

Performance preparation and application of magnesium metal composites

Buwen Zan

Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia, 010010, China

Abstract

In the modern industrial pursuit of high-performance materials, magnesium-based composites have emerged as a research hotspot in materials science due to their unique performance advantages. As a lightweight metal with a density of merely 1.74g/cm^3 —approximately two-thirds that of aluminum and one-fourth that of steel—magnesium inherently excels in lightweight applications. Moreover, its high specific strength and stiffness enable structural reinforcement while reducing overall weight, effectively addressing the dual demands of modern industry for both material lightness and strength.

Keywords

modern industry; composite materials; innovative development

镁金属复合材料的性能制备与应用

咎卜文

内蒙古工业大学, 中国·内蒙古 呼和浩特 010010

摘要

在现代工业不断追求高性能材料的背景下, 镁金属复合材料凭借其独特的性能优势, 逐渐成为材料科学领域的研究热点。镁是一种轻质金属, 其密度仅为 1.74g/cm^3 , 约为铝的 $2/3$, 钢的 $1/4$, 这使得镁金属复合材料在轻量化应用中具有先天优势。同时, 镁具有较高的比强度和比刚度, 能够在保证结构强度的同时减轻整体重量, 满足现代工业对材料轻量化和高强度的双重需求。

关键词

现代工业; 复合材料; 创新发展

1 镁金属复合材料的性能特点

1.1 基本性能

1.1.1 密度与比强度

镁金属复合材料的密度通常在 $1.7 - 2.0\text{g/cm}^3$ 之间, 这一数值相较于传统金属材料, 如铝合金 (密度约 2.7g/cm^3)、钢铁 (密度约 7.8g/cm^3), 具有明显的优势。其低密度特性使得镁金属复合材料在对重量有严格要求的领域, 如航空航天、汽车制造等, 成为理想的材料选择。在航空航天领域, 飞行器的重量每减轻 1kg , 在其使用寿命内可节省大量的燃料消耗, 同时能够提高飞行器的飞行性能和有效载荷能力。

比强度是材料强度与密度的比值, 它反映了材料在承受载荷时的效率。镁金属复合材料具有较高的比强度, 其比强度值甚至超过了一些高强度铝合金和钢材。这意味着在相同强度要求下, 使用镁金属复合材料可以显著减轻结构的重量。

量。例如, 在汽车发动机缸体的制造中, 采用镁金属复合材料代替传统的铸铁材料, 不仅可以使发动机重量减轻约 $30\% - 50\%$, 还能提高发动机的燃油效率和动力性能。在一些高端自行车的制造中, 使用镁金属复合材料制作车架, 在保证车架强度和刚性的同时, 使自行车的整体重量减轻, 提高了骑行的舒适性和操控性。

1.1.2 尺寸稳定性

镁金属复合材料具有良好的尺寸稳定性, 这得益于其组织结构的稳定性和低的热膨胀系数。在精密仪器部件制造中, 尺寸稳定性是至关重要的性能指标。以光学仪器中的镜头支架为例, 镜头支架需要精确地固定镜头位置, 以保证光学系统的成像质量。如果支架材料的尺寸稳定性不佳, 在温度变化或机械振动等外界因素作用下, 支架的尺寸会发生变化, 从而导致镜头位置偏移, 影响成像的清晰度和准确性。镁金属复合材料的低膨胀系数使其在温度变化时尺寸变化极小, 能够有效地保证镜头支架的尺寸精度, 确保光学仪器的性能稳定。在电子设备中的印刷电路板 (PCB) 上的连接件, 也需要具有良好的尺寸稳定性, 以保证电子元件之间的

【作者简介】咎卜文 (2004-), 男, 中国内蒙古呼和浩特人, 本科, 从事冶金工程研究。

电气连接可靠。镁金属复合材料制成的连接件能够在不同的工作环境下保持稳定的尺寸,提高了电子设备的可靠性和稳定性。

1.1.3 耐腐蚀性

镁金属复合材料的耐腐蚀性能是其应用中需要关注的重要性能之一。在不同的环境下,镁金属复合材料会发生不同类型的腐蚀。在大气环境中,镁金属复合材料表面会与空气中的氧气、水蒸气等发生化学反应,形成一层氧化膜。然而,这层氧化膜的致密性较差,不能有效地阻止进一步的腐蚀。在含有氯离子的海洋环境或工业环境中,镁金属复合材料容易发生点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀。这是因为氯离子具有很强的侵蚀性,能够破坏镁金属复合材料表面的保护膜,从而引发局部腐蚀。

