

TiAl 基合金薄板制备技术的研究进展

章德铭¹ 任先京¹ 马江虹¹ 陈贵清² 韩杰才²

(1 北京矿冶研究总院, 北京 100044)

(2 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

文 摘 详细阐述了 TiAl 基合金薄板四大类制备技术的特点与研究进展, 包括: 特殊轧制、普通轧制、物理气相沉积和热喷涂。其中, 电子束物理气相沉积技术具有工序简单、近净成形、无污染和氧化等优点, 最具发展潜力。

关键词 TiAl 基合金, 薄板, 制备技术

Preparation Technology of TiAl-Based Alloys Sheet

Zhang Deming¹ Ren Xianjing¹ Ma Jianghong¹ Chen Guiqing² Han Jiecai²

(1 Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044)

(2 Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract The characteristics and research progress of four kinds of preparation methods of TiAl-based alloys sheet, including special rolling, general rolling, physical vapor deposition and thermal spraying, are expounded in detail. Among them, electron beam-physical vapor deposition is the most promising technology, having many advantages such as simplicity of processing, near net shaping, no pollution and no oxidation, etc.

Key words TiAl-based alloys, Sheet, Preparation technology

1 引言

TiAl 基合金不仅具有耐高温、比强度和比模量高的特点, 且弹性模量、抗蠕变性能均比 Ti 基合金好得多而与 Ni 基高温合金相当, 因此被认为是非常有前途的新型轻质高温结构材料^[1~2]。TiAl 基合金的应用研究与薄板制备研究相辅相成, 前者使得制备 TiAl 基合金薄板的要求越来越迫切, 后者则促进 TiAl 基合金的产业化进程。在 650 ~ 850℃, 基于能替代 Ni 基高温合金的轻量化选材要求, TiAl 基合金薄板在热结构及热防护系统中的应用已纳入未来欧洲航空运输研究计划(FESTIP)中。尽管 TiAl 基合金薄板在航空航天领域具有广阔的应用潜力, 还有望应用于排气喷管、低压涡轮叶片、高温风道等零部件中, 减重可达 40% 以上^[3~4]。但是 TiAl 基合金质脆、加工性差, 制备 TiAl 基合金薄板的难度很大。

1989 年, 美国 Texas 仪器公司成功对 TiAl 铸锭冷轧得到了 TiAl 基合金薄板^[5]。此后, TiAl 基合金薄板的制备研究获得了较大发展, 并已接近产业化, 但文献报道较少。目前, 较成熟的薄板制备研究主要集中在美国、奥地利、德国、日本和俄罗斯, 主要的

TiAl 基合金薄板研究体系包括: 奥地利 Plansee 公司研制的 Ti-46.5Al-4(Cr, Nb, Ta, B) (γ -MET) 系列合金、德国 GKSS 研究中心研制的 Ti-46Al-9Nb (TNB) 系列合金, 以及双方合作生产的 Ti-48Al-2Cr 合金等。我国只有中南大学、哈尔滨工业大学和北京科技大学等单位做了部分研究工作, 但离产业化还有一定的距离。本文主要阐述 TiAl 基合金薄板四大类制备技术的特点与研究进展。

2 TiAl 基合金薄板的制备技术

目前, 研究最多、工艺也最成熟的 TiAl 基合金薄板制备技术, 几乎需要对合金进行以轧制为核心的热加工, TiAl 基合金的常规热加工工艺温区见图 1^[6]。

若先生成 TiAl 基合金后轧制得到薄板, 则由于材料的本质脆性, 通常需要采取特殊方式的热轧, 此类方法被称为特殊轧制; 若先轧制成板后反应生成 TiAl 基合金, 则通常采用普通的冷/温轧方式即可, 这类方法被称为普通轧制。最近几年新开发的 TiAl 基合金薄板制备技术则包括物理气相沉积(PVD)和热喷涂等。

