

航空用粉末冶金颗粒增强铝基复合材料研制及应用*

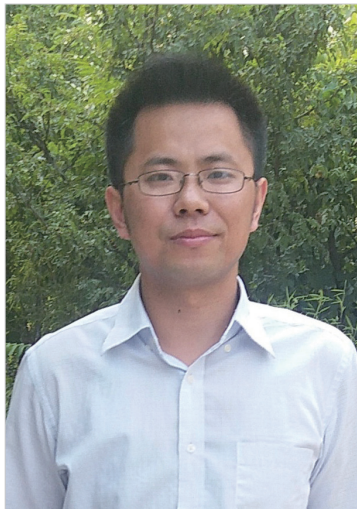
聂俊辉, 樊建中, 魏少华, 刘彦强

(北京有色金属研究总院国家有色金属复合材料工程技术研究中心, 北京 100088)

[摘要] 简要分析了颗粒增强铝基复合材料的性能优势, 阐述了铝基复合材料基体与增强体组元匹配性设计准则, 评述了国内外粉末冶金工艺制备的颗粒增强铝基复合材料组织与性能特点。此外, 较为详尽地总结了国内外先进颗粒增强铝基复合材料坯锭与构件的工程化制备技术以及复合材料无损检测的研究现状。最后还列举、分析和展望了颗粒增强铝基复合材料在航空领域的应用方向。

关键词: 粉末冶金; 颗粒; 铝基复合材料; 航空

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.16.026



聂俊辉

博士, 高级工程师, 主要从事航空航天、电子封装、核屏蔽领域用铝基复合材料的研制与应用工作。承担和参与国家 863 计划、973 计划、国家重点研发计划、横向合作课题多项, 申请与授权国家专利 10 余项。

金属基复合材料具有低密度、高比刚度和比强度、良好的高温和耐磨损性能, 近年来在汽车、电子通讯、航空航天、体育用品等领域获得了广泛的应用^[1-5]。为了获得性能优异的金属基复合材料, 除了需要考虑基体和增强相各自的性能外, 还要确保制备过程中增强相与基体之间具有良好的化学相容性, 以获得理想界面结合的复合材料。由于铝合金密度低, 有析出强化、良好的耐腐蚀性、高热导率和电导率, 以及优异的阻尼性能等综合性能优势, 使其在众多材料中(Cu、Ti、Fe、Mg 等)成为最常用的基体材料。据统计(图 1)^[4], 世界上各大公司生产的金属基复合材料产品中, 铝基复合材料的占有量达到金属基复合材料总产量的一半左右, 使用量最大。在增强相中, 由于 SiC_p 具有低密度、高刚度和硬度、良好的高温性能、耐磨性、高热导率以及低廉的制备成本, 同时与铝合金等基体材料具有良好的化学相容性等综合性能, 使

其在金属基复合材料产品中最常被使用(图 2)^[4]。

从颗粒增强铝基复合材料的性能来看, 铝基复合材料在力学和热学性能方面均表现出明显的优势。图 3 为颗粒增强铝基复合材料与传统金属材料性能对比^[6], 从图 3 可以看出, 铝基复合材料具有更高的比刚度和比强度, 可以较好地满足航空结构件等关键部件对材料高强度和模量的要求; 同时铝基复合材料具有低密度、高热导以及低膨胀的优点, 可有效克服钢铁、钛合金等材料密度大、导热差, 以及铝合金材料热膨胀系数高的不足, 在雷达、电子通讯等方面具有广泛的应用。此外, 颗粒增强铝基复合材料可以根据性能要求对增强相与基体进行组元灵活配比, 获得达到预计性能要求的新型材料, 可设计性强, 具有十分广泛的应用前景^[1-5]。

然而, 虽然颗粒增强铝基复合材料使用量大、应用面广, 但仍需要解决好材料在制备、加工以及构件

* 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0703100)。

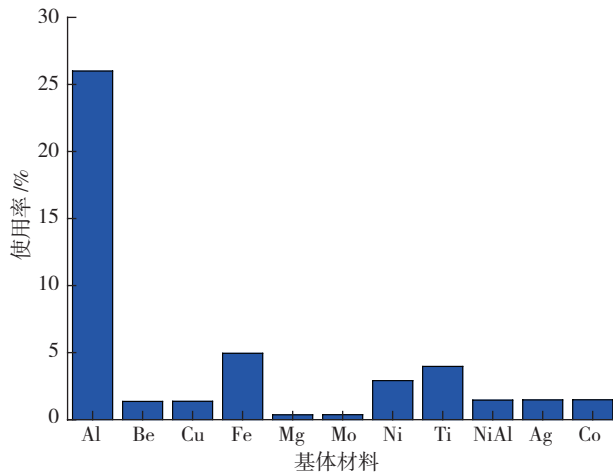


图1 金属基复合材料产品中各基体材料的使用率

Fig.1 Usage of matrix materials in metal matrix composites

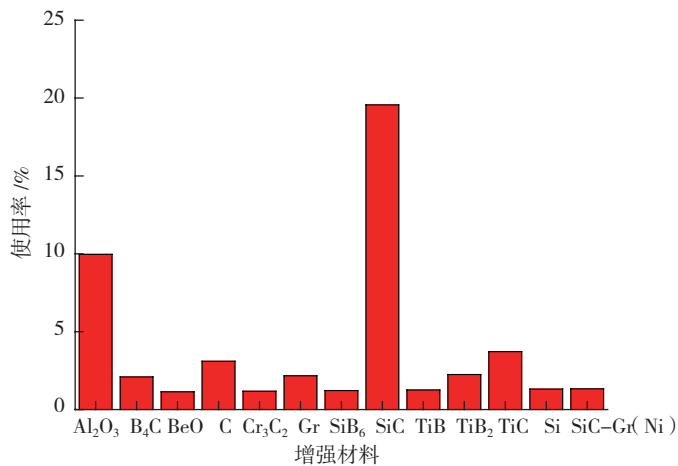


图2 金属基复合材料产品中各增强相的使用率

Fig.2 Usage of particulate in metal matrix composites

检测过程中面临的系列工艺技术难题,才能制备出达到预期性能要求的零件,并最终实现应用。本文将从颗粒增强铝基复合材料的组元配比设计、材料组织性能、工程化制备、实际应用等方面展开介绍,力求通过研制技术与应用层面的梳理、改进,促进我国颗粒增强铝基复合材料在航空等高技术领域获得更快、更好的发展。

颗粒增强铝基复合材料的组元配比设计

材料的设计准则是以满足特定应用需求为前提的。以航空结构件为例,要求材料耐疲劳、耐磨损,同时具有高比强度和比刚度,以满足

航空结构件苛刻的力学承载要求。然而铝基复合材料在强度和刚度提高的同时往往会降低塑性与韧性,导致二次加工成型性差,材料在服役过程中容易发生构件断裂,存在较大的应用安全隐患。因此,需要优选铝基复合材料的基体与增强体组元,通过组元之间的合理优化配比,使材料兼具良好的强度和塑性综合性能,进而满足航空承力结构件的使用要求。本文选取了3种铝基体、3种增强相颗粒,对其进行组元配比制备铝基复合材料,探究材料组元配比对强度和塑性的影响。前期获得的部分研究结果见图4,大致规律如下:

(1)就特定强度的铝基体,增

强颗粒的强化能力随颗粒刚度和强度的增加而增大(颗粒刚度和强度大小顺序为 $Si < Al_2O_3 < SiC$);就特定刚度和强度的增强颗粒,颗粒的强化作用随基体强度的增加而减小(基体强度大小顺序为 $Al < 6061Al < 2009Al$)。

(2)增强颗粒种类中,高模量和强度的 SiC_p 强化作用最大,最适合作增强体;基体种类中,纯Al基体中颗粒的强化作用最大,但不适用于航空结构件的高强度要求。2009Al强度高、加工硬化率较大,具有较高的承担、传递应力能力,比较适合做基体。

(3)就特定刚度和强度的增强颗粒,随着基体强度的增加,复合材料与基体材料的延伸率比降低;就特定强度的基体, SiC_p 颗粒增强的复合材料延伸率大于Si颗粒增强铝基复合材料, SiC_p 适合做增强颗粒。

此外,复合材料强度和韧性也受增强相粒径大小的影响。本研究前期开展了不同粒径($3.5\sim 13\mu m$)的 SiC_p 对航空承力结构件用15% $SiC_p/2009Al$ 复合材料的断裂韧性影响规律研究(图5(a)),发现 SiC_p 粒径在 $7\mu m$ 时,复合材料才能获得最佳的断裂韧性值,增加或降低颗粒尺寸,断裂韧性均降低^[7]。国外的研究也得到了相似的结果(图5(b)),发现在不同粒径 Al_2O_3 颗粒增强的Al-4.5Cu复合材料中,当复合材料基体状态一定时,50% $Al_2O_3/Al-4.5Cu$ 的断裂韧性均随增强相尺寸的增大而呈现先增加后减小的规律,只有合适尺寸的 Al_2O_3 颗粒才能使复合材料获得最佳的断裂韧性值^[8]。

上述研究结果表明,铝基复合材料的力学性能与基体和增强体之间的匹配性密切相关,复合材料组元匹配设计非常重要。通过合理的对基体和增强体进行组元配比,可以获得力学综合性能最佳的复合材料,满足航空等领域的应用需求。

颗粒增强铝基复合材料 组织与性能

铝基复合材料的基体与增强体

组元确定后,需要借助制备工艺才能获得致密化的复合材料坯锭。目前较成熟的颗粒铝基复合材料的制备方法包括粉末冶金、搅拌铸造、喷

射沉积和浸渗工艺等^[9-10]。不同制备工艺各有优缺点,但最终目标都是为了获得组织性能优异的复合材料。材料制备过程中各工艺均需要解决

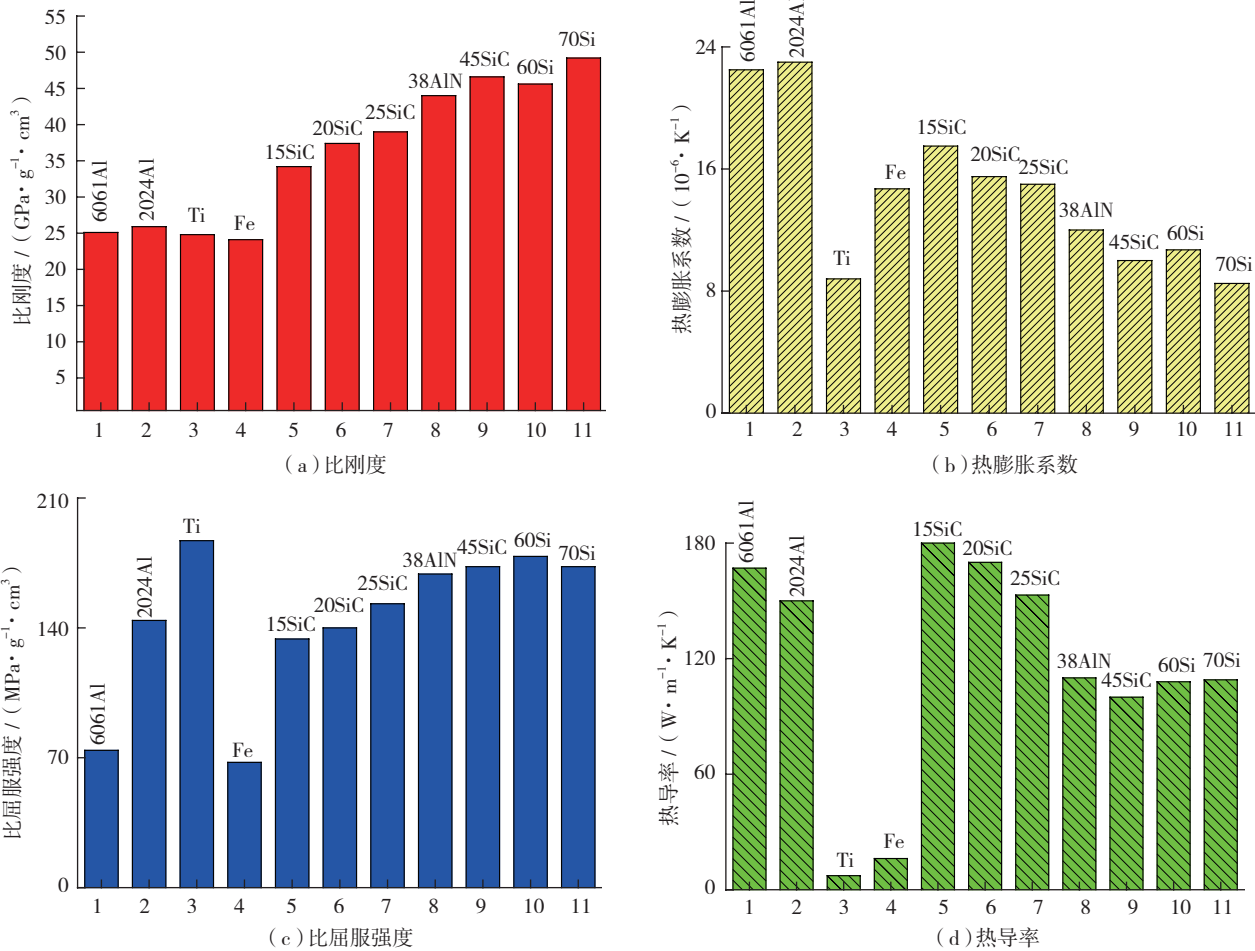


图3 颗粒增强铝基复合材料与传统金属材料性能对比

Fig.3 Performance comparison between Al matrix composites and traditional metal materials

