

聚片孪生 TiAl 单晶及其应用展望*

陈光^{1,2}, 陈奉锐^{1,2}, 祁志祥^{1,2}, 冯辰铭^{1,2},
曹月德^{1,2}, 许昊^{1,2}, 郑功^{1,2}

(1. 南京理工大学先进金属与金属间化合物材料技术工业和信息化部重点实验室 南京, 210094)

(2. 南京理工大学材料评价与设计教育部工程研究中心 南京, 210094)

摘要 简要回顾了 TiAl 金属间化合物的研究历程, 在 TiAl 单晶研究的基础上, 重点介绍了新型高温高性能聚片孪生(polysynthetically twinned, 简称 PST)TiAl 单晶理论、技术与性能等方面的突破性进展, 并分析了尚待开展的主要研究工作, 展望了其在航空发动机叶片上的应用前景。

关键词 TiAl 金属间化合物; 聚片孪生 TiAl 单晶; 力学性能; 航空发动机叶片

中图分类号 TG146.2

引 言

推重比/功重比是航空发动机的核心关键性能指标, 与质量成反比, 可以通过减重予以直接提高^[1-3]。航空发动机叶片高速旋转(通常大中型涡扇发动机叶片转速为 10~30kr/min, 小型涡轴发动机叶片转速高达 50~60kr/min)^[4-5], 每个叶片要承受十几吨的离心载荷($F = m\omega^2 r$)。每台航空发动机通常有 400 多个叶片, 离心载荷超过 4kt。叶片质量如果减小 1/2, 则离心力相应地减小 1/2, 对涡轮盘、轴等的承力以及机匣的包容性要求都减少 1/2, 将颠覆航空发动机结构设计。

TiAl 金属间化合物理论密度为 3.9 g/cm³, 不到镍基高温合金的 1/2, 是目前唯一能够在 600 °C 以上氧化环境长期使用的轻质金属材料^[3,6-8]。使用 TiAl-4822(Ti-48Al-2Cr-2Nb)合金替代镍基高温合金用作波音 787 飞机 GENx™-1B 发动机最后两级低压涡轮叶片, 使发动机减重约 181kg^[9]。“GENx™ 发动机是第 1 个使用 TiAl(4822 合金)叶片的商用飞机发动机, 与以前同级别发动机相比, 重大进步在推进效率, 实现节油 20%, 降噪 50%, 减少 NOx 排放 80%。GENx™ 使用最新的材料和设计流程实现了减重、效能提升和维护成本降低”^[7]。

笔者在简要回顾 TiAl 金属间化合物研究历程的基础上, 展望了新型高温高性能聚片孪生 TiAl 单

晶及其在航空发动机叶片上的应用前景。

1 TiAl 金属间化合物研究历程简要回顾

TiAl 金属间化合物研究可追溯到 20 世纪 50 年代, 早期研究侧重于电子显微结构^[3]。确定了 α_2 -Ti₃Al 相和 γ -TiAl 相的点阵结构, 及两者间的 Blackburn 晶体学位向关系: $(0001)_{\alpha_2} // \{111\}_{\gamma}$, $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} // \langle 1\bar{1}0 \rangle_{\gamma}$ ^[10]。1956 年, McAndrew 等^[11]发现 Ti-50Al 合金具有良好的高温强度、蠕变抗力和抗氧化性能, 但室温塑性和断裂韧性太低, 不能满足使用要求。此后, TiAl 合金研究发展缓慢。20 世纪 70 年代初, 对 TiAl 金属间化合物的合金化与性能开展了研究^[3]。到 80 年代, 以提高新一代航空发动机推重比为牵引, Pratt & Whitney 对不同成分的 TiAl 合金进行了总结, 提出了以 Ti-48Al-1V-0.3C 为代表的第 1 代双相组织 TiAl 合金, 并对其力学性能、成形工艺和典型试验件开展了系统研究^[12-15]。该合金断裂韧性较好, 但室温塑性极低, 铸件表面质量差, 无法满足使用要求。20 世纪 80 年代起, 逐步开展了商业 TiAl 合金及其工艺开发研究^[5], 最具代表性的就是美国 GE 公司开发的第 2 代 TiAl-4822 合金, 其综合性能明显优于第 1 代 TiAl 合金^[16-17]。同时, Howmet 公司与 Rolls-Royce 公司合作开展了 45XD(Ti-45Al-2Nb-2Mn-

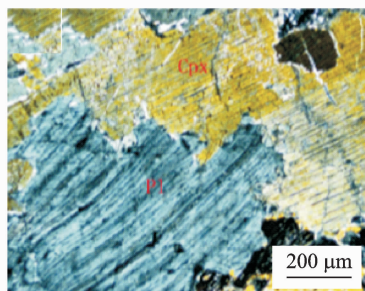
* 国家自然科学基金资助项目(51731006, 51771093, 91860104)

收稿日期: 2019-05-27

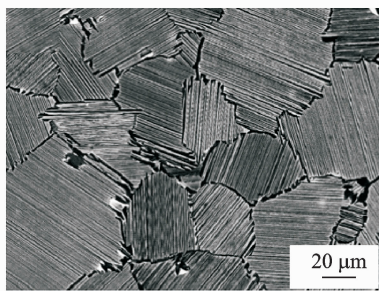
0.8 vol% TiB₂)合金及其精密铸造研究^[13,18]。

20世纪90年代开始, TiAl合金逐步进入发动机测试与商业应用阶段^[19-20]。2006年6月, GE公司宣布将在 GEnx™ 航空发动机上使用 TiAl合金低压涡轮叶片^[21]。2011年, 4822合金正式应用在波音747-8飞机 GEnx™-2B 发动机最后一级低压涡轮叶片上^[3,7]。2012年, 波音787又正式商用4822合金, 每架飞机装有2台 GEnx™-1B 发动机, 最后两级低压涡轮叶片使用4822合金^[3,7-8,12-13]。斯奈克玛(SNECMA)也计划使用4822合金作为 LEAP™ 发动机低压涡轮叶片, 代替 CFM56 发动机装配在波音737、部分空客A320neo 和中国C919飞机^[3,7,12-13]。2014年9月, 空客A320neo 飞机的 PW1100G 发动机最后一级低压涡轮叶片采用了等温锻造 TNM(Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.1B)合金, 并成功实现首次试飞, 2016年1月开始正式飞行^[12-13,22]。

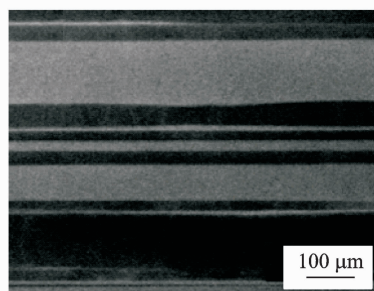
TiAl合金存在两大致命缺点: a. 室温拉伸塑性低(<2%), 必须开发相应的半脆性材料加工、制造以及发动机装配工艺路径, 增加了设计与制造成本, 且不敢用于前部的压气机^[7]; b. 承温能力有限, 强度从约650℃开始下降^[8], 700℃/3 000 h 组织失稳^[23], 限制了其长时服役温度不能超过700℃(GEnx™-1B 发动机第6,7 两级低压涡轮叶片的服役温度分别约为650℃和600℃, 第5级超过700℃^[3,7])。



(a) PST 矿物质晶体^[28]
(a) PST Mineral crystal^[28]



(b) PST TiAl晶体^[29]
(b) PST TiAl crystal^[29]



