$ ，表明其具有良好的耐电化学腐蚀性能。电化学腐蚀试验的结果可以反映材料在口腔环境中的耐腐蚀能力。

3.3.2 均匀腐蚀

均匀腐蚀反映了材料在口腔环境中的整体耐腐蚀能力。例如，通过测量镍钛合金在模拟口腔环境溶液中的质量损失，可以评估其均匀腐蚀速率。结果显示，镍钛合金的均匀腐蚀速率低于 $0.001mm/year$ ，表明其具有良好的耐均匀腐蚀性能。均匀腐蚀试验的结果可以反映材料在口腔环境中的长期耐腐蚀能力。

3.3.3 点蚀

点蚀是材料表面局部区域的腐蚀现象，对材料的耐久性有重要影响。例如，通过测量镍钛合金在模拟口腔环境溶液中的点蚀电位，可以评估其抗点蚀能力。结果显示，镍钛合金的点蚀电位高于 $0.5V$ ，表明其具有良好的抗点蚀性能。点蚀试验的结果可以反映材料在口腔环境中抵抗局部腐蚀的能力^[5]。

3.3.4 缝隙腐蚀

缝隙腐蚀是材料在口腔环境中容易出现的一种腐蚀形式。例如，通过测量镍钛合金在模拟口腔环境溶液中的缝隙腐蚀电流密度，可以评估其抗缝隙腐蚀能力。结果显示，镍钛合金的缝隙腐蚀电流密度低于 $10^{-7}A/cm^2$ ，表明其具有良好的抗缝隙腐蚀性能。缝隙腐蚀试验的结果可以反映材料在口腔环境中抵抗缝隙腐蚀的能力。

3.4 其他性能

3.4.1 磁学性能（针对磁性形状记忆合金）

磁学性能是磁性形状记忆合金特有的性能指标。例如，镍锰基磁性形状记忆合金的饱和磁化强度可达 $50emu/g$ ，磁致应变可达 0.2% ，可以用于制作磁性驱动的正畸矫治器。磁性形状记忆合金的磁学性能使其在正畸治疗中具有潜在的应用价值。

3.4.2 热稳定性

热稳定性反映了材料在高温环境下的性能稳定性。例如，镍钛基形状记忆合金在高温环境下仍能保持良好的形状记忆效应和超弹性。实验表明，镍钛基形状记忆合金在 $100^\circ C$ 环境下处理 1000 小时后，其相变温度和回复力变化率小于 5% ，表明其具有良好的热稳定性。热稳定性对于确保矫治器在高温环境下仍能正常工作至关重要。

结 论：

综上所述，口腔正畸用形状记忆合金材料凭借其独特的性能优势，在正畸领域展现出了巨大的应用潜力。从基本原理的揭示到不同类型合金的分类比较，从制备工艺的不断优化到各项性能的深入研究，都为其在临床的广泛应用奠定了坚实基础。然而，目前该领域仍存在一些挑战和问题有待解决。例如，部分形状记忆合金的成本较高，限制了其大规模的推广应用；一些合金的生物相容性虽然已满足基本要求，但仍有进一步提升的空间，以更好地适应人体复杂的生理环境。

未来的研究方向可以着重于开发新型低成本且高性能的形状记忆合金，进一步优化制备工艺以提高材料的综合性能。同时，加强多学科的交叉研究，将材料科学、生物医学、力学等学科的知识相结合，深入探索形状记忆合金在口腔正畸中的作用机制和应用模式。相信随着技术的不断进步和研究的深入开展，口腔正畸用形

状记忆合金材料将在正畸治疗中发挥更加重要的作用，为患者带来更加优质、高效的正畸解决方案。

参考文献：

- [1] 代清源, 吉利, 华嘉皓, 梁振宇, 余健文, 陈太聪. 微型正畸装置形状记忆合金弓丝非线性止锁机制设计 [J]. 生物医学工程学杂志, 2024, 41(4): 766-774.
- [2] 吴同意, 丁项琴, 刘天华, 陈道, 来国桥. 光固化 3D 打印技术及材料在口腔医疗领域的应用研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 172-177+189.
- [3] 沈刚. 口腔正畸理论更新与技术研究的几点思考 [J]. 上海口腔医学, 2023, 32(2): 113-119.
- [4] 许嘉宁, 金作林, 刘佳. 3D 打印在口腔正畸领域的应用进展 [J]. 口腔医学, 2023, 43(10): 925-929.
- [5] 于超然, 边策, 张宁. 正畸患者口腔卫生的维护方法 [J]. 中华口腔正畸学杂志, 2023, 30(2): 105-109.