

粉末冶金Ti₂AlNb合金研究进展

徐磊¹,姚利盼²,卢正冠¹,吴杰¹,杨锐¹

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

[摘要] 回顾了近年来Ti₂AlNb合金的研究历程,结合Ti₂AlNb合金的应用背景,侧重介绍了粉末冶金近净成形技术制备Ti₂AlNb合金的研究现状和应用进展情况,从粉末冶金Ti₂AlNb合金的制备、预合金粉末热等静压致密化机制、Ti₂AlNb复杂构件研制、粉末冶金Ti₂AlNb合金的热变形4个方面对近年来粉末冶金Ti₂AlNb合金的主要研究成果进行简要回顾。

关键词: Ti₂AlNb合金;粉末冶金;热等静压;近净成形;环轧

DOI:10.160080/j.issn1671-833x.2019.22.014



徐磊

研究员,研究方向为钛合金粉末冶金近净成形。发表论文近70篇,授权专利3项,发布和参与制定企业标准5项。2017年4月荣获“长征五号运载火箭首次飞行任务突出贡献者”称号。

1988年, Banerjee等^[1]发现的金属间化合物Ti₂AlNb合金是第二代金属间化合物合金,是目前国内外的研究热点,也是最有工程应用前景的金属间化合物结构材料。国内外研究目标是在600~750℃范围内替代部分高温合金用于重要结构件,减轻发动机重量,提高推重比^[2-5]。多年来,众多学者在Ti₂AlNb合金的成分设计、显微组织和性能调控等方面开展了大量研究工作^[6-9]。Ti₂AlNb合金发展至今仍然没有取得大规模广泛应用,影响Ti₂AlNb合金工程化应用的关键问题是Ti₂AlNb合金化程度高,原子数较大的Nb容易出现宏观的成分偏析,进而在合金的凝固过程出现缩孔、疏松等缺陷,导致铸造Ti₂AlNb合金的性能较差^[10-11]。Nb元素的大量添加尽管显著改善了α₂+O+B2三相合金的塑性,但也给熔炼带来了极大难度,因此高品质、大尺寸Ti₂AlNb铸锭的制备仍然困难。

美国通用公司在1992年制备出了Ti-22Al-27Nb(原子数分数,%)的铸锭合金,与以α₂相为基础的Ti₃Al合金相比,Ti₂AlNb合金实现了高温强度、室温延性、断裂韧性的良好结合,且密度只有5.3g/cm³,可以满足发动机材料减重的需求^[12-14]。国外Ti₂AlNb合金的研究主要集中在印度、美国和西欧一些国家,通过近10年来公开发表的文章数量来看,Ti₂AlNb合金在中国的研究报道逐渐增多,这与Ti₂AlNb材料的应用背景息息相关。北京钢铁研究总院^[11-12]和中国科学院金属研究所^[14-15]针对Ti₂AlNb合金的成分设计和合金制备开展了较为系统的研究,此外北京有色金属研究总院^[16]、哈尔滨工业大学^[17]和同济大学^[4]等高校也围绕该合金体系开展了大量研究工作。

接近实用化程度最高的两种制备Ti₂AlNb合金的方法是热机械变形和粉末冶金近净成形工艺。采用热变形可以改善Ti₂AlNb铸锭的

性能,如锻造、轧制、超塑性成形等,这些传统的热变形工艺在过去几十年的 Ti_2AlNb 试制中得到了快速发展^[17-20],试制出的 Ti_2AlNb 板材、环材、箔材等产品具有广阔的应用前景;此外,随着制粉设备和制粉工艺的突破,洁净 Ti_2AlNb 预合金粉末的出现使得粉末冶金近净成形工艺(Powder metallurgy near net shaping)制备 Ti_2AlNb 合金及构件得到了快速发展^[21-23],该工艺是利用模具设计技术,将金属粉末填充和密封在模具内,然后采用热等静压成形(Hot isostatic pressing, HIP)的粉末冶金技术。由于航空发动机零部件的尺寸较大、形状复杂,采用 Ti_2AlNb 作为整体叶盘、整体叶环、燃烧室等零件的关键结构材料,在制备工艺上仍存在很多亟待解决的问题。