(c) 聚片孪生TiAl单晶
(c) PST TiAl single crystal

图2 片层结构显微组织
Fig. 2 Lamellar microstructure

1992年, Inui等^[31-34]系统研究了PST TiAl单晶片层取向与力学性能之间的关系, 如图3所示。发现PST TiAl单晶的力学性能具有明显的各向异性: 90°片层取向单晶强度较高, 塑性极低; 30°~60°片层取向单晶塑性好, 但强度很低; 0°片层取向单晶具有一定的强度和塑性, 居于两者之间, 但是屈服强度只有300 MPa左右, 不能满足使用要求。这种力学性能各向异性特征一直保持到1 000℃^[35-38]。

2 PST TiAl 单晶

如图1所示^[24], 镍基高温合金由传统多晶到定向凝固柱晶、再到定向凝固单晶, 承温能力不断提高。因此, 去除晶界、将多晶变为单晶是提高TiAl金属间化合物承温能力的有效途径^[25-26]。

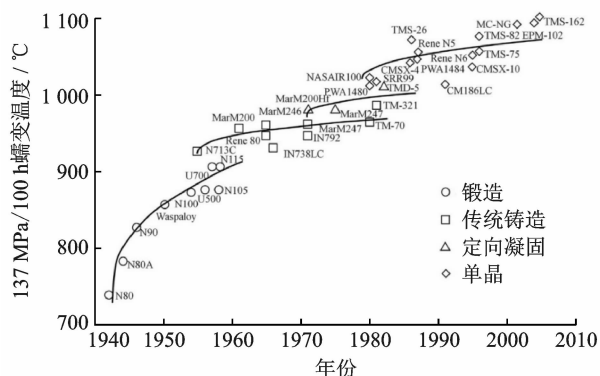


图1 Ni基高温合金发展历史^[24]

Fig. 1 Development history of Ni-based superalloys^[24]

2.1 PST TiAl 晶体

1990年, Fujiwara等^[27]发现TiAl合金中片层状组织类似于矿物晶体中的层片结构, 首次借用矿物晶体学名词PST命名了TiAl合金全片层晶体, 并沿用至今, 如图2所示。

Inui等还发现PST TiAl单晶的强度在约800℃时会出现急剧下降的现象^[32,39]。研究人员不断尝试着向PST TiAl单晶中添加强化元素, 但效果不佳^[40-41]。

1996年, Yokoshima等研究PST TiAl单晶室温和750℃断裂韧性, 发现0°片层取向单晶的断裂韧性最高, 表现出穿片层断裂特征^[42-44]。Matsuo等^[45-46]研究表明, 0°片层取向的PST TiAl单晶

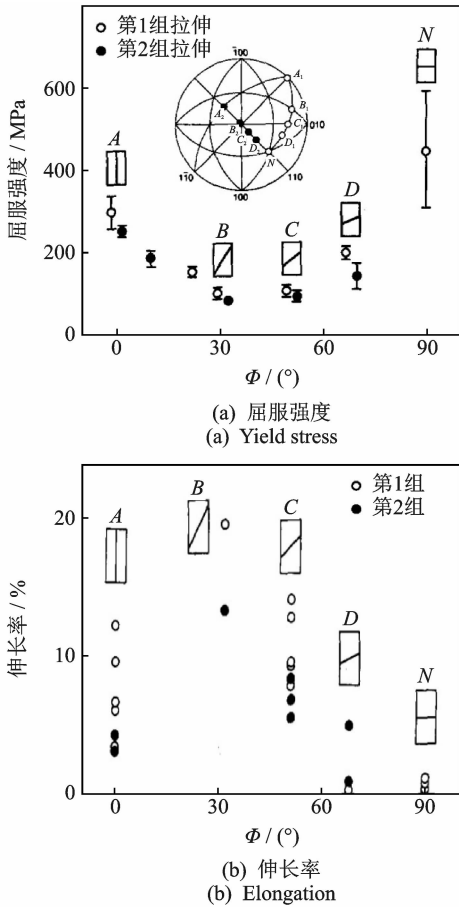


图 3 Ti-49.3Al PST 单晶片层取向与拉伸性能之间的关系^[31]

Fig. 3 Relationship between tensile properties and lamellar orientation of Ti-49.3Al PST single crystals^[31]

850 °C 时最小蠕变速率比 45° 片层取向单晶低 3 个数量级。小于 30° 或大于 80° 片层取向单晶的最小蠕变速率也小于多晶 TiAl 合金, 当片层取向为 0° 或 90° 时, PST TiAl 单晶的最小蠕变速率显著降低。需要说明的是, 上述 PST TiAl 单晶片层取向与力学性能关系研究所用试样是从 TiAl 合金多晶切取出来的小试样, 并非直接制备出的单晶试棒。

2.2 TiAl 单晶制备研究回顾

Burgers^[47] 和 Blackburn 等^[10] 晶体学位向关系分别是体心立方 (body-centered cubic, 简称 BCC) 相发生固态相变生成密排六方 (hexagonal close-packed, 简称 HCP) 相, 以及 HCP 相发生固态相变生成面心立方 (face-centered cubic, 简称 FCC) 相, 新相与母相之间遵循的位向关系, 即 $\{110\}_{\text{BCC}} // \{0001\}_{\text{HCP}}$ 和 $\{0001\}_{\text{HCP}} // \{111\}_{\text{FCC}}$, 如图 4 所示^[48]。

TiAl 合金中的 β 相、 α 相和 γ 相分别为 BCC, HCP 和 FCC 结构, 不同初生相 TiAl 合金在定向凝固及其随后的固态相变规律^[49-51] 如下, 如图 5 所示。

1) 初生 α 相 TiAl 合金, 定向凝固择优生长方向为 $[0001]$, $\{0001\}$ 晶面族与生长方向呈 90°, 根据 Blackburn 晶体学位向关系 $\{0001\}_{\alpha} // \{111\}_{\gamma}$, 即 $\alpha(\text{HCP}) \rightarrow \gamma(\text{FCC})$ 固态相变过程中, 新相 γ 的 (111) 面与母相 α 的 (0001) 面平行, 最终形成与定向凝固生长方向垂直的 PST 片层 (图 5a)。TiAl 单晶片层取向与 α 相的基面 $\{0001\}$ 一致。

2) 初生 β 相 TiAl 合金, 定向凝固择优生长方向为 $\langle 100 \rangle$, $\{110\}_{\beta}$ 晶面族有 6 种取向, 其中 2 个与生长方向成 0° (图 5b), 4 个与生长方向成 45°。根据 Burgers 晶体学位向关系 $\{110\}_{\beta} // \{0001\}_{\alpha}$, $\beta(\text{BCC}) \rightarrow \alpha(\text{HCP})$ 固态相变过程中, 密排面 $\{110\}$ 与生长方向平行的两个 β 变体 (variants) 前后会各生成 2 个 α 变体, 因此得到 4 个 α 变体, 其 $\{0001\}$ 基面与生长方向平行, 二次固态相变后形成的 PST 片层与生长方向呈 0°; 同理, 得到 8 个 α 变体, 其 $\{0001\}$ 基面与生长方向呈 45°, 二次固态相变后形成的 PST 片层与生长方向呈 45°。因此, 初生 β 相 TiAl 合金定向凝固片层取向不可控, 为随机事件, 形成 0° 片层和 45° 片层的概率分别为 1/3 和 2/3。