收稿日期: 2008-09-08

作者简介: 章德铭, 1977 年出生, 博士, 主要从事物理气相沉积和热喷涂方面的研究。E-mail: hitzdm@163.com

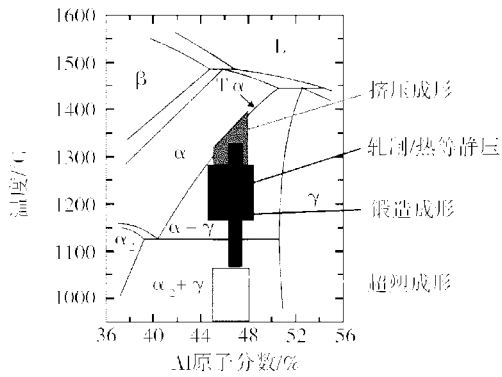


图1 TiAl 基合金的常规热加工工艺^[6]

Fig.1 Conventional hot-working process of TiAl-based alloys

2.1 特殊轧制技术

为了实现 TiAl 基合金的轧制变形, 研究者们开展了一系列探索性研究。H. Y. Kim 等人认为^[6], TiAl 基合金的热塑性变形是一个热激活过程, 遵循 Zener - Hollomon 关系, 即要实现安全变形需要足够高的变形温度 [通常在脆/韧性转变温度 (BDTT) 以上] 以及足够低的应变速率。然而, 当变形温度大于 800°C 时, TiAl 基合金的抗氧化性能显著降低, 在变形过程中易发生氧化, 增加了材料脆性和产生裂纹的可能性, 严重降低了 TiAl 基合金的可轧制性能。因此, 要成功轧制制备无缺陷的 TiAl 基合金薄板, 需要掌握以下三个原则^[7]: (1) 应在高温 ($\alpha + \gamma$) 相区进行近等温轧制; (2) 需严格控制轧制速率和每道次压下量, 以保证在允许的应变速率范围内; (3) 必须采取措施以避免 TiAl 基合金在轧制过程中被氧化。

包套热轧工艺是特殊轧制技术中较早开发并广泛应用的 TiAl 基合金薄板制备技术。使用包套不但可抑制合金的裂纹扩展, 防止合金氧化, 还可减少热量散失。我国张俊红等人^[8]和缪家士等人^[9], 分别采用该技术制备了 2.7 mm 厚的 TiAl 基合金薄板和 2.6 mm 厚的高钕 TiAl 基合金薄板, 轧制总变形量分别达到 65% 和 70%。M. R. Shagiev 等人^[10]采用相同技术已可制备得到 0.4 mm 厚的 TiAl 基合金薄板。据文献^[11]报道, 采用包套热轧工艺制备的 TiAl 基合金薄板的最大尺寸为 700 mm × 400 mm。

Plansee 公司与 GKSS 研究中心合作, 在原先包套热轧工艺的基础上, 开发了 ASRP 专利技术。该技术通过特殊的包套设计和严格控制热轧时的应变速率, 可在普通热轧机上, 低速轧制得到均匀合金成分的大尺寸 TiAl 基合金薄板^[12]。根据轧制前原始 TiAl 基合金制备工艺的不同, 特殊轧制技术可分为铸锭冶金 (IM) 和粉末冶金 (PM) 两种工艺路线, 如图 2 所示^[11,13]。

