

TiAl合金精密成形技术研究进展

李宝辉 侯正全 邱立新 陈斌

(上海航天精密机械研究所,上海 201600)

文 摘 综述了 TiAl合金成形技术的研究现状,着重介绍了铸锭冶金、粉末冶金、精密铸造、挤压和锻造、板材制备等精密成形技术。

关键词 TiAl,精密成形,铸造,粉末冶金,板材

Development of Research on Precision Forming of TiAl Alloys

Li Baohui Hou Zhengquan Qiu Lixin Chen Bin

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600)

Abstract Development of research on precision forming of TiAl alloys are reviewed, such as ingot metallurgy, powder metallurgy, precision casting, extruding and forging, sheet rolling, etc.

Key words TiAl, Precision forming, Casting, Powder metallurgy, Sheet

1 前言

TiAl合金是新一代轻质耐高温结构材料,具有高熔点、低密度、高弹性模量、好的高温强度(700~900)、好的阻燃能力和抗氧化性等优点。表1对比

了 TiAl合金与 Ti基合金、Ti₃Al基合金和 Ni基合金的性能^[1]。TiAl合金主要应用于航空航天及汽车领域,如发动机压缩机叶片、低压涡轮、排气阀等^[1~3]。

表1 TiAl合金与 Ti基合金、Ti₃Al基合金和 Ni基合金的性能

Tab 1 Properties of TiAl, Ti-based, Ti₃Al-based and Ni-based alloys

| 合金 | 密度 /g·cm ⁻³ | 弹性模量 /GPa | 蠕变极限 温度/ | 氧化极限 温度/ | 室温塑性 /% | 高温塑性 /% | 900 弹性 模量 /GPa | 拉伸强度 /MPa | 屈服强度 /MPa |
|---------------------|---------------------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------------|--------------|--------------|
| Ti基 | 4.5~4.6 | 96~110 | 600 | 600 | 10~25 | 15~50 | - | 480~1200 | 380~1150 |
| Ti ₃ Al基 | 4.15~4.7 | 110~145 | 750 | 650 | 2~10 | 10~20(660) | 90~110 | 800~1140 | 700~900 |
| TiAl基 | 3.7~4.1 | 160~180 | 750~950 | 800~950 | 1~4 | 10~600(870) | 140 | 450~700 | 400~630 |
| Ni基 | 7.9~9.5 | 190~210 | 800~1090 | 870~1090 | 3~25 | 20~80(870) | 140~150 | 1250~1450 | 800~1200 |

近年来,通过成分优化、组织控制和改善加工工艺等方法,使 TiAl合金的性能得到普遍提高。但热加工难度大仍是 TiAl合金面临的问题之一,也是其大规模应用的主要障碍。本文概述了 TiAl合金精密成形方面的研究进展。

2 TiAl合金成分和组织

工程应用的 TiAl合金主要由大量的 γ -TiAl(L1₀型结构)和少量的 α_2 -Ti₃Al(DO₁₉型结构)组成,如图1所示^[1]。 γ -TiAl晶胞的轴比为 $c/a = 1.02$,发生了轻微的畸变,在 [001]晶向上分别由纯 Ti和 Al原子平面交替组成。