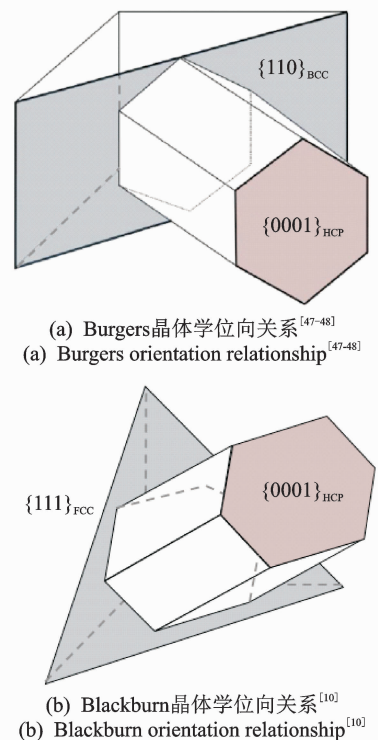


图 4 Burgers 和 Blackburn 晶体学位向关系
Fig. 4 Illustration of Burgers and Blackburn orientation relationship

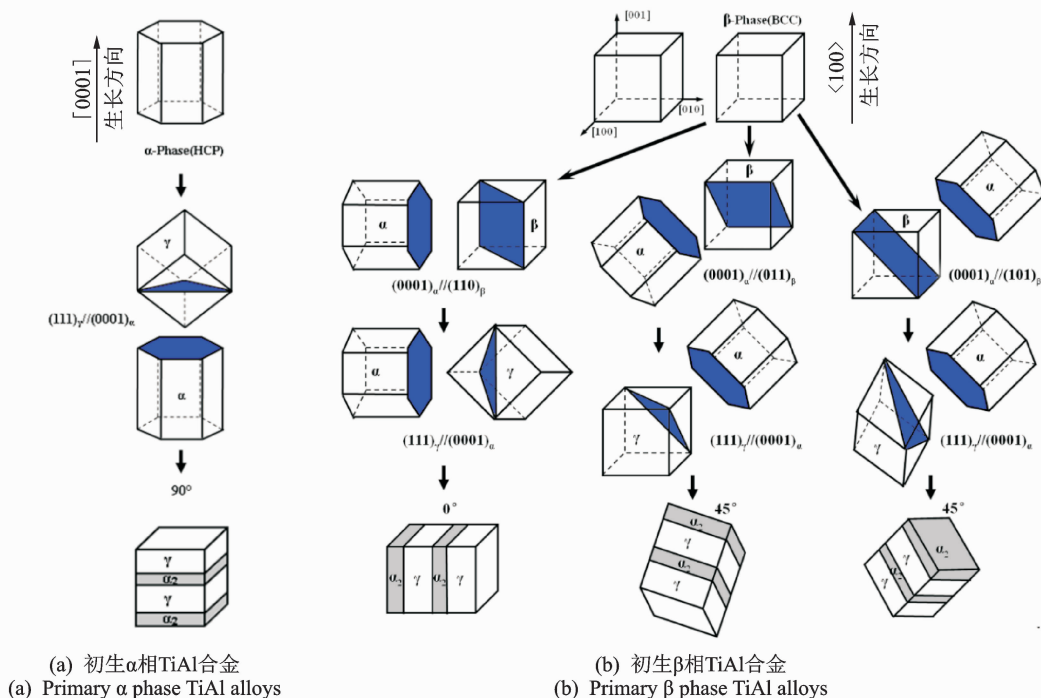


图 5 TiAl 合金定向凝固和定向固态相变过程^[51]

Fig. 5 Directional solidification and directional solid-phase transformation procedure of TiAl alloys^[51]

为了获得 0°片层取向 TiAl 单晶,开展了添加 β 相稳定元素的研究,主要有 Nb, Mo, Cr 和 Mn 等^[52-56],以期使 β 相区移向富 Al 一侧,在较大的 Al 含量范围内获得稳定的全 β 相生长。除合金元素外,定向凝固生长速率对相图也有较大影响。速率过大,会造成相图左移(包晶反应 $L + \beta \rightarrow \alpha$ 向低温和低 Al 方向偏移),变成初生 α 相凝固,则只能获得 90°片层取向 TiAl 单晶^[57-60]。

2002 年, Jung 等^[50]对初生 β 相 TiAl-X (X = Mo, Re, W) 进行定向凝固研究发现,尽管初期同时产生了具有 0°和 45°片层取向晶粒,但随着定向凝固的进行, 45°片层取向晶粒会逐渐淘汰 0°片层取向晶粒(如图 6 所示), 最终只能得到 45°片层取向 TiAl 晶体,不能得到 0°片层取向 TiAl 晶体。

鉴于初生 α 相 TiAl 合金固态相变位向关系一一对应^[10], Yamaguchi 等^[61]采用籽晶定向凝固法成功制备了 0°片层取向 TiAl 单晶。

文献^[59-62]提出了籽晶法制备 TiAl 单晶必须严格满足的 4 个要求: a. α 相必须是初生相; b. 在定向凝固过程中达到共析转变温度时,片层结构必须是稳定的; c. 在定向凝固过程中, α 相必须具有热稳定性,即通过增厚 α 片层来实现体积分数的增加,而不能生成新的 α 相; d. 在冷却过程中,此过程是可逆的,还需维持原有的晶体学取向规律。要满足如此

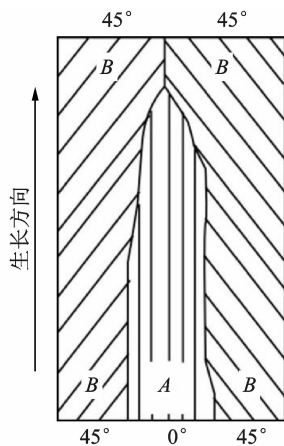


图 6 初生 β 相 TiAl 合金定向凝固过程中片层取向演化示意图^[50]

Fig. 6 Lamellar orientation evolution of primary β phase TiAl alloys under directional solidification^[50]

严苛的条件显然非常困难,迄今为止,只有 Ti-Al-Si 系和 Ti-Al-Mo-Si 系等少数合金体系满足要求,主要是通过添加 Si 元素来提高籽晶热稳定性^[44,63]。以 Ti-43Al-3Si 为籽晶制备的 TiAl 单晶主要合金体系包括^[64-73]: Ti-45Al, Ti-47Al 及 Ti-49Al 等二元合金; Ti-43Al-3Si, Ti-45Al-2Si 及 Ti-48.5Al-0.5Si 等三元合金; Ti-46Al-3Nb-0.5Si, Ti-46Al-0.5Mo-0.5Si 及 Ti-46Al-1W-0.5Si 等四元合金。但 Ti-

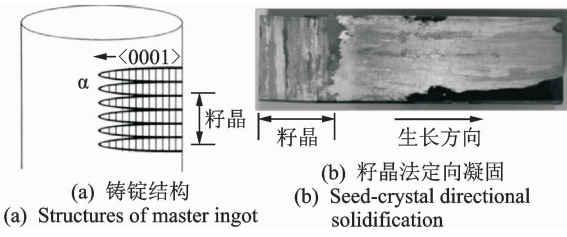


图 7 籽晶法控制初生 α 相 TiAl 合金片层取向^[42]
 Fig. 7 Seeding method to control the lamellar orientation of primary α phase TiAl alloys^[42]