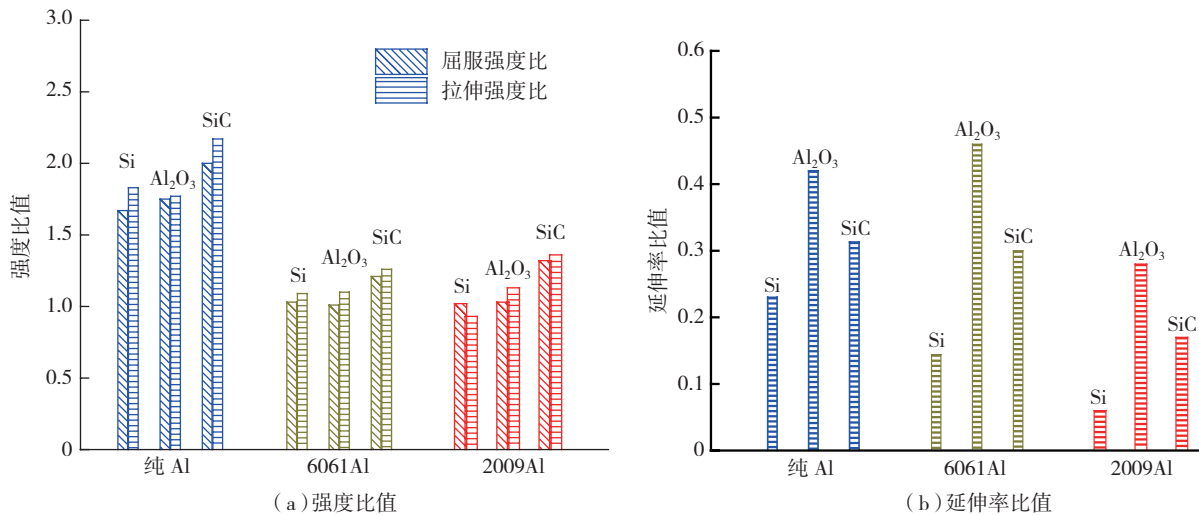


图4 颗粒增强铝基复合材料与基体力学性能比较

Fig.4 Mechanical property comparison between Al matrix composites and matrix alloys

以下问题:

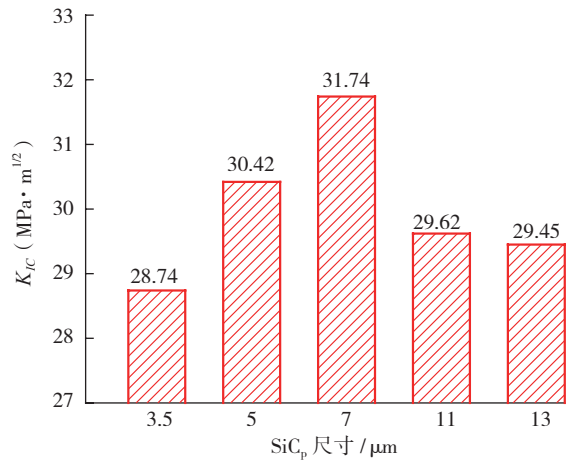
(1) 陶瓷增强相的均匀分散。通过强力搅拌、气流/化学分散、高效球磨混粉等分散技术,减少增强颗粒的团聚或偏聚,实现均匀分布。

(2) 复合材料的全致密化。通过固化或烧结技术,消除坯料内部的孔隙,避免裂纹萌生。

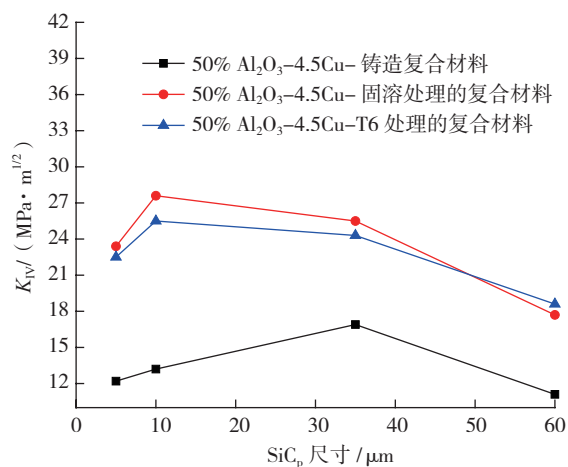
(3) 基体-增强体界面的良好结合。对增强相进行预处理,促进基体-增强相润湿性、相容性;降低制备温度,避免脆性界面产物生成。

由于粉末冶金工艺的可靠性和稳定性,可较好解决以上制备技术难题,目前已证明是最适于制备颗粒增强铝基复合材料航空部件的制备工艺。例如美国 DWA 公司、英国的 AMC 公司、美国 Talon 公司均是采用粉末冶金制备颗粒增强铝基复合材料,材料获得了优异的综合性能(表 1),研制的构件已经大量供货美国和欧洲的军用飞机、武装直升机和巡航导弹等武器。

北京有色金属研究总院是国内采用粉末冶金工艺制备颗粒增强铝基复合材料的代表性单位之一。首先通过气雾化工艺制备超细低氧含量的航空用铝合金粉末;然后进行粉末冶金均匀化混粉、冷等静压、热压或热等静压成型复合材料坯锭;再经过挤压、轧制或锻造等二次加工成型不同规格的铝基复合材料坯件,并进一步促进颗粒的均匀分布与坯料致密化,工艺路线见图 6。表 2 为北京有色金属研究总院采用粉末冶金工艺制备的铝基复合材料的性能,其中 15%~25%SiC_p/Al 复合材料由于具有较高的强度和耐疲劳性能,同时保持良好的断裂韧性与延伸率,被用于航空主承力结构件;而中高体积分数 40%~70% SiC_p/Al 复合材料除了具有较高的模量外,还具有低的热膨胀系数和高的热导率,尺寸精度和热稳定性强,用于无人机和巡航导弹等高精度导航器件;研制的 B₄C



(a) 15% SiC_p/2009Al 复合材料



(b) 50% Al₂O₃/Al-4.5Cu 复合材料

图5 颗粒尺寸对铝基复合材料断裂韧性的影响

Fig.5 Influence of particle size on fracture toughness of Al matrix composites

表1 国外粉末冶金工艺制备的铝基复合材料性能

材料来源及参数	15.5SiC /2009Al	25SiC /6092Al	50SiC /6063Al	25SiC /2124Al	40SiC /6061Al	25B ₄ C /6092Al	35B ₄ C /6092Al
来源	美国 DWA	美国 DWA	美国 DWA	英国 AMC	英国 AMC	美国 Talon	美国 Talon
弹性模量 E/GPa	96	115	178	115	140	111	132
密度 ρ/(g·cm ⁻³)	2.82	2.82	2.90	2.88	2.90	2.65	2.64
抗拉强度 R _m /MPa	550	520	—	700	570	414	414
屈服强度 R _{p0.2} /MPa	370	420	—	480	480	345	345
延伸率 A/%	7	5	—	5	2.5	2	0.75
热导率 λ/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	—	—	218	150	130	145	125
25~100℃热膨胀系数 α/(×10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	—	15.3	9.9	15.5	13.4	16.2	14.2