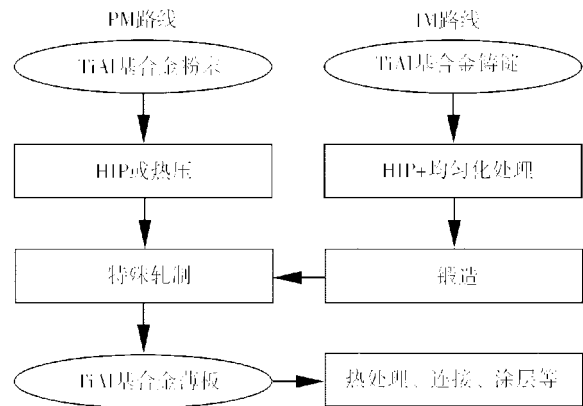


图2 特殊轧制 TiAl 基合金薄板的基本工艺流程

Fig.2 Process flow chart of TiAl-based alloys sheet prepared by special rolling

Plansee 公司最先采用的是 IM 工艺路线: 通过真空电弧熔炼得到 TiAl 基合金铸锭; 随后进行热等静压 (HIP) 和均匀化退火处理以消除铸锭中的显微孔洞和成分偏析等组织缺陷; 再在一定的温度和应变速率条件下, 采用一次或多次包套热锻细化铸造组织; 最后在 ($\alpha + \gamma$) 相区进行 ASRP 热轧得到 TiAl 基合金薄板。IM 工艺路线效率较低, 会导致 Al 含量超过 $\pm 2\%$ (原子分数) 的成分波动, 显微组织不均匀, 力学性能变化很大^[12]。此外, TiAl 基合金较差的热加工性能和包套锻造工艺使获得大尺寸的 TiAl 基合金薄板变得困难。为此, Plansee 公司又开辟了 PM 工艺路线: 使用等离子体熔炼技术得到 TiAl 基合金铸锭, 经多次重熔使铸锭成分均匀化; 随后采用 PIGA (Plasma Melting Induction Guiding Gas Atomization) 设备进行氩气雾化处理, 得到 TiAl 基合金粉末; 对经筛分得到的粒度小于 180 μm 的粉末, 在约 1280°C/190 MPa 条件下进行 2 h 的 HIP 致密化处理, 得到 TiAl 基合金坯体; 最后在 ($\alpha + \gamma$) 相区进行 ASRP 热轧得到 TiAl 基合金薄板^[14~15]。PM 工艺路线工序相对简单, 有助于降低成本, 能精确控制成分和显微结构, 并可以制备出大尺寸的 TiAl 基合金薄板, 因此 PM 路线更具有工业化潜力; 但该工艺所制备薄板的致密度和强度都要较 IM 工艺的稍差。目前, 采用 ASRP 技术制备的 TiAl 基合金薄板的最大尺寸可达到 1600 mm × 400 mm × 1 mm; 此外, 只有 150 μm 厚的小型箔也已轧制得到^[12]。表 1 为上述特殊轧制技术所制备 TiAl 基合金薄板的不同组织状态的力学性能数据, 可见该合金在高温下具有好的刚度。其中, PA 代表原始轧制变形组织经 1000°C/2 h 退火后的初始组织; NG 为近 γ 组织, DP 为双态组织, FL 为全片层组织。在 BDTT 以下, TiAl 基合金薄板的流变应力遵循 Hall - Petch 关系; 超过该温度, 由于机械孪晶和位错运动

增加而使韧性迅速增加,强度降低^[11]。

表 1 特殊轧制 TiAl 基合金薄板的力学性能

Tab. 1 Tensile properties of TiAl-based alloys sheet prepared by special rolling

合金	工艺路线	组织	BDTT/°C	$t/^\circ\text{C}$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	参考文献
γ -MET	PM	PA	750	20	452	483	0.92	[12,16]
				700	362	466	2.72	
				800	330	401	69	
TNB	PM	NG	<700	20	735	840	2.5	[14]
				700	523	700	40~65	
				1000	85	110	93	
Ti-48Al-2Cr	IM	PA	600	20	427	558	2.5~5.1	[11]
				700	362	580	50~80	
		NG	650	20	361	465	3.2~4.6	
				700	310	600	39~61	
		DP	650	20	338	504	4.2~4.5	
				700	294	496	64	
Ti-45.5Al-2Nb-2Cr	IM	As-rolled	<704	20	875	1102	4.1	[17]
				704	580	999	32	
				760	548	879	24	
				815	422	706	23	
		NG	<704	20	558	689	3.6	
				704	441	799	43	
				760	413	696	43	
				815	343	537	38	
		DP	704~760	20	896	1154	1.5	
				704	651	944	1.6	
				760	562	889	27.5	
				815	418	741	17	
FL	>815	20	730 ¹⁾	730 ¹⁾	0.2			
		704	613	756	1			
		760	572	720	0.8			
		815	510	668	1.1			