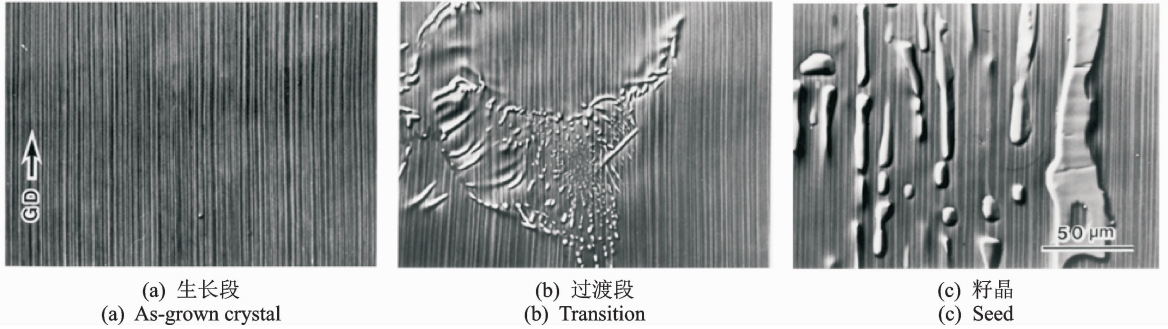


图 8 籽晶法定向凝固 Ti-47Al 合金显微组织^[67]

Fig. 8 Microstructure of Ti-47Al alloy growth from Ti-43Al-3Si seeding alloy by directional solidification^[67]

针对 Ti-43Al-3Si 籽晶制备 TiAl 单晶所遇到的问题,研究人员采用与母合金相同成分的籽晶,虽然避免了成分过渡区,但籽晶在热稳定化处理过程中片层取向难以保存^[74-79]。为解决籽晶片层取向热稳定性问题,杜玉俊^[80]通过控制动力学条件使籽晶(Ti-48Al-2Nb-2Cr、Ti-48Al-6Nb-1Cr)快速加热,但加热速率与熔区稳定性难以调控。Ding 等^[81-82]通过二次定向凝固自籽晶法获得了 0° 片层取向 Ti-46Al-5Nb 单晶。但上述籽晶法定向凝固 TiAl 单晶的力学性能均不理想。

2.3 高温高性能聚片孪生 TiAl 单晶

通过长期深入研究发现,具有 $\langle 100 \rangle$ 择优取向的定向凝固 β 相 TiAl 单晶与不同取向的 α 新相在等温面上具有不同的界面错配度(如图 9 所示^[51]), $\{0001\}_\alpha$ 基面与生长方向呈 0° 取向的错配度小于与生长方向呈 45° 取向的错配度。根据 Bramfitt 界面错配度计算公式^[83],计算得到 $(11\bar{2}0)_\alpha$, $(10\bar{1}2)_\alpha$ 与 β 相 $(00\bar{1})_\beta$ 错配度分别为 32.4% 和 35.6%, 两者相差 3.2%^[51], 进而影响新相的形核与长大过程。据此提出了利用界面各向异性调控晶体取向的理论,突破了基于 Burgers 关系 β 相凝固 TiAl 合金片层取向无法控制的定论,使聚片孪生 TiAl 单晶的使用温

度升高到大于 950°C ^[84], 推翻了不能获得平行片层取向的实验结论,打破了发达国家近 40 年 TiAl 单晶研究停滞不前的僵局。在该理论指导下,发明了定向凝固与定向固态相变相结合的单晶制备新技术:通过定向凝固获得 $\langle 100 \rangle$ 取向 β 相 TiAl 单晶,再通过定向固态相变调控 $\beta \rightarrow \alpha$ 及最终片层取向,实现了初生 β 相 TiAl 合金片层取向的有效控制,如图 10 所示^[51]。

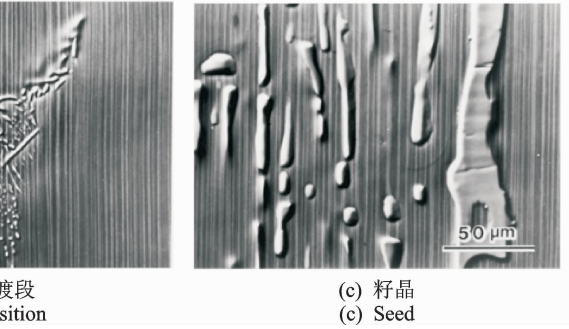


图 9 BCC- β 和 HCP- α 相定向凝固等温面的原子排布及相界面^[51]

Fig. 9 Atomic arrangement and phase interface of the BCC- β and HCP- α phase in the isotherm surface during directional solidification process^[51]

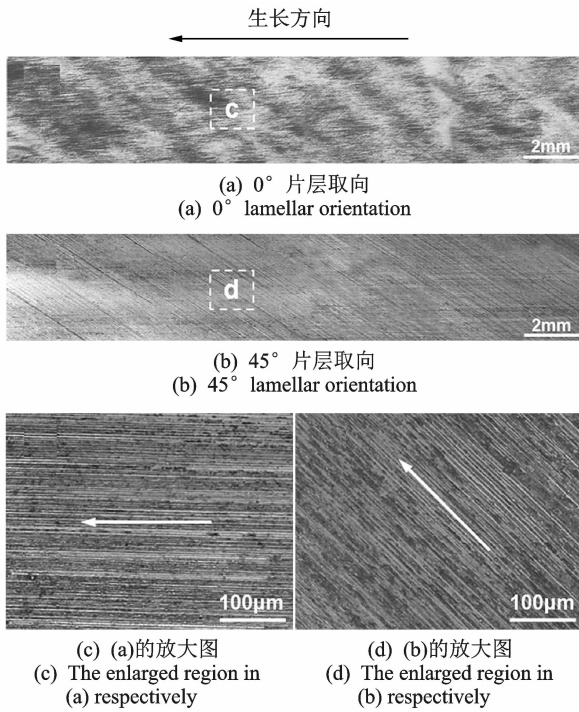


图 10 聚片孪生 TiAl 单晶片层取向^[51]

Fig. 10 Lamellar orientation of PST TiAl single crystals^[51]

发明的聚片孪生 TiAl 单晶实现了强度、塑性和蠕变抗力的优异结合与整体跨越式提升,攻克了 TiAl 合金室温脆性大和服役温度低两大国际性难题。图 11 为新型高温高性能聚片孪生 TiAl 单晶^[51]与文献报道的 TiAl 单晶^[31,51,61-62,64-68,79-80]和 4822 合金^[8,12,51]室温拉伸强度与伸长率对比。与美国 TiAl-4822 相比,聚片孪生 TiAl 单晶室温拉伸塑性由小于 2% 提高到 6% 以上,屈服强度由小于 450 MPa 提高到 700 MPa 以上,且强度和塑性均显著优于二元、三元和四元成分的其他 TiAl 单晶;聚片孪生 TiAl 单晶强度开始下降温度由 TiAl-4822 合金低于 700 °C 提高到 950 °C 以上^[51,85-89],如图 12 所示。900 °C 抗蠕变性能优于美国 TiAl-4822 合金 1~2 个数量级^[51],如图 13 所示。上述工作被认为对 TiAl 合金在更高温度的广泛应用做出了重大贡献^[8],澳大利亚技术科学与工程院院士、莫纳什大学 Polmear 教授等^[90]主编的《Light Alloys》教科书将其作为“新的突破性进展”写入第 5 版。

2.4 聚片孪生 TiAl 单晶尚待开展的工作

每一种原创性新材料从实验室到实际应用都需经历漫长过程。TiAl 金属间化合物从开始研究到进入航空发动机叶片的商业应用经历了约 60 年时

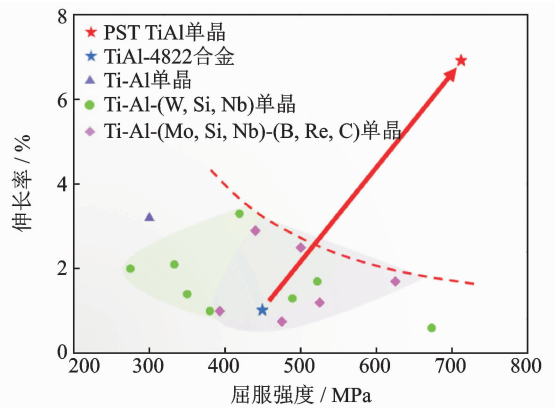


图 11 聚片孪生 TiAl 单晶与文献 TiAl 合金室温拉伸性能^[31,51,61-62,64-68,79-80]

