

氧化锆陶瓷表面处理对粘接强度的影响

刘懋童

浙江大学 华家池校区 浙江 杭州 310029

摘要：氧化锆陶瓷因其优异的力学性能和生物相容性，在航空航天、生物医学等领域具有广泛的应用前景。然而，其表面惰性导致与基体材料的粘接强度较低，限制了其进一步应用。本文系统分析了氧化锆陶瓷表面处理方法，包括机械处理、化学处理和物理处理等，探讨其对粘接强度的影响机制。研究表明，表面处理能够改变氧化锆陶瓷的表面粗糙度、化学活性和表面能，进而提高与基体材料的粘接强度。通过对不同处理方法的对比分析，提出了优化表面处理工艺的建议，为氧化锆陶瓷在复合材料中的应用提供了理论依据。

关键词：氧化锆陶瓷；表面处理；粘接强度；表面能；化学活性

引言：

氧化锆陶瓷作为一种高性能陶瓷材料，因其高强度、高韧性以及良好的耐磨性和耐腐蚀性，在现代工业和生物医学领域得到广泛应用。然而，氧化锆陶瓷表面化学惰性强，与金属或聚合物基体的粘接性能较差，这在很大程度上限制了其在复合材料中的应用。为了提高氧化锆陶瓷与基体材料之间的粘接强度，表面处理技术成为关键。本文将从表面处理的多种方法入手，分析其对氧化锆陶瓷表面性质的影响，并探讨这些变化如何影响粘接强度，旨在为氧化锆陶瓷的表面改性提供科学指导。

1 氧化锆陶瓷的表面特性

1.1 表面化学惰性

氧化锆陶瓷的主要成分是二氧化锆 (ZrO_2)，其表面具有较高的化学稳定性。这种化学惰性使得氧化锆陶瓷在与有机粘结剂或金属基体接触时，难以形成有效的化学键合。表面化学惰性主要源于氧化锆陶瓷表面的氧化层，该氧化层在一定程度上阻碍了与外界物质的化学反应，导致粘接界面的结合强度较低。即便在常规粘接工艺中添加偶联剂等辅助材料，界面间也多为物理吸附作用，易受环境湿度、温度变化影响，在受力时易出现剥离或脱落问题。

1.2 表面能与表面粗糙度

氧化锆陶瓷的表面能较低，这使得其与高分子材料或金属基体之间的润湿性较差。表面能的大小直接影响材料之间的粘接性能，低表面能会导致粘接剂在陶瓷表面的铺展困难，从而降低粘接强度。此外，氧化锆陶瓷的表面粗糙度也对其粘接性能有重要影响。表面过于光滑会减少粘接剂与陶瓷表面的机械嵌合力，而适当的表面粗糙度可以增加粘接剂的接触面积，从而提高粘接强度。实际应用中常通过喷砂、酸蚀等工艺调控粗糙度，同时可借助表面改性提升表面能，协同改善润湿性与嵌合效果。

1.3 表面微观结构

氧化锆陶瓷的表面微观结构复杂，存在微裂纹、孔隙和晶界等缺陷。这些微观结构在粘接过程中会与粘接剂发生相互作用，影响粘接性能。微裂纹和孔隙可以为粘接剂提供额外的锚固点，增强机械嵌合力；然而，过大的孔隙或裂纹可能导致应力集中，降低粘接界面的强度。因此，优化氧化锆陶瓷的表面微观结构是提高其粘接强度的重要途径。

2 机械处理对氧化锆陶瓷粘接强度的影响

2.1 喷砂处理

喷砂是一种常用的机械表面处理方法，通过高速喷射磨料颗粒对氧化锆陶瓷表面进行冲击，从而改变其表面粗糙度和机械性能。喷砂处理可以有效去除氧化锆陶瓷表面的氧化层和杂质，增加表面的粗糙度，为粘接剂提供更多的机械嵌合力。此外，喷砂处理还可以在陶瓷表面形成微裂纹，进一步增强粘接剂的锚固效果。研究表明，经过喷砂处理后，氧化锆陶瓷与金属基体的粘接强度显著提高，但喷砂参数（如喷砂压力、磨料粒径等）对粘接强度的影响需要进一步优化。

2.2 打磨处理

打磨是通过机械摩擦的方式对氧化锆陶瓷表面进行处理，以改变其表面粗糙度和微观结构。打磨处理可以去除表面的不平整部分，增加表面的平整度和均匀性。对于氧化锆陶瓷而言，打磨处理不仅可以提高表面粗糙

度,还可以改善表面的化学活性。适当的打磨压力和打磨时间可以有效提高氧化锆陶瓷的粘接强度,但过度打磨可能导致表面损伤,反而降低粘接性能。因此,在打磨过程中需要严格控制打磨参数,以达到最佳的表面处理效果。