注:1) 试样屈服前断裂。

在 Plansee 公司等单位的研究成果基础上,其他研究机构又做了些完善性的工作。例如,V. M. Imayev 等人对 IM 工艺路线进行了改进,增加了在($\alpha_2 + \gamma$)相区的低温热加工工序,从而省略了氧化保护措施并避免了包套与合金基体间的扩散连接,获得了尺寸为 200 mm × 120 mm × 1.7 mm 的 Ti-45.2Al-3.5(Cr, Nb, B) 合金薄板^[18]。美国 Goodrich Aerostructures 公司与 NASA 兰利研究中心及格林研究中心等几家单位合作,发展了超塑成形、热成形以及钎

焊、点焊、扩散连接等技术,制备了 TiAl 基桁架核心波纹板和三明治式蜂窝夹芯面板^[12]。

相对于上述特殊轧制技术工序的繁琐,T. Hanamura 等人^[19],采用铸轧技术实现了 TiAl 基合金薄板的制备。铸轧技术是将热轧与传统的铸造技术相结合的一种近净成形技术,具有工艺简单、成本低廉的特点;但需要解决其显微组织粗大、均匀性差、氧含量高问题。研究表明^[20]:在铸轧 TiAl 基合金中添加

TiB₂或 Al₂O₃颗粒可显著改善薄板的力学性能;并且高的氧含量也未对 TiAl 基合金的韧性产生明显的不良影响。

美国学者发展了一种类似于铸轧技术的熔融溢流快速固化技术(MORST),又称直接铸造技术。该技术是在制备 Ti 合金箔的基础上用于 TiAl 基合金薄板制备的^[21~22]。MORST 借助等离子熔化溢流炉,在氩气保护气氛下,将以等离子氩弧熔化于坩埚中的金属液体溢流到冷凝钨辊表面,从而得到 TiAl 基合金板坯;随后对板坯进行包套热轧、冷轧和退火处理,最终得到显微组织均匀、细小且致密度与强度较高的 TiAl 基合金薄板。与 IM 工艺路线相比,MORST 的产物纯净、组织性能良好且成本较低;但室温塑性通常较差。目前,利用 MORST 已成功制备出 0.5 mm 厚、100 mm 宽、3 000~4 000 mm 长的 TiAl 基合金板坯,经轧制后可得到约 0.1 mm 厚的箔材。

2.2 普通轧制技术

为了克服 TiAl 基合金冷热加工变形性差的缺陷,有效避开难度较大的特殊轧制工序,依据先轧制成板后反应生成 TiAl 基合金的原则,普通轧制技术应运而生。根据轧制前材料形式的不同,普通轧制技术可分为粉末活化(RP)和箔片活化(RF)两种工艺路线,如图 3 所示^[23]。