Fig. 11 Room-temperature tensile properties of PST TiAl single crystal and reported TiAl alloys^[31,51,61-62,64-68,79-80]

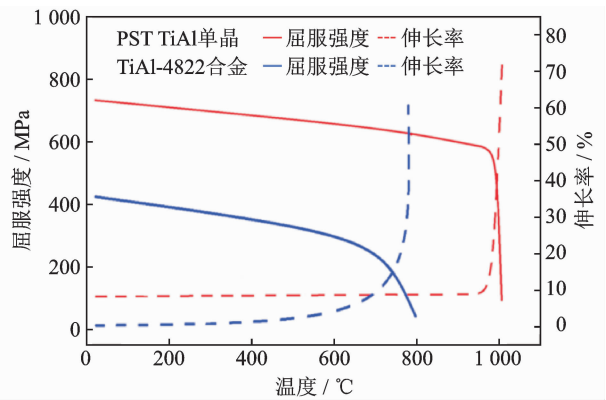


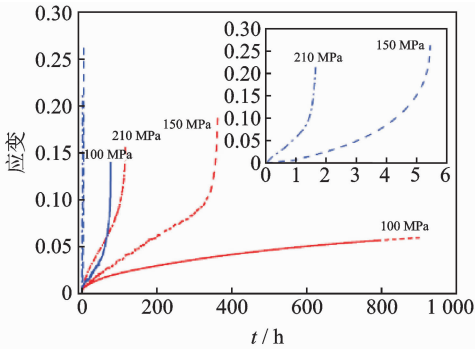
图 12 聚片孪生 TiAl 单晶与 TiAl-4822 合金不同温度拉伸性能^[51]

Fig. 12 Tensile properties of PST TiAl single crystal and TiAl-4822 alloy at different temperatures^[51]

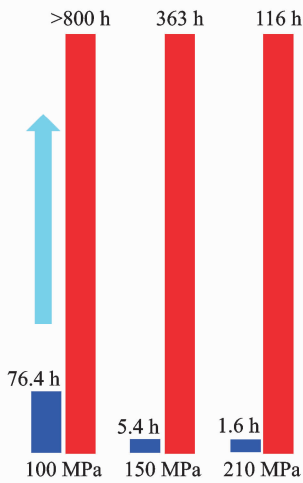
间^[9,12-13]。TiAl-4822 合金从实验室研究到实际应用经历了约 30 年^[3,7,12-13]。第 1 代 Ni 基单晶高温合金从 1969 年首次报道到 1980 年正式应用,经历了 11 年^[23,91];之后,每一代 Ni 基单晶高温合金从实验研究到正式应用都经历了 6~10 年^[24]。

新型高温高性能聚片孪生 TiAl 单晶在理论、技术与关键力学性能的实验室研究已经取得了突破性进展,但距实际应用还有很多工作尚待开展,具体包括:

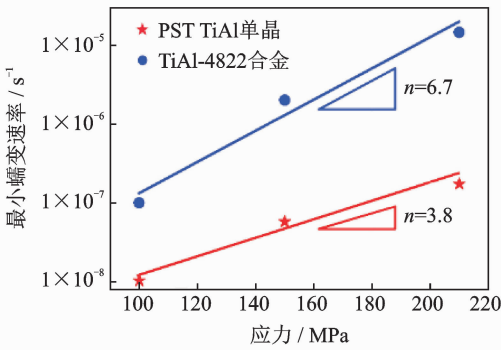
1) 疲劳行为研究。如图 14^[92]所示,根据中航工业集团对叶片失效分析的统计结果,故障叶片约 80% 的失效模式为各种形式的疲劳裂纹或疲劳断



(a) 蠕变应变-时间曲线
(a) Creep strain-time curve



(b) 持久寿命
(b) Creep lifetime



(c) 最小蠕变速率
(c) Minimum creep rates

图 13 聚片孪生 TiAl 单晶与 TiAl-4822 合金 900 °C 抗蠕变性能^[51]

Fig. 13 Creep properties of PST TiAl single crystal and TiAl-4822 alloy at 900 °C^[51]

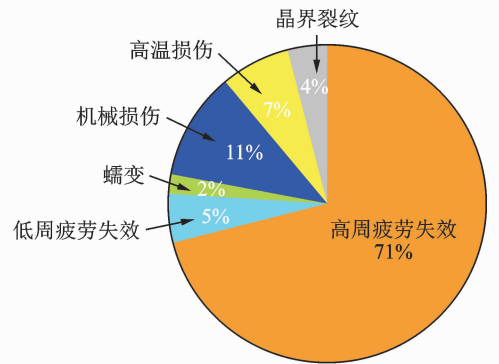
裂。需要指出的是,由于叶片工作环境复杂,疲劳断裂多数情况下并非某种单一模式,而是两种或多种模式叠加,即“复合”疲劳断裂失效。聚片孪生 TiAl 单晶疲劳行为研究尚属空白。

2) 抗氧化与抗腐蚀性能研究。由于航空发动机叶片被高温腐蚀性气体所包围,热氧化、腐蚀不可

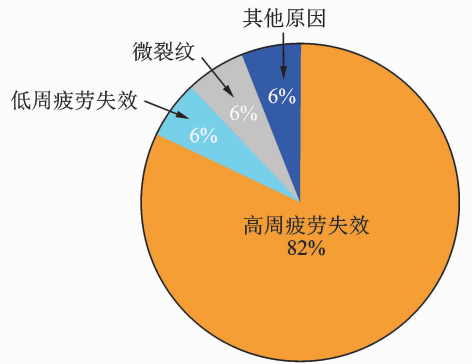
避免,造成叶片失效(涡轮叶片因氧化腐蚀失效故障占比约 7%^[92])。聚片孪生 TiAl 单晶抗氧化性能与抗腐蚀性能还没有相关研究^[93]。

3) 蠕变行为及组织稳定性研究。航空发动机叶片长时在高温、高压、高转速下工作,蠕变抗力及组织稳定性是重要指标^[94]。已有的聚片孪生 TiAl 单晶蠕变性能研究还远远不够。

4) 成形与加工技术研究。航空发动机叶片形状不规则、尺寸精度要求高,难以加工成形,亟待开展聚片孪生 TiAl 单晶成形加工技术研究。TiAl 合金熔体化学活性大,与坩埚、型壳材料反应剧烈,熔模精铸定向凝固 TiAl 单晶几乎无法实现。



(a) 涡轮叶片
(a) Turbine blades



(b) 压气机叶片
(b) Compressor blades

图 14 2000~2012 年处理的叶片失效模式统计^[92]

Fig. 14 Statistical analysis of the failure modes of blades during 2000~2012^[92]

3 新型高温高性能聚片孪生 TiAl 单晶在航空发动机叶片上的应用展望

航空发动机叶片从前往后依次可分为风扇叶片、低压压气机叶片、高压压气机叶片、高压涡轮叶片以及低压涡轮叶片等^[95-96]。图 15 为 PW1100G 和 GEnx 两种典型航空发动机结构示意图。

