

特约专栏

# TiAl 基金属间化合物的研究现状与发展趋势

李金山<sup>1</sup>, 张铁邦<sup>1</sup>, 常 辉<sup>1</sup>, 寇宏超<sup>1</sup>, 周 廉<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘 要:** 系统地总结了 TiAl 基金属间化合物结构材料的研究现状、存在的问题以及在航空航天等领域的应用情况。对 TiAl 基金属间化合物的组织控制与性能研究、冶金熔炼、成形加工等进行了归纳, 结合 TiAl 基金属间化合物材料与应用研究取得的新进展, 预测了 TiAl 基金属间化合物轻质结构材料在今后一段时期的发展趋势。

**关键词:** TiAl; 金属间化合物; 冶金; 超塑性; 研究进展; 发展趋势

**中图分类号:** TG146.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-3962(2010)03-0001-05

## Recent Achievements and Future Directions of TiAl-Based Intermetallic Compounds

LI Jinshan<sup>1</sup>, ZHANG Tiebang<sup>1</sup>, CHANG Hui<sup>1</sup>, KOU Hongchao<sup>1</sup>, ZHOU Lian<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The recent achievements, main problems and applications of TiAl-based intermetallic compounds are reviewed in this paper. The mechanical properties, metallurgy and deforming technology of TiAl-based alloys are systemic summarized. Combine the up to date fruits, the possible near future developing directions of light-weight TiAl-based intermetallic compounds for high temperature structural applications are forecasted.

**Key words:** TiAl; intermetallic compounds; metallurgy; superplastic; recent achievements; future directions

### 1 前 言

金属间化合物由于其原子的长程有序排列和原子间金属键与共价键的共存性, 使其可能同时兼顾金属的塑性和陶瓷的高温强度, TiAl 基金属间化合物因其优异的高温力学性能与低的密度而在航空航天等方面受到高度重视。TiAl 基金属间化合物的弹性模量、抗蠕变性能等均比钛合金好得多, 与 Ni 基高温合金相当, 但密度还不到 Ni 基合金的 1/2, 使用温度可望达到 900 °C 以上, 室温模量可达 176 GPa, 且随温度升高而缓慢下降, 可以填补高温钛合金和 Ni 基高温合金的使用空白, 有望用于喷气发动机和涡轮等航空航天、汽车工业的耐高温部件以及超高速飞行器的翼、壳体等, 被认为是最有应用潜力的新一代轻质耐高温结构材料<sup>[1-4]</sup>。GE 公司近期宣布, 用于波音 787 和 747-8 民航客机的 GENX 发动机低压涡轮

轮后两级叶片将采用 TiAl 基金属间化合物, 减轻发动机重量约 200 kg, 这是该体系合金作为结构材料首次在航空工业领域批量应用, 对航空发动机的减重意义重大, 推动了全球 TiAl 基金属间化合物的研究热潮<sup>[5]</sup>。

TiAl 基金属间化合物所独有的轻质高强等特性, 使其作为新型航空航天用高温结构材料受到研究者的重视。但是, 由于其具有明显的室温脆性, 拉伸过程中延伸率不足 1% 即会断裂, 并且在热加工过程中晶粒会急剧长大, 导致进一步脆化, 可加工性很差, 而使其应用遇到困难。目前 TiAl 基金属间化合物应用存在的主要问题: ①性能对成分高度敏感, 加工温区太窄; ②中低温强度低, 而且依靠加工硬化来提高强度几乎不可能; ③无 Cr 的 TiAl 基金属间化合物在 500~900 °C 的耐腐蚀性能差; ④元素熔点差异大, 熔铸高质量合金锭比较困难并且成本很高<sup>[6]</sup>。

