

铝基陶瓷复合材料在轻量化汽车零部件上的应用研究

闫新和

中信戴卡股份有限公司工程技术研究总院 河北秦皇岛 066011

摘要: 研究铝基陶瓷复合材料在汽车轻量化零部件上的推广应用,将极大地提高原有汽车轻量化零部件的综合性能,弥补原有铝合金轻量化零部件在恶劣环境中性能保持的稳定性,进一步提高产品寿命,应用前景十分广阔。

关键词: 铝基陶瓷;增强体;制备工艺;转向节;轻量化

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.12.003

在汽车制造轻量化的今天,作为现代工程领域的一颗璀璨明星,铝基复合材料凭借其独特的性能,在众多应用场合中崭露头角,尤其在轻量化汽车零部件中的探索应用更是得到众多有实力的头部企业的青睐。铝基复合材料主要由铝合金作为基体,通过添加其他增强体,如陶瓷颗粒、碳纤维等,来实现性能的大幅度提升。作为一种高性能的新型材料,铝基复合材料具有许多独特的优点,轻质、高强是其最大的亮点,耐磨、耐腐蚀性能也是它区别于其他金属材料的显著特点。

铝基陶瓷复合材料是由上海交通大学周尧和院士、王浩伟教授等为代表的五代材料人合力攻坚30年研发而成,并在国际上率先实现了原位自生铝基复合材料的规模化工程应用。陶铝克服了传统外加陶瓷颗粒增强铝基复合材料存在的颗粒尺寸大、界面相容性差等组织相问题,陶瓷颗粒尺寸由外加法的几微米到几十微米降低到亚微米级别,突破了外加陶瓷增强铝

基复合材料塑性低、加工难等应用瓶颈。

铝基陶瓷复合材料及产品介绍

1. 铝基陶瓷复合材料的构成

铝基陶瓷复合材料是众多金属基体复合材料中的一种。金属基体复合材料是一种由金属材料、陶瓷材料或高分子材料等两种以上的增强性材料经过复合工艺制备而成的多相材料。各种材料在性能上相互取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料,从而满足各种场景工件不同的要求。金属基体可以是铝基体、镁基体或镍基体,而组成复合材料的增强体则如图1所示,通常采用颗粒体、纤维体或晶须体。

颗粒增强体铝基复合材料是金属基复合材料中最成熟的一个品种。构成复合材料增强体的颗粒物如图2所示,有SiC颗粒、TiC颗粒、 Al_2O_3 颗粒、纳米陶

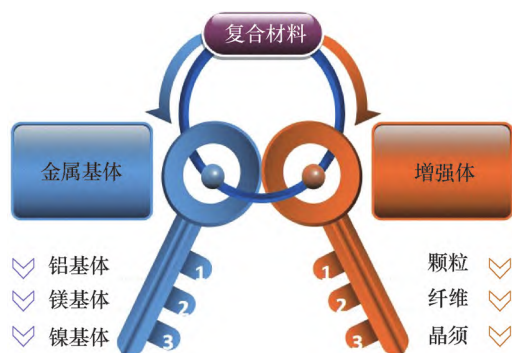


图1 复合材料构成示意

瓷颗粒以及初晶Si颗粒等。目前国外（如美国、加拿大）已有小批量生产，该种复合材料所用的增强体主要为TiC和 Al_2O_3 ，亦有少量氧化钛和硼化钛等颗粒（粒径一般为 $10\mu m$ ）。