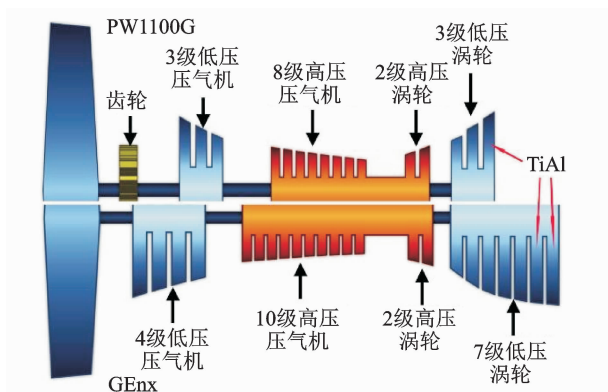


图 15 两种典型发动机结构示意图

Fig. 15 Schematic of two typical engines

低压压气机叶片工作温度小于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，目前使用钛合金^[95]。高压压气机前几级叶片工作温度小于 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，目前使用高温钛合金，后几级叶片的工作温度达到 $550\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于钛合金的长时工作温度不超过 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，因此采用镍基变形高温合金，比如 Inconel 718、GH 4169 等，密度约为 8.2 g/cm^3 ^[24,95]。现有 TiAl(4822)合金因室温拉伸塑性低 ($<2\%$)，不敢用于前部的压气机^[8]。新型高温高性能聚片孪生 TiAl 单晶室温拉伸塑性大于 6% ，可望替代镍基高温合金，应用于钛合金承温能力不能胜任的高压压气机叶片。

低压涡轮叶片工作温度约 $600\sim 1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[95]。GEnxTM-1B 航空发动机最后两级低压涡轮叶片工作温度分别约为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3,7,97]，4822 合金已经成功替代镍基高温合金应用于最后两级低压涡轮叶片。聚片孪生 TiAl 单晶由于承温能力大幅度提高到 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，有望应用于现有 TiAl 合金不能胜任的 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度范围服役的涡轮叶片，替代镍基高温合金。

合理的空心气冷结构设计与耐高温隔热层相结合，是镍基单晶高温合金用于超过其熔点的高压涡轮叶片的成功经验^[95-96]。文献[98-99]报道陶瓷隔热层能使涡轮叶片表面温度降低 $100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，结合空心气冷和热障涂层，使用温度至少提高 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若研发出聚片孪生 TiAl 单晶空心气冷和陶瓷隔热层技术，聚片孪生 TiAl 单晶空心叶片将用于 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度范围，实现大幅度减重、降低离心载荷，颠覆发动机结构设计。

参 考 文 献

[1] 彭友梅. 航空燃气涡轮发动机推重比概念和确定方法

[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1994(1):30-34.

Peng Youmei. Aviation gas turbine engine thrust-to-weight ratio concept and determination method [J]. Gas Turbine Test and Research, 1994(1): 30-34. (in Chinese)

[2] 王良. 我国航空发动机制造技术的现状与挑战[J]. 航空制造技术, 2008(S1): 32-37.

Wang Liang. Current status and challenge of Chinese aeroengine manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008 (S1): 32-37. (in Chinese)

[3] Pollock T M. Alloy design for aircraft engines[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 809-815.

[4] Zhang Weihao, Zou Zhengping, Liu Huoxing, et al. Study on turbine aerodynamics design of small turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 72-79.

[5] 邓旺群, 高德平. 涡轴发动机动力涡轮转子动力特性研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 717-722.

Deng Wangqun, Gao Deping. Dynamic characteristics study of a power turbine rotor of a turbine shaft engine [J]. Journal of Aeronautical Power, 2003, 18(6): 717-722. (in Chinese)

[6] Dimiduk D M. Gamma titanium aluminide alloys-an assessment within the competition of aerospace structural materials[J]. Materials Science & Engineering A, 1999, 263(2): 281-288.

[7] Bewlay B P, Weimer M, Kelly T, et al. The science, technology, and implementation of TiAl alloys in commercial aircraft engines[J]. MRS Proceedings, 2013, 1516: 49-58.

[8] Schütze M. High-temperature alloys: single-crystal performance boost[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 823-824.

[9] GE Aviation. The GEnx commercial aircraft engine - The GEnx engine delivers proven performance for the Boeing 787 dreamliner and Boeing 747-8 [EB/OL]. [2019-05-27]. <https://www.geaviation.com/commercial/engines/genx-engine>.

[10] Blackburn M J, Jaffee R, Promisel N. The science, technology and applications of Titanium[M]. London: Pergamon, 1970: 633-643.

[11] McAndrew J B, Kessler H D. Ti-36 pct Al as a base for high temperature alloys[J]. Journal of Metals, 1956, 8(10): 1348-1353.

[12] 冯辰铭, 张旭亮, 祁志祥, 等. TiAl 合金发展及其应用[J]. 空天材料与结构, 2018, 1(1): 54-62.

- Feng Chenming, Zhang Xuliang, Qi Zhixiang, et al. Development and application of TiAl alloy[J]. *Aerospace Materials and Structure*, 2018, 1(1): 54-62. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] Blackburn M J, Smith M P. Titanium alloys of the TiAl type: US, 4294615 [P]. 1981-10-13.
- [15] Lipsitt H A. High-temperature ordered intermetallic alloys[C]//Koch C C, Liu C T, Stoloff N S. *Materials Research Society Symposia Proceedings*. Warrendale, [s. n.], 1985: 351.
- [16] Kim Y W. Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminide[J]. *Journal of Metals*, 1989, 41(7): 24-30.
- [17] Huang S C, Hall E L. Synthesis, properties and applications of titanium aluminides [C]//*Proceedings of 6th World Conference on Titanium*. Cannes, France: Society of France Metallurgy, 1988: 1109-1114.
- [18] Kim Y W, Kim S L. Advances in gammalloy materials-processes-application technology: successes, dilemmas, and future[J]. *the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2018, 70(4): 553-560.
- [19] Noda T. Application of cast gamma TiAl for automobiles[J]. *Intermetallics*, 1998, 6(7/8): 709-713.
- [20] Tetsui T. Application of TiAl in a turbocharger for passenger vehicles[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2001, 3(5): 307-310.
- [21] Norris G. 787 special: the inside story[J]. *Flight International*, 2006, 170(5055): 39-75.
- [22] Mayer S, Erdely P, Fischer F D, et al. Intermetallic β -Solidifying γ -TiAl based alloys-from fundamental research to application[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 2017, 19(4): 1-27.
- [23] Hu D, Godfrey A B, Loretto M H. Thermal stability of a fully lamellar Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B alloy[J]. *Intermetallics*, 1998, 6(5): 413-417.
- [24] Long haibo, Mao Shengcheng, Liu Yinong, et al. Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys-a review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 743: 203-220.
- [25] Taub A I, Fleischer R L. Intermetallic compounds for high-temperature structural use [J]. *Science*, 1989, 243(4891): 616-621.
- [26] Perepezko J H. The hotter the engine, the better[J]. *Science*, 2009, 326(5956): 1068-1069.
- [27] Fujiwara T, Nakamura A, Hosomi M, et al. Deformation of polysynthetically twinned crystals of TiAl with a nearly stoichiometric composition[J]. *Philosophical Magazine A*, 1990, 61(4): 591-606.
- [28] 端葛鸿. 赣东北蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及地球化学特征[D]. 上海:华东理工大学, 2017.
- [29] Marcus W R, Andreas S, Heike G, et al. Orthorhombic phase formation in a Nb-rich γ -TiAl based alloy - An in situ synchrotron radiation investigation[J]. *Acta Materialia*, 2006, 121: 343-351.
- [30] Inui H, Nakamura A, Yamaguchi M. Deformation of polysynthetically twinned (PST) crystals of TiAl in tension and compression at room temperature[J]. *Mrs Online Proceedings Library Archive*, 1990, 213(3): 371-391.
- [31] Inui H, Oh M H, Nakamura A, et al. Room-temperature tensile deformation of polysynthetically twinned (PST) crystals of TiAl[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1992, 40(11): 3095-3104.
- [32] Inui H, Kishida K, Misaki M, et al. Temperature dependence of yield stress, tensile elongation and deformation structures in polysynthetically twinned crystals of TiAl[J]. *Philosophical Magazine A*, 1995, 72(6): 1609-1631.
- [33] Yao K F, Inui H, Kishida K, et al. Plastic deformation of V- and Zr-alloyed PST TiAl in tension and compression at room temperature[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995, 43(3): 1075-1086.
- [34] Umeda H, Kishida K, Inui H, et al. Effects of Al-concentration and lamellar spacing on the room-temperature strength and ductility of PST crystals of TiAl [J]. *Materials Science & Engineering A*, 1997, 239-240: 336-343.
- [35] 彭英博, 陈锋, 王敏智, 等. Ti-45Al-8Nb 合金 PST 晶体片层取向与力学性能的关系[J]. *金属学报*, 2013, 48(11): 1457-1461.
- Peng Yingbo, Chen Feng, Wang Minzhi, et al. Relationship between mechanical properties and lamellar orientation of PST crystals in Ti-45Al-8Nb alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 48(11): 1457-1461. (in Chinese)
- [36] Johnson D R, Chihara K, Inui H, et al. Microstructural control of TiAl-Mo-B alloys by directional solidification[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(18): 6529-