采用粉末冶金热等静压技术制备的 Ti_2AlNb 合金组织均匀,无宏观成分偏析,性能一致性好,是目前成形 Ti_2AlNb 复杂结构零件的备选方案。本文基于粉末冶金 Ti_2AlNb 合金的特定应用背景,从粉末冶金 Ti_2AlNb 合金的制备、预合金粉末热等静压致密化机制、粉末冶金复杂构件研制和粉末冶金 Ti_2AlNb 合金的热变形 4 个方面对粉末冶金 Ti_2AlNb

合金的研究进展加以介绍。

粉末冶金 Ti_2AlNb 合金的制备

显微组织和孔隙率是决定粉末冶金制品力学性能的影响因素。采用热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)技术可以制备理论全致密的粉末冶金合金。对于不同的合金体系,粉末冶金合金的组织调控原则不尽相同。采用感应熔炼气体雾化法制备了名义成分为 $Ti-22Al-24Nb-0.5Mo$ (原子数分数,%)预合金粉末后,需要对预合金粉末进行后续的热等静压致密化处理,粉末的致密化过程包括^[24-25]:(1)将预合金粉末填充到低碳钢包套中,同时需获得高的振实密度;(2)采用机械泵和分子泵进行真空脱气;(3)采用氩弧焊对低碳钢包套进行封焊;(4)选择合适的温度、压力和保温时间进行热等静压。采用热等静压工艺制备粉末钛合金材料时,温度对粉末合金的显微组织与综合力学性能影响显著^[26-27],在较高的热等静压温度下致密化粉末合金能有效抑制粉末钛合金的粉末原始颗粒边界的出现、提高钛合金的致密度,实现粉末钛合金良好的冶金结合。

热等静压工艺参数中温度对材料的致密度和力学性能影响最大,对 Ti_2AlNb 这种难变形高温强度高的金属间化合物更是如此。粉末 Ti_2AlNb 合金拉伸及持久寿命随热等静压温度的变化趋势见表 1,可以看出,在整个热等静压温度范围内(920~1165℃),粉末 Ti_2AlNb 合金的室温及 650℃ 屈服强度随着热等静压温度的升高先升高后降低,在 1050℃ 时达到极大值;粉末 Ti_2AlNb 合金的室温延伸率随着热等静压温度的升高不断降低,当热等静压温度为 1080℃ 时,室温延伸率低于 3%,失去了工程应用意义;粉末 Ti_2AlNb 合金在 650℃/360MPa 条件下的持久寿命随着热等静压温度的升高先升高后降低,当热等静压温度为 1080℃ 时,持久寿命达到了极大值。在 Ti_2AlNb 合金 T_{B2} 相变点以下 20~30℃ (如 1030℃) 进行热等静压时能够获得典型的 3 相片层组织(α_2+B2+O),片层组织是该合金能够在工程中应用的组织^[15,28]。当粉末 Ti_2AlNb 合金在 T_{B2} 相变点附近(如 1050℃)热等静压时,室温及高温的延伸率急剧下降,当热等静压温度超过 T_{B2} 相变点时(如 1080℃),由于组织类型是 3 相魏氏体组织,

表 1 典型热等静压工艺制备的粉末 Ti_2AlNb 合金的力学性能对比

Table 1 Comparisons of tensile and rupture properties at room and elevated temperature of PM Ti_2AlNb alloys with different HIPing routes

热等静压工艺	$T/^\circ C$	0.2% YS/MPa	UTS/MPa	El/%	L/h
920℃/130MPa/3h	20	920	1023	7	28
	650	565	708	16	
980℃/140MPa/3h	20	922	1055	6	36
	650	608	753	15	
1010℃/140MPa/3h	20	850	1030	9	—
	650	599	742	16	
1030℃/140MPa/3h	20	882	1082	8	56
	650	599	763	13	
1050℃/140MPa/3h	20	1068	1242	4	54
	650	739	939	8	
1080℃/140MPa/3h	20	907	1052	2	212
	650	658	833	11	
1165℃/140MPa/3h	20	944	1057	1	69
	650	731	913	7	

其 650°C/360MPa 条件下持久寿命高,但室温强度与塑性差。当热等静压温度进一步升高至 T_{B2} 相变点 80~120°C 以上时(如 1165°C),晶粒快速长大,无论是强度、塑性还是高温持久寿命均显著下降。

适合 Ti_2AlNb 预合金粉末的热等静压温度是 980~1030°C,在这个热等静压温度区间进行致密化成形均能获得接近理论全致密度的粉末合金,但随着热压温度的升高,粉末颗粒间的界面冶金结合更加紧密。粉末 Ti_2AlNb 合金热等静压温度窗口为 1030~1050°C,压力在 130MPa 以上,并保温保压 3h,在此条件下可得到孔隙缺陷少、显微组织均匀的粉末 Ti_2AlNb 合金。

