

碳化硅和碳化硼陶瓷在防弹材料应用中的工艺优化与性能提升

赵 强

宁夏机械研究院股份有限公司 宁夏 银川 750001

摘 要: 碳化硅与碳化硼陶瓷作为高性能防弹材料,通过工艺优化实现了性能显著提升。原料处理、成型工艺及烧结工艺的优化策略,有效改善了材料的微观结构,增强了强度和韧性。实弹射击测试表明,优化后的碳化硅陶瓷背凸值降低约5%;碳化硼陶瓷背凸值降低约8%。这些成果为碳化硅和碳化硼陶瓷在防弹材料领域的应用奠定了坚实基础。

关键词: 碳化硅陶瓷;碳化硼陶瓷;防弹材料工艺优化

引言

随着防弹技术的不断发展,高性能防弹材料的需求日益增长。碳化硅与碳化硼陶瓷,以其独特的晶体结构和卓越的性能特点,成为防弹材料领域的佼佼者。然而,原始性能难以满足日益严苛的防护需求,因此,通过工艺优化提升材料性能成为研究热点。本文综述了碳化硅与碳化硼陶瓷在防弹材料应用中的工艺优化策略与性能提升机制,旨在为防弹材料的发展提供新的思路和方法。

1 碳化硅和碳化硼陶瓷的特性与防弹应用基础

碳化硅与碳化硼陶瓷,作为高性能防弹材料的杰出代表,各自拥有独特的晶体结构与卓越的性能特点,为防弹应用奠定了坚实的基础。碳化硅陶瓷,其晶体结构以Si-C四面体为基本构建单元,存在 α 与 β 两种晶型,其中 α -SiC凭借强大的共价键结合,能在高温极端环境下维持高强度的键合状态,展现出出色的强度、高硬度、优异的耐磨性与耐腐蚀性,同时兼具高热导率与良好的抗热震性能。这些独特的性能优势,加之适中的价格,使得碳化硅陶瓷在高性能防弹材料领域具有极高的性价比,成为众多防护解决方案中的优选。在防弹原理上,碳化硅陶瓷以其高硬度与高强度特性构筑了坚实的防护屏障。当弹丸撞击时,碳化硅陶瓷能有效抵挡其侵入,并通过分散弹丸动能,使弹丸变形、破裂或改变轨迹,明显降低潜在伤害,展现出卓越的防弹效能。而碳化硼陶瓷则凭借类似金刚石的三维骨架结构,通过紧密的碳-硼共价键连接,形成了复杂的空间网状体系,赋予了其仅次于金刚石和立方氮化硼的硬度,兼具超低密度、高弹性模量等特性。在防弹应用中,碳化硼陶瓷以超高硬度和强度直接阻挡弹丸穿透,同时利用其高韧性吸收并耗

散弹丸能量,阻止裂纹扩展,为被防护对象提供持久可靠的防护。碳化硼陶瓷凭借高硬度与独特晶体结构,在防弹材料领域独树一帜。它能有效吸收分散冲击能量,抵御高速弹丸,保障人体安全。加之超低密度特性,碳化硼陶瓷成为制造轻型防弹装备的理想之选,既提升了穿戴舒适性,又增强了便携性。

2 碳化硅和碳化硼陶瓷的工艺优化策略

2.1 原料处理优化

2.1.1 碳化硅陶瓷

在碳化硅陶瓷应用于防弹材料时,原料处理的优化对其性能起着至关重要的作用。高纯度的碳化硅粉体是基础。在选取时,需严格把控杂质含量,像铁、铝、氧等元素的含量要精准控制。杂质的存在会在陶瓷内部形成缺陷,影响其结构完整性,进而降低材料的防弹性能。因此,通过先进的提纯技术,最大程度减少杂质,为后续工艺奠定良好基础。粒径的均匀性与适宜性同样关键。借助精细的研磨与分级工艺,获得粒径D50在0.5-0.7 μm 的粉体。这样的粒径范围能够有效降低烧结过程中的孔隙率。孔隙的减少意味着材料致密度的提升,而致密度与材料强度密切相关。强度的增强使碳化硅陶瓷在受到冲击时,能更好地分散能量,抵御弹丸的穿透。对碳化硅粉体进行表面改性,是提升材料性能的重要手段。采用化学气相沉积(CVD)、物理气相沉积(PVD)等前沿技术,在粉体表面涂覆碳纳米管、氮化硼等增强相。这些增强相能够改善粉体颗粒间的界面结合力。当材料受到外力冲击时,颗粒间更好的结合力可使应力更均匀地分布,避免局部应力集中导致材料破裂,有效增强材料的韧性和整体性能,让碳化硅陶瓷在防弹材料领域发挥更大的作用^[1]。