具有本征脆性的 TiAl 基金属间化合物能否作为高温结构材料应用, 其强韧化改性和相关物化性能的研究是基础, 先进的成形加工技术是关键, 冶金熔炼技术是

收稿日期: 2009-11-30

通信作者: 李金山, 男, 1966 年生, 博士, 博士生导师

必不可少的支撑。TiAl 基金属间化合物结构材料的基础研究与应用开发涉及物理冶金、材料工艺及成形加工等多个学科方向。

## 2 TiAl 基金属间化合物的组织控制与性能研究

有序基金属间化合物普遍存在脆性问题, TiAl 也不例外。为了解决由于对称性低、滑移系少、共价键电子数在总价电子数比例高等因素造成的 TiAl 基金属间化合物脆性, 近年来在该体系的研究方面开始转向双相 TiAl 基金属间化合物, 利用 Al 和其它合金元素的含量来控制延展性相对较好的  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 相与  $\gamma$ -TiAl 脆性相的含量百分比, 从而达到降低 TiAl 基金属间化合物脆性<sup>[7]</sup>的目的。借助合金化<sup>[7-12]</sup>、工艺控制<sup>[13-16]</sup>, 以及颗粒或纤维增强制成复合材料<sup>[17-20]</sup>等, 可以实现部分改善 TiAl 基金属间化合物塑性、韧性和高温抗氧化性的目的。近年在 TiAl 基金属间化合物性能改善方面取得了较为显著的成效。

大量研究表明, TiAl 基金属间化合物的力学性能对合金成分和组织极其敏感, 通过添加第三组元固溶或沉淀强化、控制组织形态和晶粒大小等方法能够改善 TiAl 基金属间化合物的力学性能和高温抗氧化性。各国研究人员围绕 TiAl 基金属间化合物的成分设计、组织控制及合金的构效关系等方面做了许多卓有成效的工作, 使 TiAl 基金属间化合物的部分力学性能得到明显提高。根据现有实验结果, TiAl 基金属间化合物 Al 含量的减少通常能提高合金的强度, 但同时也一定程度上降低了合金的延展性和高温抗氧化性; 2% (原子分数) 的 Cr, Mn, V 等过渡金属元素的添加能改善 TiAl 基金属间化合物的塑性; Nb 的添加有利于提高 TiAl 基金属间化合物的高温抗氧化性能; 少量 W, Mo, Si, C 等元素的添加对改善合金的抗蠕变能力有所帮助; B 的添加通常能细化晶粒并能稳定合金在高温环境中的结构稳定性<sup>[7]</sup>。TiAl 基金属间化合物的室温塑性还与显微组织形态、晶粒大小密切相关, 显微组织越均匀, 合金的室温延伸率就越高<sup>[16]</sup>。文献[21]的研究结果表明, TiAl 基金属间化合物中片层组织含量的增加会提高双态组织 TiAl 基金属间化合物的屈服强度, 但同时会降低合金的室温塑性。TiAl 基金属间化合物材料研究领域知名专家 Kim 指出: 该合金体系中的拉伸塑性和断裂韧性是反向关联的, 并且认为这种反向关联来自这些参数对晶粒尺寸的相反依赖性<sup>[9]</sup>。合金元素的添加在起到固溶强化或时效强化的同时, 通常也能细化晶粒, 改变片层间距, 进而对合金的性能产生影响。

在大气环境中, 温度高于 800 °C 时, TiAl 基金属间化合物通常会被氧化, 形成不具有保护性的 TiO<sub>2</sub> 或 TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混合氧化膜, 最终导致 TiAl 高温抗氧化性能急剧下降<sup>[22]</sup>。对 TiAl 基金属间化合物高温抗氧化性的研究也是该领域研究热点之一, 目前主要集中在离子注入、热喷涂、激光熔覆等表面改性技术。等温氧化研究结果表明, 在表面涂覆约 8 μm 的 TiAl<sub>3</sub> 涂层, 可以使 TiAl 基金属间化合物在 1 000 °C 空气环境中不被严重氧化。这是由于表层 TiAl<sub>3</sub> 中的 Al 元素在氧化过程中迅速与大气和基体 TiAl 反应生成具有保护作用的 TiAl<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜, 进而提高 TiAl 基金属间化合物的高温抗氧化能力<sup>[23]</sup>。