Ti_2AlNb 预合金粉末热等静压致密化机制

热等静压工艺是在热加工温度下,对粉末零件或者压坯在各个方向施以高的均等的气体压力,使粉末颗粒之间实现良好的冶金结合,在热等静压^[29-30]处理中,最常见的气体介质是氩气或者氮气,压力范围为 50~200MPa,最常用的压力为 100MPa。热等静压工艺是 1955 年 Saller 等在美国 Battelle Memorial Institute 发明的。热等静压起初用于包层核燃料元件的扩散连接;在 1970~1980 年期间,美国空军实验室将热等静压工艺扩展到了制造 Ni 基

高温合金与钛合金粉的预成形坯;与此同时,还发现可用热等静压愈合具有复杂形状的铸件内部缩孔、缩松等缺陷^[31]。

粉末-包套体在热等静压的高温高压协同作用下,产生宏观上的收缩变形,同时松散粉体内部发生粉末颗粒致密化、固结的微观演变过程。深入认识预合金粉末致密化行为,可为热等静压制度的制定提供理论指导。粉末的致密化既取决于热等静压的工艺参数如温度、压力、时间等,又与粉末自身的工艺属性如粉末粒度匹配、颗粒流动性、颗粒屈服强度等紧密相关,还受包套尺寸的影响。采用 ABAQUS 软件模拟了 Ti_2AlNb 预合金粉末在不同热等静压阶段的致密化行为,模拟了致密化不同阶段粉体压坯试样的密度,对粉末致密化的微观过程进行了系统的研究;通过分析保温温度、保压压力、保温保压时间等因素对粉末致密化和显微组织的影响,为优化选择热等静压工艺参数提供依据。通常热等静压工艺有如下 3 种路径:(1)先升压再升温;(2)先升温再升压;(3)同时升温升压。数值模拟中采用典型的同时升温升压热等静压工艺路径,如图 1 所示,温度和压力分别从 18°C 和 0.22MPa 同步上升,温度的平均升温速率为 8.6°C/min,压力的平均升压速率为 1.2MPa/min,经过 120min 到达稳态即 1030°C/140MPa,并在稳态

保持 3h,然后降温卸压。

提取 ABAQUS 数值模拟中粉末体压坯的相对密度随热等静压时间的变化数据,绘制成粉末致密化曲线,如图 2 所示。致密化曲线总体呈现“S”型的变化趋势,经历一个由慢到快,再由快到慢的过程。粉末致密化过程可以被划分成 4 个阶段。

(1) Stage I 包套屏蔽控制慢速致密化:温度和压强分别从 18°C 和 0.22MPa 至 893°C 和 107MPa,粉末体压坯的相对密度从初始 65% 上升至 70.8%。在热等静压的起始阶段,粉末体由松散颗粒组成,强度低,在此期间,低碳钢包套的屏蔽效应是导致粉体致密化缓慢的主要因素。

(2) Stage II 粉末位移重排控制快速致密化:温度和压强分别从 893°C 和 107MPa 上升至 943°C 和 118MPa,粉末发生快速致密化,热等静压致密化速率从 893°C 开始不断增加,在 943°C 达到极大值。

(3) Stage III 粉末塑性变形控制快速致密化:温度和压强分别从 943°C 和 118MPa 上升至 1012°C 和 139MPa,热等静压致密化速率逐渐

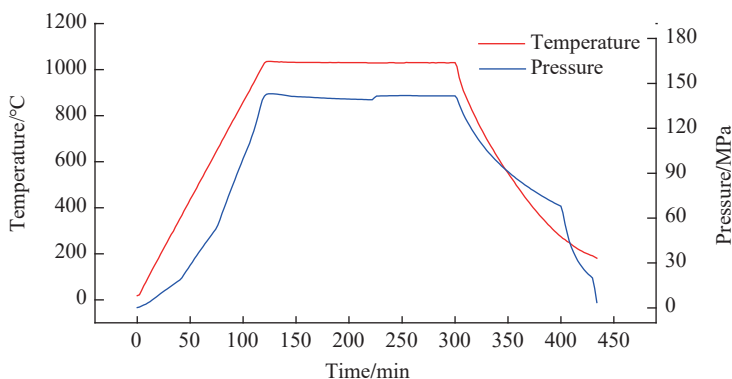


图 1 典型的粉末 Ti_2AlNb 合金热等静压工艺曲线(1030 /140MPa/3h)
Fig.1 Typical HIPing scheme of PM Ti_2AlNb alloys(1030 /140MPa/3h)