2.3 超声波处理

超声波处理是一种利用超声波的高频振动对氧化锆陶瓷表面进行处理的方法。超声波的空化效应可以在陶瓷表面产生微小的气泡,这些气泡在破裂时会产生强烈的冲击波,从而改变氧化锆陶瓷的表面微观结构。此外,超声波处理还可以在陶瓷表面形成微裂纹,增强粘接剂的锚固效果。研究表明,经过超声波处理后,氧化锆陶瓷的表面能显著提高,与高分子材料的粘接强度也得到显著增强。

3 化学处理对氧化锆陶瓷粘接强度的影响

3.1 酸蚀处理

酸蚀处理是通过化学腐蚀的方式对氧化锆陶瓷表面进行处理,以改变其表面化学性质和微观结构。常用的酸蚀试剂包括氢氟酸、盐酸和硫酸等。酸蚀处理可以有效去除氧化锆陶瓷表面的氧化层和杂质,增加表面的化学活性和粗糙度。在酸蚀过程中,酸与氧化锆陶瓷表面发生化学反应,形成微孔结构,为粘接剂提供更多的锚固点。研究表明,经过酸蚀处理后,氧化锆陶瓷的表面能显著提高,与金属基体的粘接强度也得到显著增强。然而,酸蚀处理过程中需要严格控制酸的浓度和处理时间,以避免对陶瓷表面造成过度腐蚀。

3.2 碱处理

碱处理是通过碱性溶液对氧化锆陶瓷表面进行处理,以改变其表面化学性质和微观结构。常用的碱性试剂包括氢氧化钠和氢氧化钾等。碱处理可以有效去除氧化锆陶瓷表面的有机杂质和部分氧化层,增加表面的化学活性和粗糙度。在碱处理过程中,碱性溶液与氧化锆陶瓷表面发生化学反应,形成微孔结构,为粘接剂提供更多的锚固点。研究表明,经过碱处理后,氧化锆陶瓷的表面能显著提高,与高分子材料的粘接强度也得到显著增强。然而,碱处理过程中需要严格控制碱的浓度和处理时间,以避免对陶瓷表面造成过度腐蚀。

3.3 化学镀处理

化学镀是一种通过化学反应在氧化锆陶瓷表面沉积一层金属或合金的方法,以提高其表面化学活性和粘接性能。常用的化学镀方法包括镀镍、镀铜和镀银等。化学镀处理可以在氧化锆陶瓷表面形成一层均匀的金属涂层,该涂层不仅可以提高表面的化学活性,还可以改

善表面的导电性和热稳定性。研究表明,经过化学镀处理后,氧化锆陶瓷的表面能显著提高,与金属基体的粘接强度也得到显著增强。然而,化学镀处理过程中需要严格控制镀液的成分和处理时间,以避免镀层的不均匀生长。

4 物理处理对氧化锆陶瓷粘接强度的影响

4.1 离子注入处理

离子注入处理是通过高能离子束轰击氧化锆陶瓷表面,使离子进入表层晶格并产生一系列物理化学变化。该过程会打破表面原有稳定的化学键,形成缺陷结构,同时引入新的元素成分,改变表面化学组成。这些结构和成分的变化能显著提高表面化学活性,增强与基体材料的化学结合能力。此外,离子注入产生的晶格畸变会使表面粗糙度略有提升,增加机械嵌合作用位点。同时,表面能也会因活性位点的增多而提高,促进粘接剂在表面的润湿和铺展,从而有效提升粘接强度,且处理后表面无明显损伤,能保持材料本体性能。

4.2 等离子体处理

等离子体处理利用等离子体中的高能粒子与氧化锆陶瓷表面发生相互作用,实现表面改性。等离子体中的电子、离子等粒子撞击表面,可去除表面的污染物和弱边界层,清洁表面的同时破坏惰性氧化层。该过程还能在表面引入羟基、羧基等极性官能团,这些官能团能与粘接剂或基体材料形成化学键,增强化学粘接作用。同时,等离子体的刻蚀效应会使表面形成微小凹凸结构,提高表面粗糙度,增加机械嵌合面积。此外,表面极性的提高会降低接触角,提升表面能,改善粘接剂的润湿性能,进而综合提高粘接强度,且处理过程环保高效。

4.3 激光处理

激光处理通过高能量密度的激光束作用于氧化锆陶瓷表面,实现快速加热和冷却。这种热效应会使表面发生熔融再结晶,形成致密的改性层,同时激光的刻蚀作用会在表面形成规则或不规则的微纳结构,显著提高表面粗糙度,增强机械嵌合效应。此外,高温作用会打破表面原有化学键,使表面产生大量活性位点,提高化学活性,有利于与基体材料形成化学结合。激光处理还能去除表面杂质,改善表面洁净度,减少粘接缺陷。不过,需控制激光参数以避免表面出现裂纹,合理的工艺可在提升粘接强度的同时,保证表面结构稳定性。