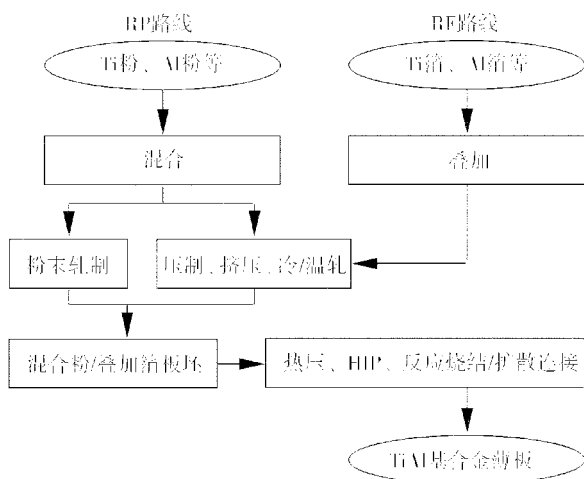


图3 普通轧制 TiAl 基合金薄板的基本工艺流程

Fig.3 Process flow chart of TiAl-based alloys sheet prepared by general rolling

RP 工艺路线采用 Ti、Al 混合粉及其他合金元素粉末作为原料,经常规轧制等过程固结成形成混合粉末板坯,再通过加压反应烧结等得到 TiAl 基合金薄板。RP 工艺路线不仅避开了 TiAl 基合金的本质脆性和难热加工变形性,无需特殊轧制等苛刻的工艺,而且简化了工艺流程,成本较低,且可获得均匀细小的显微组织。RP 工艺路线的不足之处在于:(1)由

于 Ti、Al 间的扩散系数相差很大,在无压反应烧结时容易发生 Kirkendall 偏扩散,会产生大幅度的体积膨胀,使制备完全致密化的 TiAl 基合金薄板存在很大困难^[24]。因此,必须采用热压或 HIP 等加压烧结手段,以抑制体积膨胀,消除孔隙,提高薄板的致密度。(2)由于 Ti、Al 具有很强的化学活性,容易在薄板中引入氧化物夹杂,使制备纯净的 TiAl 基合金薄板存在很大困难,且力学性能也有待进一步提高。江焱等人^[25]采用 Ti、Al 粉末直接冷轧成板坯,随后进行低压反应烧结,获得了 1.3~1.6 mm 厚的高孔隙率 TiAl 基合金薄板。文献[26]中提到了一种伪等静压(pseudo-HIP)设备,可使在反应烧结的同时保持甚至提高薄板的致密度成为可能。此外,T. J. Jewett 等人^[24]也采用 RP 工艺路线,成功制备了 TiAl 基合金薄板。

为降低薄板中氧含量并提高致密度,采用高纯 Ti、Al 箔片取代 Ti、Al 粉末被认为是可行的。例如 J. G. Luo 等人^[27]采用该法在获得 Ti/TiAl₃ 微层板的基础上,经过上百次的冷轧-退火循环处理后,获得了孔隙率仅为 3.43% 的单相 γ 合金薄板。H. Fukutomi 等人^[28]的研究表明:RF 工艺路线不仅可制备氧含量低、力学性能良好的 TiAl 基合金薄板;而且可获得具有定向层片结构的显微组织,从而改善材料的室温延性与蠕变抗力。A. Jakob 等人^[29]采用 RF 工艺制备 Ti-48.4Al 合金薄板的结果表明:其室温延性约为 1%,极限拉伸强度可达 400 MPa,BDTT 约为 850°C。最近,R. G. Zhang 等人^[30]通过交替叠加 Ti 箔、Al 箔和 Nb 箔的 RF 工艺,成功制备了近全片层组织的高镍 TNB 合金薄板。尽管加工步骤相当,且 RP 工艺路线的主要缺点在 RF 工艺路线中均得到了改善,但 RF 工艺路线的制备成本很高,这主要源于原材料的成本相对较高,并且扩散反应比反应烧结获得均匀 TiAl 基合金的难度要大得多。

2.3 PVD 技术

PVD 技术制备 TiAl 基合金薄板的过程可概括为四个阶段:(1)TiAl 基合金靶材被高能束激发成为气相;(2)气相粒子从靶材表面运输到基板;(3)气相粒子到达基板表面后凝结、成核、长大、成膜;(4)脱膜处理后即得到 TiAl 基合金薄板。目前,根据高能加热方式的不同,制备 TiAl 基合金薄板的 PVD 技术中包括磁控溅射(MS)和电子束物理气相沉积(EB-PVD)两种方法。

N. Senkov 等人^[31]以 TiAl 基合金粉末作为靶材,采用 MS 技术经 48 h 的溅射沉积,制备得到了 50 mm × 75 mm × 0.15 mm 自由生长的非晶态 TiAl 基合金薄板。尽管 MS 法所制备薄板的晶粒细小,有助