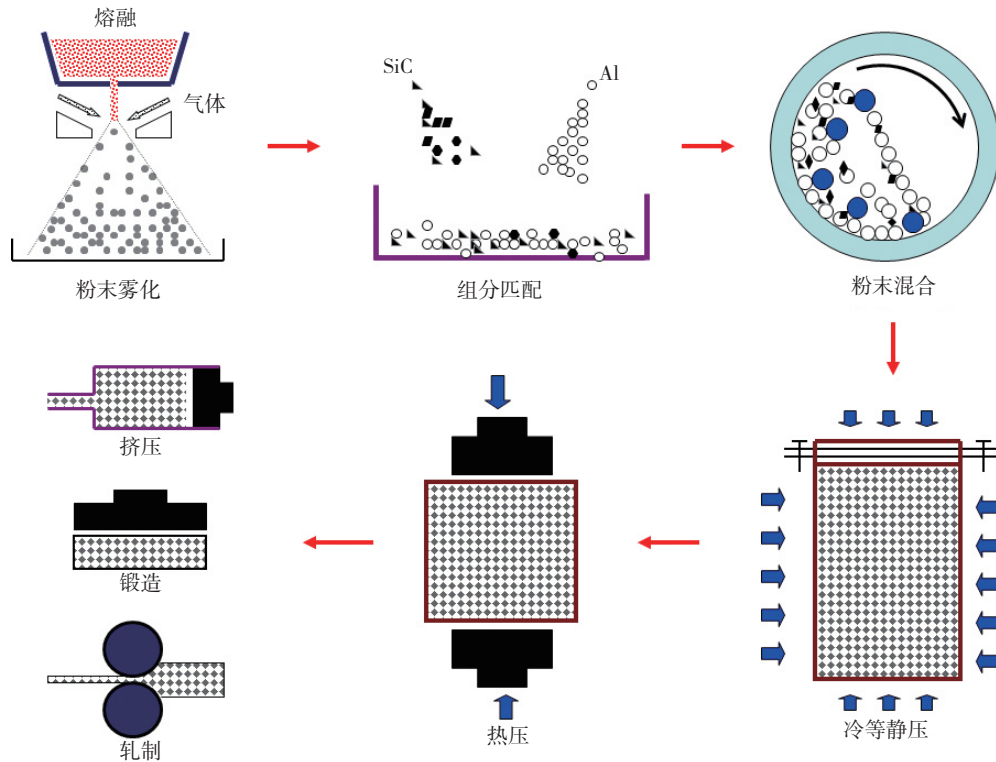


图6 颗粒增强铝基复合材料粉末冶金制备工艺

Fig.6 Powder metallurgy process for fabricating particle reinforced Al matrix composites

与 AlN 增强的铝基复合材料由于性能优异在航空高精度仪表零部件中也获得了应用。图 7 为粉末冶金工艺研制的颗粒增强铝基复合材料的微观组织,显示材料内部无孔洞等缺陷,增强相颗粒分布较均匀。

颗粒增强铝基复合材料的工程化制备

1 粉末冶金铝基复合材料坯锭制备与塑性加工

铝基复合材料坯锭与构件工程化研制方面,国外已经形成了成套的工程化制备技术,解决了包括坯锭制备、热挤压、锻造、轧制、焊接、热处理等一系列工艺问题。如美国的 DWA 公司可研制出单重几百 kg 的粉末冶金坯锭(年产量 100t 以上);英国 Adtek International Ltd 和法国 Creuzet Aeronautique 完成了复合材料模锻、热挤压与轧制工艺研究;法国 Forges de Bologne 开展大尺寸、复杂形状 15%SiC_p/2009Al

表2 国产粉末冶金工艺制备的铝基复合材料性能

材料性能参数	15SiC/ 2009Al	20SiC/ 2009Al	25SiC/ 2009Al	40SiC/ Al	55SiC/ Al	65SiC/ Al	70SiC/ Al	35B ₄ C/ Al	35AlN/ Al
密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.83	2.85	2.87	2.95	3.00	3.05	3.07	2.65	2.86
弹性模量 E / GPa	97	105	112	155	200	225	245	147	130
断裂韧性 K_{IC} / ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	30	25	20	13.5	11.0	10.0	—	—	—
抗拉强度 R_m / MPa	570	590	650	640	430	380	320	406	520
屈服强度 $R_{p0.2}$ / MPa	400	410	440	511	—	—	—	277	—
延伸率 A / %	8	4	4	1	0.5	—	—	2	—
弯曲强度 σ_f / MPa	—	1045	1037	1010	620	550	510	656	—
热导率 λ / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	200	174	153	—	200	219	225	114	—
25~100℃热膨胀 系数 α / ($\times 10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$)	17.5	16.3	14.5	13.5	9.5	8.2	7.2	13.7	12.0
轴向疲劳强度/ (1×10^7 MPa)	360	—	—	—	—	—	—	—	—

复合材料锻件精密等温锻造工艺研究,生产直升机复合材料旋翼连接件、动环与不动环、导弹用零部件。国内经过“十一五”、“十二五”阶段的技术发展,大型颗粒增强铝基复合材料制备工艺技术也已十分成熟。北京有色金属研究总院采用粉末冶金工艺可制备出单锭从几十 kg 至吨级重量的颗粒增强铝基复合材料坯锭,实现了扁圆形、方形、薄板、梯形等不同形状、不同尺寸粉末冶金坯料的制备和近终成型;突破了大尺寸难变形颗粒增强铝基复合材料的挤压、轧制、环轧、自由锻、等温锻造等各种塑性变形工艺技术,缩小了与国外先进技术之间的差距。图 8 与图 9 为北京有色金属研究总院采用粉末冶金工艺制备的颗粒增强铝基复合材料坯锭和塑性加工后的棒材、锻饼和轧制件实物,可满足不同用户的应用需求。

2 粉末冶金铝基复合材料表面加工与处理

粉末冶金坯锭与塑性加工后的构件表面质量一般还无法满足航空零部件的高质量要求,需要进一步的精密加工才能获得高精度的零部件。由于铝合金中添加了高硬度、耐磨的陶瓷相颗粒,导致材料的机械加工难度增大、加工效率低下。合适的加工工艺和加工工具对实现复合材料高效与高精度加工尤为关键,如采用金刚石锯片和铣刀的加工效率和精度要远高于普通硬质合金工具;而尽量降低加工速率和减少单次切削量可以增加构件的加工精度,也有利于减少刀具的发热与磨损。图 10 为北京有色金属研究总院研制的 20%~60% SiC/Al 复合材料薄片经机械加工后的表面情况(尺寸 $1.0\text{mm} \times 75.0\text{mm} \times 130.0\text{mm}$),可以看出厚度为 1mm 的复合材料材料薄板试样表面加工质量良好,未出现翘曲、蹦边等情况,这也为精密构件的机加工提供了保障。

