

文章编号: 1004 - 0609(2004)08 - 1286 - 09

陶瓷基复合材料伪半固态触变成形^①

罗守靖¹, 程远胜¹, 杜之明¹, 杨忠启²

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院 435[#], 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨市人民防空办公室, 哈尔滨 150001)

摘要: 半固态材料具有触变性和优良的组织结构, 即成形零件质量好, 力学性能与锻件的力学性能相近, 成形零件的尺寸和精度能达到净近成形或净终成形, 而传统陶瓷的制备主要根据粉末冶金方法通过成型和烧结工序完成。综合半固态金属加工技术、粉末冶金以及 21 世纪陶瓷成形发展的方向, 提出了一种新型成形方法—伪半固态触变成形, 从而为陶瓷复合材料以及高熔点材料在更多领域的应用起到了推进作用。

关键词: 伪半固态; 触变成形; 高熔点材料

中图分类号: TG 376

文献标识码: A

Ceramics matrix composites thixofroming in pseudo-semi-solid state

LUO Shou-jing¹, CHENG Yuan-sheng¹, DU Zhi-ming¹, YANG Zhong-qi²

(1. School of Materials Science & Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Harbin Citizen Air Defense Office, Harbin 150001, China)

Abstract: The materials in semi-solid state have thixotropy property and good histology, namely the quality of the formed parts is very well, mechanical property is near to that of the forging. At the same time, the size and the precision can get to the net-near-forming or net-end-forming. But the traditional ceramics were manufactured through forming and sintering based on the powder metallurgy. The semi-solid metal forming, the powder metallurgy and development direction of the ceramics forming in 21 century were synthesized, a new forming method—the thixofroming in pseudo-semi-solid state was proposed. It plays a very big role in accelerating the ceramics composites and using high melt point materials in more fields.

Key words: pseudo-semi-solid; thixofroming; high melt point materials

陶瓷基复合材料是 20 世纪 80 年代逐渐发展起来的新型材料, 由于具有耐高温、耐磨、耐高温蠕变、导热系数低、热膨胀系数低、耐化学侵蚀等特点, 在树脂基和金属基复合材料不能满足性能要求的情况下, 陶瓷复合材料得到了广泛的应用, 是结构复合材料中最活跃的研究领域, 主要用作机械加工材料、耐磨材料、高温耐蚀材料、轻型装甲材料、分离或过滤器材料等^[1]。在陶瓷基复合材料的

制备中, 由于存在增强相材料的处理如纤维的处理、分散、烧结等问题, 对复合材料的性能影响很大, 因此, 其制备技术在传统的陶瓷制备上又有了很多新的工艺, 例如浆液渗透与混合、化学气相渗透(CVI)和化学气相沉积涂覆(CVD)纤维。由于增强颗粒一般不用或很少用特殊处理, 因此颗粒增强复合材料多沿用传统陶瓷粉末冶金制备工艺, 即粉体制备、成型和烧结^[1, 2]。本文在传统工艺的基础

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375035)

收稿日期: 2003 - 12 - 19; 修订日期: 2004 - 03 - 08

作者简介: 罗守靖(1939 -), 教授, 博士。

通讯作者: 罗守靖, 教授; 电话: 0451 - 86418723; E-mail: dasheng21cn@hit.edu.cn

上, 结合半固态金属加工技术以及粉末冶金技术提出了一种陶瓷基复合材料成形的新工艺——陶瓷基复合材料伪半固态触变成形。

1 半固态金属加工技术

半固态金属加工技术是 21 世纪前沿性金属加工技术^[3-15]。半固态金属加工是金属在凝固过程中, 进行强烈搅拌或通过控制凝固条件, 抑制树枝晶生长或破碎所生成的树枝晶, 形成具有等轴、均匀、细小的初生相, 均匀分布于液相中的悬浮半固态浆料, 这种浆料在外力作用下, 当固相率达到 60% 时仍具有较好的流动性。利用压铸、挤压、模锻等常规工艺进行加工成形, 也可以用其他特殊的成形方法加工零件。这种既非完全液态、又非完全固态的金属浆料加工成形的方法, 就称为半固态金属加工技术 (semi-solid metal forming or semi-solid metal process, 简称 SSM)。

1.1 半固态金属加工主要工艺过程

半固态加工的主要成形手段有压铸、锻造、挤压和轧制等方法。其工艺路线主要有两条: 1) 将搅拌获得的半固态浆料在保持其半固态温度的条件下直接成形, 通常称为流变铸造, 如图 1 所示^[5]; 2) 将半固态浆料制备成坯料, 根据尺寸下料, 再重新加热到半固态温度成形, 通常被称为触变成形, 如图 2 所示^[5]。对于触变成形, 由于半固态坯料便于输送, 易于实现自动化, 因而在工业中得到了较早