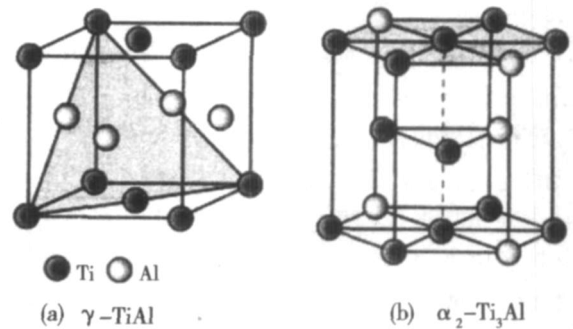


图1 γ -TiAl和 α_2 -Ti₃Al的晶体结构

Fig 1 Crystal structures of γ -TiAl and α_2 -Ti₃Al

收稿日期:2008-05-26

作者简介:李宝辉,1980年出生,博士,主要从事轻质合金的精密铸造及热精密成形工作。E-mail: hitwinb@126.com

TiAl合金的最新发展方向之一是研究高温高性能合金,陈国良教授在高 Nb含量 TiAl合金方面进行

了许多开创性的工作^[1]。国际 TiAl合金专家 Kim 等人^[2]总结了历代 TiAl合金的发展历程,如表 2所示。

表 2 目前主要发展的几代 TiAl合金
Tab 2 Classification of gamma alloys developed up to date

| 发展历程 | 合金成分 / % (原子分数) |
|------|---|
| 第一代 | Ti - (46~48)Al - 2(Cr,Mn) - (0~2)Nb - (x)B |
| 第二代 | Ti - (46~47)Al - (0~2)Cr - 2Nb - xMn - (0~0.2)B - (0~0.2)C |
| K5合金 | Ti - (45.5~46)Al - (0~2)Cr - 3Nb - 0.2W - (0.1~0.3)B - (0~0.4)C - (0~0.2)Si |
| 当前 | Ti - 45Al - (5~10)Nb - (0~0.2)B - (0~0.2)C - (0~0.2)Si |
| 将来 | Ti - (44~46)Al - (4~8)Nb - (0~0.6)(W,Hf) - xB - (0~0.8)(C,Si) |

TiAl合金有四种典型的显微组织,分别是全层片组织(FL)、近层片组织(NL)、双态组织(DP)和近组织(NG)^[3]。TiAl合金的力学性能对显微组织极其敏感,可概括如下:粗大的全层片组织具有优良的断裂韧性和抗蠕变性,但强度和塑性较差;近层片组织有最好的强度并有一定的塑性;双态组织塑性最好,但断裂韧性和抗蠕变性较差;近组织综合力学性能较差^[4]。工程用 TiAl合金的各种力学性能必须

具有良好的协调性,即具有较好的综合性能。一般来说,晶粒尺寸在 50~250 μm、层片间距在 0.05~0.5 μm、 α_2 相体积分数在 5%~25%之间的具有锯齿互锁晶界的全层片组织有最好的综合性能^[1,3,5]。

3 TiAl合金的成形技术及应用

TiAl合金的发展目标是在 600~900 替代传统的超合金,以降低部件的质量。目前, TiAl合金主要的成形技术如图 2所示^[3~6]。

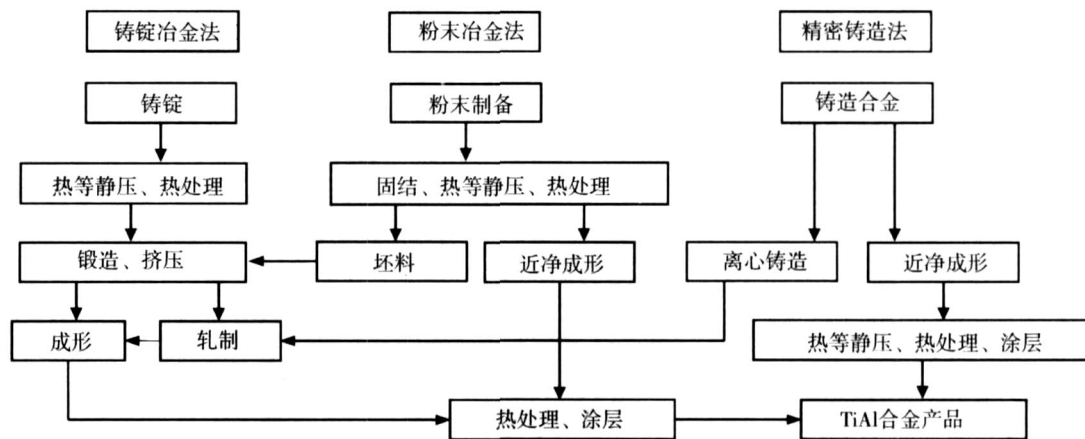


图 2 TiAl合金的加工工艺路线

Fig 2 Manufacturing route of TiAl alloys

3.1 铸锭制备

TiAl合金铸锭组织粗大、强度低、塑性差,但可以作为后续热加工处理的预备工艺,因此能否制备出表面无裂纹、成分均匀、内部无大的缩孔和集中缩松缺陷的铸锭是很关键的。俄罗斯 VSMPO 公司采用真空电弧熔炼法制备出大尺寸质量完好的铸锭,直径达 960 mm、质量达 1.0~2.5 t^[7]。德国 GfE 通常可以生产多种成分的工业化规模 TiAl 铸锭,直径 300 mm、高度 1500 mm^[5]。

3.2 精密铸造

美国 GE^[8]将熔模精铸法铸造的 Ti - 47Al - 2Cr - 2Nb 合金低压涡轮机叶片(LPT balde)安装在 CF6 - 80C2 型商业用途运输航行器上进行了第一次发动机试验,通过了 1000 次模拟飞行循环的考核,结果宇航材料工艺 2008 年 第 5 期