5 复合处理对氧化锆陶瓷粘接强度的影响

5.1 机械-化学复合处理

机械-化学复合处理结合了机械处理和化学处理的优势,先通过机械研磨、喷砂等方式改变氧化锆陶瓷

表面形貌,提高表面粗糙度,形成凹凸不平的结构,为后续化学处理提供更多作用位点,同时增强机械嵌合基础。随后进行化学处理,如酸蚀、硅烷偶联剂处理等,化学试剂可深入机械处理形成的微孔和沟槽内,与表面原子发生反应,引入极性官能团或形成过渡层。这种复合处理使表面既具有良好的物理嵌合结构,又具备较高的化学活性,有效解决了单一机械处理化学结合不足、单一化学处理机械嵌合薄弱的问题,实现粘接强度的协同提升。

5.2 物理-化学复合处理

物理-化学复合处理先采用物理方法对氧化锆陶瓷表面进行预处理,如等离子体或离子注入处理,去除表面惰性层并产生活性位点和微小粗糙结构,改善表面亲水性和表面能。在此基础上进行化学处理,如涂覆粘接促进剂、硅烷偶联剂修饰等,化学物质可与物理处理产生的活性位点牢固结合,在表面构建稳定的化学结合层。物理处理为化学处理创造了有利条件,使化学作用更充分、均匀;化学处理则进一步强化了表面化学结合能力,弥补了单一物理处理效果易衰减的缺陷。两者结合使表面兼具高表面能、高活性和稳定化学结合层,显著提升粘接的稳定性和强度。

5.3 多场耦合处理

多场耦合处理是利用两种及以上能量场协同作用于氧化锆陶瓷表面,如超声场与化学场耦合、电场与等离子体场耦合等。以超声-化学耦合为例,超声的空化效应可产生微小气泡并破裂,对表面产生冲击和搅拌作用,加速化学试剂的扩散和反应速率,使化学处理更彻底,同时细化表面微观结构。多场协同作用能产生单一场处理无法实现的效果,不仅能改变表面形貌和化学组成,还能调控表面晶格结构和电子状态,形成更优的表

面性能。这种处理方式可精准调控表面粗糙度、化学活性和表面能等关键参数,使表面性能更适配基体材料,大幅提升粘接强度和耐久性,尤其适用于高性能复合材料的制备需求。

6 表面处理工艺的优化

6.1 表面处理参数的优化

表面处理参数直接影响氧化锆陶瓷表面改性效果,需针对不同处理方法优化关键参数。如机械喷砂处理中,砂粒粒径、喷砂压力、喷砂时间等参数会影响表面粗糙度,粒径过大或压力过高易导致表面损伤,过小则粗糙度过低;化学处理中,试剂浓度、处理温度、反应时间需精准控制,浓度过高或时间过长可能腐蚀表面,过低则反应不充分。优化时需以表面粗糙度、化学活性、表面能等关键指标为目标,通过单因素和正交试验等方法,确定各参数的最佳范围。同时需考虑参数间的交互作用,避免单一参数优化导致整体效果失衡,确保处理后表面性能稳定且适配粘接需求。

6.2 表面处理方法的组合优化

表面处理方法的组合优化需根据氧化锆陶瓷的应用场景、基体材料特性及粘接要求,选择合适的处理方法并确定合理顺序。不同基体材料对表面性能需求不同,与金属基体粘接需侧重化学结合和机械嵌合,可选择机械-化学复合处理;与聚合物基体粘接需提升表面亲水性和化学相容性,可采用等离子体-硅烷偶联剂复合处理。组合顺序也至关重要,通常先进行物理或机械处理改善表面形貌和活性,再进行化学处理强化结合。同时需考虑处理成本、效率和环保性,在保证粘接性能的前提下,选择低成本、高效率的组合方案,实现性能与经济性的平衡。

总 结 :

氧化锆陶瓷的表面处理对其与基体材料的粘接强度具有重要影响。通过机械处理、化学处理和物理处理等方法,可以有效改变氧化锆陶瓷的表面粗糙度、化学活性和表面能,从而提高其与金属或高分子基体的粘接强度。复合处理方法可以进一步发挥多种处理方法的优点,显著提高氧化锆陶瓷的表面性能和粘接强度。然而,表面处理工艺的优化是提高粘接强度的关键,需要根据具体的应用需求选择合适的表面处理方法和参数,并进行严格的质量检测与评估。未来的研究方向应集中在开发更加高效、环保的表面处理技术,以及进一步优化表

面处理工艺,以满足氧化锆陶瓷在不同领域的应用需求。

参考文献 :

- [1] 姚雪敏,王华,王璐,等.口腔半透明氧化锆陶瓷粘接效果的影响因素[J].国际口腔医学杂志,2024,51(4):450-455.
- [2] 杜桥,牛光良.激光及涂层表面处理对氧化锆陶瓷粘接强度的影响[J].华西口腔医学杂志,2024,42(03):359-364.
- [3] 陈良.激光蚀刻对陶瓷与树脂间粘接强度的影响[D].吉林大学,2021.