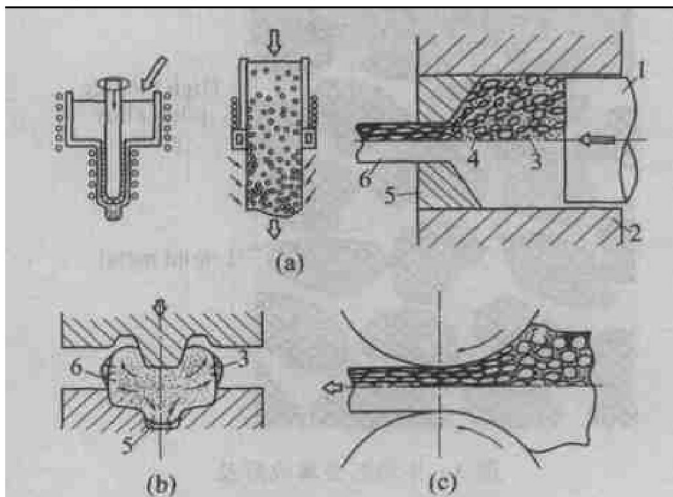


图 1 流变锻造工艺流程图

Fig. 1 Rheoforging technology flow chart

(a) —Extrusion; (b) —Forging; (c) —Roller milling;

1 —Punch; 2 —Squeegee silo; 3 —Liquid;

4 —Solid; 5 —Cavity die; 6 —Sample

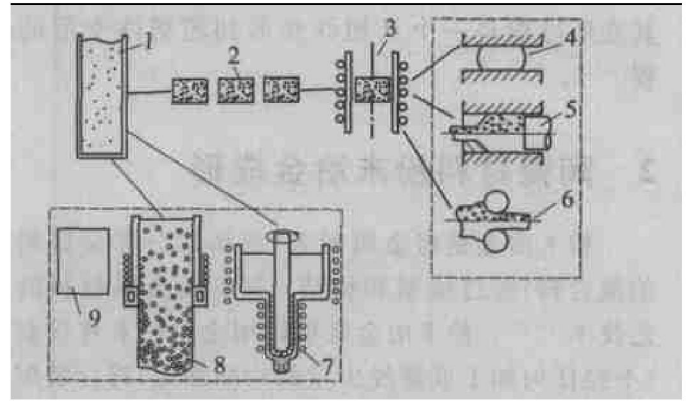


图 2 触变成形工艺流程图

Fig. 2 Thixoforming technology flow chart

1 —Freezing; 2 —Blank; 3 —Heating;

4 —Forging; 5 —Extrusion; 6 —Roller milling;

7 —Mechanism mixing; 8 —Electromagnetic mixing;

9 —SIMA

的广泛应用。对于流变铸造, 由于将搅拌后的半固态浆料直接成型, 具有高效、节能、短流程的特点, 近年来发展很快。

1.2 半固态加工成形的特点

与普通的加工方法相比, 半固态加工成形具有很多的优点: 1) 应用范围广, 凡有固液两相区的合金均可实现半固态成形; 2) SSM 充型平稳, 无湍流和喷溅, 加工温度低, 凝固收缩小, 因而铸件尺寸精度高。SSM 成形件尺寸与成品零件几乎相同, 可实现净近成形, 极大地减少了机械加工量, 做到少切削加工或无切削加工, 从而节约了资源。同时, SSM 凝固时间短, 有利于提高生产率; 3) 半固态合金已释放了部分结晶潜热, 减轻了对成形装置, 尤其是模具的热冲击, 使其寿命大幅度提高; 4) SSM 成形件表面平整光滑, 铸件内部组织致密, 内部气孔、偏析等缺陷少, 晶粒细小, 力学性能高, 可接近或达到锻件的性能; 5) 应用半固态成形工艺可改善制备复合材料中非金属材料的漂浮、偏析以及金属基体不润湿的技术难题, 为复合材料的制备和成形提供了有利条件; 6) 与固态金属模锻相比, SSM 的流动应力显著降低, 模锻成形速度更快, 因而可以形成十分复杂的零件。

1.3 半固态加工成形后的力学性能

半固态加工成形主要采用流变铸造铸锭重新加热到液固两相区之间的温度后, 再加压或锻造成零件。实践证明, 由于半固态金属具有触变性, 铸锭在成形中具有明显的超塑效应和充填性能, 且变形

抗力小,可在较髙速度下变形。从变形机理分析,其变形过程是一个从塑性变形到超塑性变形的过程^[5-15]。

2 陶瓷材料粉末冶金成形

粉末冶金是将金属粉末(或掺部分非金属粉末的混合料)经过成型和烧结,制备出金属材料的工艺技术^[16-26]。粉末冶金既可以用金属粉末直接制成(不经任何加工或者经少量的切削加工)符合装配要求的零件,又可制造用一般冶炼方法难以生产的金属材料 and 制品。

2.1 粉末冶金的主要特点

粉末冶金由于无切削或少切削,因而其经济效益极为显著,主要表现为几个方面: 1) 节约金属,一些机械加工的材料利用率为 15%~70%,而粉末冶金的材料利用率可到达 90% 以上; 2) 劳动生产率高,一般的机械制造厂,一个工人生产的机械零件为 2.5 t/a,而用粉末冶金生产同样零件,一个工人生产的机械零件为 5.0~6.8 t/a; 3) 投资较少,粉末冶金可用少量的压机和炉子代替精密机床,从而减少设备的投资和面积的占用。

2.2 粉末冶金制备陶瓷的工艺技术过程

粉末冶金制造陶瓷的工艺技术过程^[1, 27-29]主要包括:

1) 粉体制备 粉体性能直接影响陶瓷的性能,为了获得性能优良的陶瓷复合材料,制备出高纯、超细、组分均匀分布且无团聚的粉体是关键的第一步。粉体的制备可分为机械制粉和化学制粉两种。化学制粉可得到性能优良的高纯、超细、组分均匀的粉料,其粒径小于 10 nm,但这类方法需要复杂的设备,制备工艺要求严格,因而生产成本也较高。机械制粉能制备多组分粉体,其生产工艺简单、产量大,但得到的粉体组分分布不均匀,特别是当某种组分很少的时候,得到粉体组分更不均匀,因而这种生产方法常常会给粉体引入杂质。

2) 成型 制备出了良好的粉体,成型就成了获得高性能陶瓷的关键,坯体在成型中形成的缺陷在烧结后极显著地表现出来。一般坯体的成型密度越高,则烧结中的收缩就越小,制品的尺寸精度就越容易控制。因此,对成型的研究日益引起重视,并且主要朝着高坯体密度、低缺陷近尺寸成形的(烧结前后坯体尺寸变化很小)方向发展,主要为干

压成型、等静压成型、热压铸成型、挤压成型、轧制成型和注浆成型等。成型过程中,为了提高坯料成型时的流动性,增加颗粒间的结合力和提高坯体的机械强度,在坯料成型的过程中一般加入少量的有机粘合剂。常见的粘合剂有: ①石蜡,一种固体塑化剂,不易挥发,特别是不易于从坯体中排出; ②酚醛漆(高频清漆); ③聚乙烯醇(PVA)水溶液; ④水、油酸、煤油粘合剂; ⑤亚硫酸纸浆废液; ⑥苯胶。但无论采用哪种粘合剂,与粉体混合均匀后都必须经过 250~425 μm 筛才能应用。此外,粘合剂的加入量对瓷料的强度、电性能等都有很大的影响,如图 3 所示,而很多的粘合剂还有很大的毒性,危害人体的健康,在后续的排除工作过程中还需比较长的时间。

3) 烧结 烧结是陶瓷工艺中最髙要的工序,在烧结工序中,瓷料要发生烧结、晶粒生长、溶质脱溶或晶界产生的分凝现象,在烧结后期还可能出现二次再结晶过程。烧结实际上是体系表面能和缺陷能降低的过程,通常体系能量的降低是高温热能激活下的物质传递过程。陶瓷的烧结通常分为 3 个

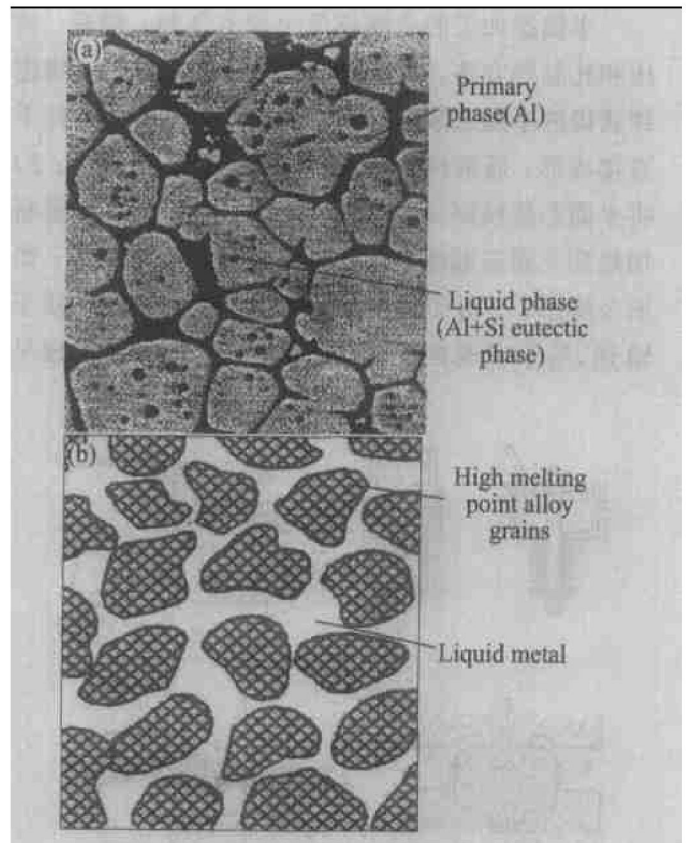


图 3 半固态金属成形及伪半固态成形微观组织特征

Fig. 3 Microstructure character of semi-solid metal forming and pseudo-semi-solid forming

- (a) —Semi-solid metal forming;
- (b) —Pseudo-Semi-Solid forming

阶段即从室温至最高烧结温度的升温阶段, 在最高温度的保温阶段和从最高温度降至室温的冷却阶段。冷却速度对瓷料的结构性能有很大的影响, 由于冷却速度慢, 因而相当于延长了不同温度的保温时间。为了降低烧结温度, 提高烧结活性, 在烧结过程中经常引入少量的添加剂, 包括助熔剂、矿化剂和改性加入物等, 而影响烧结的因素还很多, 如坯体的初始密度、烧结气氛等。

3 陶瓷成形工艺发展方向

自 20 世纪 80 年代以来, 陶瓷成形工艺^[30]一直受到人们的高度重视, 相继产生了一系列新的成形技术, 不同成形技术有各自的不同优点, 但同时也都有一定的局限性。总的来说, 成为 21 世纪陶瓷成形工艺发展的主流^[31-40]为以下 4 个方面:

1) 低粘度高固含量粉体浆料的制备

如果不考虑对粉体的要求, 那么成形工艺面临的首要问题是低粘度高固含量浆料的制备, 因为这是保证素坯密度和强度的前提。低粘度将使浆料浇注顺利进行, 且低粘度还是成形复杂形状陶瓷部件所必需。高固含量是提高素坯密度和强度的基础, 高密度的坯体可降低烧结温度, 减小收缩率, 避免坯体在烧结过程可能产生的变形、开裂等缺陷。实现低粘度高固含量粉体浆料的制备要综合考虑多种因素的作用, 例如对原料粉体进行适当的表面改性, 降低高价反离子杂质浓度, 引入高效分散剂等。

2) 脱脂问题

由于成型工艺大多需要加入不同量的粘接剂、分散剂等有机添加剂, 因而在烧结之前常需脱脂, 而脱脂过程将会引起坯体开裂等缺陷。因此, 尽量避免脱脂的有效途径是在满足坯体强度和密度的前提下, 尽量不用或少用有机添加剂。

3) 净尺寸原位凝固技术

近十多年来, 净尺寸原位凝固技术已经受到人们的高度重视, 由于注凝成型和 DCC 法等迅速发展, 因而在随后的一段时期内, 这一技术仍将是陶瓷成形工艺的发展主流。高性能陶瓷是一种脆性的难加工材料, 净尺寸成型可以减少烧结体的机加工量, 而原位凝固技术可使坯体在固化过程中避免收缩, 浆料进行原位固化, 避免了浆料在固化过程中可能引起的浓度梯度等缺陷, 从而为成形坯体的均匀性和可靠性提供保证。净尺寸原位凝固技术通常是在物理化学的理论基础上, 借助一些可操作的物

理反应(如温度诱导絮凝成型和胶态振动注模成型等)或化学反应(如注凝成型和直接凝固注模成型等)使物料快速实现固化。开展新的符合要求的物理反应或化学反应的研究并将之应用于陶瓷成型领域仍是 21 世纪陶瓷成形工艺发展的主要方向之一。

4) 成本问题

众所周知, 陶瓷材料具有许多优异的性能, 但因成本问题使其实际应用受到很大的限制。从陶瓷生产过程的各个环节入手, 进行低成本陶瓷材料的研究开发将是 21 世纪陶瓷材料领域面临的最艰巨的任务, 而连续化、自动化的成型工艺将解决这一问题。

4 陶瓷基复合材料伪半固态触变成形

半固态金属常温下呈非枝晶、近似球形的微观结构, 如图 3(a) 所示为 Al-6.6% Si 合金半固态组织。在半固态温度下, 初生晶 (Al) 沉浮于液相 (Al + Si 共晶相) 中, 具有维持一定外形和触变性特征。半固态合金的触变性, 来源于高熔点的球状晶和分布在晶界的低熔点共晶相。在半固态温度下, 液相包围球晶相, 借助外力作用, 实现触变成形^[41-49]。

4.1 伪半固态成形的物理意义

综合多年来有关粉末冶金、陶瓷成形工艺以及半固态成形技术的研究成果, 根据 21 世纪陶瓷成形工艺的发展方向, 提出了利用粉末冶金技术制备出一定技术规格的高纯、超细、组分均匀分布且无团聚的粉体, 将一定比例的金属微粒和陶瓷粉体均匀混合, 以实现增强体(增塑体)体积分数可随意调节的特点。然后依据“半固态”金属加工技术的特点, 将混合粉料在一定压力作用下成型为具有一定形状、内部比较致密的坯料(一般来说是棒料), 然后二次加热使温度达到基体的固态和增强体(增塑体)液态区间—即伪半固态成形温度, 借助一定的压力作用制成所要求的零件, 这就是陶瓷基符合材料伪半固态触变成形技术(PSSP)^[50-54]。

该成形工艺在传统陶瓷成形的基础上, 结合了粉末冶金技术、半固态金属加工技术的特点, 促进了 21 世纪陶瓷复合材料成形工艺的发展, 且该工艺的主要特点:

1) 避免纯粉末冶金方法生产过程中在界面处留下的显微孔洞。

由于这种成形工艺使用液态金属作为增塑相, 因而避免了添加有机添加剂的必要, 也就不需要进

行烧结。直接借助压力使坯体得到压实而致密化,也不会因为加入粘结剂而需要脱脂工序以及由此而产生的一些缺陷问题。

2) 可以实现近净成型,避免坯体收缩,从而减少了坯体的机械加工量。

由于该成形工艺充型平稳,无湍流和喷溅,加工温度低,凝固收缩小,因而成形零件尺寸精度高,可实现净近成形,极大地减少了机械加工量,做到少切削加工或无切削加工,从而节约了资源。同时,由于凝固时间短,从而有利于提高生产率。

3) 在伪半固态成形时,由于原料中有液态金属存在,其流动性很好,可以降低原料的粘度,有利于成形,因而通过设备的改进,可以实现自动化加工。

4) 与传统陶瓷成形工艺相比,PSSP的流动应力显著降低,因此,PSSP模锻成形速度更快,可以成形十分复杂的零件。

5) 伪半固态成形温度比较低,且释放了部分结晶潜热,减轻了对成形模具的热冲击,使其寿命大幅度提高。

4.2 2024/SiC_p陶瓷基复合材料伪半固态触变成形实验

伪半固态触变成形方法的特点是浆料由液态金属和高熔点粉末颗粒组成,用该方法制备的陶瓷基复合材料既具有半固态金属成形技术所具有的流动性,又达到了半固态成形技术所要求的强度,其主要工艺流程如图4所示。