TiAl合金叶片完整无损。在此基础上,铸造出 GE - 90 发动机用的过渡导梁板,长度 200 mm、最大宽度 60 mm。另一个设计是先进发动机辐射扩散器,直径 61 cm、宽度 6.25 cm、厚度 5 cm,外面有 16 个支撑筋。

在汽车发动机部件中,研究最集中的是涡轮转子和排气阀。日本三菱公司和 Daido Steel 公司^[9~10]采用真空熔炼反重力低压铸造技术(CLV)生产了 Ti - 48Al - 2Nb - 0.7Cr - 0.3Si 合金涡轮转子,替代较重的 Ni 基合金 Inconel 713C 涡轮转子应用在三菱赛车上。转子直径 10 或 15 cm,叶片尖端厚度可达 0.35 mm,经热等静压后用在柴油或汽油发动机上。测试表明,使用 TiAl 合金更节省启动时间,提高了最大转速。用同样的铸造工艺生产了排气阀,经耐久力测试

表明稳定性良好。CLV工艺也可以用Ar保护水冷铜坩埚感应熔炼,然后采用低压反重力铸造,合金中O质量分数在0.05%左右。美国Howmet公司研制的增压涡轮及进气阀、排气阀已在一定范围商业化,由ABB公司用在两个柴油发动机上运行了4000h,结果取得了成功^[8]。德国MTU成功进行了低压涡轮机马达精密铸造TiAl叶片的旋转试验^[3]。德国某公司,采用水冷感应熔炼和永久模离心铸造技术生产汽车排气阀,30min一个循环,一个循环50个铸件,年产量约 6×10^5 件^[3]。TiAl合金精密铸造技术相对来说比较成熟,该工艺具有近净成形性和成本低的特点。但是要想取得大规模商业应用还有待成本的降低,目前其高成本主要由铸造工艺、热等静压、电加工、机加工几部分引起的。

3.3 粉末冶金(PM)

粉末冶金TiAl合金晶粒细小、成分均匀,但是杂质含量较高(O、N等),工艺较复杂。该技术一般需要对粉末进行包套热压、热挤、热等静压及烧结而成形。Ti-47Al-2Cr-1Nb-1Ta合金气体雾化粉末经过1150℃热挤压后显示出良好的低温超塑性,在应变速率为 2×10^{-5} /s,800℃时伸长率高于310%;而经过1400℃热挤后,形成了细小全层片组织,具有良好的蠕变抗力^[11]。

洁净粉末生产方法的最新进展和致密化工艺的改进提高了人们对粉末冶金材料的兴趣。TiAl合金粉末可以经热等静压成坯后直接轧制成板材而无需均匀化热处理和锻造,从而使PM工艺成为生产板材的一种有吸引力的选择。而且由于热等静压可以生产更大尺寸的坯料,从而PM工艺可能实现大型TiAl板材的生产。德国GKSS研究中心采用等离子体熔化惰性气体雾化(PIGA)设施可以大规模生产微细的、几乎无偏析的预合金TiAl粉末^[5]。

另外,采用粉末冶金法制备纳米TiAl材料已被研究者所关注,通过合理控制球磨工艺可以得到纳米TiAl粉末,但是在随后烧结过程中很难控制纳米颗粒的长大,这方面的工艺还有待进一步的研究。

3.4 锻造和挤压

锻造/挤压工艺可以使TiAl合金获得更好的综合性能。比如^[12]Ti-46Al-1.5(Mo,Cr)-0.2Si合金经过热挤后,晶粒尺寸下降到约1μm,室温下弹性模量为(170±3)GPa,拉伸强度1050MPa,伸长率为3%,断裂韧性25MPa·m^{1/2},疲劳强度600MPa, $R=-1$,工作温度750℃。采用双步热机械处理(最后一步在共晶点 T_e 以下)的Ti-44.2Al-3(Cr,Nb,B)合金晶粒细小($d_1=3\sim4\mu\text{m}$, $d_2=1.5\mu\text{m}$),800℃时材料拉伸强度达517MPa,伸长率达134%。

