

TiAl金属间化合物粉末冶金 工艺研究进展*

张国庆,刘玉峰,刘 娜,李 周

(中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室,北京 100095)

[摘要] 粉末冶金工艺可有效避免铸锭冶金带来的成分偏析、组织粗大、缩松缩孔等问题,是 TiAl 金属间化合物制备的重要研究方向。从粉末制备、烧结、成形、热处理 4 个方面对 TiAl 金属间化合物粉末冶金工艺的研究进展进行了介绍,重点评述了冷壁坩埚真空气雾化、电极感应熔炼气雾化、热等静压等制备技术,对粉末冶金制备 TiAl 金属间化合物的研究方向进行了展望。

关键词: TiAl 金属间化合物;粉末冶金;气雾化;热等静压(HIP);近净成形

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.22.038



张国庆

研究员,博士生导师,北京航空材料研究院副总工程师,北京市百名科技领军人才首批入选者。长期致力于高温合金、金属间化合物、高温结构材料的研制及应用研究,负责多项国家科技计划项目,发表学术论文 130 余篇,授权发明专利 17 项,获得 5 项部级科技成果奖。

随着现代工业的快速发展,对材料的强度、承温能力、减重等提出了更高的要求。TiAl 金属间化合物密度低、比强度高、阻燃性能好、抗蠕变抗氧化性能好,使用温度为 700~900°C,是极具潜力的新型轻质耐高温结构材料^[1]。目前, TiAl 金属间化合物大量应用于航空发动机低压涡轮叶片的研制和生产。2006 年, GE 公司就将 4822 合金(Ti-48Al-2Cr-2Nb)用于制造 GENx 发动机的第六、七级低压涡轮叶片,首次实现了 TiAl 金属间化合物的工程化应用^[2]。2013 年,中国科学院金属所获得了罗罗公司颁发的 TiAl 涡轮叶片精密铸造技术质量认证证书,使国内 TiAl 叶片达到国际先进水平。赛车等高档汽车上也采用 TiAl 金属间化合物制造增压涡轮、排气阀等,对提高发动机转速,减少动阀

磨损具有重要作用^[3]。随着超音速飞行器、热防护系统用结构材料对承温能力的要求逐渐提高, TiAl 金属间化合物板材、箔材等也具有广阔的应用前景^[4]。

TiAl 金属间化合物常用的制备工艺有铸造、铸锭冶金和粉末冶金。TiAl 叶片的制备需先用重力铸造出毛坯,再机加出最终尺寸的叶片,原料利用率较低,另外 TiAl 金属间化合物的本征脆性也导致机加难度较大,从而使 TiAl 叶片制造成本一直居高不下^[5]。采用铸锭冶金工艺制备 TiAl 板材等,需先采用热等静压、均匀化退火等消除铸锭的缩松、缩孔、成分偏析等缺陷,随后进行一次或多次锻造来细化晶粒组织,最终轧制成所需的材料^[6]。该工艺流程较长,制备成本较高,工艺难度较大。粉末冶金工艺易于实现晶粒的细化、成分的均匀化和复杂构件的近净成形,在高合金化、大尺寸、低成本 TiAl

* 基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51434007)。

金属间化合物的制备方面具有独特的优势,已成为 TiAl 金属间化合物制备技术的重要研究领域^[7]。本文从粉末制备、粉末烧结、成形工艺、热处理 4 个方面介绍了 TiAl 金属间化合物粉末冶金工艺的研究进展。

粉末制备

粉末是 TiAl 金属间化合物粉末冶金构件制备的前提和基础,对其性能起着重要作用。TiAl 金属间化合物粉末制备工艺可分为元素粉末法和预合金粉末法。其中以元素粉末为原材料,便可省略制粉环节,不仅可以降低成本,缩短工艺周期,还易于添加各种合金元素,但该工艺制备的粉末生成相较复杂,杂质含量较高,烧结时由于 Kirkendall 效应导致其烧结性能也较差,其应用较少^[8]。预合金粉末法成分均匀性较好,杂质元素含量较低,制得的构件力学性能较好,因而成为 TiAl 金属间化合物粉末制备的首选工艺^[9]。目前,常用的 TiAl 金属间化合物预合金粉末制备工艺有惰性气体雾化法(GA)、等离子旋转电极雾化法(PREP)。

