

纳米陶瓷铝合金在汽车上的应用

胥洲 李润哲 成龙 谭福瑞

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

摘要: 纳米陶瓷铝合金是采用物理或化学的方法, 以铝或铝合金为基体, 由一种或多种不同性质的增强物质组合而成的一种多项固体材料, 该材料不仅具有基体铝合金高塑性的优点, 同时具备了增强颗粒高硬度、高模量的优点。纳米陶瓷铝合金具有良好的综合性能, 可广泛应用于航空航天、电子电气、汽车等领域。重点介绍了一种通过化学方法在铝合金基体中原位自生出纳米陶瓷颗粒, 该方法制备出的纳米陶瓷铝合金具有轻质、高刚度、高强度、高抗疲劳、耐高温的优越性能, 其力学性能远高于铝合金, 同时保持了铝合金良好的加工制造性能。

关键词: 纳米陶瓷 铝合金 复合材料 增强颗粒 原位自生

中图分类号: U466 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20220179

Application of Nano-Ceramic Aluminum Alloy in Automobile

Xu Zhou, Li Runzhe, Cheng Long, Tan Furui

(Global R&D Center, China FAW Cor., Ltd., Changchun 130013)

Abstract: Nano-ceramic aluminium alloy is a kind of multi-item solid material, which is based on aluminium or aluminium alloy by physical or chemical methods and composed of one or more reinforcing substances with different properties. This material not only has the advantages of high plasticity of aluminium alloy matrix, but also has the advantages of high hardness and high modulus of reinforcing particles. Therefore, nano-ceramic aluminium alloy has good comprehensive properties and can be widely used in aerospace, electronics and electric, automobiles and other fields. In this paper, a kind of in-situ self-generated nano-ceramic particles in aluminium alloy matrix by chemical method is introduced. The nano-ceramic aluminium alloy prepared by this method has the advantages of light weight, high rigidity, high strength, high fatigue resistance, high temperature resistance, and its mechanical properties are much higher than those of aluminium alloy, while maintaining good processing and manufacturing properties of aluminium alloy.

Key words: Nanometer ceramic, Aluminium alloy, Composite material, Reinforcing particle, In situ synthesis

1 前言

本研究中的陶瓷铝合金是一种原位自生纳米陶瓷颗粒增强铝基复合材料, 又称纳米陶瓷铝合金, 结合了陶瓷颗粒及铝合金的优点, 突破了单一材料的性能局限, 具有轻质、高刚度、高强度、高抗

疲劳、耐高温的优越性能, 其力学性能远高于铝合金, 同时保持了铝合金良好的加工制造性能, 下文提到的纳米陶瓷铝合金均由此种材料制备^[1]。

汽车轻量化可以通过先进的制造工艺、轻量化材料、结构化设计途径实现, 轻质材料包括铝、镁、陶瓷、塑料、玻璃纤维、碳纤维复合材料等^[2]。从

作者简介: 胥洲(1987—), 男, 工程师, 学士学位, 研究方向为金属材料。

基金项目: 吉林省、长春市重大科技专项(20210301017GX)。

参考文献引用格式:

胥洲, 李润哲, 成龙, 等. 纳米陶瓷铝合金在汽车上的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2023(6): 58-62.

XU Z, LI R Z, CHENG L, et al. Application of Nano-Ceramic Aluminum Alloy in Automobile[J]. Automobile Technology & Material, 2023(6): 58-62.

轻量化、节能、环保综合性能方面考虑,铝合金是汽车轻量化首选材料之一,而陶瓷铝合金是国际领先的具有完全自主知识产权的新材料,克服了目前国际先进的外加陶瓷颗粒增强铝基复合材料存在的颗粒尺寸大、分布不均匀、界面反应难以控制的问题,目前正逐步应用于汽车领域。

2 纳米陶瓷铝合金制备原理及特点

2.1 纳米陶瓷铝合金制备原理

在铝熔体中加入组成陶瓷的基本元素通过原位自生的方法合成陶瓷颗粒,由此制备出纳米陶瓷铝合金材料^[3]。

传统的纳米陶瓷铝合金是通过物理搅拌的方式将纳米陶瓷颗粒加入铝合金基体中,这种方式制备的陶铝材料中陶瓷颗粒有尖角、颗粒粗大、陶瓷颗粒与铝基体界面不相容,如图1所示,由此生产的陶铝材料塑性差、加工困难、强度低。