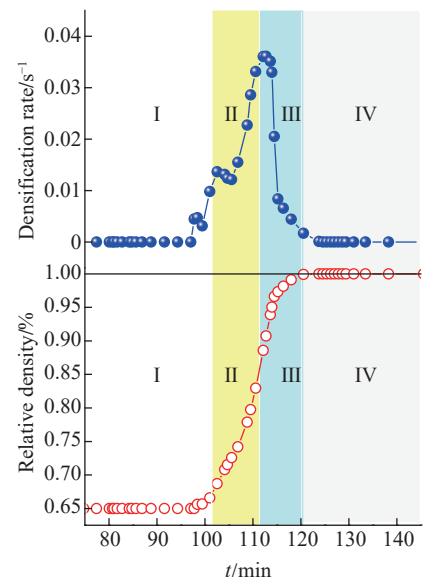


图 2 Ti_2AlNb 预合金粉末热等静压致密化曲线

Fig.2 Densification curve of Ti_2AlNb pre-alloyed powders under HIP

下降,在 1012℃ 达到极小值,粉末体的相对密度从 81.3% 迅速提高至 99.1%。

(4) Stage IV 蠕变扩散机制控制慢速致密化: 温度和压强分别从 1012℃ 和 139MPa 上升至 1030℃ 和 140MPa 并保持至 10min,热等静压致密化速率缓慢增加,粉末体压坯相对密度从 99.1% 增加到 99.5% 以上。

粉末合金的孔隙分为两部分: 粉末的空心粉(为闭孔)和粉末颗粒间的间隙(由开孔和闭孔组成)。致密化初期,粉末孔隙的面积主要由开孔构成,随着致密化的进行,粉末体压坯的孔隙已由开孔转变成闭孔,粉末颗粒发生严重的塑性变形,粉末颗粒之间由点接触发展成为一个接触面,而球形粉末颗粒也变成具有多面体的特征。在最后的蠕变阶段,粉末体已经具有较高的致密度,其承受的有效压应力难以超过其临界切应力,塑性变形机制不再发生作用。经过蠕变和扩散,孔隙基本能够得到消除。

对比图 1 和图 2 可知,粉末主要致密化任务在热等静压升温升压阶段已经完成,因此升温升压阶段是研究粉末致密化的重点。

粉末冶金 Ti_2AlNb 复杂构件研制

Ti_2AlNb 预合金粉末的振实密度为 63%~70%,在热等静压致密化过程中粉末/包套体的体收缩将达到 30%~37%,给部件尺寸控制带来极大难度,还会出现不均匀致密化现象。粉末包套体在热等静压致密化过程中引起不均匀收缩的主要因素有:(1)粉末/成形模具之间的相互干涉引起填充密度在包套体内部存在差别;(2)包套、内外模具材料差异以及与粉体材料的强度匹配差异;(3)内部成形模具截面和厚度的变化引起的对热等静压压力的屏蔽和

热量传导的屏蔽。此外,在大型热等静压设备热压时,温度和压力也很难保证完全均匀一致,这些因素会对部件的精确尺寸控制带来很大难度,控制尺寸收缩均匀性也是保障复杂构件各部位性能一致性的重要手段。

在制备粉末构件的过程中,包套结构的设计非常重要^[32-34],依据 Ti_2AlNb 合金的材料性能和粉末特点,结合有限元辅助设计,能够摒弃费时费力的试错法研制,依据包套结构设计的原则和模拟结果,在前文设计的热等静压制度下成功制备了 Ti_2AlNb 粉末复杂部件,如图 3 所示,制成的部件关键尺寸偏差小于 2%。借助有限元仿真的手段,结合实际构件研制经验,粉末在致密化成形过程中致密化进程趋于均匀一致,从而有利于确保部件整体性能的一致性。