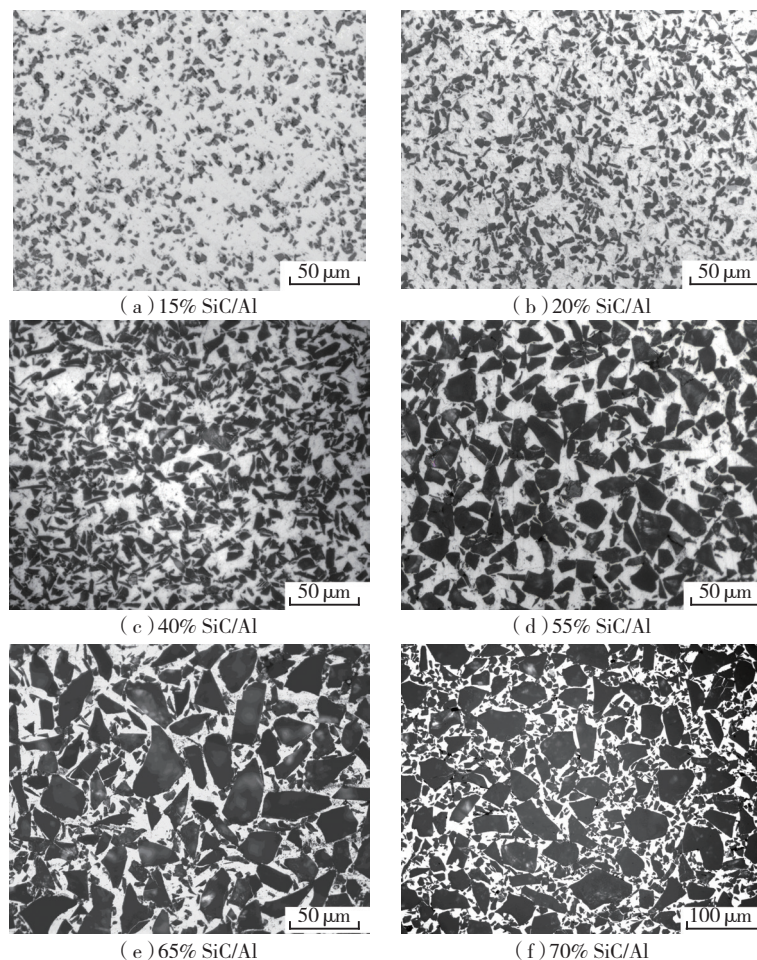


图7 粉末冶金工艺制备的SiC/Al复合材料的微观结构

Fig.7 Microstructures of powder metallurgy fabricated composites

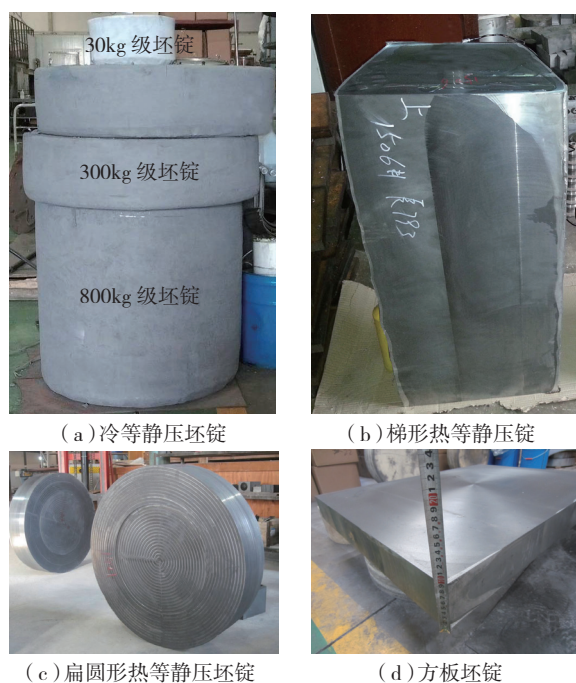


图8 粉末冶金铝基复合材料坯锭

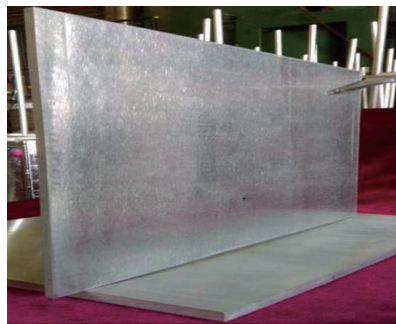
Fig.8 Powder metallurgy fabricated Al matrix composite billets



(a) 挤压棒



(b) 锻件



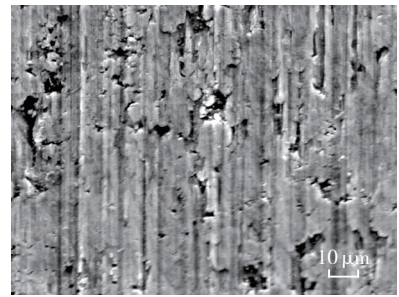
(c) 轧板



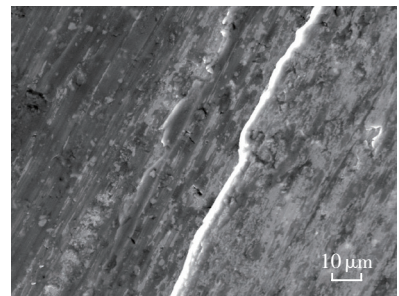
(d) 环轧件

图9 粉末冶金铝基复合材料塑性加工构件

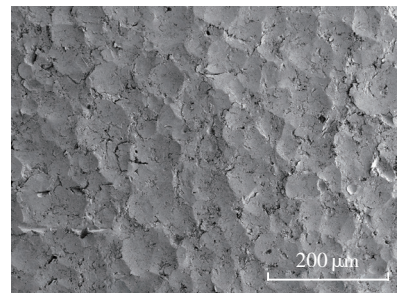
Fig.9 Powder metallurgy fabricated Al matrix composites plastic forming components



(a) 机械加工后表面



(b) 抛光处理后表面



(c) 喷丸处理后表面

图11 15% SiC_p/Al复合材料锻件表面处理形貌

Fig.11 Surface morphologies of 15% SiC_p/Al composites after surface treatments

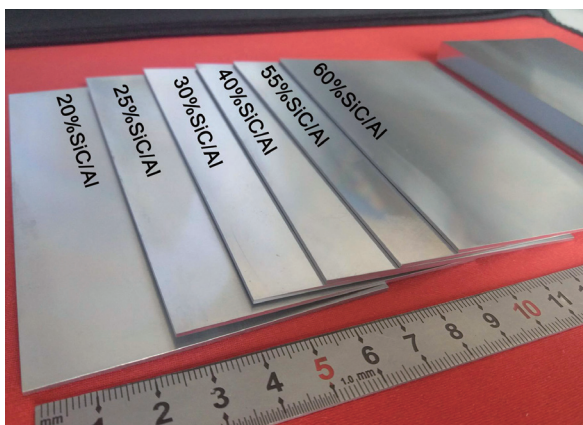


图10 机械加工后SiC/Al基复合材料薄片

Fig.10 Surface states of SiC/Al composites after machining

此外,有时根据颗粒铝基复合材料的特殊应用要求,需要对材料进行抛光、喷丸等表面处理,以使表面状态达到零部件的技术要求。图11为经过机械加工、抛光、喷丸处理的材料表面形貌存在明显差异。图12为表面经过机械加工和喷丸处理后材料的疲劳性能,机械加工和喷丸

处理的材料得到了不同的疲劳性能结果,表明表面状态对复合材料的力学性能影响的重要性。通过进一步与欧洲宇航研制的15% SiC_p/Al复合材料、2024Al合金的疲劳性能进行对比,发现本研究表面加工处理后的15% SiC_p/Al复合材料疲劳强度更优,这可能是由于适当的表面处理工艺对复合材料疲劳性能起到了提升作用,但该观点还需更系