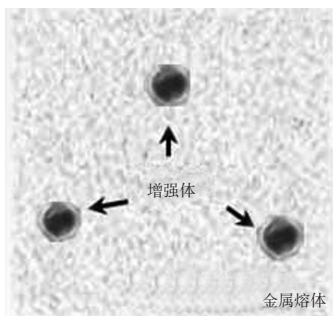


图1 物理搅拌混合陶瓷颗粒

而本研究通过在铝熔体中加入组成陶瓷的基本元素通过原位自生的方法合成陶瓷颗粒,采用该种制备工艺生产出的陶铝材料中陶瓷颗粒形状规整、颗粒细小、陶瓷颗粒与铝基体界面相容性好,如图2所示。

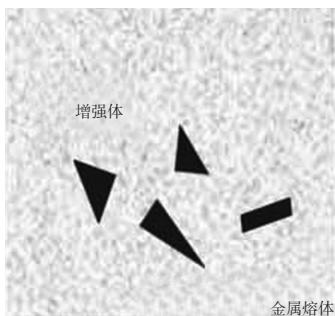


图2 化学反应合成陶瓷颗粒

由此生产的陶铝材料塑性好、易加工、强度高,该种陶铝材料中的纳米陶瓷颗粒直径尺寸可

达到50~500 nm,如图3所示。

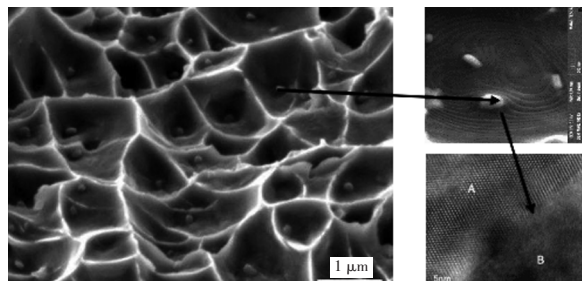


图3 原位自生法形成的陶瓷颗粒形貌

2.2 纳米陶瓷铝合金特点

纳米陶瓷铝合金是一种原位自生纳米陶瓷颗粒增强铝基复合材料,通过熔体控制技术, TiB_2 陶瓷颗粒原位自生,尺寸降低到50~500 nm,均匀镶嵌在晶界外,与基体相容性好,起到析出强化作用,增强材料性能;国际上制备铝基复合材料的传统方法是先将陶瓷粉碎成陶瓷颗粒,然后以搅拌铸造或粉末冶金的方法混入铝合金中复合材料,属于机械混合,陶瓷颗粒的尺寸大(几到几十微米),分布不均匀、界面反应难以控制,带来加工成形困难、强度及塑性差和性能不稳定等一系列问题^[4]。

纳米陶瓷铝合金材料具有高刚度、高强度、高抗疲劳、低膨胀、高阻尼、耐高温的优越性能。力学性能远高于铝合金,同时保持了铝合金良好的加工制造性能^[5];由于纳米陶瓷铝合金具有设计自由度高,可根据基体合金种类及纳米陶瓷含量进行成分设计,进而达到材料性能定制目的。

3 纳米陶瓷铝合金材料性能

3.1 纳米陶瓷铝合金机械性能

在A356铸造铝合金中加入 TiB_2 ,质量分数为 $w(TiB_2)=1.5\%$,研发的纳米陶瓷铸造铝合金性能如表1所示。

表1 普通铝合金与纳米陶瓷铝合金性能对照

铸造系列	铝合金 A356	纳米陶瓷铝合 金 A356 $w(TiB_2)=1.5\%$	性能变化
抗拉强度/MPa	280~310	≥ 340	提高10%以上
屈服强度/MPa	180~230	≥ 300	提高30%以上
断后伸长率/%	3~5	≥ 8	提高60%以上
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.70	2.77	相当

纳米陶瓷增强铝合金材料与原基体材料比较,材料性能大幅提高。材料性能具有可设计性。在ZL205、A356、ZL109等常规铝合金材料中耦合不同质量分数的TiB₂,材料刚度、强度综合性能大幅提高,具体性能见表2。

表2 纳米陶瓷铝合金可设计性列表

可设计性	高强度系列 (w(TiB ₂)=8%)+ ZL205, E=80 GPa, A=4% R _m =550 MPa	高塑性系列 (w(TiB ₂)=1.5%)+ A356, E=73 GPa, A=14% R _m =350 MPa	高刚度系列 (w(TiB ₂)=15%)+ ZL109, E=95 GPa, A=0.5% R _m =380 MPa
------	---	---	--