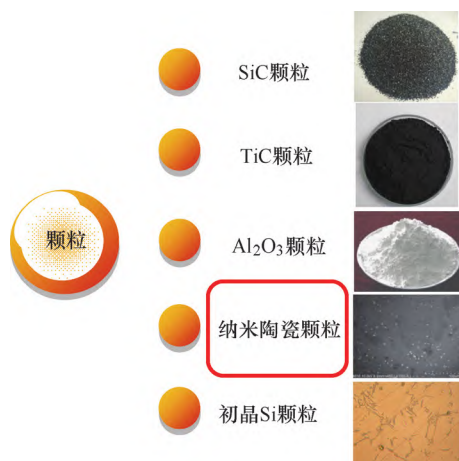
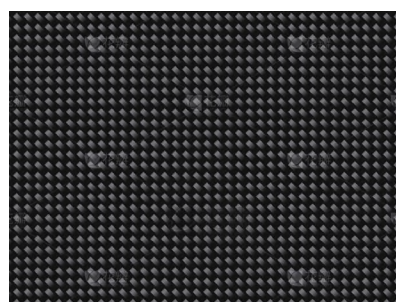
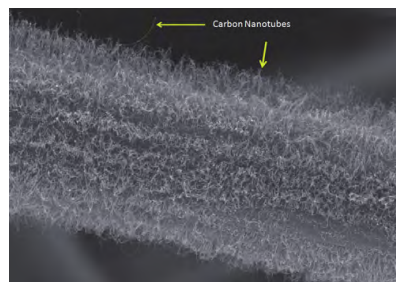


图2 复合材料主要颗粒物

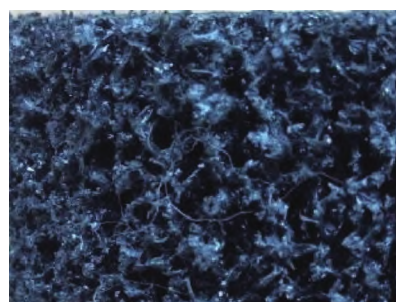
纤维在复合材料中的作用基本上是提高纯树脂体系的力学性能。复合材料中使用的所有不同纤维都具有不同的性能，因此会以不同的方式影响复合材料的性能。复合材料增强体纤维如图3所示，主要包括玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维及氧化铝纤维



a) C纤维复合材料



b) B纤维复合材料

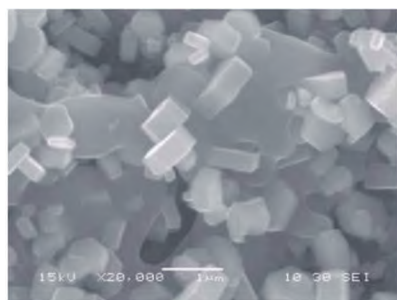
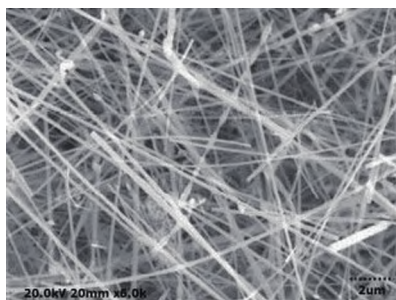


c) SiC纤维复合材料

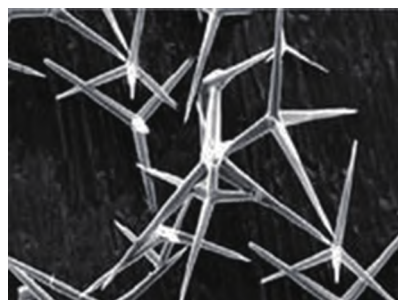
图3 复合材料增强体主要纤维

等。这些纤维在金属基复合材料中会起到提高强度、改善性能的作用。

复合材料增强体晶须主要包括金属晶须增强体和非金属晶须增强体。其中，金属晶须主要应用于金属基复合材料中，如图4所示，金属晶须有氧化铝、氧化锌晶须等。陶瓷质晶须则有SiC、钛酸钾、硼酸铝晶须

a) Al_2O_3 系列陶瓷质晶须

b) SiN系列陶瓷质晶须



c) SiC系列陶瓷质晶须

图4 复合材料增强体晶须

等。

2. 铝基陶瓷复合材料产品的制备工艺

(1) 混制工艺 铝基陶瓷复合材料的混制工艺分为两步：预处理过程和复合制备过程。在预处理时，先根据需求选择合适的铝基体和陶瓷颗粒原材料，再将铝和陶瓷原料进行分别处理，以保证两种材料的纯度和颗粒度。在复合制备阶段，采用不同的方法，如热压烧结、热等静压、电热爆破等。液态搅拌铸造法如图5所示，将使铝液和陶瓷颗粒进行复合，形成均匀分散的材料体系，实现陶瓷颗粒在铝基体中的均匀分布，这种方法能使复合材料界面效应、混杂效应或复合效应充分发挥，有利于复合材料性能的提高与互补（见表1），从而满足复合材料结构和强度设计要求。