为了提高镁金属复合材料的耐腐蚀性能,通常采用多种防护措施。表面涂层是一种常用的方法,如采用有机涂层、金属涂层等。有机涂层可以在镁金属复合材料表面形成一层隔离层,阻止腐蚀介质与基体接触,从而提高耐腐蚀性能。金属涂层则可以利用涂层金属的耐腐蚀性来保护镁金属复合材料基体。微弧氧化处理也是一种有效的防护手段,它通过在镁金属复合材料表面原位生长一层陶瓷膜,提高材料的硬度和耐腐蚀性。在一些对耐腐蚀性能要求极高的应用场景中,还可以结合多种防护措施,如先进行微弧氧化处理,再涂覆有机涂层,以达到更好的防护效果。

1.2 特殊性能

镁金属复合材料除了具有上述基本性能外,还展现出一些特殊性能,使其在特定领域具有独特的应用价值。

镁金属复合材料具有良好的阻尼性能,能够有效地吸收和耗散振动能量。在汽车发动机、变速箱等部件中,振动和噪声会影响设备的正常运行和使用寿命,同时也会降低驾乘舒适性。镁金属复合材料的高阻尼性能使其能够在这些部件中发挥减振降噪的作用。当发动机运转产生振动时,镁金属复合材料制成的发动机支架能够迅速吸收振动能量,减少振动向车身的传递,从而降低车内的噪声水平。在一些精密仪器中,如光学望远镜的支撑结构,采用镁金属复合材料可以有效减少外界振动对仪器的干扰,提高仪器的精度和稳定性。

镁金属复合材料还具有优异的电磁屏蔽性能。随着电子设备的广泛应用,电磁干扰问题日益严重。在电子设备中,内部电子元件的工作会产生电磁辐射,这些辐射不仅会影响设备自身的性能,还可能对周围的其他设备造成干扰。镁金属复合材料可以有效地屏蔽电磁辐射,其原理是当电磁波入射到镁金属复合材料表面时,会在材料内部产生感应电流,这些感应电流会产生与入射电磁波相反的磁场,从而抵消部分入射电磁波,达到屏蔽电磁辐射的目的。在手机、笔记本电脑等电子产品的外壳制造中,使用镁金属复合材料可以有效地屏蔽内部电子元件产生的电磁辐射,保护用户的健康,

同时也能提高设备的抗干扰能力,保证设备的稳定运行。在一些对电磁环境要求严格的场所,如医院的磁共振成像(MRI)室、通信基站等,镁金属复合材料也可用于制作屏蔽设备,减少电磁干扰对周围环境的影响。

2 镁金属复合材料的制备方法

制备方法对镁金属复合材料的组织结构和性能有着至关重要的影响。不同的制备方法会导致复合材料中增强相的分布、界面结合状况以及基体的组织结构存在差异,进而影响复合材料的综合性能。目前,常见的镁金属复合材料制备方法主要有粉末冶金法、搅拌铸造法、喷射沉积法等,每种方法都有其独特的原理、工艺特点和适用范围。

2.1 粉末冶金法

粉末冶金法是制备镁金属复合材料的重要方法之一,其原理是将镁合金粉末与增强相粉末充分混合均匀,然后在一定压力下将混合粉末压制所需形状的坯体,最后通过热压烧结等工艺使坯体致密化,实现增强相与基体合金的复合。在制粉过程中,由于镁合金化学性质活泼,容易与空气中的氧气、水蒸气等发生反应,因此需要采取特殊的防氧化保护措施,如在惰性气体环境中进行制粉操作,以确保镁合金粉末的质量。

具体操作步骤如下:首先,选择合适的镁合金粉末和增强相粉末,对镁合金粉末进行预处理,去除表面的杂质和氧化物。将镁合金粉末和增强相粉末按照一定比例放入球磨机中进行球磨混合,球磨过程中要控制好球磨时间、球料比等参数,以确保粉末混合均匀。将混合好的粉末装入模具中,在一定压力下进行冷压成型,得到具有一定形状和尺寸的坯体。把坯体放入真空炉或惰性气体保护炉中进行热压烧结,烧结温度和压力要根据材料的特性进行合理选择,一般烧结温度在镁合金熔点的0.6-0.8倍之间,压力在10-50MPa左右。通过热压烧结,坯体中的粉末颗粒之间发生原子扩散和再结晶,使坯体致密化,形成性能良好的镁金属复合材料。

粉末冶金法在制备镁金属复合材料时具有诸多优点。该方法能够使增强体在基体中均匀分布,从而提高复合材料性能的均匀性。通过控制粉末的混合比例和工艺参数,可以精确调整复合材料中增强相的体积分数,满足不同应用场景对材料性能的需求。利用粉末冶金工艺和机械合金化工艺还可以制备出具有优良储氢性能的镁基复合材料,拓展了镁金属复合材料的应用领域。粉末冶金法也存在一些缺点。其工艺设备复杂,需要球磨机、压力机、烧结炉等多种设备,设备投资较大。小批量生产时,由于设备的利用率较低,导致生产成本较高,限制了该方法在一些对成本敏感领域的应用。