日本三菱公司^[8,13]将Ti-45Al-5Mn合金经过

铸锭/锻造/热处理/机加工或铸锭/锻造/轧制/弯曲/热处理/机加工等路线生产所需部件。一个典型的锻造工艺为:铸锭直径150mm、高度150mm,用500t的液压机进行锻造,压头下降速度10~20mm/s,压头预热温度100~200℃,锻造时间2min内完成。在1300~1360℃5次锻造成截面40mm×60mm的长棒,再热轧成5mm厚的板材。一种叶片就是从锻造后长棒上机加工生产的,另一种结构件是由板材经过闭模锻造生产的。另外还采用包套挤压和包套闭模锻造工艺生产Ti-42Al-10V合金一些部件,变形温度1260℃,变形时间<1s。这两种合金经过热变形后均具有较高的强度,可以满足使用要求^[14]。

德国开发了燃气涡轮发动机高压压缩机叶片的全套生产工艺,包括热挤压、闭模锻造和电化学铣最终成形^[5]。合金成分为Ti-47Al-3.7(Nb,Cr,Mo,Si)-0.5B,以晶粒细小的挤压棒材为原料,锻造出200多个叶片。目前,德国GKSS研究人员已经建立了工业化规模等温锻造大型铸锭的工艺,例如:直径270mm、长250mm的铸锭在+双相区采用单级等温锻造可以加工成直径达600mm的薄饼锻件。

2002年初,Plansee AG开始了热挤压加工高性能汽车TiAl合金阀门件的商业化生产^[5]。选择低碳钢作为包套材料,直径250mm、长度500mm的坯料经一次热挤后成为直径60mm、长约5m的棒材。为了获得细晶材料,挤压在+相区内进行。一次挤压后的材料经过一些处理,在相同温度下二次挤压成直径为15~20mm的棒材。热矫直后,将棒材切割成一定长度并去除包套材料,随后把棒材机加工成阀门件,后续工序主要有精加工和涂层。另外,Plansee AG和GKSS还开发了方料的挤压工艺,方料典型尺寸为120mm×30mm×4000mm。GKSS正在进行高钌TiAl合金扭转热加工工艺的实验研究。

3.5 板材成形

TiAl合金板材是当前美国主要航空计划的备选材料,这些计划包括:(1)可重复使用的运载火箭,它是计划代替宇宙飞船的单级轨道飞行器;(2)NASA未来X飞机;(3)联合战斗机;(4)X-38救援车;(5)军用航天飞机;(6)机动航天器;(7)超声速飞机。此外,TiAl合金板材是理想的弹体结构蒙皮材料。20世纪80年代后期,日本和美国等国集中于板材轧制工艺的研究,如日本的等温轧制和美国的传统热包套轧制。图3为几种典型的TiAl合金板材部件^[8]。

20世纪90年代早期,Plansee AG技术中心开发了先进的轧制技术(ASRP)^[5],可在常规热轧机上生产大型TiAl板材,在较低轧制速度和+双相区下成功地轧制出大尺寸Ti-48Al-2Cr及Ti-47Al-2Cr-0.2Si合金薄板材。目前,通常可生产的TiAl
宇航材料工艺 2008年 第5期

合金板材尺寸约为 800 mm × 400 mm × 1 mm, 至今为止已轧制出的 TiAl 合金板材最大尺寸约为 2 000 mm × 500 mm × 1 mm, 代表了 TiAl 合金板材制备的最高水平。就轧制工艺而言, 生产更大尺寸的板材是可行的, 但是板材尺寸受到所用的坯料组织均匀性和尺寸的限制。目前, 主要有铸锭冶金和粉末冶金两种工艺提供所需要的板材预制坯料。Pratt - Whitney Aircraft 的研究者在 $\alpha + \beta$ 双相区, 轧制速度为 0.5 ~ 1.5 m/s, 每道次变形量为 5% ~ 15% 的条件下, 制备出厚度为 0.2 ~ 2 mm 的 TiAl 合金板材。NASA Glenn 研究中心和 Pratt & Whitney 对 Plansee AG 提供的 TiAl 板材进行了成形和连接加工^[5,8]。涉及到的连接方法有 CO₂ 激光焊接, TiCuNi 作为填充材料的真空钎焊, 1 000 /20 MPa/5 h 扩散连接。