2.1.2 碳化硼陶瓷

在探讨碳化硅与碳化硼陶瓷于防弹材料应用中的工艺优化与性能提升时,针对碳化硼陶瓷的工艺优化策略显得尤为重要。(1)优化碳化硼粉末的合成工艺是基础。采用诸如自蔓延高温合成法(SHS)及碳热还原法等先进技术,确保所制备的碳化硼粉末纯度提升至99%以上,这一举措能显著降低杂质含量,从而减轻其对材料整体性能的负面影响。此外,精确调控硼碳比至接近其理论值4:1,是保障碳化硼陶瓷结构稳定与性能优异的关键步骤。(2)对碳化硼粉末实施有效的表面处理同样不可或缺。通过机械合金化等手段,可提升粉末的活性,增强其与其他组分的结合能力。而热压烧结预处理则能改善粉末的烧结性能,有助于在烧结过程中实现更高的致密化,进而提升材料的整体强度和韧性。(3)综合上述工艺优化措施,能明显提升碳化硼陶瓷的纯度与结构稳定性,还能通过改善其烧结性能,为制备高性能的防弹材料奠定坚实基础。这一系列工艺上的精进,无疑将推动碳化硼陶瓷在防弹材料领域的应用迈向新的高度,为安全防护提供更为可靠的技术支撑^[2]。

2.2 成型工艺优化

2.2.1 碳化硅陶瓷

在碳化硅陶瓷作为防弹材料的工艺优化路径中,成型工艺的调整与升级是核心步骤。尽管传统的模压成型(干压成型的一种)有着广泛的应用基础,但其局限性同样明显。除了引入注射成型与凝胶注模成型,还深化了对干压成型技术的改进。先进的干压成型技术,优化模具设计和粉末预处理,能提高碳化硅粉末的填充密度和分布均匀性。如采用多层填充与振动密实技术,可以有效减少粉末间的空隙,使坯体在成型阶段即具备高致密度和强度。通过精确调控干压成型的压力范围,结合适当的温度控制,以及优化保压时间,进一步细化碳化硅颗粒间的接触,增强坯体的结构强度。这些改进措施,在制造具有复杂几何形状的防弹部件时尤为重要,能确保最终产品在保持高精度形状的同时,具备良好的防弹性能。

2.2.2 碳化硼陶瓷

(1)在碳化硼陶瓷成型工艺优化中,改进传统干压成型技术至关重要。通过引入双向压制和分步加压策略,结合优化的粉末粒度和流动性,以及适当的润滑剂和粘结剂,显著提升了粉末填充效率和坯体均匀性;精确控制烧结前的预热温度和时间,有效释放坯体内部应力,为烧结致密化打下坚实基础,进一步提高了碳化硼陶瓷坯体的整体质量。(2)除了干压成型的改进,热压

烧结技术的精确运用依然关键。在2000至2200℃的高温区间内,施加40至55MPa的压力,并维持30至60分钟的保温时间,确保了碳化硼陶瓷的致密度和力学性能的最优化。探索并应用如放电等离子烧结(SPS)这类新型烧结技术,利用其独特的快速升温特性,在较低温度和更短的时间内实现高质量的烧结,细化碳化硼的晶粒结构,提高材料的整体韧性和防弹性能。(3)模具设计的优化也是碳化硼陶瓷成型工艺中不可忽视的环节。采用高精度、耐磨损的模具材料,结合模块化设计,提高了模具的重复使用率,还便于根据不同产品需求快速调整模具结构。通过精确计算模具的变形量和应力分布,有效避免成型过程中的应力集中和缺陷生成,为获得高质量碳化硼陶瓷坯体提供了坚实的保障^[3]。

2.3 烧结工艺优化

2.3.1 碳化硅陶瓷

在碳化硅陶瓷的烧结工艺中,研发多元烧结助剂体系是提升其性能的关键步骤。通过添加适量的 Y_2O_3 、 Al_2O_3 、 B_4C 等烧结助剂,构建起多元烧结助剂体系。这些助剂能够在较低温度下形成液相,为碳化硅颗粒的重排以及溶解-沉淀过程创造有利条件。如液相的存在能让碳化硅颗粒在液相中更自由地移动并紧密堆积,有效促进致密化进程,降低烧结温度的同时提高材料的致密度。研究表明, Y_2O_3 和 Al_2O_3 的复合添加,可将碳化硅陶瓷原本较高的烧结温度降低至1600-1800℃,不仅节约了能源成本,还减少了高温对材料性能的潜在不良影响。同时,选择适宜的烧结气氛对碳化硅陶瓷性能也至关重要。氩气、氮气等惰性气氛或真空环境成为理想之选,它们能够有效防止碳化硅在高温烧结时被氧化。氧化会导致材料内部产生缺陷,进而劣化材料性能。在实际操作中,精确控制烧结气氛的压力和流量,可保证烧结过程的稳定性和均匀性。稳定的烧结环境有助于材料内部结构均匀发展,避免因气氛波动造成的局部缺陷,最终提升碳化硅陶瓷在防弹材料应用中的性能^[4]。