- 6540.
- [37] Inui H, Matsumuro M, Wu D H, et al. Temperature dependence of yield stress, deformation mode and deformation structure in single crystals of TiAl (Ti-56 at% Al)[J]. *Philosophical Magazine A*, 1997, 75(2): 395-423.
- [38] Kishida K, Inui H, Yamaguchi M. Deformation of lamellar structure in TiAl-Ti₃Al two-phase alloys[J]. *Philosophical Magazine A*, 1998, 78(1): 1-28.
- [39] Kishida K, Johnson D R, Masuda Y, et al. Deformation and fracture of PST crystals and directionally solidified ingots of TiAl-based alloys[J]. *Intermetallics*, 1998, 6(7/8): 679-683.
- [40] Kishida K, Inui H, Yamaguchi M. Deformation of PST crystals of a TiAl/Ti₃Al two-phase alloy at 1000°C[J]. *Intermetallics*, 1999, 7(10): 1131-1139.
- [41] Lee H N, Johnson D R, Inui H, et al. Microstructural control through seeding and directional solidification of TiAl alloys containing Mo and C[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(12): 3221-3233.
- [42] Kim S E, Lee Y T, Oh M H, et al. Directional solidification of TiAl-Si alloys using a polycrystalline seed [J]. *Intermetallics*, 2000, 8(4): 399-405.
- [43] Chan K S, Kim Y W. Effects of lamellae spacing and colony size on the fracture resistance of a fully-lamellar TiAl alloy[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995, 43(2): 439-451.
- [44] Yokoshima S, Yamaguchi M. Fracture behavior and toughness of PST crystals of TiAl[J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(3): 873-883.
- [45] Matsuo T, Nozaki T, Asai T, et al. Effect of lamellar plates on creep resistance in near gamma TiAl alloys [J]. *Intermetallics*, 1998, 6(7): 695-698.
- [46] Matsuo T, Nozaki T, Asai T, et al. Role of lamellar plates in creep of TiAl alloy with fully lamellar structure[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2002, 329-331: 774-779.
- [47] Burgers W G. On the process of transition of the cubic-body-centered modification into the hexagonal-close-packed modification of zirconium [J]. *Physica*, 1934, 1(7): 561-586.
- [48] Tong V, Joseph S, Ackerman A K, et al. Using transmission Kikuchi diffraction to characterise α variants in an $\alpha+\beta$ titanium alloy[J]. *Journal of Microscopy*, 2017: 1-12.
- [49] Kim M C, Oh M H, Lee J H, et al. Composition and growth rate effects in directionally solidified TiAl alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 1997, 239-240: 570-576.
- [50] Jung I S, Jang H S, Oh M H, et al. Microstructure control of TiAl alloys containing β stabilizers by directional solidification[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2002, 329: 13-18.
- [51] Chen Guang, Peng Yingbo, Zheng Gong, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(8): 876-881.
- [52] Jung I S, Kim M C, Lee J H, et al. High temperature phase equilibria near Ti-50 at% Al composition in Ti-Al system studied by directional solidification[J]. *Intermetallics*, 1999, 7(11): 1247-1253.
- [53] Lapin J, Gabalcová Z, Pelachová T. Effect of Y₂O₃ crucible on contamination of directionally solidified intermetallic Ti-46Al-8Nb alloy [J]. *Intermetallics*, 2011, 19(3): 396-403.
- [54] Singh A K, Muraleedharan K, Banerjee D. Solidification structure in a cast γ alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(6): 767-772.
- [55] Kainuma R, Ohnuma I, Ishikawa K, et al. Stability of B₂ ordered phase in the Ti-rich portion of Ti-Al-Cr and Ti-Al-Fe ternary systems[J]. *Intermetallics*, 2000, 8(8): 869-875.
- [56] Xiao Zhixia, Zheng Lijing, Yan Jie, et al. Lamellar orientations and growth directions of β dendrites in directionally solidified Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 324(1): 309-313.
- [57] Vaisbuch E, Romero R, Gomez R, et al. Effect of Y₂O₃ crucible on contamination of directionally solidified intermetallic Ti-46Al-8Nb alloy [J]. *Intermetallics*, 2011, 19(3): 396-403.
- [58] Lapin J, Gabalcová Z. Solidification behaviour of TiAl-based alloys studied by directional solidification technique[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(6): 797-804.
- [59] 苏彦庆, 刘桐, 李新中, 等. 籽晶法定向凝固 TiAl 基合金片层取向控制[J]. *金属学报*, 2018, 54(5): 647-656.
- Su Yanqing, Liu Tong, Li Xinzong, et al. The evolution of seeding technique for the lamellar orientation controlling of γ -TiAl based alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(5): 647-656. (in Chinese)
- [60] 樊江磊, 吴深, 高红霞, 等. TiAl 合金片层取向控制研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(12): 74-80.
- Fan Jianglei, Wu Shen, Gao Hongxia, et al. Review of lamellar orientation control of TiAl alloys[J]. *Ma-*