要想在较宽的温度范围内与高温合金竞争, TiAl 基金属间化合物除须改善塑性指标外, 还必须具有优良的高温强度、断裂韧性和高温抗氧化性等。目前 TiAl 基金属间化合物在综合力学性能平衡等方面尚有不少技术难题亟待突破, 距实际工程应用仍有相当大的差距。调整成分、控制组织等对 TiAl 力学性能的改善作用是有限的, 改善 TiAl 基金属间化合物某一性能通常会部分损失其它相关性能, 综合力学性能难以平衡。如何在提高强度的同时不降低塑性和韧性, 是当前 TiAl 基金属间化合物研究所面临的最大挑战; 合金元素对 TiAl 基金属间化合物性能的影响机制目前尚无明确认识, 仍需深入的理论和实验研究; TiAl 基金属间化合物高温抗氧化性改善方面的研究主要集中在表面改性方面, 一旦表面改性层在高温下被破坏, 合金的抗氧化性能则会急剧下降, 尚不能从本质上解决 TiAl 基金属间化合物高温抗氧化问题。

## 3 TiAl 基金属间化合物的冶金熔炼

金属材料的冶金质量对其综合服役性能通常起着决定性的作用。曾发生过多起因低密度夹杂、缩孔疏松等冶金缺陷造成飞机发动机零件失效而导致飞行事件。具有本征脆性的 TiAl 基金属间化合物的裂纹扩展速度极快, 其性能对冶金缺陷极度敏感, 能否作为结构材料在航空航天领域得到工程化应用, 其关键在于熔炼过程中成分偏析、夹杂等缺陷是否得到控制, TiAl 基金属间化合物纯净化、均质化的冶金质量控制, 将是当前及今后一段时期内工程化应用基础研究的重要方向之一。

由于 TiAl 基金属间化合物的组成元素的熔点和密度的差异及非平衡凝固偏析系数不同, 其大型铸锭不可避免的存在成分偏析, 以 Al 元素为例通常有约 2% (原子分数) 的宏观偏析。TiAl 基金属间化合物铸锭中的冶金缺陷、成分偏析会使后续热机械加工不可控并且

得不到均匀组织,严重影响其综合力学性能和高温抗氧化性<sup>[13]</sup>。北京科技大学陈国良院士团队近期的研究结果表明,真空自耗电弧炉或等离子体冷床炉熔炼的高 Nb-TiAl 基金属间化合物,当铸锭尺寸较小时(小于 160 ~ 200 mm),能得到成分和组织相对均匀的铸锭,但仍存在大量的枝晶及组织的宏观偏析和高 Nb 造成的微观偏析;当铸锭尺寸较大时,通常会存在明显裂纹甚至直接发生铸锭开裂等严重质量问题<sup>[14]</sup>。俄罗斯的 VSMPO 公司采用真空自耗电弧熔炼制备出直径 480 ~ 960 mm、质量 200 ~ 3 500 kg 的 TiAl 基金属间化合物大尺寸铸锭,铸锭中未观察到明显的宏观冶金缺陷,但 Al 元素的偏析现象仍较为严重<sup>[15]</sup>。文献[24 - 25]的作者使用陶瓷坩埚或涂层保护的石墨坩埚,采用感应加热,熔炼 TiAl 基金属间化合物,在成分均匀性方面有所改进,但引入了较多的涂层和坩埚中所包含的 C, Si 等元素,影响其力学性能。从现有研究结果来看,真空自耗电弧熔炼仍不失为 TiAl 基金属间化合物适宜的熔炼方式,更为重要的是可以直接利用钛合金的生产设备,进行工程化应用。TiAl 基金属间化合物的自耗电弧熔炼存在两个亟待解决的主要问题:其一,由于元素熔点、密度及非平衡凝固偏析系数的差异,通常会在大锭中导致不同程度的元素偏析,影响其力学性能;其二,海绵钛或中间合金中常见的低密度和高密度夹杂物的熔点很高,在 TiAl 熔体中如果不经长时间的停留一般是无法得到充分溶解和扩散的,有时即使采用 3 次熔炼也不能完全消除。