于改善 TiAl 基合金的塑性;但该法的沉积速率偏低,加工周期较长,不适于 TiAl 基合金薄板的大规模生产。

目前,EB-PVD 技术在制备微层板^[32]和大尺寸 Ni 基高温合金薄板^[33]方面研究的成功,为其制备 TiAl 基合金薄板奠定了坚实的基础。与 MS 技术相比,EB-PVD 技术的沉积速率要高得多,约为 0.01 ~ 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。EB-PVD 技术制备薄板的优点包括:(1)工序简单,近净成形;(2)具有很高的沉积速率和较好的工艺可重复性;(3)可以防止薄板被污染和氧化;(4)蒸发速率较高,几乎可以蒸发所有物质,为制备任意组分的薄板提供了机会;(5)电子束功率易于调节,束斑形状、尺寸和位置易于控制,有利于精确控制板厚;(6)可制备厚度均匀且形状特殊的薄板。但是 EB-PVD 技术也具有成本较高的缺点,这主要归因于 EB-PVD 设备复杂、昂贵,并且靶材的利用率不高。我们采用 EB-PVD 的薄板制备新技术,制备出厚度小于 0.5 mm、尺寸为 150 mm \times 100 mm 的 TiAl 基合金薄板;并从强韧化的角度出发,制备了 TiAl/Nb 和 TiAl/NiCoCrAl 复合材料微层板^[34~35]。

2.4 热喷涂技术

根据热源的不同,目前用于制备 TiAl 基合金薄板的热喷涂技术主要包括等离子喷涂(PS)和高密度红外(HDI)辐照两种方法。

PS 技术是利用高能等离子体加热 TiAl 基预合金粉末,使之熔化并固化的薄板制备技术。该技术工艺简单,材料利用率和沉积速率较高,产物纯净且组织细小;但与 EB-PVD 技术相比,PS 技术所制备薄板的致密度和表面光洁度稍差且缺陷较多,因此,通常需进行后续轧制或者热压处理。S. C.^[36]和 J. Hales 等人^[37]分别采用 PS 后轧制和 PS 后热压的方法,制备得到了几乎全致密的 TiAl 基合金薄板。此外,NASA 兰利研究中心还在 PS 技术制备的 0.178 mm 厚的 γ -MET 合金箔基础上,将其与 SCS-6 纤维交替叠放,在 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 、103.4 MPa 下进行 2 h 的真空热压处理,获得了 SCS-6/ γ -MET 基复合材料薄板^[12]。

美国橡树岭国立实验室(ORNL)发展了一种 HDI 技术,与传统的热喷涂技术不同,但由于本质上也是熔融后固化成板,因此归于此类。该技术利用等离子体红外加工装置,通过功率密度达 3 500 W/cm^2 的等离子弧灯所产生的红外光照射合金粉末预制坯,使之快速液化并在熔融状态烧结生成 TiAl 基合金薄板。该技术与传统的薄板制备技术相比,省去了许多中间步骤,能量利用率高,近净成形,生产周期短,成

本低廉;所制备的薄板纯净,并具有理想的晶粒尺寸和良好的性能,最大尺寸为 350 mm \times 32 mm,厚度通常介于 0.025 ~ 1 mm;并且可通过在金属粉末中添加纤维或者陶瓷的办法,方便的制备复合材料薄板^[38]。

3 结语

目前,TiAl 基合金已步入实用化研究阶段,而 TiAl 基合金薄板的制备是其实用化研究中最重要课题之一。在诸多制备方法中,粉末冶金等特殊轧制技术,是目前唯一可进行批量生产的方法,但该法的成本高且技术保密。我国有关 TiAl 基合金薄板的制备研究报道主要局限于铸锭冶金和粉末活化这两种方法,其中铸锭冶金方法制备得到的薄板厚度为 2.6 ~ 2.7 mm,材料的轻量化优势无法体现;而采用粉末活化方法制备得到的薄板孔隙率高达 40% 左右。箔片活化和磁控溅射方法的制备成本很高;铸轧、熔融溢流快速固化以及高密度红外辐照方法的技术尚不成熟,并且需对现有设备进行改造;等离子喷涂方法的制备成本低廉,具有一定潜力。EB-PVD 技术的相关研究为 TiAl 基合金薄板的制备提供了新的思路,部分解决了其脆性难加工的缺点,工序非常简单且成本在可接受的范围,对加速实现 TiAl 基合金薄板在我国的产业化应用具有重要意义。