粉末冶金 Ti_2AlNb 合金热变形研究

Ti_2AlNb 合金的热机械变形方式与 Ti_3Al 合金及其他钛合金的加工方法近似,锻造、轧制设备、模具设计、加热保温方式等没有明显区别。但是 Ti_2AlNb 合金的热变形难度高于普通钛合金,一是材料的变形抗力大,只能采用热变形工艺, Ti_2AlNb 对锻造等变形设备的吨位要求很高,即便是制备尺寸较小的 Ti_2AlNb 锻件仍然需要大吨位的设备,锻件尺寸与设备尺寸的不匹配进一步增加了 Ti_2AlNb 热变形成形难度;二是 Ti_2AlNb 的组织性能受热响应敏感, B2 相在低于单相区温度区间内的热变形过程中再结晶困难, Ti_2AlNb 合金中容易形成织构或厚的 α_2 相晶界,降低材料的可加工性。



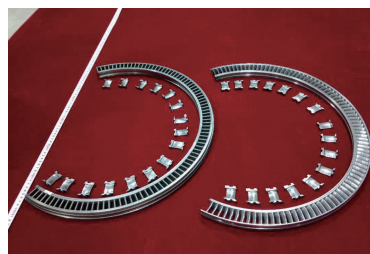
(a) 机匣毛坯



(b) 发动机叶盘



(c) 发动机复杂构件



(d) 发动机叶环



(e) 发动机支撑叶盘



(f) 发动机叶轮

图 3 中国科学院金属研究所研制的 Ti_2AlNb 粉末冶金部件
Fig.3 PM Ti_2AlNb parts fabricated by IMR, CAS

粉末冶金制坯+热变形联合工艺制备 Ti_2AlNb 合金的提出是基于 Ti_2AlNb 铸锭偏析(大尺寸尤为明显)及锻造工艺火次长、失效风险大的客观研究现状,该工艺参考了GH4169粉末盘的制备方法^[35],是一种通过粉末冶金提高坯料均匀性来解决高合金化材料难变形特点的有效手段。另一方面,由于 Ti_2AlNb 的材料特点,当目标件为具有异形截面尺寸特点的环形机匣,采用传统的铸锭开坯、冲孔、环轧工艺制备 Ti_2AlNb 异形环存在很大难度^[36]。通过与变形 Ti_2AlNb 合金的热成形特点进行对比发现,粉末冶金 Ti_2AlNb 合金具有和变形合金相当的热变形能力,粉末合金可以承受更低的温度和更高的应变速率而不开裂^[37-38]。

采用预合金粉末热等静压工艺制备 Ti_2AlNb 异形环坯,图4给出了 Ti_2AlNb 异形截面环坯的轧制过程,采用高温涂层+石棉包裹可以保证粉末 Ti_2AlNb 环坯的热变形过程,

异形截面环坯在合适的保温制度下热变形结果良好,无缺陷或裂纹产生。热变形后,室温和 $650^{\circ}C$ 的拉伸强度显著提高,高温持久寿命改善,且随着变形量的增加,热变形对 Ti_2AlNb 合金性能的改变趋势更加明显。热变形+热处理后的作用使得 Ti_2AlNb 异形粉末环组织中的O板条先细化再长大,经热处理后形成的近O+B2近两相组织具有良好的强韧性匹配,室温塑性得到显著改善,异形环的整体性能优于未经热变形的粉末合金^[39]。

结论

由于 Ti_2AlNb 金属间化合物难熔炼、难变形及3相合金组织难调控的材料特点,采用粉末冶金近净成形工艺制备 Ti_2AlNb 合金及构件受到越来越多的关注。钛合金粉末冶金工艺在国外航空航天等领域的关键部件获得应用且效果良好,但在国内仍属新技术,且缺乏关于材料本身特

性的系统而深入的认识。 Ti_2AlNb 的力学性能受显微组织类型影响显著而且热处理强化过程中热响应敏感, Ti_2AlNb 预合金粉末在热等静压及热处理前后的组织演化机理还需进一步加深理解。粉末冶金 Ti_2AlNb 构件的冶金质量评价无现成经验可循,一般参考锻件或铸件的检测标准,仍需要开展系统的工程化应用研究。

粉末冶金 Ti_2AlNb 合金经过一定的热变形步骤,力学性能显著改善,粉末制坯+热变形的优势是可靠性强、产品合格率高,适合制备具有复杂形状的环形产品。但随着技术的不断发展,材料成本和工艺成本可能是制约粉末冶金近净成形技术更大规模应用的潜在问题。