注:表中E为弹性模量,A为断后延伸率,R_m为抗拉强度。

3.2 纳米陶瓷铝合金高温性能 and 高温疲劳性能

耐高温纳米陶瓷铝合金性能与常规耐高温铝合金材料比较,依据标准GB/T 34220—2017《耐火材料 高温抗拉强度试验方法》及JJF 1298—2011《高温蠕变、持久强度试验机型式评价大纲》进行试验,其高温性能及疲劳性能显著提高,具体参数见表3及表4。

表3 耐高温纳米陶瓷铝合金性能与常规耐高温铝合金高温性能

材料	抗拉强度 R _m /MPa		蠕变应力指数
	300 °C	350 °C	
常规耐热铝合金 (A356)	120~140	100~120	4.2
耐高温纳米陶瓷铝合金	130~150	110~130	12

表4 耐高温纳米陶瓷铝合金性能与常规耐高温铝合金疲劳循环后(50×10⁶)抗拉强度

温度	20 °C	150 °C	200 °C	250 °C	350 °C	400 °C
常规耐热铝合金 (A356) /MPa	105	85	70	50	40	35
耐高温纳米陶瓷铝合金/MPa	113	92	78	55	46	39
提高/%	7.62	8.24	11.43	10.00	15.00	11.43

3.3 纳米陶瓷铝合金挤压性能

纳米陶瓷铝合金在普通铝合金的基础上增加20%的屈服强度,且保证同样的延伸率,见图4,部分纳米陶瓷铝合金6系牌号接近普通铝合金7系的强度;型材纳米陶瓷铝合金材料,有轻质高强的特点,解决了普通铝合金型材高强度无法挤压薄壁件的难题,见图5。

4 纳米陶瓷铝合金在汽车上的应用

纳米陶瓷铝合金材料具有高刚度、高强度、高抗疲劳、耐高温等优越性能。开发纳米陶瓷铝合金材料,通过优化设计,应用于汽车上的不同零部件,实现汽车降重、降成本、提高疲劳寿命等目标,见表5。

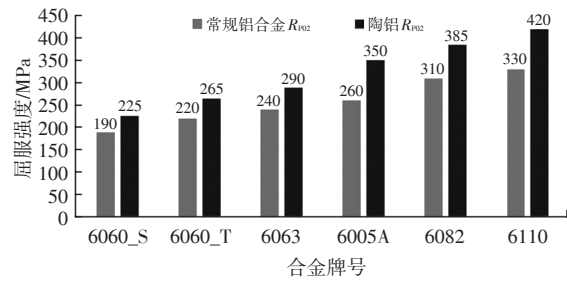


图4 纳米陶瓷铝合金与普通铝合金屈服强度对比



图5 纳米陶瓷铝合金挤压薄壁件

表5 纳米陶瓷铝合金在汽车上的应用

材料	应用	零件	效益
铸造材料	底盘零部件	副车架、转向节、车轮支架、控制臂	以铸代锻,降重、降成本
型材	车身结构件	新能源车电池盒、防撞梁、门槛加强件	降重、降成本
耐高温材料	发动机零部件	活塞、缸体、缸套、飞轮壳	降重、提高寿命、降低排放
3D打印材料	模具、试验样品	涡轮增压叶片、热交换器、管接头等	快速制造加工复杂结构的零件、减少开发阶段的开模费用和实验周期

4.1 铸造纳米陶瓷铝合金

铸造纳米陶瓷铝合金新材料可应用于汽车底盘零件,如副车架、转向节、车轮支架、控制臂等,见图6,尤其是一体化副车架,以及目前正在研究的一体化后地板,均可使用该材料,可显著降低汽车质量,提升操控性。