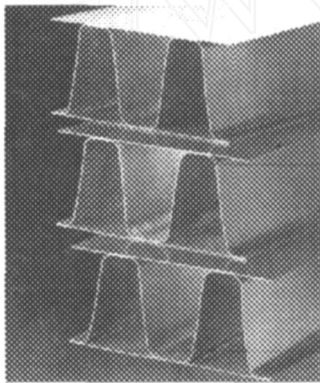


图 3 TiAl 合金板材部件

Fig 3 Sheet parts of TiAl alloy

哈尔滨工业大学已轧制出厚度达 1.5 mm 的高钒 TiAl 合金板材。开始轧制温度为 1 180 ~ 1 250, 轧制速度 < 0.5 m/s, 道次变形量为 5% ~ 15%, 道次回炉加热时间依赖样品厚度而定, 约为 5 ~ 20 min, 总变形量约 70% ~ 75%, 最终板材厚度在 1.5 ~ 2 mm。轧后板材炉冷至 300 ~ 400, 然后空冷至室温。去除包套材料及机加工后, 未发现板材有质量缺陷。北京科技大学已轧制出厚度为 2.6 mm 的高钒 TiAl 合金板材^[15]。

一般来说, TiAl 合金板材轧制要满足以下几个条件: (1) 理想的包套设计, 要考虑包套材料的热膨胀和变形能力等, 一般选择 304 不锈钢、Ti - 6Al - 4V; (2) 合理的轧制温度区间, 一般选择 $\alpha + \beta$ 双相区 (T 以下 40 ~ 150) 进行近等温轧制; (3) 严格控制轧制速度和道次变形量, 避免苛刻的应变速率和变形量的影响, 防止板材开裂; (4) 采取氧化保护措施, 保护板材; (5) 轧制后缓慢冷却, 防止热应力开裂。

4 结语

TiAl 合金研究向着高温高性能方向发展, 其目标是 600 ~ 900 替代传统的超合金, 达到减重的目的。含 5% ~ 10% (原子分数) Nb 的 TiAl 合金由于有更高的高温强度和抗氧化能力, 较普通 TiAl 合金有更广

阔的应用前景。熔模精密铸造技术具有近净成形和低成本的优势, 是今后发展的一个重要方向。随着航空航天工业对 TiAl 板材的强烈需求, 粉末冶金和铸锭冶金是两条主要途径, 但还须不断攻克和完善 TiAl 合金热变形技术, 如挤压、锻造、轧制等。

参考文献

- 1 张永刚, 韩雅芳, 陈国良等. 金属间化合物结构材料. 北京: 国防工业出版社, 2001: 438 ~ 784
- 2 Cameiro T, Kim Y W. Evaluation of ingots and alpha-extrusions of gamma alphas based on Ti - 45Al - 6Nb Intemetallics, 2005; (13): 1 000 ~ 1 007
- 3 Clements H, Appel F, Bartels A et al Processing and application of engineering - TiAl based alphas In: Proceeding of the 10th world conference on titanium, Hamburg, 2003: 2 123 ~ 2 136
- 4 陈玉勇, 孔凡涛. TiAl 基合金新材料研究及精密成形. 金属学报, 2002; 38(11): 1 141 ~ 1 148
- 5 陈振华等译. 钛与钛合金. 北京: 化学工业出版社, 2005: 98 ~ 412
- 6 李宝辉, 孔凡涛, 陈玉勇等. TiAl 金属间化合物的合金设计及研究现状. 航空材料学报, 2006; 26(2): 72 ~ 78
- 7 Teryukhin V V, Levin IV, Shibano V S et al Process development and quality evaluation of large size wrought plates from titanium intermetallide base alloy (- alloy). In: Proceeding of the 10th world conference on titanium, Hamburg, 2003: 2 285 ~ 2 292
- 8 Edward A L. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials Intemetallics, 2000; (8): 1 339 ~ 1 345
- 9 Tetsui T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles Materials Science and Engineering A, 2002; A329 - 331: 582 ~ 588
- 10 Noda T. Application of cast gamma TiAl for automobiles Intemetallics, 1998; (6): 709 ~ 713
- 11 Hsiung L M, Nieh T G Microstructures and properties of powder metallurgy TiAl alphas Materials Science and Engineering A, 2004; A364: 1 ~ 10
- 12 Frommeyer G, Kinppscheer S Enhanced superplasticity of fine-grained gamma TiAl (Mo, Cr, Si) alphas In: Proceeding of the 10th world conference on titanium, Hamburg, 2003: 2 249 ~ 2 256
- 13 Tetsui T, Shindo K, Kobayashi S et al A newly developed hot worked TiAl alloy for blades and structural components Scripta Materialia, 2002; (47): 399 ~ 403
- 14 Tetsui T, Kobayashi S, Takeyama M et al Strengthening a high-strength TiAl alloy by hot-forging Intemetallics, 2003; (11): 299 ~ 306
- 15 缪家士, 林均品, 王艳丽等. 高钒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

(编辑 李洪泉)