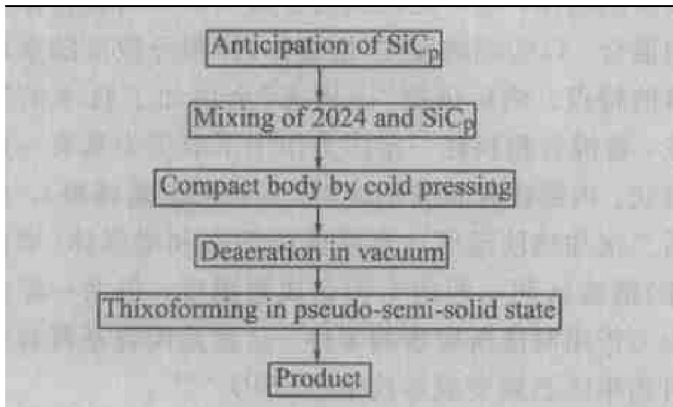


图4 伪半固态成形工艺流程图

Fig. 4 Pseudo-semi solid forming technology flow chart

1) 粉末的预处理

由于SiC粉末一般含有一定量的杂质元素,为了减少杂质元素对该实验的影响,采用稀盐酸处理的方法除去一些杂质,从而达到净化的目的。其流

程图如图5所示。

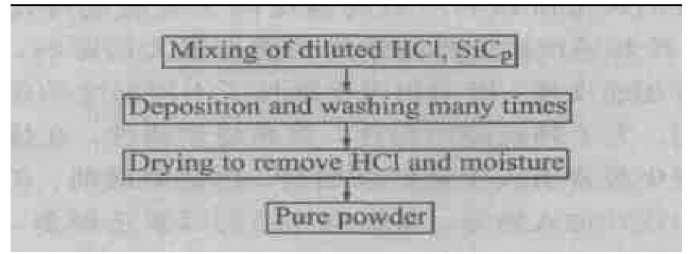


图5 粉末预处理流程图

Fig. 5 Powder anticipation flow chart

2) 粉末的混合

SiC颗粒与2024铝合金粉末采用滚筒式混粉机进行混合,并使用镀铬钢球促进粉末均匀化。

3) 混合粉末致密化过程

为了减少致密化过程中由于摩擦力影响而产生的密度不均匀效应,同时考虑到使操作尽量简单、实用,采用双向加压装置。为了尽量减少压制过程中摩擦力的影响,在模具的内部加了一层石墨纸,从而得到更好的压制条件,得到理想的冷压实预制坯料如图6所示。

4) 2024/SiC_p复合材料角框件伪半固态触变成形

伪半固态触变成形工艺具有简便和易于操作的特点,根据这些特点,设计出的模具如图7所示。

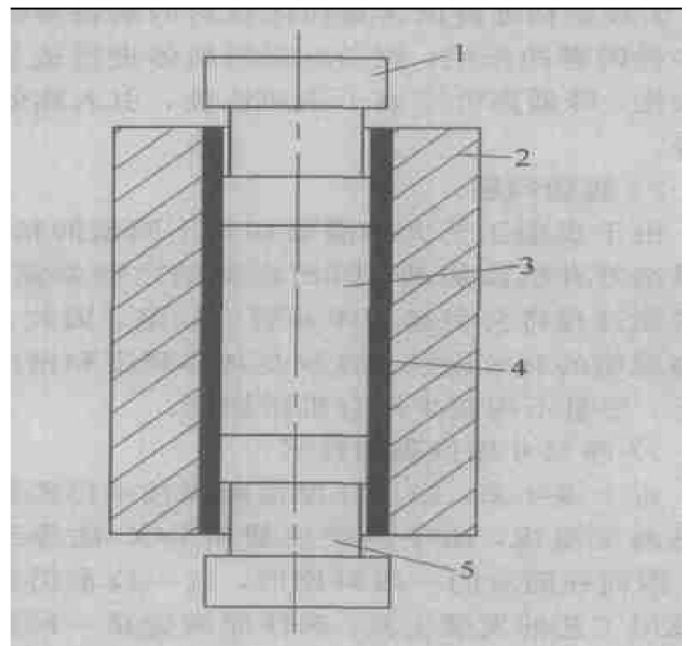


图6 混合粉末双向加压致密化装置

Fig. 6 Device of mixed powder bidirection forcing

- 1—Upper punch; 2—Squeegee silo;
- 3—Mixed powder; 4—Graphite paper;
- 5—Lower punch