采用该铸造纳米陶瓷铝合金材料生产的转向

节可达到锻造转向节水平,具体性能指标见表6,铸造纳米陶瓷铝合金材料采用铸造工艺,接近常规6082Al T6锻造材料水平。

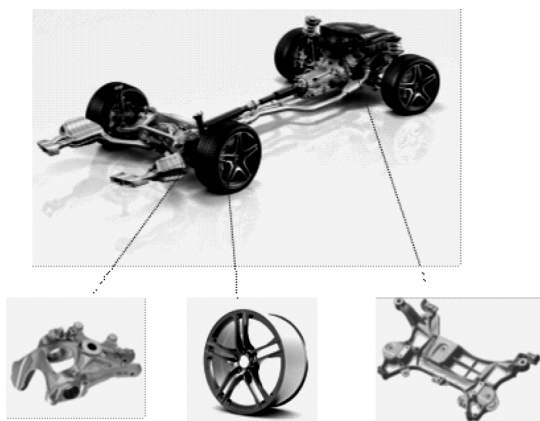


图6 铸造纳米陶瓷铝合金在汽车底盘零件上的应用

表6 纳米陶瓷铝合金铸造转向节性能	
试制零件	零件性能
普通锻造转向节	抗拉强度:340~346 MPa 屈服强度:300~306 MPa 延伸率:8.0%~9.6%
纳米陶瓷铝合金铸造转向节	抗拉强度:340~365 MPa 屈服强度:300~315 MPa 延伸率:8.1%~9.1%

4.2 型材纳米陶瓷铝合金

质量轻、强度高的型材纳米陶瓷铝合金材料可应用于车身结构件,如防撞梁、门槛加强件、新能源车电池盒等,见图7,可显著减轻汽车质量,减小壁厚,提升可靠性。型材纳米陶瓷铝合金在同等强度下,壁厚比常规铝合金型材薄,可结合产品结构优化设计。

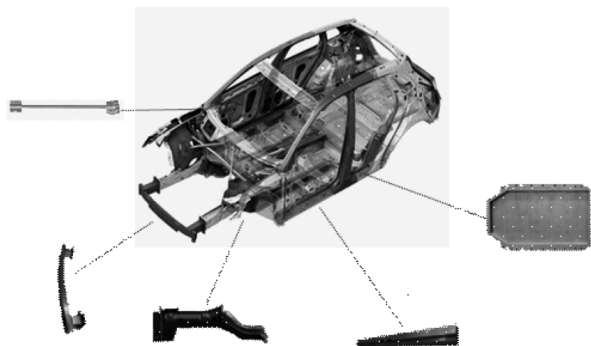


图7 型材纳米陶瓷铝合金在汽车白车身零件上的应用

型材纳米陶瓷铝合金力学性能可达到以下水平:抗拉强度 ≥ 350 MPa、屈服强度 ≥ 330 MPa、延伸率 $\geq 8\%$ 。由于壁厚的减薄和设计优化。在成本不变情况下,可用于电池托盘等产品,见图8,与传统

铝合金 A356 材料相比,预计降重 20% 以上。

4.3 耐高温纳米陶瓷铝合金

按照国 V、国 VI 及以上排放要求,不断增加的发动机升功率,不断增长的活塞寿命,传统耐高温铝合金已经不能满足要求,耐高温纳米陶瓷铝合金与常规耐高温铝合金材料比较,高温抗拉强度、抗热疲劳性能、耐腐蚀性及耐磨性显著提高,可广泛应用于发动机内零件,见图9。

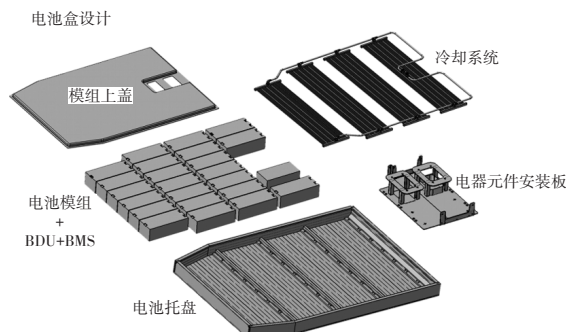


图8 型材纳米陶瓷铝合金应用于汽车电池托盘

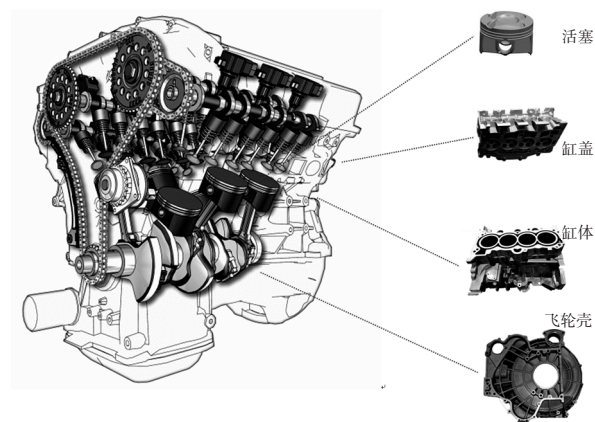


图9 耐高温纳米陶瓷铝合金应用于汽车发动机

开发耐高温纳米陶瓷铝合金材料,比较传统铝合金 A356 材料,材料强度提高 8%,耐磨性提高 10%;试制活塞在高速高负荷工况下摩擦功损失降低 2%~3%,预计可降重 10%,降低成本 5%;试制缸体预计可降重 5%、但成本会小幅增加,随着材料用量增加,材料价格将降低,零件成本亦降低(以上数据待验证)。