2.3.2 碳化硼陶瓷

在碳化硼陶瓷的烧结工艺优化策略中,无压烧结技术占据了主导地位。无压烧结通过精确调控烧结过程中的温度曲线和压力环境,实现了碳化硼陶瓷的高效致密化。关键优化点在于温度制度的合理设计与实施。在烧结初期,采用较低的升温速率,确保碳化硼颗粒间的均匀加热和初步接触,有助于形成稳定的初始烧结颈。随着烧结温度的逐渐升高,精确控制升温速率和保温时间,促进颗粒间的物质迁移和晶界扩散,实现材料的进一步致密化。在无压烧结过程中,气氛控制同样至关重

要。引入惰性气体或还原性气氛,有效避免了碳化硼在高温下的氧化和氮化反应,保护了材料的纯净度和性能。为了优化烧结效果,可采用分段保温策略,即在关键温度区间内延长保温时间,以促进晶粒的均匀生长和孔隙的充分排除。烧结完成后,后续的热处理步骤对于碳化硼陶瓷的性能提升同样关键。通过退火处理,即在低于烧结温度的一定范围内进行长时间保温,有效消除材料内部的残余应力和晶格畸变,提高材料的韧性和尺寸稳定性。

3 碳化硅和碳化硼陶瓷防弹性能的提升与测试

3.1 防弹性能提升机制

在碳化硅与碳化硼陶瓷防弹性能的提升机制研究中,工艺优化扮演了至关重要的角色。(1)通过工艺优化,碳化硅和碳化硼陶瓷的微观结构得到了显著的改善。晶粒尺寸变得更加均匀且细小,孔隙率显著降低,相组成也更为合理。这些变化共同增强了材料的强度和韧性,为防弹性能的提升奠定了坚实的基础。在遭受弹丸冲击时,优化后的微观结构能够更加有效地分散和吸收能量,从而降低弹丸的侵入深度和破坏程度。(2)为了进一步提升防弹性能,引入了多种能量耗散机制。如通过表面改性、添加增强相(如碳纳米管)以及优化烧结工艺等措施,碳化硅陶瓷中形成了桥联和拔出效应,这些效应能够消耗更多的弹丸能量。同样,碳化硼陶瓷中的位错滑移和相变吸能等过程也因微观结构的优化而变得更加活跃,提高了材料的整体防弹性能。(3)这些提升机制的共同作用,使得碳化硅和碳化硼陶瓷在防弹材料领域展现出更加优越的性能。

3.2 性能测试方法与结果分析

在评估碳化硅和碳化硼陶瓷的防弹性能时,当前主流且有效的方法是采用实弹射击测试。这一方法直接模拟了真实战场环境下的弹丸冲击,直观且精确地反映出材料的防弹能力。关键的测试指标是弹丸在规定速度下是否穿透靶板,及靶板的凸起变形数值(简称背凸),

该数值是衡量防弹材料性能的重要标尺。实弹射击测试还涵盖了材料吸能效果的评估,对比射击前后靶板的变形情况,精确分析材料在冲击下的能量吸收能力。经过工艺优化后的碳化硅陶瓷,在实弹射击测试中展现出了明显的防弹性能提升:其背凸值有明显的降低,意味着在更高速度的弹丸冲击下仍能保持良好的防护效果;优化后的碳化硅陶瓷在射击测试中展现出的背凸值降低了约5%,显示出更强的冲击能量吸收能力,有效减轻了弹丸对靶板的破坏。碳化硼陶瓷的性能提升同样明显,其背凸值在实弹射击测试中降低幅度达到了8%,表明在抵御高速弹丸冲击方面有了质的飞跃;这数据充分验证了工艺优化的有效性,也彰显了碳化硼陶瓷在防弹领域的卓越性能及其强大的市场竞争力。

结束语

综上所述,碳化硅与碳化硼陶瓷通过工艺优化实现了性能的显著提升,展现出在防弹材料领域的广阔应用前景。未来,随着材料科学与制备技术的不断进步,碳化硅与碳化硼陶瓷的防弹性能有望进一步提升,为安全防护提供更加可靠的技术支撑。同时,也期待更多新型防弹材料的涌现,共同推动防弹技术的发展。此外,跨学科合作与创新设计理念的引入,也将为防弹材料的多样化和个性化提供新的思路。

参考文献

- [1]魏汝斌,董彬,王小伟,张文婷,刘欣,杜亚媚,翟文.人体防护装备用碳化硼抗弹陶瓷应用探析[J].兵工学报,2022,43(09):2210-2218.
- [2]史彦民,徐正平,龙成勇,曹剑武,张永亮,董宾宾.炭黑添加量对无压烧结碳化硼陶瓷烧结的影响[J].耐火材料,2022,56(05):416-419.
- [3]刘营营.碳化硼基复相陶瓷的制备及力学性能研究[D].中国科学院大学,2022(04):13-14.
- [4]黄明,曹峰,彭志航,向阳.防弹装甲用碳化硼陶瓷材料的研究进展[J].现代技术陶瓷,2021,42(04):213-224.