参考文献

- [1] BANERJEE D, GOGIA A K, NANDI T K, et al. A new ordered orthorhombic phase in a Ti_3Al-Nb alloy[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(4): 871-882.
- [2] GERMAN L, BANERJEE D, GUÉDOU J Y, et al. Effect of composition on the mechanical properties of newly developed Ti_2AlNb -based titanium aluminide[J]. Intermetallics, 2005, 13(9): 920-924.
- [3] CHEN W, LI J W, XU L, et al. Development of Ti_2AlNb alloys: opportunities and challenges[J]. Advanced Materials & Processes, 2014, 172(5): 23-27.
- [4] 沈军, 冯艾寒. Ti_2AlNb 基合金微观组织调制及热成形研究进展[J]. 金属学报, 2013, 49(11): 1286-1294.
- SHEN Jun, FENG Aihan. Recent advances on microstructural controlling and hot forming of Ti_2AlNb -based alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(11): 1286-1294.
- [5] BANERJEE D. The intermetallic Ti_2AlNb [J]. Progress in Materials Science, 1997, 42(1-4): 135-158.
- [6] EMURA S, ARAOKA A, HAGIWARA M. B2 grain size refinement and its effect on room temperature tensile properties of a $Ti-22Al-27Nb$ orthorhombic intermetallic