惰性气体雾化法制备的粉末具有效率高、粒度较细等优点。TiAl 金属间化合物熔点高、活性大,几乎与所有坩埚材料反应,因而粉末制备工艺控制难度较大。北京航空材料研究院引进了一台英国 PSI 公司的冷壁坩埚真空感应熔炼气雾化(VIGA-CC)装置,将 TiAl 金属间化合物原料放入冷壁坩埚中,当感应加热时,在坩埚底部和周围形成一个壳体,使感应熔化总是在同成分的固态壳中进行,从而避免了坩埚材料的污染,成功制备出了低氧、球形度好的 TiAl 金属间化合物粉末。图 1 即为采用该方法制备的 Ti-47Al-2Cr-2Nb 粉末,其球形度超过 0.96,氧含量为 780×10^{-6} ,氮含量为 140×10^{-6} 。北京航空材料研究院还系统开展了 TiAl 金属间化合物粉末制备工艺的

研究,发现适当增大雾化压力,提高熔体过热度,减小喷嘴直径,均有利于制备出粒径细小的粉末。对于 α 凝固 TiAl 金属间化合物,粉末主要由 α_2 和 γ 相组成,细粉($<37\mu\text{m}$)主要为 α_2 相,随着粉末粒径增大,逐渐析出了 γ 相,粗粉(150~250 μm)主要为 γ 相^[10]。对于 β 凝固 TiAl 金属间化合物,细粉($<37\mu\text{m}$)主要为 $\beta/\text{B2}$ 相,随着粉末粒径的增大,逐渐析出了 α_2 、 γ 相^[11]。

VIGA-CC 装置虽然避免了熔体与坩埚材料的接触,但由于导流管的存在,制备的粉末仍存在一定的污染。德国 ALD 公司在此基础上开发出了电极感应熔炼气雾化(EIGA)技术,通过感应线圈将旋转的电极棒熔化并形成细小液流,经高压气体雾化制成粉末。该工艺合金熔体不与耐火材料接触,有效避免了材料污染,非常适合 TiAl 金属间化合物等活性材料粉末的制备。雾化时,电极熔化的金属液流细小,高速的气流对液滴的破碎效果较好,得到的粉末粒径较细。中国兵器科学研究院宁波分院、飞而康快速制造科技有限责任公司均引进了德国 ALD 公司 EIGA 制粉设备,在此基础上开展了 Ti 基合金粉末的制备工艺研究,制备的 TiAl 金属间化合物粉末中粒径仅 60 μm 左右,同时氧含量低于 1000×10^{-6} ,氮含量低于 200×10^{-6} ,有效避免了烧结过程中原始颗粒边

界(PPB)的形成^[12]。但该工艺雾化时由于气液比较大,雾化时“伞效应”显著,粉末空心率较高。前期研究发现,采用 EIGA 制备的 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金粉末随着粒径增大,空心粉含量越高,得到的热等静压锭高温延伸率越低^[13]。另外,该技术需提前熔炼出电极,易产生电极合金成分和杂质元素的偏析,导致制备的粉末化学成分不均匀。

等离子旋转电极法是利用母合金电极旋转产生的离心力将电极一端由等离子熔化的金属液滴沿切向甩出并雾化的粉末制备工艺。该工艺制备的 TiAl 金属间化合物粉末纯净、球形度高、流动性好、空心粉少。但该工艺受限于电极转速,粉末粒径较粗,生产效率也较低,由于采用母合金锭作为电极,同样存在成分偏析问题。目前,PREP 最先进的设备及核心技术仍掌握在俄罗斯手中,国内西北有色金属研究院、钢铁研究总院均引进了俄罗斯的 PREP 制粉设备,但工艺水平仍有较大差异。西北有色金属研究院、中南大学对 PREP 法制备 TiAl 粉末开展了大量的研究,得到的粉末表面光洁,极少有卫星粉,球形度明显高于气雾化制备的 TiAl 粉末^[14-15]。

另外,北京科技大学开展了大量机械破碎+射频等离子球化制备 TiAl 金属间化合物粉末方面的研究。

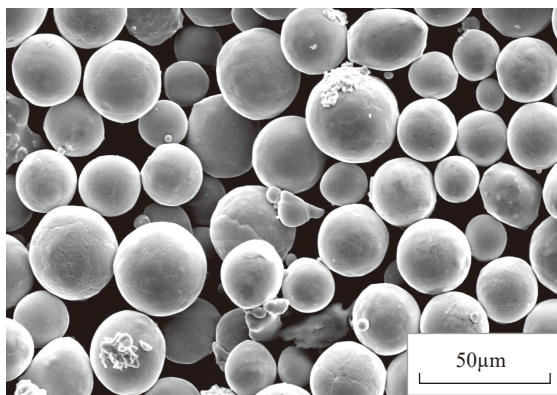


图1 VIGA-CC制备的Ti-47Al-2Cr-2Nb粉末形貌
Fig.1 Morphology of Ti-47Al-2Cr-2Nb powders produced by VIGA-CC