围绕 TiAl 基金属间化合物大尺寸铸锭的熔炼,国内外学者在自耗电弧熔炼工艺改进、缺陷控制、熔炼过程模拟等方面做了较多的工作。西北工业大学开展了钛合金及 TiAl 基金属间化合物熔炼过程模拟的相关研究,以热力学及动力学为基础对铸锭的冶金过程进行模拟计算,建立对热量、溶质及动量传输描述的计算机模拟系统<sup>[26 - 27]</sup>。结合工艺验证,初步掌握高 Ti 及 TiAl 冶金和凝固过程中的成分分布规律、异质夹杂的迁移和分离行为、缺陷形成机制及其控制方法,发展了高性能 TiAl 基金属间化合物的高均质化及凝固缺陷控制技术,在 TiAl 基金属间化合物冶金过程中纯净化、均质化机理及调控方法的研究方面取得了积极进展。

## 4 TiAl 基金属间化合物的先进成形加工技术

TiAl 基金属间化合物工程检验阶段的研究成果预示着一场高温结构材料的革命即将到来,然而,要真正实现这场变革, TiAl 基金属间化合物成形技术这一瓶颈问题亟待解决。在设计与性能研究的基础上, TiAl 基金属

间化合物成形技术的研究和开发也逐渐成为其应用研究的热点之一<sup>[28 - 35]</sup>。

超塑性成形技术是利用材料在一定温度和应变速率范围内表现出的超塑性行为而进行材料加工成形的一种技术。迄今为止,人们已经在近  $\gamma$  组织、双态组织和含有亚稳  $\beta$  相组织的 TiAl 基金属间化合物中发现了超塑性现象。近  $\gamma$  组织由  $\gamma + \alpha_2$  双相组织组成,是 TiAl 基金属间化合物的最常见组织,具有优良的超塑性,超塑性温度一般为 800 ~ 1 050 °C<sup>[33 - 35]</sup>。现有研究结果表明, TiAl 基金属间化合物的超塑性主要受成分、显微组织、晶粒尺寸和变形温度等因素的影响<sup>[28 - 36]</sup>。早在 1992 年, Imayev 等人利用粉末冶金制备技术,制备出 TiAl 基金属间化合物,经锻造和热处理后获得平均晶粒尺寸约为 5  $\mu\text{m}$  的均匀等轴晶组织,在 1 025 °C 时的延伸率高达 200% ~ 250%。同时还发现晶粒尺寸减小至亚微米时,呈现超塑性时的温度显著降低,当平均晶粒尺寸约为 0.4  $\mu\text{m}$  时,在 800 °C 即表现出超塑性,延伸率为 225%<sup>[36]</sup>。由此可见,适当的成分设计、工艺处理可以使 TiAl 基金属间化合物具有显著的超塑性,超塑成形有望成为解决 TiAl 基金属间化合物成形难题的有效方法之一<sup>[37]</sup>。现已报道利用超塑性成形技术可以成功制备出 TiAl 基金属间化合物排气尾喷管、侧翼等<sup>[38]</sup>。近期,西北工业大学重点在 TiAl 基金属间化合物的超塑性成形工艺研究方面做了较为系统的探索性研究工作,并联合相关科研机构共同设计开发了适用于 TiAl 基金属间化合物的 630T 超塑成形实验设备,试制出 TiAl 超塑成形试验件,同时在超塑性基础研究和成形过程模拟方面也积极开展工作,取得了阶段性成果,可以初步预测 TiAl 基金属间化合物在超塑性成形过程的显微组织、板材厚度、应力分布等变化规律,为超塑成形提供理论支持和技术指导。