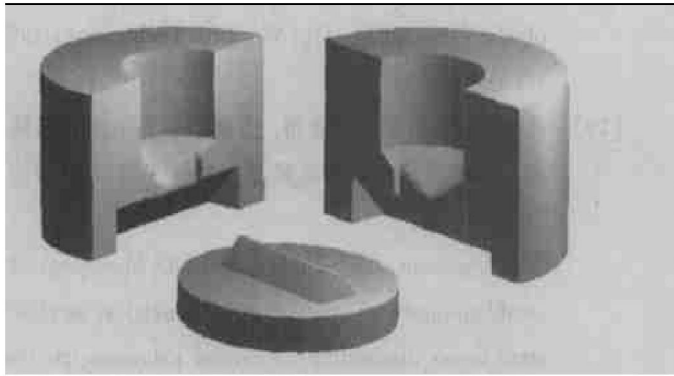


图 7 2024/SiCp 复合材料角框件成形模具

Fig. 7 2024/SiCp composite angle frames forming dies

通过伪固态成形方法而制备出的合格 2024/SiCp 复合材料角框件制件如图 8 所示。

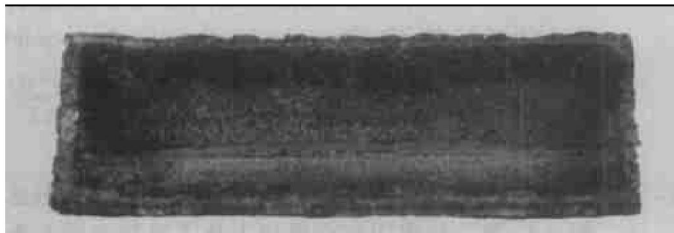


图 8 角框件制件

Fig. 8 Angle frames sample

5 结束语

1) 伪固态触变成形是在传统陶瓷成形的基础上, 结合粉末冶金技术和半固态金属加工技术发展起来的一种新的成形工艺, 它综合了粉末冶金技术和半固态加工技术的特点, 符合 21 世纪陶瓷成形工艺的发展方向。

2) 伪固态触变成形为陶瓷材料、金属间化合物和高温金属材料提供了一条简捷高效之路。而此 3 种材料均为高温材料, 一般采用粉末烧结成形, 但由于成形设备昂贵、工艺流程长、制件形状简单并存在一定孔隙。因而, 采用伪固态触变成形工艺, 由于成形过程中存在压力, 粘结体充填后的凝固缺陷容易在压力下消除, 可获得无孔隙制件。

3) 伪固态触变成形为纳米粉成形提供了一种新的成形工艺。纳米粉获得并不困难, 由于在粉末烧结过程中存在结块、低密度的烧结母体和晶粒长大问题, 因而, 采用该工艺, 伪固态成形温度大大低于高熔点相纳米粉体的熔化温度, 可以避免粉末烧结过程中出现的问题, 且成形容易并可获得所要求的形状和性能的制件。

REFERENCES

- [1] 贾成厂. 复合材料导论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
JIA Chengchang. The Introduction of Composites[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [2] 张长瑞, 郝元恺. 陶瓷基复合材料[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001.
ZHANG Changrui, HAO Yuan-kai. The Ceramics Matrix Composites[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2001.
- [3] 罗守靖, 杜之明. 半固态金属加工(SSP)分类及其新进展[J]. 热加工工艺, 1995, 10(5): 46-49.
LUO Shoujing, DU Zhiming. The category and new development of the semisolid process[J]. Hot Working Technology, 1995, 10(5): 46-49.
- [4] 罗守靖. 复合材料液态挤压[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
LUO Shoujing. The Liquid Compression of Composites[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [5] 谢水生, 黄声宏. 半固态金属加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
XIE Shuisheng, HUANG Shenghong. The Semi-Solid Metal Process and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.
- [6] 谢水生. 半固态金属加工技术的工业应用及发展[A]. 第二届半固态金属加工技术研讨会论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 1-8.
XIE Shuisheng. The industrial application and development of semisolid metal process technology[A]. The Colloquium of the 2nd Semi-Solid Metal Process Technology Seminar[C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002. 1-8.
- [7] 杜之明, 罗守靖, 孙家宽. 2024 铝合金半固态变形机理[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 666-670.
DU Zhiming, LUO Shoujing, SUN Jiakuan. Deformation mechanism of tension of 2024 Al alloy at semisolid state[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(5): 666-670.
- [8] 罗守靖, 田文彤, 谢水生. 半固态加工技术及应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765-773.
LUO Shoujing, TIAN Wentong, XIE Shuisheng. The semisolid process and its application[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 765-773.
- [9] 樊刚, 程钢. 半固态材料成形应用[J]. 铸造技术, 2001, 12(3): 26-29.
FAN Gang, CHENG Gang. The semisolid materials forming and application[J]. Casting Technology, 2001,