统全面的后续研究进行确定。

复合材料在服役过程中如遇到周围环境中的氧、光、水蒸气、微生物等多种因素作用时,可能导致材料遭受腐蚀破坏甚至丧失使用价值,因此材料在服役过程中的防腐就显得十分必要。工程化上最常用的方法是在构件表面生成或涂覆一层耐腐蚀性保护层以隔绝构件与腐蚀环境的接触,从而减小或避免腐蚀现象发生,提高服役寿命。北京有色金属研究总院前期对航空用的15% SiC_p/2009Al复合材料表面进行阳极氧化和沸水封孔表面处理,并对构件进行了防腐效果检测。图13为阳极氧化前后SiC_p/2009Al复合材料在

3.5% NaCl 溶液中浸泡 0.5h 的阻抗谱图,阳极氧化后的复合材料在整个测试频率范围内表现为纯电容特征,说明氧化膜的阻抗相当大,阳极氧化膜有效地阻挡了水和腐蚀性阴离子的侵入,表现出相当优异的耐蚀能力,大大提高了铝基复合材料的耐蚀性能^[11]。

3 铝基复合材料质量检测

颗粒增强铝基复合材料在制备过程中会面临着颗粒分布微观不均匀、致密度差、坯锭各部位组织性能不均匀等缺陷产生,所以采用无损检测方法检验坯锭质量及一致性是保证后续研究工作开展的关键工序。此外,对于构件而言,高稳定和高可靠性是复合材料作为航空领域重要结构材料的关键指标,而无损检测技术是检验该技术指标的重要手段之一。目前国内外多选用超声波无损探伤检测技术对金属基复合材料及构件进行缺陷评价与预测。如法宇航、ACMC 公司、Arco 公司、美国西屋研究与发展中心均开展了金属基复合材料超声波无损检测评价工作。美国西屋研究与发展中心研究了 SiC/Al 复合材料锻件试样的超声衰减与材料断裂韧性的关系,根据试件背面反射回波反射次数的多少对材料确定了优、良、差 3 个等级(表 3)^[12]; Arco 化学公司则利用测量 SiC/Al 复合材料的声速来指导生产、改进工艺。

国内少数单位,如北京航空材料研究院、航天材料及工艺研究所、北京有色金属研究总院等单位也开展了金属基复合材料及构件的超声波检测工作。其中,北京有色金属研究总院在颗粒增强铝基复合材料超声波探伤方面具有 10 多年的研究与实际检测基础,具备研制不同类型高精度超声探伤对比试块的能力,可对不同形状、不同大小(几 kg 级至吨级)金属基复合材料坯锭与构件进行超声无损探伤检测,有效评定坯锭

与构件质量等级,为构件实际应用提供技术保障。图 14 为北京有色金属研究总院对航空用 15% SiC_p/2009Al 复合材料进行超声波检测后发现的 SiC_p 偏聚缺陷以及对应的超声波信号;图 15 (a) 为对几十个 15% SiC_p/2009Al 复合材料坯锭进行超声波检测后获得的声速结果,复合材料声速偏差控制在 $\pm 3\%$ 的范围,检测数据具有较高的稳定性;图 15 (b) 显示超声波声速与 SiC_p/Al 复合材料

弹性模量之间具有对应关系,根据声速的大小可间接获得材料的弹性模量大小。总之,通过建立复合材料超声波信息、组织缺陷、材料性能之间的对应关系,可有效对复合材料的缺陷进行评估与预测,确保复合材料构件质量得到保障。

粉末冶金铝基复合材料的应用及发展

由于优异的组织 and 力学性能,以

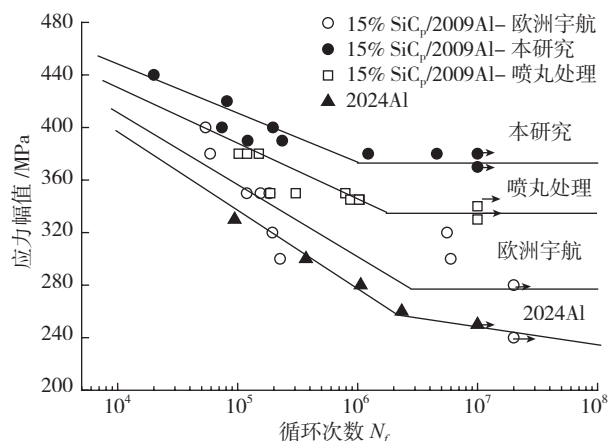


图12 15% SiC_p/Al复合材料的轴向疲劳性能

Fig.12 Fatigue property of 15% SiC_p/Al composites

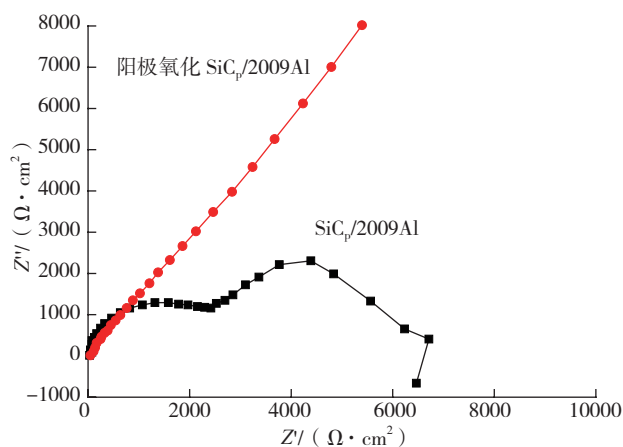


图13 阳极氧化SiC_p/2009Al在3.5% NaCl溶液中浸泡0.5h的阻抗

Fig.13 Impedance spectrum of anodic oxidation treated SiC_p/2009Al immersed in 3.5% NaCl solution for 0.5h

表3 SiC/Al复合材料锻件断裂韧性与超声衰减

试样代号	断裂韧性	背面反射次数	结论
2024Al	—	10	优
SEN-C1, SEN-C2	18.0	5~7	良
SEN-D1, SEN-D2	11.0	1~2	差

及大型、高精密构件的工程化技术保障,颗粒增强铝基复合材料已经在汽车、电子通讯、核屏蔽、体育用品、航空航天等领域获得了广泛的应用。特别是近年来随着世界范围内航空技术的迅猛发展,颗粒铝基复合材料在航空领域的应用已经取得了十分瞩目的成就。如美国 DWA 公司生产的 AA6092/17.5SiC_p 复合材料由于具有高的比强度、比刚度和长的

疲劳寿命,已经取代铝合金材料,用于 F-16 战机上的腹鳍(图 16 (a)),并且复合材料零部件的使用寿命提高了 4 倍,大大节省了飞机的维护保养成本。此外,在 F-16 战机上,采用 AA6092/17.5SiC_p 复合材料取代了铝合金材料用于制备 26 个可活动的燃油入口盖(图 16 (b)),承载能力提高了 28%,平均翻修寿命高于 8000h,裂纹检查期延长为 2~3 年^[13]。

法国 Eurocopter 公司采用 15% SiC_p/2009Al 复合材料锻件应用于 EC-120 直升机旋翼连接件(图 17 (a))和 NH90 的动环与不动环(图 17 (b)),该应用成果实现首次在航空一级运动零件上的使用,并且构件的疲劳强度比铝合金提高 50%~70%,弹性模量提高 40%,构件重量比钛合金获得大幅降低。美国 Boeing Military Aircraft and Missile Systems 则将铝基复合材料替代石墨/聚合物复合材料,用于 Boeing 777 商用飞机 Pratt and Whitney 4000 系列发动机导流叶片(图 17 (c)),提高了零件抵抗飞鸟等外来物冲击破坏的能力^[14]。