2.2 搅拌铸造法

搅拌铸造法是一种较为常用的制备镁金属复合材料的

方法,其制备过程基于金属熔体的流动特性。首先,将镁合金原料加热至熔化状态,形成液态的镁合金熔体。利用高速旋转的搅拌器桨叶搅动金属熔体,使其剧烈流动,并形成以搅拌旋转轴为中心的漩涡。在搅拌过程中,将增强相颗粒加入到金属熔体中,依靠漩涡的负压抽吸作用,使颗粒进入金属熔体。经过一段时间的搅拌,增强相颗粒在熔体中逐渐均匀分布。机械搅拌后的增强相均匀分布的合金熔液,可以通过压铸、沙型铸造以及永久模铸造等方式成形,最终得到镁金属复合材料。

搅拌铸造法对增强相分布有着重要影响。在搅拌过程中,搅拌速度、搅拌时间以及增强相颗粒的加入方式等因素都会影响增强相在基体中的分布均匀性。当搅拌速度过低时,增强相颗粒难以充分分散,容易出现团聚现象;而搅拌速度过高,则可能导致熔体中卷入过多气体,产生气孔等缺陷。合适的搅拌速度一般在 500 - 1500r/min 之间,搅拌时间在 15 - 60min 左右,具体数值需要根据材料体系和增强相颗粒的特性进行调整。增强相颗粒的加入方式也很关键,如采用分批加入的方式,可以使增强相颗粒更均匀地分散在熔体中。

搅拌铸造法具有一些显著的优势。该方法是液态成形,设备相对简单,投资成本较低,且能一次成形复杂零件,适合于大规模生产。批量生产时,搅拌铸造法的成本仅是其他方法的 1/3 - 1/10,这使得该方法在工业生产中具有很大的竞争力。该方法还可制备大体积的金属基复合材料,满足一些大型构件的生产需求。搅拌铸造法也存在一些不足之处。在强烈的搅拌过程中,难免有气体和夹杂物混入,会产生气孔和氧化物等铸造缺陷,影响复合材料的性能。由于增强相颗粒与镁合金熔体的密度差异,在搅拌过程中增强相颗粒可能会出现偏析和结团的现象,难以避免,从而降低复合材料性能的均匀性。铸造温度过高时,基体与增强相之间可能发生有害的界面反应,进一步降低产品性能,导致性价比不高。

2.3 喷射沉积法

喷射沉积法是一种较为先进的制备镁金属复合材料的技术,其技术原理基于快速凝固和颗粒复合的过程。首先,将镁合金原料加热至完全熔化,形成液态的镁合金。在高压惰性气体的喷射作用下,液态镁合金被雾化成细小的液滴,形成熔融的金属喷射流。与此同时,将增强相颗粒通过特定的装置喷入射流中,使固、液两相充分混合。混合后的固、液两相共同沉积到经预处理的衬底上,由于沉积过程中冷却速度极快,液滴迅速凝固,从而快速凝固得到镁金属复合材料。

具体制备流程如下:将镁合金放入感应炉或其他熔炉中加热熔化,达到预定的温度后,保持熔体的温度稳定。通过高压惰性气体源,如氩气、氮气等,将高压气体通入雾化喷嘴,使液态镁合金在喷嘴处被雾化成细小的液滴。利用送粉装置将增强相颗粒输送到雾化喷嘴附近,使其与雾化后的

镁合金液滴在飞行过程中混合。混合后的固、液两相在重力和气体流的作用下,沉积到预先准备好的衬底上,衬底可以是金属板、模具等。沉积过程中,由于冷却速度极快,通常在 $10^3 - 10^6 \text{K/s}$ 之间,液滴迅速凝固,形成具有细小晶粒和均匀增强相分布的镁金属复合材料。

喷射沉积法在提高材料性能方面具有重要作用。该方法能够使复合材料获得快速凝固的组织特征,晶粒细小,这有助于提高材料的强度、硬度和韧性等力学性能。由于增强相颗粒在沉积过程中能够较均匀地分散在基体中,增强相均匀度有一定的提高,从而使复合材料的性能更加均匀。喷射沉积法也面临一些挑战。制备过程中容易出现孔隙率较高的问题,这是由于在沉积过程中,气体可能会被包裹在沉积物中,形成空隙。空隙处产生的应力集中将促进微裂纹的发展,降低增强相与基体的界面性能,对材料的冲击韧性和疲劳寿命也有不利影响。喷射沉积设备较为复杂,成本较高,这在一定程度上限制了该方法的大规模应用。