该工艺先将母合金切屑或较粗的预合金粉末进行机械破碎,再送入射频等离子体球化系统中,通过等离子体高温加热使粉末熔化,之后快速冷凝成为球形粉末。该工艺为 TiAl 金属间化合物粗粉的利用、降低生产成本提供了有效途径,但目前该工艺制备的粉末氧含量较高,存在夹杂污染,难以实现不同粒径粉末的同步球化,仍需进一步开展工艺研究^[16]。

粉末烧结

按粉末烧结过程中是否施加压力,可将粉末烧结工艺分为无压烧结和加压烧结。对粉末冶金 TiAl 金属间化合物而言,为了保证其致密性和力学性能,通常采用加压烧结,如热等静压(HIP)、放电等离子烧结(SPS)。

粉末热等静压前需进行包套,通过包套将压力均衡地传递给粉末,实现粉末的烧结。图 2 为粉末包套及热等静压过程。对 TiAl 粉末,通常选用纯钛或钛合金制作包套,以减轻包套材料和粉末之间的元素扩散(图 2 (a)) ; 将 TiAl 粉末装入包套并振实(图 2 (b)) , 保证热等静压时包套的均匀变形; 随后抽真空并加热,使粉末表面气体充分脱吸附(图 2 (c)) ; 接着对包套进行封焊(图 2 (d)) ; 最后将包套置于热等静压炉中,通过惰性气体向包套施加各向同等的压力,同时施以高温,在高温高压作用下使包套内部的粉末进行烧结和致密化

(图 2 (e)) 。 若将图 2 中的包套换成特定形状的模具,即可实现 TiAl 粉末的近净成形,极大地简化工艺流程,提高材料利用率,降低生产成本,同时很好地保证构件整体性能的一致性和稳定性,适用于大型、复杂构件的制备。

TiAl 粉末热等静压后的组织通常为近 γ 组织,对 α 凝固 TiAl 金属间化合物,主要由 α_2 相和 γ 相组成^[9]。对 β 凝固 TiAl 金属间化合物,以 Ti-43Al-9V-0.3Y 为例,在 1000~1260 $^{\circ}$ C 进行热等静压时,其组织主要由 β /B2 相和 γ 相组成,晶粒尺寸受温度影响较大,随着热等静压温度的升高,晶粒尺寸逐渐增大,从而延伸率逐渐升高,强度逐渐降低^[12,17]。若热等静压后仍需进行变形,则宜选用较高的温度进行热等静压,以得到较低的变形抗力和较高的塑性;对热等静压近净成形工艺,在较低温度下热等静压可得到细小的初始组织,后续通过热处理进行组织调控,得到良好强度和塑性匹配的构件。

放电等离子烧结利用脉冲能、放电脉冲压力和焦耳热产生的瞬时高温来实现 TiAl 粉末的烧结。与其他粉末烧结工艺相比,SPS 烧结工艺升温降温速度快,对于小型制件,其加热速度可高达 10^6 $^{\circ}$ C/s,可有效缩短烧结时间;SPS 放电产生的高能粒子撞击粉末的接触部分,起到活化作用,降低原子的扩散自由能,因而

其成形压力较低,通常仅需几十兆帕。Voisin 等^[18]采用 SPS 工艺实现了 TiAl 叶片的近净成形,为降低 TiAl 叶片制造成本开辟了新思路。哈尔滨工业大学、中南大学、西北有色金属研究院等均开展了 TiAl 金属间化合物 SPS 烧结工艺的研究,一定范围内烧结温度升高可增加构件的致密度,继续升高温度会引起晶粒度长大,但有利于全片层组织的形成^[19-21]。