铝基复合材料还可作为战斗机的液压传动缸、飞机仪器支架、运输机侧翼、地板支撑杆和飞机防撞机组座椅支柱等,充分发挥了铝基复合材料的强度、刚度和耐磨损优势^[15]。

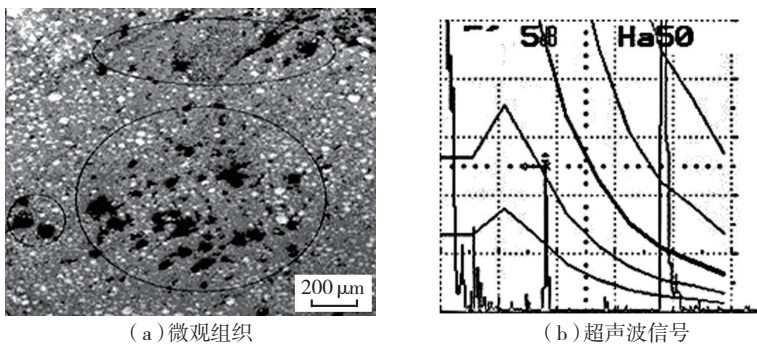


图14 粉末冶金SiC/Al复合材料微观组织超声波信号之间的关系

Fig.14 Relationship between composite microstructure and ultrasonic spectre imformation

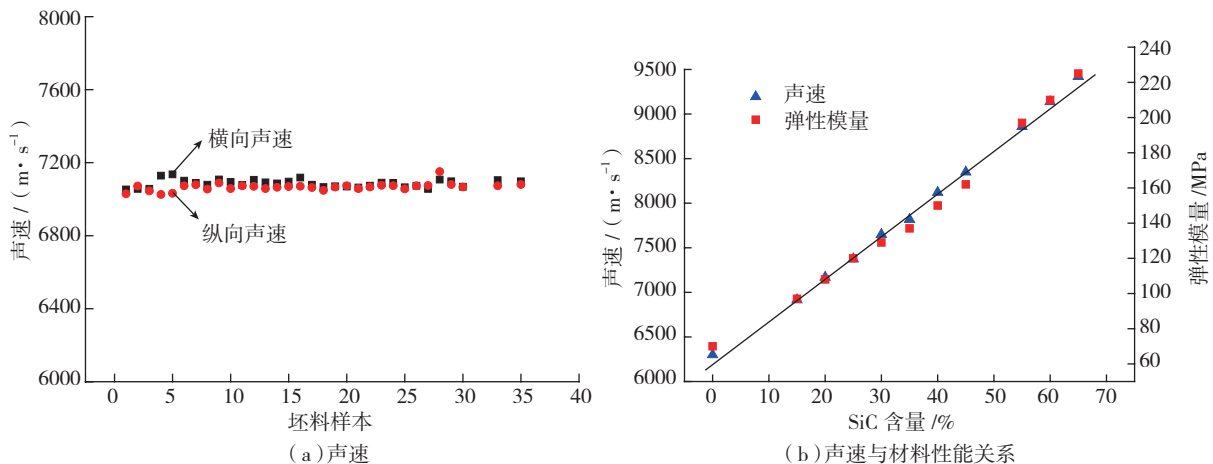
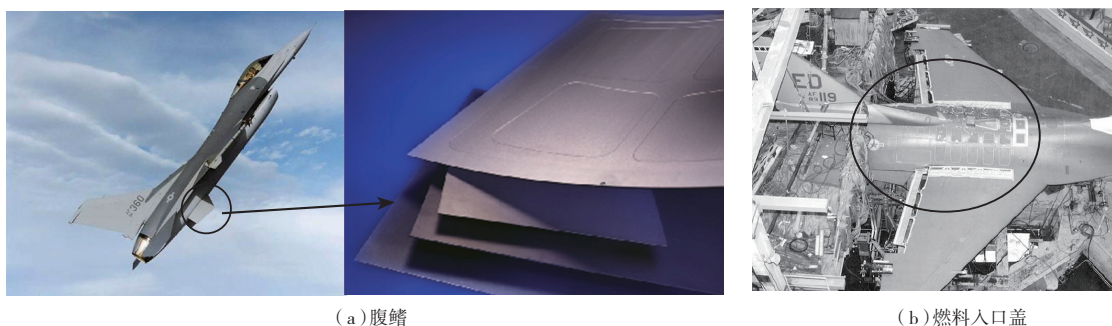


图15 粉末冶金SiC_p/Al复合材料的超声波声速与材料性能的关系

Fig.15 Relationship between ultrasonic sound velocity and composite performance of powder metallurgy SiC_p/Al composite



(a) 腹鳍

(b) 燃料入口盖

图16 F-16军用飞机的AA6092/SiC/17.5p复合材料

Fig.16 AA6092/SiC/17.5p composites used in ventral fins and fuel access doors of F-16 fighting Falcon

如欧洲空客将颗粒增强铝基复合材料取代纤维强化的聚合物用于机身支柱,以便降低构件的制备成本和提高损伤容限。此外,美国在 20 世纪 80 年代将 SiC_p/Al 复合材料替代铍,用于某型号惯性环形光钎陀螺螺制导系统,并且已经形成美国国家军用标准(MIL-M-46196)。作为第三代航空惯性器件材料, SiC_p/Al 还成功用于三叉戟导弹的惯性导向球及其惯性测量单元的检查口盖。ARCO 公司也开始批量化生产 SiC_p/Al 复合材料用于制造惯性测量元件,取得比铍材的成本低 2/3 的效果。在导弹部件的应用上,由于传统的铝合金无法满足高强度和耐高温要求,而颗粒增强铝基复合材料具有高强度和低密度,并且能承受导弹发射时的短时高温(发射时间短),被考虑用来制备导弹的弹翼和侧鳍^[2]。

在需求牵引下,我国也开展了颗粒增强铝基复合材料在航空领域的应用工作。经过“十一五”和“十二五”技术攻关,目前我国基本掌握了具有自主知识产权的颗粒增强铝基复合

材料制备工艺,性能已经接近国际先进领先水平,构件也实现装机应用,部分产品实现了批量生产。例如,北京有色金属研究总院采用粉末冶金技术研制了 SiC_p/Al 系列铝基复合材料,部分构件已经成功用于飞机主承力结构件(图 18),研制的 15% SiC_p/Al 航空锻件的疲劳性能达到国际先进水平,顺利经过了疲劳台架考核,目前已经在 XX 型号飞机上获得了应用,首次实现了该构件的国产化应用。中科院长春光学精密机械与物理研究所采用 55%~57% SiC_p/Al 复合材料制备航空机载光电稳定平台的主承力框架,得益于该材料优异的结构承载功能及卓越的热控功能,材料获得较高的系统稳定精度,全部通过考核定型试飞,后续材料还计划用于航空光电平台升降盘、安装盘、主承力框架、基板等关键构件^[16]。此外,随着服役过程温度的提高,如导弹发射产生的弹身部件瞬间高温、飞机高速飞行机身的升温,均对所用材料的高温性能提出了要求,而能够承受更高温(300℃以上)的耐热型铝基