(2) 成型工艺 将混合均匀的原材料通过一定手段成型为所需形状。铝基陶瓷复合材料是颗粒增强金属基复合材料（PRMMCs）中的一种，其产品主要成型工艺（见表2）有热压成型、凝胶注模成型、陶瓷涂

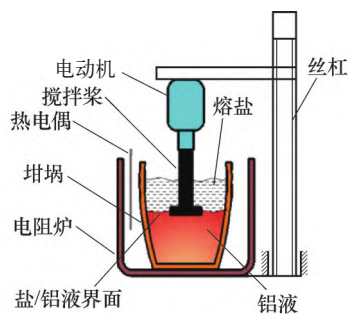
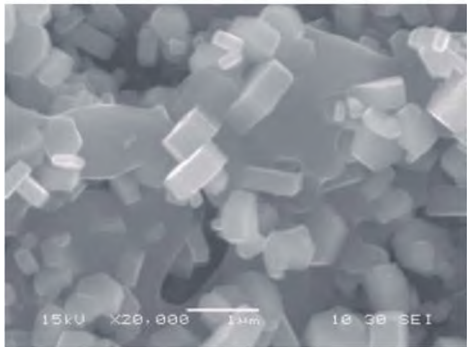


图5 搅拌铸造法混制工艺示意

表1 不同制备工艺性能对比

制备工艺	铝合金+增强体	抗拉强度 / MPa	延伸率 (%)	屈服强度 / MPa	弹性模量 / GPa
粉末冶金	6061 + 20%SiC _p	498	6	415	97
	6061 + 20%SiC _w	585	4	440	120
	6061 + 30%SiC _w	795	2	570	140
喷射沉积 无压渗透	7075 + 15%SiC _p	601	3	556	95
	7049 + 15%SiC _p	643	2	598	90
	7090 + 29%SiC _p	735	2	665	105
	A356 + 10%SiC _p	303	0.6	283	81
	A356 + 15%SiC _p	331	0.3	324	90
	A356 + 20%SiC _p	352	0.4	331	97
普通铸造	6061	524	20	476	69
	2014	310	13	275	73
	7075	485	10	505	72
	8090	570	7	415	80
	A356	220	6	205	76

表2 不同制备工艺相关特性对比

特性	制备方法			
	粉末冶金	搅拌铸熔	挤压铸造	喷射沉积
微观结构多样性	1	2	2	1
增强体含量	≤70%	≤30%	20%左右	≤30%
增强体尺寸	纳米至微米	≥10μm	≥5μm	微米级
增强体均匀性	1	2	2	3
界面结合状况	1	2	2	1
气孔率	1	2	1	1
力学性能	1	4	2	2
低成本潜力	4	1	2	2
连续生产能力	3	1	4	1
工艺成熟性	1	2	4	2

覆成型、液相反应烧结成型等。

1) 热压成型，将预制的陶瓷与铝材层层叠放，然后通过高温和高压的条件进行热压，使两者之间形成结合。

2) 凝胶注模成型，将陶瓷粉末和铝粉末与有机胶体混合，并在适当的温度和湿度下进行搅拌，形成膏状物料后注入模具中，然后通过凝胶化、烘干和烧结等步骤制得复合材料。

3) 陶瓷涂覆成型，先制备陶瓷涂料，然后将其涂

覆在铝材表面上,再进行烧结和热处理,使涂层与铝材结。

4) 液相反应烧结成型,将铝薄板与陶瓷粉末堆积在一起,然后在高温条件下进行烧结,利用陶瓷粉末与铝薄板之间的液相反应形成氧化物膜层,从而增强材料的结合性和耐蚀性。

需要注意的是,铝陶产品铸造成型工艺也存在一些技术难题,如增强颗粒与基体金属熔体的润湿性差、增强颗粒分布均匀性差、增强颗粒与基体金属的界面互不溶解及PRMMCs的凝固对组织和性能的不利影响等。总之,铝基陶瓷复合材料的产品凝固过程较为复杂,业界目前尚无统一的理论以及有效的解决办法。