- 12(3): 26 - 29.
- [10] Milman Y V, Chugunova S I, Chudoba T, et al. Temperature dependence of hardness in silicon carbide with different porosity[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Material*, 1999, 12(17): 361 - 368.
- [11] 程 钢, 樊 刚. 半固态成形技术的研究和应用[J]. *兵器材料科学与工程*, 2001, 24(5): 66 - 68.
CHENG Gang, FAN Gang. The study and application of semi-solid process technology[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2001, 24(5): 66 - 68.
- [12] 唐靖林, 曾大本. 半固态加工技术的发展和现状[J]. *兵器材料科学与工程*, 1998, 21(3): 56 - 60.
TANG Jing-ling, ZENG Da-ben. The development and application status of semi-solid process technology[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1998, 21(3): 56 - 60.
- [13] 蒋 鹏, 贺小毛. 半固态成形工艺的基本类型与应用[J]. *锻压机械*, 1998, 12(3): 5 - 8.
JIANG Peng, HE Xiao-mao. The basic types and application of semi-solid process technology[J]. *Metalforming Machinery*, 1998, 12(3): 5 - 8.
- [14] LI Jir-wang, TIAN Jie-mo, DONG Li-min. Synthesis of SiC precursors by a two-step sol-gel process and their conversion to SiC powders[J]. *Journal of the European Ceramics Society*, 2000, 77(13): 1853 - 1857.
- [15] Shi Z L, Yang J M, Lee J C, et al. The interfacial characterization of oxidized SiC(p)/2014Al composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, A303(14): 46 - 53.
- [16] 任学平, 康永林. 粉末塑性加工理论及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
REN Xue-ping, KANG Yong-lin. *The Power Plastic Working Theory and Its Application*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Publishing House, 1998.
- [17] 罗守靖, 杜之明, 张 磊, 等. 硅线石/2024 液态挤压成形件的摩擦学特性[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(4): 127 - 130.
LUO Shou-jing, DU Zhi-ming, ZHANG Lei, et al. The tribology character of sillimanite/2024 drip molding by liquid compression[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(4): 127 - 130.
- [18] 罗守靖, 杜之明, 等. Al₂O₃·SiC_p/LY12 复合材料液态下浸渗与塑性成形的研究[J]. *热加工工艺*, 1998, 10(5): 20 - 22.
LUO Shou-jing, DU Zhi-ming, et al. The study of Al₂O₃·SiC_p/LY12 composite liquid infiltration and plastic forming[J]. *Hot Working Technology*, 1998, 10(5): 20 - 22.
- [19] 孙家宽, 杜之明, 罗守靖. 金属半固态一维等温轴对称压缩模型的建立及求解[J]. *塑性工程学报*, 1999, 5(4): 7 - 16.
SUN Jiā-kuan, DU Zhī-ming, LUO Shou-jing. The establishment and solution of the metal at semi-solid state linear dimension isothermal axisymmetric compressed model[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 1999, 5(4): 7 - 16.
- [20] 张新建, 乐启炽, 崔建忠. 金属半固态成形工艺及其新分类方法[A]. 第二届半固态金属加工技术研讨会论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 12 - 17.
ZHANG Xin-jian, LE Qi-chi, CUI Jian-zhong. The metal semi-solid process technology and new category method[A]. *The Colloquium of the 2nd Semi-Solid Metal Process Technology Seminar*[C]. Beijing: Metallurgy Industry Publishing House, 2002. 12 - 17.
- [21] 罗守靖, 霍文灿. 半固态合金加工技术若干问题的思考[A]. 第二届半固态金属加工技术研讨会论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 30 - 35.
LUO Shou-jing, HUO Wen-can. The thoughts about semi-solid alloy process several problems[A]. *The Colloquium of the 2nd Semi-Solid Metal Process Technology Seminar*[C]. Beijing: Metallurgy Industry Publishing House, 2002. 30 - 35.
- [22] Yuichi Ikuhara, Hidehiro Yoshida, Taketo Sakuma. Impurity effects on grain boundary strength in structural ceramics[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 321(20): 24 - 30.
- [23] Marco Antonio Schiavon, Eduardo Radovanovic, Inez Valeria Pagotto Yoshida. Microstructural characterization of monolithic ceramic matrix composites from polysiloxane and SiC powder[J]. *Powder Technology*, 2002, 123(19): 232 - 241.
- [24] Barabanenkov Y N, Ivanov V V, Ivanov S N, et al. The scattering of nonequilibrium phonons in Al₂O₃ nanoceramics[J]. *Physica B*, 2002, 317(20): 269 - 272.
- [25] Benito G, Morales M P, Requena J, et al. Barium hexaferrite monodispersed nanoparticles prepared by the ceramic method[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, 234(24): 65 - 72.
- [26] Webster T J, Ergun C, Doremus R H, et al. Enhanced functions of osteoblasts on nanophase ceramics[J]. *Biomaterials*, 2000, 21(18): 1803 - 1810.
- [27] Berger S. Elastic and plastic strain in Al/TiW/Si contacts during thermal cycles[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, A288(17): 164 - 167.
- [28] 杜之明, 罗守靖, 张广安, 等. 高硅铝合金汽车活塞半固态触变成形的实验研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2003(S): 250 - 252.