复合材料有望实现应用,目前我国相关研究单位在这方面正开展部分研究工作。另一方面,随着未来无人化战争的发展趋势,采用无人飞行器平台对高风险战区实现近距离精确侦查和作战打击将发挥越来越重要的作用,高性能铝基复合材料有望在无人机的关键部件上获得广泛应用,市场前景良好。

结束语

在颗粒增强复合材料基体与增强体组元优化匹配、大尺寸复合材料坯锭工程化制备与塑性加工、表面处理、无损检测等成套研制技术的保障下,颗粒增强铝基复合材料以其优异的性能优势在航空领域获得了广泛的应用。面向未来,为促进铝基复合材料的进一步应用,并缩小与世界先进水平之间的差距,可从以下方面开展工作,促进我国颗粒增强铝基复合材料的发展:(1)形成体系化的工程化制备技术。建立起完善、系统的颗粒增强铝基复合材料工程化制备技术体系,确保铝基复合材料研制数据



图17 SiC_p/Al 复合材料制备的欧洲直升机连接件、主螺旋桨转向架、发动机导流叶片
Fig.17 SiC_p/Al composites used in rotor blade sleeve, rotor bogie in European helicopters and fan exit guide vane in turbines

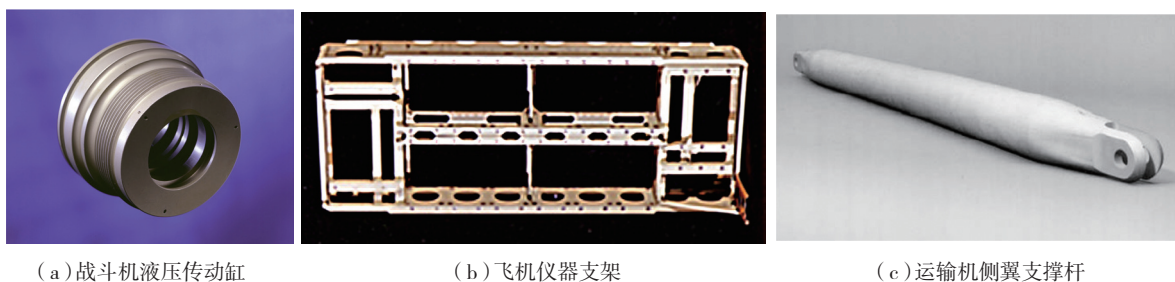


图18 SiC_p/Al 复合材料制备的战斗机液压传动缸、飞机仪器支架、运输机侧翼支撑杆
Fig.18 SiC_p/Al composites used in hydraulic cylinder for fighter, frame for aircraft instrument and transverse wing support struts for a transport aircraft

归档齐全、研制步骤记录翔实、研制过程具有可追溯性,确保材料质量稳定可靠。(2)复合材料构件的低成本高效制备。借鉴材料基因工程设计思想,通过高通量“设计-表征-制备-应用”的全链条设计,“短、平、快”地研制出面向特定应用目标的新型铝基复合材料,实现材料研制周期与成本双减半。(3)复合材料研制与应用对接。加强研制单位与应用单位之间相互交流、沟通,通过应用需求牵引,促进材料研制技术发展,更好地为应用服务,以良性发展促进整个铝基复合材料行业的进步。

参考文献

- [1] MCDANELS D L, SERAFINI T T, DICARLO J A. Polymer, metal, and ceramic matrix composites for advanced aircraft engine applications[J]. *Journal of Materials for Energy Systems*, 1986, 8(1):80-91.
- [2] SHAKESHEFF A J, PURDUE G. Designing metal matrix composites to meet their target: particulate reinforced aluminium alloys for missile applications[J]. *Materials Science and Technology*, 1998, 14:851-856.
- [3] KOLI D K, AGNIHOTRI G, PUROHIT R. Advanced aluminium matrix composites: the critical need of automotive and aerospace engineering fields[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2015, 2(4/5):3032-3041.
- [4] ADEBISI A A, MALEQUE M A, RAHMAN M M. Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis[J]. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2011, 4:471-480.
- [5] YASHPAL K, SUMANKANT, JAWALKAR C S, et al. Fabrication of aluminium metal matrix composites with particulate reinforcement: a review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2):2927-2936.
- [6] EVANS A, MARCHI C S, MORTENSON A. Metal matrix composites in industry: an introduction and a survey[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2003:90-310.
- [7] NIE J H, FAN J Z, ZHANG S M, et al. Tensile and fracture properties of 15vol%SiC_p/2009Al composites fabricated by hot isostatic pressing and hot extrusion processes[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, 27(5):875-884.
- [8] MISEREZ A. Fracture and toughening of high volume fraction ceramic particle reinforced metals[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2003:146-157.
- [9] IBRAHIM I A, MOHAMED F A, LAVERNIA E J. Particulate reinforced metal matrix composites—a review[J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26:1137-1156.
- [10] SRIVATSAN T S, IBRAHIM I A, MOHAMED F A, et al. Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composites[J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26:5965-5978.
- [11] 张文梅. SiC_p/2009Al复合材料的腐蚀行为研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2016.
- [12] ZHANG Wenmei. Study on the corrosion behaviors of SiC_p/2009Al composites[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2016.
- [13] MOTT G, LIAW P K. Correlation of mechanical and ultrasonic properties of Al-SiC metal matrix composite[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1988, 19(9):2233-2246.
- [14] MOURITZ A. Introduction to aerospace materials[M]. Sawston: Woodhead Publishing Limited, 2012:394-400.
- [15] CHAWLA N, CHAWLA K K. Metal matrix composites[M]. New York: Springer Science Business Media Inc., 2006:353-355.
- [16] CANTOR B, ASSENDER H, GRANT P. Aerospace materials[M]. Florida: CRC Press, 2001:107-108.
- [17] 程志峰, 张葆, 王平, 等. SiC/Al复合材料在机载光电稳定平台中的应用[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(1):130-133.
- [18] CHENG Zhifeng, ZHANG Bao, WANG Ping, et al. Application of SiC/Al composites in airborne photoelectric stable platform[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 34(1):130-133.

通讯作者: 樊建中, 教授, 研究方向为粉末冶金高强高韧铝基复合材料的制备技术、大尺寸复杂形状复合材料零部件的成型技术及应用、低膨胀铝基复合材料, E-mail: jzfan@grinm.com。

Research and Application of Powder Metallurgy Particle Reinforced Aluminum Matrix Composite Used in Aviation

NIE Junhui, FAN Jianzhong, WEI Shaohua, LIU Yanqiang

(National Engineering Research Center for Nonferrous Metal Composites, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

[ABSTRACT] In the present study, the performance advantages of particle reinforced aluminum matrix composites were briefly analyzed. The component matching design of aluminum matrix composites was expounded, and the microstructures and properties of aluminum matrix composites fabricated by powder metallurgy process were reviewed. In addition, the detailed engineering preparation and nondestructive testing technologies for Al matrix composites in China and abroad were introduced. In the end, this paper described and analyzed the application and development of particle reinforced aluminum matrix composites in aviation.

Keywords: Powder metallurgy; Particle; Al matrix composite; Aviation

(责编 李丹)