参考文献

- 1 Dimiduk D M. Gamma titanium aluminide alloys—an assessment within the competition of aerospace structural materials. *Materials Science and Engineering*,1999;A263:281~288
- 2 Loria E A. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials. *Intermetallics*,2000;(8):1339~1345
- 3 Austin C M. Current status of gamma Ti aluminides for aerospace applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*,1999;(4):239~242
- 4 Bartolotta P A, Krause D L. Titanium aluminide applications in the high speed civil transport. In: *International symposium on gamma titanium aluminides*, California, The Minerals, Metals and Materials Society,1999:1~9
- 5 Das G, Kestler H, Clemens H et al. Sheet gamma TiAl: status and opportunities. *JOM*,2004;56(11):42~45
- 6 Kim H Y, Sohn W H, Hong S H. High temperature deformation of Ti-(46~48)Al-2W intermetallic compounds. *Materials Science and Engineering*,1998;A251:216~225
- 7 Koeppel C, Bartels A, Clemens H et al. Optimizing the properties of TiAl sheet material for application in heat protection shields or propulsion systems. *Materials Science and Engineering*,1995;A201:182~193
- 8 张俊红,黄伯云,周科朝.包套轧制制备 TiAl 基合金板材. *中国有色金属学报*,2001;11(6):1055~1058
- 9 缪家士,林均品,王艳丽.高铌钛铝基合金板材的高温包套轧制. *稀有金属材料与工程*,2004;33(4):436~438