## 5 结 语

TiAl 基金属间化合物工程化应用的关键在于材料综合力学性能的突破、大锭熔炼工艺控制和开发切实可行的成形技术等。北京科技大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、钢铁研究总院等单位在 TiAl 基金属间化合物材料性能研究和成形技术开发等方面取得了可喜的进展,为推动该合金体系的工程化应用做出了阶段性的贡献。随着航空航天技术的不断发展,为提高发动机的热效率和减轻零部件的自重,对发动机用 TiAl 基轻质结构材料的性能提出了更高的要求,从现有研究结果来看,提高 TiAl 基金属间化合物的抗拉强度、延伸率或抗氧化性等单一性能指标相对较容易,但其综

合力学性能难以平衡,造成材料的可加工性降低且难以满足实际应用需求;由于 TiAl 基金属间化合物的组成元素的熔点和密度的差异及非平衡凝固偏析系数不同,工程化放大生产时,成分偏析等冶金缺陷的控制对其合力学性能至关重要, TiAl 大锭的熔炼和缺陷控制将会成为今后一段时期该合金体系工程化应用基础研究的热点;从现有结果及发展趋势来看,短期内,常规金属材料成形方式在解决 TiAl 基金属间化合物材料的成形问题上难有大的突破,超塑成形技术有望成为 TiAl 基金属间化合物制品加工的有效方式之一,并会受到越来越多的关注。