铝陶产品在汽车零部件上的应用

在汽车制造领域,铝基陶瓷复合材料的应用对于实现汽车轻量化、提高燃油效率和减少排放具有重要意义。尤其是铝陶材料在汽车一些关键部件(见表3)如转向节、制动盘乃至发动机等产品上的应用,不仅提高了部件的强度和韧性,还实现了经济效益和社会效益的双赢。

表3 国外铝基复合材料在汽车上的应用

制造单位	基体合金	增强相及其体积含量 (%)	应用对象
Martin公司	2219	TiC, 15	活塞、连杆、刹车片
Lanxide公司	Al- (3-10) wt%Mg	Al ₂ O ₃ , 55~60	燃料喷射管
Dural公司	2024	Al ₂ O ₃ , 10~20	刹车盘
Dural公司	6061	Al ₂ O ₃ , 10~20	活塞
Dural公司	A356	SiC, 10~20	轮、气缸、驱动杆
DWA公司	2124	SiC, 10~20	活塞、连杆
ART公司	2124	AlN, 70	连杆

转向节是汽车制动系统的重要组成部分,其性能的好坏直接关系到车辆能否安全、高速地行驶。随着目前汽车轻量化发展的要求,高性能、轻质量的转向节越来越成为汽车零部件厂商青睐的对象。

铝基陶瓷复合材料应用于汽车转向节,具有较强的优势:铝合金的密度仅为钢的1/3,而铝陶材料的转向节质量仅为铸铁转向节质量的40%~50%,是最佳的汽车轻量化材料。同时又具有较高的比轻度、比

刚度和弹性模量,而且导热性好,其耐磨性明显高于HT200;热膨胀系数小,在高温载荷下尺寸比较稳定。

据悉,我国某企业已经成功完成了一款陶瓷铝合金转向节的研发(见图6)。其材料机械性能为:屈服强度290MPa/抗拉强度310MPa/伸长率8%,已达到了锻造转向节水平,经由权威金属材料研究机构完成了转向节静强度和疲劳的台架试验,且机械性能、化学成分和金相组织检测、测试,其结果均证明全部合格,已经具备批量生产条件。

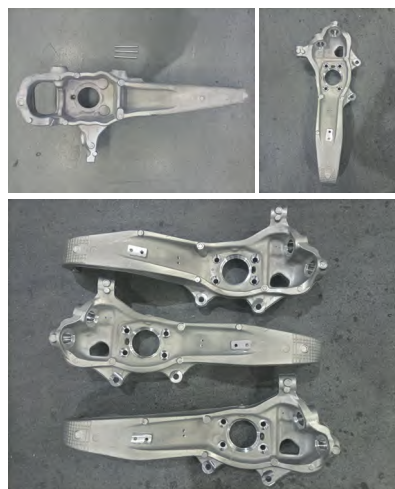


图6 陶瓷铝合金转向节应用案例

结语

随着中国汽车工程学会2020年10月《节能与新能源汽车技术路线图2.0》的发布,在“以铝代钢”实现汽车轻量化的大环境下,伴随着我国科学技术的不断进步,相信在不久的将来,陶瓷铝合金新材料在汽车底盘零件上的推广应用,尤其在新能源汽车的副车架、转向节、车轮支架及控制臂等,包括一体化副车架,以及目前正在研究火热的一体化前机舱、后地板等,必将迎来迭代升级式普及,应用前景和发展空间将非常广阔。

参考文献:

- [1] 冯毅,张德良,高翔.基于安全、轻量化、可靠性多目标的新能源汽车电池包壳体开发[J].汽车工程学报,2024,14(2):155-167.
- [2] 袁广江,章文峰,王殿斌,等.SiC颗粒增强铝基复合材料制备及机加性能研究[J].复合材料学报,2000(2):38-41. **AUTO1950**