- terial Review, 2016, 30(12): 74-80. (in Chinese)
- [61] Yamaguchi M, Johnson D R, Lee H N, et al. Directional solidification of TiAl-base alloys[J]. Intermetallics, 2000, 8(5): 511-517.
- [62] Johnson D R, Inui H, Yamaguchi M. Directional solidification and microstructural control of the TiAl/Ti₃Al lamellar microstructure in TiAl-Si alloys[J]. Acta Materialia, 1996, 44(6): 2523-2535.
- [63] Johnson D R, Masuda Y, Inui H, et al. Alignment of the TiAl/Ti₃Al lamellar microstructure in TiAl alloys by directional solidification[J]. Materials Science & Engineering A, 1997, 239-240: 577-583.
- [64] Yamanaka T, Johnson D R, Inui H, et al. Directional solidification of TiAl-Re-Si alloys with aligned γ/α_2 lamellar microstructures [J]. Intermetallics, 1999, 7(7): 779-784.
- [65] Johnson D R, Lee H N, Muto S, et al. Microstructure and creep behavior of directionally solidified TiAl-base alloys[J]. Intermetallics, 2001, 9(10): 923-927.
- [66] Kim S E, Lee Y T, Oh M H, et al. Directional solidification of TiAl base alloys using a polycrystalline seed [J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 25: 329-331.
- [67] Johnson D R, Inui H, Muto S, et al. Microstructural development during directional solidification of α -seeded TiAl alloys [J]. Acta Materialia, 2006, 54(4): 1077-1085.
- [68] Lee H, Johnson D, Inui H, et al. A composition window in the TiAl-Mo-Si system suitable for lamellar structure control through seeding and directional solidification [J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 329-331: 19-24.
- [69] Johnson D R, Masuda Y, Yamanaka T, et al. Creep deformation of TiAl-Si alloys with aligned γ/α_2 lamellar microstructures [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2000, 31(10): 2463-2473.
- [70] Luo Wenzhong, Shen Jun, Min Zhixian, et al. Lamellar orientation control of TiAl alloys under high temperature gradient with a Ti-43Al-3Si seed[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(24): 5441-5446.
- [71] 刘桐. 定向凝固 TiAl 基合金初始糊状区演变及微观组织控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [72] Du Yujun, Shen Jun, Xiong Yilong, et al. Lamellar microstructure alignment and fracture toughness in Ti-47Al alloy by electromagnetic confinement and directional solidification[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 621: 94-99.
- [73] Zhang Chengjun, Xu Daming, Fu Hengzhi, et al. To eliminate the composition transient zone in directional solidification of TiAl alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(15): 3604-3609.
- [74] Fan Jianglei, Guo Jingjie, Long Wenzhong, et al. Lamellar orientation control of directionally solidified Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy by self-seeding technology[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(2): 183-188.
- [75] Fan Jianglei, Li Xinzhong, Su Yanqing, et al. Microstructure evolution of directionally solidified Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy [J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 337: 52-59.
- [76] Liu Dongmei, Li Xinzhong, Su Yanqing, et al. Microstructure evolution in directionally solidified Ti-(50, 52) at% Al alloys[J]. Intermetallics, 2011, 19: 175.
- [77] Liu Guohuai, Wang Zhadong, Li Xinzhong, et al. Continued growth controlling of the non-preferred primary phase for the parallel lamellar structure in directionally solidified Ti-50Al-4Nb alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 152-160.
- [78] Liu Tong, Luo Liangshun, Zhang Donghui, et al. Comparison of microstructures and mechanical properties of as-cast and directionally solidified Ti-47Al-1W-0.5Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 682: 663-671.
- [79] 胡轶嵩, 金浩, 刘荣华, 等. 光学浮区法制备定向生长 Ti-44.5Al-3Nb-0.8Si-0.2C 合金[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(9): 45-48.
Hu Yisong, Jin Hao, Liu Ronghua, et al. Directional solidification of Ti-44.5Al-3Nb-0.8Si-0.2C alloy prepared by optical floating zone furnace[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(9): 45-48. (in Chinese)
- [80] 杜玉俊. TiAl 合金定向片层组织电磁约束制备及力学性能[D]. 西安:西北工业大学, 2015.
- [81] Ding Xianfei, Lin Junpin, Zhang Laiqi, et al. Microstructural control of TiAl-Nb alloys by directional solidification[J]. Acta Materialia, 2012, 60(2): 498-506.
- [82] Ding Xianfei, Lin Junpin, Zhang Laiqi, et al. A close-to-complete peritectic transformation during directional solidification of a Ti-45Al-8.5Nb alloy[J]. Intermetallics, 2011, 19(8): 1115-1119.
- [83] Bramfitt B L. The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,

- 1970, 1(7):1987-1995.
- [84] Zheng Deshuang, Chen Ruirun, Wang Jian, et al. Novel casting TiAl alloy with fine microstructure and excellent performance assisted by ultrasonic melt treatment[J]. *Materials Letters*, 2017, 200: 67-70.
- [85] Biamino S, Penna A, Ackelid U, et al. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(6): 776-781.
- [86] Voisin T, Monchoux J P, Thomas M, et al. Mechanical properties of the TiAl IRIS alloy[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2017, 47(12): 1-12.
- [87] Appel F, Oehring M, Paul J D H. A novel in situ composite structure in TiAl alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 493(1): 232-236.
- [88] Wang Dongpeng, Qi Zhixiang, Zhang Hongti, et al. Microscale mechanical properties of ultra-high-strength polysynthetic TiAl-Ti₃Al single crystals[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 732(8): 14-20.
- [89] 陈光, 郑功, 祁志祥, 等. 受控凝固及其应用研究进展[J]. *金属学报*, 2018, 54(5): 669-681.
Chen Guang, Zheng Gong, Qi Zhixiang, et al. Research progress on controlled solidification and its applications[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(5): 669-681. (in Chinese)
- [90] Polmear I, St John D, Nie J F, et al. Light alloys: metallurgy of the light metals[M]. Elsevier: Butterworth-Heinemann, 2017: 504.
- [91] 胡壮麒, 刘丽荣, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金的发展[J]. *航空发动机*, 2005, 31(3): 1-7.
Hu Zhuangqi, Liu Lirong, Jin Tao, et al. Development of the Ni-base single crystal superalloys[J]. *Aircraft Engine*, 2005, 31(3): 1-7. (in Chinese)
- [92] 马楠楠, 陶春虎, 何玉怀, 等. 航空发动机叶片多轴疲劳试验研究进展[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(6): 44-49.
Ma Nannan, Tao Chunhu, He Yuhuai, et al. Research progress of multiaxial fatigue test methods on blades of aviation engine[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(6): 44-49. (in Chinese)
- [93] Schütze M, Quadackers W J. Future directions in the field of high-temperature corrosion research[J]. *Oxidation of Metals*, 2017, 87(5/6): 681-704.
- [94] Appel H F, Paul J D H, Oehring M. Gamma titanium aluminide alloys: science and technology[M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2011: 313-352.
- [95] 郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 491-774.
- [96] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014: 137-285.
- [97] Bewlay B P, Nag S, Suzuki A, et al. TiAl alloys in commercial aircraft engines [J]. *High Temperature Technology*, 2016, 33(4-5): 549-559.
- [98] 霍武军, 孙护国. 先进的航空发动机涡轮叶片涂层技术[J]. *航空科学技术*, 2001(3): 34-36.
Huo Wujun, Sun Huguo. Advanced turbine blade coating technology for aero-engine[J]. *Aviation Science and Technology*, 2001(3): 34-36. (in Chinese)
- [99] 叶雄, 谭俊, 宋皓, 等. 航空发动机叶片尖涂层的研究进展[J]. *材料保护*, 2018, 51(2): 87-94.
Ye Xiong, Tan Jun, Song Hao, et al. Study advances of blade tip coatings for aero-engine[J]. *Material Protection*, 2018, 51(2): 87-94. (in Chinese)



第一作者简介: 陈光,男,1962年4月生,教授、博士生导师。南京理工大学先进金属与金属间化合物材料技术工信部重点实验室主任、材料评价与设计教育部工程研究中心主任,国家某重大重点项目专家组首席科学家,全国创新争先奖和江苏省专利发明人奖获得者,江苏省有突出贡献中青年专家、优秀科技工作者、留学回国先进个人。主要研究方向为凝固技术与新材料、单晶高温合金与TiAl金属间化合物材料技术。作为第1完成人荣获国家技术发明二等奖1项,省部级科技奖10项,其中教育部技术发明一等奖1项,江苏省科技一等奖2项。已获授权国家发明专利64项、国际发明专利1项。在《Nature Materials》,《Acta Materialia》等期刊公开发表学术论文200余篇,出版专著2部。
E-mail: gchen@njust.edu.cn