成形工艺

烧结态的 TiAl 金属间化合物往往难以实现完全致密化,且材料韧性较差,所以高性能 TiAl 金属间的制备通常需要进行锻造、挤压、轧制,如 TiAl 板材。奥地利 Plansee AG 公司开发了预合金粉末 HIP+ 热轧的工艺制备 TiAl 板材。陈玉勇等^[22]在铸锭冶金制备出尺寸板材的基础上,采用该工艺开展了粉末冶金 TiAl 板材的研究,制备出长度超过 150mm,厚度大于 1mm 的完好 TiAl 板材。李慧中等^[23]将细小双态组织的 TiAl 板坯与超塑性成形模具组装后,整体加热至 900~980 $^{\circ}$ C,保温 20~30min 后,进行等温等速率成形,实现了 TiAl 板材的超塑性成形。随着超音速飞行器、武器装备等的壳体、热防护系统对材料承温能力的要求逐渐提高, TiAl 板材具有广阔的应用前景。

3D 打印技术被誉为“第三次工业革命”,具有无需开模,材料利用率高,工艺流程简单,生产效率高,易于制备复杂零件等优点。TiAl 金属间化合物具有本征脆性,加工性能较差,采用 3D 打印技术,可实现 TiAl 构件的近净成形,有效解决其加工难题。意大利 Avio 公司与瑞典 Arcam 公司合作,采用电子束熔融技术制造出了 GENx 飞机发动机 TiAl 涡轮叶片并进行了测试。国内开展了大量 3D 打印 TiAl 金属间化合物的工艺研究^[24-25],但仍有一些问题尚未解

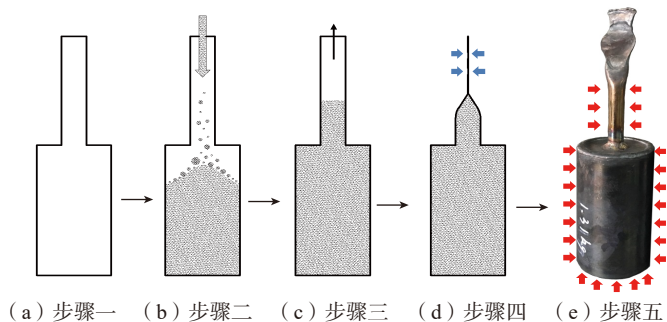


图2 粉末包套及热等静压过程示意图
Fig.2 Schematic of powder scanning and HIPing

决,如制品致密度、Al损失、性能各向异性、组织调控、残余应力等。

热处理

组织是决定 TiAl 金属间化合物性能的重要因素之一,目前普遍认为均匀细小的全片层组织是构件拥有较好的综合力学性能。TiAl 金属间化合物常用的热处理工艺为双温热处理,曾敏^[26]对热轧态的粉末冶金 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金进行了热处理,在 1310℃ 以上保温 0.5h,随后炉冷至 900℃ 保温 2h,空冷至室温即可得到全片层组织,升高温度、延长保温时间均会导致片层组织尺寸变大。

TiAl 金属间化合物的热处理工艺有两个要点:一是 T_a 转变温度,二是冷却速率。通常文献会给出特定成分 TiAl 金属间化合物的 T_a 转变温度,但对冷却速率的表述较为含糊。前期研究发现,将 TiAl 金属间化合物在 T_a 转变温度以上保温 0.5h,随后分别采用 1℃/min、5℃/min、10℃/min、15℃/min 的速率进行冷却,得到的片层晶团尺寸和体积分数均呈先增加后减小的变化规律,因而冷却速率的控制对组织调控非常重要。Laurin^[27]研究了粉末冶金 β 凝固 TiAl 金属间化合物的热处理工艺,在 1400℃ 保温 40min,采用阶梯冷却工艺冷却至室温:第一阶段以 11℃/min 冷却至转变温度 $T_{F/A}$ (1270~1290℃),促使全片层晶团形成;第二阶段从 $T_{F/A}$ 空冷至室温,避免片层晶团长大和等轴 γ 相析出,从而得到细小全片层组织。

目前,有关粉末冶金 TiAl 金属间化合物热处理工艺的报道仍较少。不同成分、不同状态的 TiAl 金属间化合物热处理工艺差别较大,铸态、锻态的热处理工艺对粉末冶金工艺状态的适用性较差。接下来仍需系统开展粉末冶金 TiAl 金属间化合物相变规律研究,完善其热处理工艺制度。