- 10 Shagiev M R, Salishchev G A, Senkov O N et al. Properties of TiAl sheet pack-rolled at temperatures below 1 000°C. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003; 34A(6): 1 329 ~ 1 339
- 11 张俊红, 黄伯云, 贺跃辉等. TiAl 基合金板材制备技术的发展现状. *材料导报*, 2002; 16(2): 16 ~ 18
- 12 Weeks C E. Evaluation of a gamma titanium aluminide for hypersonic structural applications. Dissertation of the Degree of Master, Georgia Institute of Technology, 2005; 10 ~ 46
- 13 Chatterjee A, Mecking H, Arzt E et al. Creep behavior of γ -TiAl sheet material with differently spaced fully lamellar microstructures. *Materials Science and Engineering*, 2002; A329 ~ 331; 840 ~ 846
- 14 Gerling R, Bartels A, Clemens H et al. Structural characterization and tensile properties of a high niobium containing gamma TiAl sheet obtained by powder metallurgical processing. *Intermetallics*, 2004; (12): 275 ~ 280
- 15 Schillinger W, Bartels A, Gerling R et al. Texture evolution of the γ - and the α/α_2 -phase during hot rolling of γ -TiAl based alloys. *Intermetallics*, 2006; 14: 336 ~ 347
- 16 Bacos M P, Morel A, Naveos S et al. The effect of long term exposure in oxidising and corroding environments on the tensile properties of two gamma-TiAl alloys. *Intermetallics*, 2006; 14: 102 ~ 113
- 17 Seetharaman V, Semiatin S L. Microstructures and tensile properties of Ti 45.5Al 2Nb 2Cr rolled sheets. *Materials Science and Engineering*, 2001; A299: 195 ~ 209
- 18 Imayev V M, Imayev R M, Kuznetsov A V et al. Superplastic properties of Ti - 45.2Al - 3.5(Nb, Cr, B) sheet material rolled below the eutectoid temperature. *Materials Science and Engineering*, 2003; A348: 15 ~ 21
- 19 Hanamura T, Hashimoto K. Microstructure and high temperature strength of direct-cast gamma TiAl-based alloy sheet. *Materials Transactions JIM*, 1997; 38(7): 599 ~ 606
- 20 Hanamura T, Hashimoto K. Improvement of microstructure and mechanical properties in TiB₂-doped TiAl alloy by direct sheet casting. *Materials Transactions JIM*, 1998; 39(7): 724 ~ 730
- 21 Weaver M L, Garmestani H. Microstructures and mechanical properties of commercial titanium foils processed via the melt overflow process. *Materials Science and Engineering*, 1998; A247: 229 ~ 238
- 22 Weaver M L, Calhoun C M, Garmestani H. Microstructure, texture, and mechanical properties of continuously cast gamma TiAl. *Journal of Materials Science*, 2002; 37: 2 483 ~ 2 490
- 23 刘峰晓, 贺跃辉, 刘咏等. 粉末冶金制备 TiAl 基合金板材的研究现状及趋势. *稀有金属材料与工程*, 2005; 34(2): 169 ~ 173
- 24 Jewett T J, Dahms M. Reactive processing of Ti - 48 at. % Al sheets and foils. *Journal of Materials Synthesis and Processing*, 1995; 3(5): 339 ~ 351
- 25 江珪, 贺跃辉, 汤义武等. 元素粉末冷轧成形及反应合成制备 Ti - Al 合金板材. *中国有色金属学报*, 2004; 14(9): 1 501 ~ 1 507
- 26 Taguchi K, Ayada M, Ishihara K N et al. Near-net shape processing of TiAl intermetallic compounds via pseudo HIP-SHS route. *Intermetallics*, 1995; (3): 91 ~ 98
- 27 Luo J G, Acoff V L. Processing gamma-based TiAl sheet materials by cyclic cold roll bonding and annealing of elemental titanium and aluminum foils. *Materials Science and Engineering*, 2006; A433: 334 ~ 342
- 28 Fukutomi H, Nakamura M, Suzuki T et al. Void formation by the reactive diffusion of titanium and aluminum foils. *Materials Transactions JIM*, 2000; 41(9): 1 244 ~ 1 246
- 29 Jakob A, Speidel M O. Development of foil metallurgy technique for production of TiAl. *Materials Science and Technology*, 1994; 10(10): 845 ~ 847
- 30 Zhang R G, Acoff V L. Processing sheet materials by accumulative roll bonding and reaction annealing from Ti - Al - Nb elemental foils. *Materials Science and Engineering*, 2007; A463: 67 ~ 73
- 31 Senkov N, Uchic M D. Microstructure evolution during annealing of an amorphous TiAl sheet. *Materials Science and Engineering*, 2003; A340: 216 ~ 224
- 32 李晓海, 陈贵清, 韩杰才等. EB - PVD 法制备微层材料的研究. *宇航材料工艺*, 2005; 35(6): 13 ~ 16
- 33 李晓海. EB - PVD 制备大尺寸 Ni 基高温合金薄板的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2006
- 34 Han J C, Zhang D M, Chen G Q et al. Fabrication, microstructure and properties of electron beam-physical vapor deposited TiAl sheet and TiAl/Nb laminated composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006; 16(S2): 449 ~ 452
- 35 张如炳, 陈贵清, 章德铭等. TiAl/NiCoCrAl 层板复合材料的 EB - PVD 制备及组织性能研究. *航空材料学报*, 2008; 28(1): 33 ~ 37
- 36 Jha S C, Forster J A. Producing titanium aluminide foil from plasma-sprayed preforms. *JOM*, 1993; 45(7): 57 ~ 59
- 37 Hales S J, Saqib M, Alexa J A. An innovative method for manufacturing gamma-TiAl foil. *Gamma Titanium Aluminides*, 2003
- 38 Rivard J D K, Blue C A, Ott R D et al. Advanced manufacturing technologies utilizing high density infrared radiant heating. *Surface Engineering*, 2004; 20(3): 220 ~ 228

(编辑 李洪泉)