2.4 其他制备方法

除了上述三种常见的制备方法外,还有原位合成法、扩散连接法等其他制备方法。原位合成法是一种近年来发展起来的制备复合材料的新方法,其原理是在一定条件下,通过元素之间或元素与化合物之间的化学反应,在金属基体内原位合成一种或几种高硬度、高弹性模量的陶瓷增强相,从而达到强化金属基体的目的。通过这种方法制备的复合材料,增强体是在金属基体内形核、自发长大,因此增强体表面无污染,基体和增强体的相溶性良好,界面结合强度较高。同时,省去了繁琐的增强体预处理工序,简化了制备工艺。固-液反应复合工艺是将反应物粉末与金属熔体混合,使加入粉末与金属熔体成分反应或自行分解,生成难熔的高硬度质点,均匀分散在基体中,形成复合材料,该复合工艺成本较低,反应材料种类较多,复合后的材料组织细密。

扩散连接法主要用于制备层状镁金属复合材料或实现镁金属复合材料与其他材料的连接。其原理是在一定温度和压力下,使待连接的材料表面原子相互扩散,形成冶金结合。在制备镁/铝层状复合材料时,可以将镁合金和铝合金板材进行表面处理后,叠放在一起,在真空或保护气氛下进行加热和加压,使镁合金和铝合金界面处的原子相互扩散,实现连接。扩散连接法能够获得连接强度较高的接头,但该方法对设备要求较高,连接过程需要严格控制温度、压力和时间等参数,且生产效率相对较低。

3 研究总结

本研究全面且深入地探讨了镁金属复合材料,在多个关键方面取得了具有重要价值的研究成果。在性能特点上,镁金属复合材料展现出了卓越的综合性能。其密度在 $1.7 - 2.0 \text{g/cm}^3$ 之间,相较于铝合金、钢铁等传统金属材料具有显著的轻量化优势,在航空航天、汽车制造等对重量严格限制

的领域具有极大的应用潜力。高比强度使其在承受载荷时表现出色，能够在保证结构强度的同时，有效减轻结构重量，如在汽车发动机缸体制造中，采用镁金属复合材料可使发动机重量减轻 30% - 50%，并提升燃油效率和动力性能。良好的尺寸稳定性确保了其在精密仪器部件制造中的应用，能在温度变化或机械振动等外界因素作用下，保持精确的尺寸精度，保障仪器的性能稳定。

镁金属复合材料的特殊性能也十分突出。其良好的阻尼性能使其成为减振降噪的理想材料，在汽车发动机、变速箱等部件中，能有效吸收和耗散振动能量，降低车内噪声水平，提高驾乘舒适性；在精密仪器中，可减少外界振动干扰，提高仪器精度和稳定性。优异的电磁屏蔽性能则使其在电子设备领域发挥重要作用，能有效屏蔽电子设备内部电子元件产生的电磁辐射，保护用户健康，提高设备抗干扰能力，确保设备稳定运行。

在制备方法上，本研究详细剖析了多种常见方法。粉末冶金法通过将镁合金粉末与增强相粉末混合、压制和烧结，实现了增强相与基体合金的复合。该方法能够使增强体均匀分布，精确调整增强相体积分数，还可制备出具有优良

储氢性能的镁基复合材料，但存在工艺设备复杂、生产成本高的问题，限制了其在一些对成本敏感领域的应用。搅拌铸造法基于金属熔体流动特性，将增强相颗粒加入液态镁合金熔体中，通过搅拌使其均匀分布，再经压铸等方式成形。此方法设备简单、成本低、适合大规模生产且能制备大体积复合材料，但在搅拌过程中容易混入气体和夹杂物，导致增强相颗粒偏析和结团，以及基体与增强相之间发生有害界面反应，影响复合材料性能。喷射沉积法利用高压惰性气体将液态镁合金雾化，与增强相颗粒混合后快速凝固得到复合材料。该方法能使复合材料获得快速凝固组织，晶粒细小，增强相分布均匀，从而提高材料性能，但存在孔隙率较高、设备复杂和成本高的挑战。

参考文献

- [1] 杜文博, 严振杰, 吴玉锋等. 镁基复合材料的制备方法与新工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3).
- [2] 董群, 陈礼, 赵明久等. 镁基复合材料制备技术、性能及应用发展概况[J]. 材料导报, 2004, 18(4).
- [3] 张修庆, 滕新营. 镁基复合材料的制备工艺[J]. 热加工工艺, 2004(3).