结论

TiAl 金属间化合物粉末冶金工艺可消除铸锭冶金带来的成分偏析、组织粗大、疏松缩孔等问题,已成为 TiAl 构件制备工艺研究的重要领域。

在粉末制备方面,不管是气雾化还是旋转电极雾化法,该过程都不可避免地会导致氧含量的增加。另外气雾化过程引入的惰性气体不溶于 TiAl 金属间化合物,在后续热处理或服役过程中难免产生气孔,对构件力学性能产生不利影响。接下来需针对粉末氧含量和惰性气体含量进行深入研究,找到工程化应用的临界值。

近净成形是粉末冶金工艺制备 TiAl 金属间化合物的优势之一。应充分挖掘其工艺潜力,系统开展热等静压、放电等离子烧结等的工艺参数、模具设计、组织调控等方面的研究,以及 3D 打印技术在 TiAl 构件制备方面的应用研究。

科研单位应加强与军用、民用企业的沟通交流,充分挖掘 TiAl 金属间化合物的使用需求和应用潜力。对满足使用需求的 TiAl 金属间化合物,应积极进行工艺验证和应用考核,推动其产业化进程。

参考文献

- [1] KIM Y W, KIM S L. Advances in gammalloy materials—processes—application technology: successes, dilemmas, and future[J]. JOM, 2018, 70(4): 553–560.
- [2] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 129–147.
- YANG Rui. Advances and challenges of TiAl base alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 129–147.
- [3] 孙杰. 汽车发动机部件用钛铝金属间化合物的制备分析与应用研究[J]. 世界有色金属, 2018, 496(4): 296–297.
- SUN Jie. Preparation, analysis and application of titanium and aluminum intermetallics for automotive engine parts[J].

World Nonferrous Metal, 2018, 496(4): 296–297.

[4] DRAPER S L, KRAUSE D, LERCH B, et al. Development and evaluation of TiAl sheet structures for hypersonic applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 464(1–2): 330–342.

[5] AGUILAR J, SCHIEVENBUSCH A, KATTLITZ O. Investment casting technology for production of TiAl low pressure turbine blades—Process engineering and parameter analysis[J]. Intermetallics, 2011, 19(6): 760–761.

[6] LIANG Y, LIN J. Fabrication and properties of γ -TiAl sheet materials: a review[J]. JOM, 2017, 69(12): 1–5.

[7] KIM Y W, SMARSLY W, LIN J, et al. Microstructure and mechanical properties of TiAl alloys produced by powder metallurgy[M]// Gamma Titanium Aluminide Alloys 2014: A Collection of Research on Innovation and Commercialization of Gamma Alloy Technology. John Wiley & Sons, 2014.

[8] 路新, 何新波, 曲选辉. 高能球磨与无压烧结制备高铌 TiAl 合金[J]. 航空材料学报, 2009, 29(1): 16–21.

LU Xin, HE Xinbo, QU Xuanhui. Fabrication of high Nb containing TiAl alloys by high-energy ball milling and pressureless intering[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(1): 16–21.

[9] ZENG H J, ZHANG L Q, LIN J P, et al. Alloy and powder preparation of high niobium containing TiAl based alloys[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 109: 150–155.

[10] 刘娜, 李周, 袁华, 等. 气雾化 TiAl 合金粉末的制备及表征[J]. 钢铁研究学报, 2011(S2): 537–540.

LIU Na, LI Zhou, YUAN Hua, et al. Fabrication and characterization of gas atomized TiAl alloy powders[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011(S2): 537–540.

[11] 刘玉峰. 氩气雾化 TiAl 合金粉末特性及热等静压致密化研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2018.

LIU Yufeng. Characterization and HIP densification of argon gas atomized TiAl alloy powders[D]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Materials, 2018.

[12] LIU Y, LI Z, LIU N, et al. Effect of oxygen content of powders on previous particle boundaries in hot isostatic pressed TiAl alloy[M]. Berlin: Springer, 2017: 779–786.

[13] 刘玉峰, 刘娜, 郑亮, 等. 热等静压温度和粒度对粉末冶金 TiAl 合金组织和

性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(10): 3227-3233.

LIU Yufeng, LIU Na, ZHENG Liang, et al. Effect of HIPing temperatures and powders particle size on microstructure and properties of PM TiAl alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(10): 3227-3233.

[14] HE W, LIU Y, TANG H, et al. Microstructural characteristics and densification behavior of high-NbTiAl powder produced by plasma rotating electrode process[J]. Materials & Design, 2017, 132: 275-282.