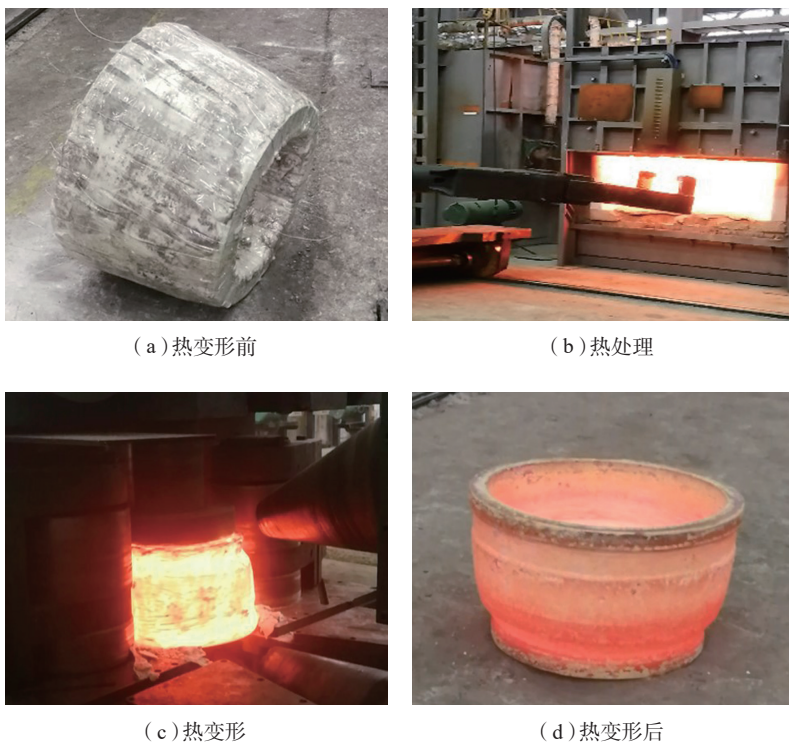


图4 Ti_2AlNb 异形截面环坯的一般轧制过程

Fig.4 General rolling process of PM Ti_2AlNb special shaped ring billet

- alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(5): 629–634.
- [7] TANG F, NAKAZAWA S, HAGIWARA M. The effect of quaternary additions on the microstructures and mechanical properties of orthorhombic Ti_2AlNb -based alloys[J]. *Materials Science and Engineer: A*, 2002, 329–331: 492–498.
- [8] COWEN C J, BOEHLERT C J. Comparison of the microstructure, tensile, and creep behavior for $Ti-22Al-26Nb$ (at. pct) and $Ti-22Al-26Nb-5B$ (at. pct)[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(1): 26–34.
- [9] BOEHLERT C J, MAJUMDAR B S, SEETHARAMAN V, et al. Part I. The microstructural evolution in $Ti-Al-Nb$ O+Bcc orthorhombic alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30(9): 2305–2323.
- [10] 王永. Ti_2AlNb 基合金的合金化、热加工及力学性能研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2012.
- WANG Yong. The study on alloying, hot deformation behaviors and mechanical properties of Ti_2AlNb based alloys[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, CAS, 2012.
- [11] 李世琼. “航天运载火箭发动机用 Ti_3Al 基合金研究”项目成果简介 [J]. *材料导报*, 2001, 15(2): 10–11.
- LI Shiqiong. Introduction of Ti_3Al based alloy for space launch vehicle engine[J]. *Materials Reports*, 2001, 15(2): 10–11.
- [12] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 等. Ti_3Al 和 Ti_2AlNb 基合金的研究与应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 336–341.
- ZHANG Jianwei, LI Shiqiong, LIANG Xiaobo, et al. Research and application of Ti_3Al and Ti_2AlNb based alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 336–341.
- [13] 杜刚, 崔林林, 雷强, 等. O 相合金 Ti_2AlNb 的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2018, 37(1): 68–73.
- DU Gang, CUI Linlin, LEI Qiang, et al. Research and development of orthorhombic titanium aluminide[J]. *Materials China*, 2018, 37(1): 68–73.
- [14] 徐磊, 郭瑞鹏, 吴杰, 等. 钛合金粉末热等静压近净成形研究进展 [J]. *金属学报*, 2018, 54(11): 69–84.
- XU Lei, GUO Ruipeng, WU Jie, et al. Progress in hot isostatic pressing technology of titanium alloy powder[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 69–84.
- [15] WU J, XU L, LU Z G, et al. Microstructure design and heat response of powder metallurgy Ti_2AlNb alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(12): 1251–1257.
- [16] 吴波. Ti_2AlNb 基合金的制备工艺、组织和力学性能研究 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2002.
- WU Bo. Study on Preparation, microstructure and mechanical properties of Ti_2AlNb based alloy[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2002.
- [17] LIN P, HAO Y G, ZHANG B Y, et al. Strain rate sensitivity of $Ti-22Al-25Nb$ (at%) alloy during high temperature[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 710: 336–342.
- [18] MA X, ZENG W D, XU B, et al. Characterization of the hot deformation behavior of a $Ti-22Al-25Nb$ alloy using processing maps based on the Murty criterion[J]. *Intermetallics*, 2012, 20(1): 1–7.
- [19] 宋涛. Ti_2AlNb 基合金成形工艺及力学性能研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2014.
- SONG Tao. Study on forming process and mechanical properties of Ti_2AlNb based alloy[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, CAS, 2014.
- [20] DONG S L, CHEN R R, GUO J J, et al. Deformation behavior and microstructural evolution of directionally solidified $TiAlNb$ -based alloy during thermo-compression at 1373–1573K[J]. *Materials & Design*, 2015, 84: 118–132.
- [21] LU Z G, WU J, GUO R P, et al. Hot deformation mechanism and ring rolling behavior of powder metallurgy Ti_2AlNb intermetallics[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(7): 621–629.
- [22] NIU H Z, CHEN Y F, ZHANG D L, et al. Fabrication of a powder metallurgy Ti_2AlNb -based alloy by spark plasma sintering and associated microstructure optimization [J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 823–829.
- [23] 吴杰, 徐磊, 卢正冠, 等. $Ti-22Al-24Nb-0.5Mo$ 粉末合金的制备及电子束焊接 [J]. *金属学报*, 2016, 52(9): 1070–1078.
- WU Jie, XU Lei, LU Zhenguan, et al. Preparation of powder metallurgy $Ti-22Al-24Nb-0.5Mo$ alloys and electron beam welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(9): 1070–1078.
- [24] 郭瑞鹏, 徐磊, 程文祥, 等. 热等静压参数对 $Ti-5Al-2.5Sn$ ELI 粉末合金组织与性能的影响 [J]. *金属学报*, 2016, 52(7): 842–850.
- GUO Ruipeng, XU Lei, CHENG Wenxiang, et al. Effect of hot isostatic pressing parameters on microstructure and mechanical properties of powder metallurgy $Ti-5Al-2.5Sn$ ELI alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(7): 842–850.
- [25] WU J, GUO R P, XU L, et al. Effect of hot isostatic pressing loading route on microstructure and mechanical properties of powder metallurgy Ti_2AlNb alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(2): 172–178.
- [26] XU L, GUO R P, BAI C G, et al. Effect of hot isostatic pressing conditions and cooling rate on microstructure and properties of $Ti-6Al-4V$ alloy from atomized powder[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2014, 30(2): 1289–1295.
- [27] 邬军. $Ti-5Al-2.5 Sn$ ELI 预合金粉末热等静压致密化行为研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2011.
- WU Jun. Investigation on densification behavior of $Ti-5Al-2.5Sn$ ELI pre-alloyed powders during HIPing[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, CAS, 2011.
- [28] 吴杰, 徐磊, 卢斌, 等. 粉末冶金 Ti_2AlNb 合金的制备及持久寿命 [J]. *材料研究学报*, 2014, 28(5): 387–394.
- WU Jie, XU Lei, LU Bin, et al. Preparation of Ti_2AlNb alloy by powder metallurgy and its rupture lifetime[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2014, 28(5): 387–394.
- [29] DIETZE M, BUCHKREMER H