4.4 纳米陶瓷铝合金 3D 打印材料

纳米陶瓷铝合金 3D 打印材料具有高的激光吸收率,晶粒尺寸细小,经 3D 打印后可实现零件定制化、轻量化、复杂结构一体化,零件性能达到和超过锻件水平,具体见表7。

通过使用纳米陶瓷铝合金 3D 打印材料可以快

速制造加工复杂结构的零件,例如涡轮增压叶片、热交换器、管接头等,见图10,这样可以减少开发阶段的开模费用和实验周期。

表7 纳米陶瓷铝合金3D打印材料性能

合金体系		抗拉强度 /MPa	断后伸长 率/%	弹性模量 /GPa
6082 铝 合金	锻态	340	9~12	70
	铸态	310	2.5	71
Al-Si 系 合金	3D打印纳米 陶瓷铝合金	530	15	95

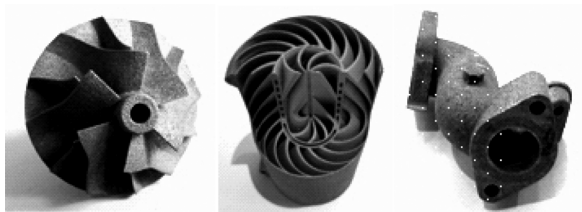


图10 纳米陶瓷铝合金3D打印材料应用于汽车复杂结构零件

5 结论

依据此种强铝基复合材料原位自生纳米陶瓷颗粒优异的特点,使其具有可设计性,实现对各种牌号铝合金进行陶瓷铝合金化,在基体铝合金铸件、型材、板材性能基础上进一步提高材料强度,同时提升弹性模量、比强度、比刚度。

纳米陶瓷颗粒增强铝基复合材料应用在汽车上的效果如下。

(a)铸造纳米陶瓷铝合金材料:采用铸造陶铝材料以铸代锻,可降重降成本;以铸代铸,可降重、但成本会小幅增加,随着材料用量增加,材料价格将降低,零件成本亦降低。

(b)型材纳米陶瓷铝合金材料:陶瓷铝合金型材新材料采用高强度陶瓷铝合金型材,(抗拉强度 ≥ 350 MPa、屈服强度 ≥ 330 MPa、延伸率 $\geq 8\%$)。由

于壁厚减薄和设计优化。在成本不变情况下,可用于电池托盘等产品,预计降重20%以上。采用与普通型材铝合金(如3系、4系、5系铝合金等)同等系列材料时,型材纳米陶瓷铝合金材料强度要比普通型材铝合金高,因此纳米陶瓷型材铝合金有一定的减薄空间,预计降重10%以上,可用于防撞梁等产品。

(c)耐高温纳米陶瓷铝合金材料:耐高温陶瓷铝合金材料比较现有材料,其材料强度提高8%,耐磨性提高10%。试制活塞在高速高负荷工况下摩擦功损失降低2%~3%,预计可降重10%,降低成本5%;试制缸体预计可降重5%、但成本会小幅增加,随着材料用量增加,材料价格将降低,零件成本亦降低。

(d)纳米陶瓷铝合金3D打印材料:3D打印陶铝材料经3D打印后,可实现零件定制化、轻量化、复杂结构一体化,零件性能达到和超过锻件水平。

参考文献:

- [1] 赵宇, 吴婉. SiC 颗粒增强铝基复合材料的制备及组织分析[J]. 热加工工艺, 2016, 45(2): 98-103.
- [2] 张松利, 张振坤, 赵玉涛. (Al₂O₃+Si)/Al 系铝基复合材料的原位制备及性能[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(1): 16-21.
- [3] 尹洪峰, 任耘, 罗发. 复合材料及应用[M]. 西安, 科学技术出版社, 2003: 75.
- [4] FROUM IN N, FRAGE N, AIZENSHTEIN M, et al. Interface reaction in B4C/(Cu-Si)system [J]. Acta Materialia, 2004, 52(9): 2625.
- [5] SAIZ E, TOM SIA AP, SUGANUMA K. Wetting and strength issues at Al/ α - alumina interfaces [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23: 2787-2796.