[15] YONG L, LIANG X, LIU B, et al. Investigations on processing powder metallurgical high-Nb TiAl alloy sheets[J]. Intermetallics, 2014, 55(31): 80-89.

[16] 路新, 刘程程, 朱郎平, 等. 高能球磨与射频等离子体球化制备 TiAl 合金球形微粉 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 1915-1920.

LU Xin, LIU Chengcheng, ZHU Langping, et al. Fabrication of micro-fine spherical TiAl alloy powder by high-energy ball milling and radio frequency plasma spheroidization[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(9): 1915-1920.

[17] LIU N, LI Z, XU W Y, et al. Hot deformation behavior and microstructural evolution of powder metallurgical TiAl alloy[J]. Rare Metals, 2016, 36(4): 236-241.

[18] VOISIN T, MONCHOUX J, DURAND L, et al. An innovative way to produce γ -TiAl blades: spark plasma

sintering[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(10): 1408-1413.

[19] XIAO S L, XU L J, YU H B, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-45Al-5.5 (Cr, Nb, B, Ta) alloy sintered at different SPS temperatures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12): 2960-2964.

[20] 陈钰青, 王岩, 罗世彬, 等. TiB₂ 对 γ -TiAl 基合金粉末放电等离子烧结行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2018(1): 61-70.

CHEN Yuqing, WANG Yan, LUO Shibin, et al. Effect of TiB₂ on spark plasma sintering behavior of γ -TiAl based alloy powders[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018(1): 61-70.

[21] YANG X, ZHENG-PING XI, LIU Y, et al. Microstructure and fracture toughness of a TiAl-Nb composite consolidated by spark plasma sintering[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(11): 2628-2632.

[22] 陈玉勇, 孔凡涛, 张宇, 等. 一种高性能 TiAl 合金板的制备方法 [P]: CN201510465441.3. 2015-11-18.

CHEN Yuyong, KONG Fantao, ZHANG Yu, et al. Preparation of a high performance TiAl alloy sheet[P]: CN201510465441.3. 2015-11-18.

[23] 李慧中, 齐叶龙, 梁霄鹏, 等. 一种 TiAl 基合金板材超塑性成形方法 [P]: CN201610076127.0. 2016-02-03.

LI Huizhong, QI Yelong, LIANG Xiaopeng, et al. Superplastic forming of a TiAl

base alloy sheet[P]: CN201610076127.0. 2016-02-03.

[24] 周俊, 周斌, 李宏新, 等. 电子束选区熔化线能量密度对钛铝合金粉末中铝元素挥发的影响 [J]. 电加工与模具, 2018(4): 52-56.

ZHOU Jun, ZHOU Bin, LI Hongxin, et al. Influence of line energy of electron beam selective melting on volatilization of aluminum in TiAl alloy powders[J]. Electromachining & Mould, 2018(4): 52-56.

[25] 刘占起, 徐国建, 马瑞鑫, 等. 激光同轴送粉增材制造 TiAl 合金的性能 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 113-120.

LIU Zhanqi, XU Guojian, MA Ruixin, et al. Properties of TiAl alloy prepared by additive manufacturing with laser coaxial powder feeding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 113-120.

[26] 曾敏. 粉末冶金 TiAl 合金的包套轧制工艺及其热处理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.

ZENG Min. Study on canned forging and heat treatment process of powder metallurgy TiAl alloy[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[27] LAURIN D E. Hot isostatic pressing and heat treatment development of powder metallurgy beta gamma titanium aluminide alloys[D]. Ottawa: Carleton University, 2010.

通讯作者: 张国庆, E-mail: g.zhang@126.com。

Progress in Powder Metallurgy TiAl-Based Intermetallics

ZHANG Guoqing, LIU Yufeng, LIU Na, LI Zhou

(Science and Technology of Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] Powder metallurgy (PM) TiAl-based alloy can solve the problems associated with ingot metallurgy, such as composition segregation, coarse microstructure and shrinkage cavity. In this paper, recent progress of PM TiAl-based intermetallics in powders preparation, sintering, forming and heat treatment was reviewed. Some methods were introduced including cold crucible vacuum induction melting gas atomization (VIGA-CC), electrode induction melting gas atomization (EIGA), hot isostatic pressing (HIP). Furthermore, the research direction of PM TiAl-based intermetallics was pointed out.

Keywords: TiAl intermetallics; Powder metallurgy; Gas atomization; Hot isostatic pressing (HIP); Near net shape forming (责编 大漠)