P, STÖVER D. Densification behaviour of a PM titanium alloy during HIP[J]. Metal Powder Report, 1991, 46(10): 30–35.

[30] 阮建明, 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

RUAN Jianming, HUANG Peiyun. Powder metallurgy principle[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

[31] 黄东, 魏战雷, 朱郎平, 等. 热等静压对 Ti₂AlNb 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(8): 835–837.

HUANG Dong, WEI Zhanlei, ZHU Langping, et al. Influence of HIP process on mechanical properties of Ti₂AlNb alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(8): 835–837.

[32] YUAN W X, MEI J, ARMROV V, et al. Computer modeling and tooling design for near net shaped components using hot isostatic pressing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1–3): 39–49.

[33] GUO R P, XU L, WU J, et al. Simulation of container design for powder metallurgy titanium components through hot-isostatic-pressing[J]. Materials Science Forum,

2015, 817: 610–614.

[34] 刘国承. 金属粉末热等静压致密化数值模拟与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

LIU Guocheng. Metal powders densification under hot isostatic pressing: numerical simulation and experiment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[35] 齐长缨. 一种 GH4169 盘形件的锻造方法: CN 102764837A[P]. 2012–11–07.

QI Changying. GH4169–type disk parts forging method, involves baiting GH4169–type bar prepared by cast condition or powder metallurgy process into primary bar ingot, and adding bar ingot into box type heating furnace of specific degrees centigrade: CN 102764837A[P]. 2012–11–07.

[36] 田伟, 钟燕, 梁晓波, 等. Ti–22Al–25Nb 合金环件成形工艺与组织性能关系[J]. 材料热处理学报, 2014(10): 49–52.

TIAN Wei, ZHONG Yan, LIANG Xiaobo, et al. Relationship between forming process and microstructure–properties of Ti–22Al–25Nb alloy ring[J]. Transactions of Materials and Heat treatment, 2014(10):

49–52.

[37] 卢正冠, 吴杰, 徐磊, 等. 粉末 Ti–22Al–24Nb–0.5Mo 合金热变形能力的对比研究[J]. 材料研究学报, 2015, 29(6): 445–452.

LU Zhengguan, WU Jie, XU Lei, et al. Comparative study on hot work ability of powder metallurgy Ti–22Al–24Nb–0.5Mo alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(6): 445–452.

[38] YANG J L, WANG G F, WANG W C, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of P/M Ti–22Al–25Nb alloy during hot extrusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 699: 210–216.

[39] 卢正冠, 吴杰, 徐磊, 等. Ti₂AlNb 异形粉末环件的轧制成形与性能研究[J]. 金属学报, 2019, 55(6): 729–740.

LU Zhengguan, WU Jie, XU Lei, et al. Ring rolling forming and properties of Ti₂AlNb special shaped ring prepared by powder metallurgy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(6): 729–740.

通讯作者: 徐磊, E-mail: lxu@imr.ac.cn.

Development of Powder Metallurgy Ti₂AlNb Alloys

XU Lei¹, YAO Lipan², LU Zhengguan¹, WU Jie¹, YANG Rui¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

[ABSTRACT] A brief summary of historic developments of Ti₂AlNb alloy based on orthorhombic phase is presented first. Combined with the specific application background of Ti₂AlNb alloy, the research status and application of powder metallurgy (PM) Ti₂AlNb alloys in connection with near net shaping technology using hot isostatic pressing (HIP) are mainly reviewed. Key issues such as preparation of PM Ti₂AlNb alloys, powder densification during HIP, forming of complex components and hot workability of PM Ti₂AlNb alloy were discussed. Future research directions are suggested in the summary section. The bulk of the paper is concerned with progress made in the last 15 years, especially in the last decade.

Keywords: Ti₂AlNb alloys; Powder metallurgy; Hot isostatic pressing; Near net shape forming; Ring rolling

(责编 李丹)