- DU Zhiming, LUO Shoujing, ZHANG Guang'an, et al. The experimental study of thixoforming in semisolid state of automobile piston with high silicon aluminum alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2003(S): 250 - 252.
- [29] Beijing Powder Metallurgy Research Institute. *Powder Metallurgy*[M]. Beijing: China Machine Press, 1974.
- [30] 胡连喜, 罗守靖. 铝/氧化铝纤维预制体的液态浸渗动力学[J]. *中国有色金属学报*, 1998, 10(8): 75 - 81.
- HU Lianxi, LUO Shoujing. The liquid infiltration dynamics of Al/Al₂O₃ precast body[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1998, 10(8): 75 - 81.
- [31] 赵东林, 周万成. 陶瓷基复合材料及其制造工艺[J]. *西安工程学院学报*, 1998, 20(2): 36 - 39.
- ZHAO Donglin, ZHOU Wancheng. The ceramics matrix composite and its fabrication technology[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 1998, 20(2): 36 - 39.
- [32] Vaben R, Forster J, Stover D. Toughening of SiC ceramics by a bimodal grain size distribution produced by HIPping ultrafine and coarse grained SiC powders[J]. *Nanostructured Materials*, 1995, 12(6): 889 - 892.
- [33] Driss-Habti M, Nakano K, Suzuki K. Microindentation tests as a tool for the estimate of mechanical properties and the modeling of the interfacial behavior of ceramic matrix composites[J]. *Composites A*, 1999, 30(24): 471 - 475.
- [34] 刘学建, 黄莉萍, 古宏晨, 等. 陶瓷成型方法研究进展[J]. *陶瓷学报*, 1999, 20(4): 230 - 234.
- LIU Xuejian, HUANG Liping, GU Hongchen, et al. The study development of ceramics confectioning methods[J]. *Journal of Ceramics*, 1999, 20(4): 230 - 234.
- [35] Muller S G, Glass R C, Hobgood H M, et al. The status of SiC bulk growth from an industrial point of view[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 211(25): 325 - 332.
- [36] Carter C H, Tsvetkov J V F, Glass R C, et al. Progress in SiC: from material growth to commercial device development[J]. *Material Science and Engineering B*, 1999, B61(8): 1 - 8.
- [37] 刘学建, 古宏晨. 21 世纪陶瓷成型技术发展趋势[J]. *江苏陶瓷*, 2000, 10(6): 42.
- LIU Xuejian, GU Hongchen. The development trend of 21st century ceramics confectioning technology[J]. *Jiang Su Ceramics*, 2000, 10(6): 42.
- [38] 周继承, 黄伯云. 增塑粉末挤压成形新技术[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(1): 1 - 13.
- ZHOU Jicheng, HUANG Baiyun. The new technology of plasticized powder extrusion process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(1): 1 - 13.
- [39] 郝春成, 崔作林, 尹衍升, 等. 颗粒增韧陶瓷的研究进展[J]. *材料导报*, 2002, 16(2): 28 - 30.
- HAO Chuncheng, CUI Zuolin, YIN Yansheng, et al. The study development of particles elasticized ceramics[J]. *Materials Review*, 2002, 16(2): 28 - 30.
- [40] Nagel R, Weyrich K, Hofmann D H H, et al. Heavy ion induced intermixing of metal/SiC interfaces[J]. *Nuclear instruments and Methods in Physics Research B*, 2001, 178(23): 315 - 318.
- [41] Lee J C, Byun J Y, Park S B, et al. Prediction of Si contents to suppress the formation of Al₄C₃ in the SiC_p/Al composite[J]. *Acta Mater*, 1998, 46(5): 1771 - 1780.
- [42] 张广安, 罗守靖, 田文彤. 短纤维增强铝基复合材料的挤压浸渗工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(3): 525 - 528.
- ZHANG Guang'an, LUO Shoujing, TIAN Wentong. The extrusion infiltration technology of short fibres reinforced Al matrix composite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(3): 525 - 528.
- [43] 罗守靖, 张广安. Cs/Al 复合材料管的制备与性能[J]. *锻压技术*, 2003, 4(12): 23 - 27.
- LUO Shoujing, ZHANG Guang'an. The preparation and performance of Cs/Al composite tube[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2003, 4(12): 23 - 27.
- [44] Buffiere J Y, Mair E, Verdu C, et al. Damage assessment in an Al/SiC composite during monotonic tensile tests using synchrotron X-ray microtomography[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1997, A236(25): 633 - 635.
- [45] Lyckfeldt O, Brandt J, Lesca S. Protein forming-a novel shaping technique for ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2000, 20(14 - 15): 2551 - 2559.
- [46] Lee Y F, Lee S L. Effects of Al additive on the mechanical and physical properties of silicon reinforced copper matrix composites[J]. *Scripta Materialia*, 1999, 41(7): 773 - 778.
- [47] Lee J C, Seok H K, Lee H I. Alloy design of thixoformable wrought SiC/Al alloy composites[J]. *Materials Research Bulletin*, 1999, 34(1): 35 - 42.
- [48] Smagorinski M E, Tsantrizos P G, Grenier S, et al. The properties and microstructure of Al-based composites reinforced with ceramics particles[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, A244(40): 86 - 90.

- [49] Thakur S K, Dhindaw B K. The influence of interfacial characteristics between SiC_p and Mg/Al metal matrix on wear, coefficient of friction and microhardness [J]. *Wear*, 2001, 247(32): 191 - 201.
- [50] Hashim J, Looney L, Hashmi M S J. The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 119(25): 324 - 328.
- [51] FAN Tong-xiang, SHI Zhong-liang, ZHANG Di, et al. The interfacial reaction characteristics in SiC/Al composite above liquidus during remelting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, A257(18): 281 - 286.
- [52] Zhu S J, Peng L M, Zhou Q, et al. Creep behaviour of aluminium strengthened by fine aluminium carbide particles and reinforced by silicon carbide particulates in DS Al-SiC/Al₄C₃ composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, A268(14): 236 - 245.
- [53] Muller S G, Glass R C, Hobgood H M, et al. The status of SiC bulk growth from an industrial point of view [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 211(24): 325 - 332.
- [54] Byung Kim G, Dong S L, Su Park D. Effects of thermal processing on thermal expansion coefficient of a 50% SiC_p/Al composite [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2001, 72(20): 42 - 47.

(编辑 李艳红)