### 参考文献 References

- [1] Loria E A. Gamma Titanium Aluminides as Prospective Structural Materials[J]. *Intermetallics*, 2000, 8(9-11): 1 339-1 345.
- [2] Dimiduk D M. Gamma Titanium Aluminide Alloys—An Assessment within the Competition of Aerospace Structural Materials[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 263(2): 281-288.
- [3] Ramanujan R V. Phase Transformations in Gamma Based Titanium Aluminides[J]. *International Materials Reviews*, 2000, 45: 217-240.
- [4] Chen Y, Kong F, Han J, *et al.* Influence of Yttrium on Microstructure, Mechanical Properties and Deformability of Ti-43Al-9V Alloy[J]. *Intermetallics*, 2005, 13(3-4): 263-266.
- [5] General Electric. *Titanium Aluminide*[EB/OL]. (2009-09-21)[2009-10-31]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium\\_aluminide](http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_aluminide).
- [6] Lasalmonie A. Intermetallics: Why is it so Difficult to Introduce Them in Gas Turbine Engines? [J]. *Intermetallics*, 2006, 14(10-11): 1 123-1 129.
- [7] Appel F, Oehring M.  $\gamma$ -Titanium Aluminide Alloys: Alloy Design and Properties[C]//*Titanium and Titanium Alloys—Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA, 2003: 114.
- [8] Wu Y H, Wang S K. Microstructural Refinement and Improvement of Mechanical Properties and Oxidation Resistance in EPM TiAl-Based Intermetallics with Yttrium Addition[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(6): 1 479-1 493.
- [9] 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.
- [10] Liu Z C, Lin J P, Li S J, *et al.* Effects of Nb and Al on the Microstructures and Mechanical Properties of High Nb Containing TiAl Base Alloys [J]. *Intermetallics*, 2002, 10(7): 653-659.
- [11] Chen Yuyong (陈玉勇), Kong Fantao (孔凡涛). TiAl 合金显微组织细化[J]. *Acta Metallurgica Sinica (金属学报)*, 2008, 44(5): 551-556.
- [12] Hu D. Effect of Boron Addition on Tensile Ductility in Lamellar TiAl Alloys[J]. *Intermetallics*, 2002, 10(9): 851-858.
- [13] Clemens H, Kestler H. Processing and Applications of Intermetallic  $\gamma$ -TiAl-Based Alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2(9): 551-570.
- [14] Chen G L, Xu X J, Teng Z K, *et al.* Microsegregation in High Nb Containing TiAl Alloy Ingots beyond Laboratory Scale[J]. *Intermetallics*, 2007, 15(5-6): 625-631.
- [15] Tetyukhin V V, Levin I V, Shibanov A S, *et al.* Process Development and Quality Evaluation of Large Size Wrought Plates from Titanium Intermetallic Base Alloy ( $\gamma$ -alloy)[C]//*Proceeding of the 10th World Conference on Titanium*. Hamburg: Wiley-Vch, 2003: 2 285-2 292.
- [16] Koeppe C, Bartels A, Seeger J, *et al.* General Aspects of the Thermomechanical [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1993, 24(8): 1 795-1 806.
- [17] Venkateswara Rao K T, Ritchie R O. High-Temperature Fracture and Fatigue Resistance of a Ductile  $\beta$ -TiNb Reinforced  $\gamma$ -TiAl Intermetallic Composite [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(12): 4 167-4 180.
- [18] Peng L M, Li Z, Li H, *et al.* Microstructural Characterization and Mechanical Properties of TiAl-Al<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC in Situ Composites by Hot-Press-Aided Reaction Synthesis[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 414(1-2): 100-106.
- [19] Rao K P, Zhou J B. Characterization and Mechanical Properties of in Situ Synthesized Ti5Si3/TiAl Composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 356(1-2): 208-218.
- [20] Munoz Moris M A, Gutierrez Umutia I, Moris D G. Effect of Equal Channel Angular Pressing on Strength and Ductility of Al-TiAl Composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 396(1-2): 3-10.
- [21] Zheng Ruiting (郑瑞廷), Zhang Yonggang (张永刚), Chen Changri (陈昌麒), *et al.* 片层晶粒体积分数对双态组织  $\gamma$ -TiAl 基金属室温力学性能的影响[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报)*, 2003, 13(2): 448-453.
- [22] Schmitz Niederau M, Schutze M. The Oxidation Behavior of Several Ti-Al Alloys at 900 °C in Air[J]. *Oxidation of Metals*, 1999, 52(3): 225-240.
- [23] Chu M S, Wu S K. Oxidation Behavior of Ti-50Al Intermetallics with Thin TiAl<sub>3</sub> Film at 1 000 °C [J]. *Oxidation of Metals*, 2005, 63(1): 1-13.
- [24] Chraponski J, Szkliniarz W, Mikuszewski T. Comparison of Microstructure and Phase Composition of Vacuum Induction Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy Melted in Crucible with Plasma Spraying Coatings[C]//*Proceeding of the 10th World Conference on Titanium*. Hamburg: Wiley-Vch, 2003, 4: 2 217-2 224.
- [25] Szkliniarz W, Mikuszewski T, Chraponski J, *et al.* The Chemical Composition, Structure and Properties of Gamma-TiAl Inter-

- metallic Phase Based Alloys Melted in Vacuum Induction Furnaces in Ceramic Crucibles [C]//*Proceeding of the 10th World Conference on Titanium*. Hamburg: Wiley-Vch, 2003, 4: 2 225-2 232.
- [26] Wang Binbin (王斌斌), Chang Hui (常辉), Li Jinshan (李金山), *et al.* 真空自耗电弧熔炼中电磁搅拌的数值模拟[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2009, 38(11): 1969-1973.
- [27] Xue Xiangyi (薛祥义), Meng Xiangwei (孟祥伟), Fu Baoquan (付宝全), *et al.* 真空自耗电弧熔炼电流对 Ti-10V-2Fe-3Al 铸锭凝固组织的影响[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2009, 19(10): 1 772-1 776.
- [28] Schuh C., Dunand D C. Transformation Superplasticity of Super  $\alpha_2$  Titanium Aluminide [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(16): 5 663-5 675.
- [29] Nieh T G., Hsiung L M., Wadsworth J. Superplastic Behavior of a Powder Metallurgy TiAl Alloy with a Metastable Microstructure [J]. *Intermetallics*, 1999, 7(2): 163-170.
- [30] Bohn R., Klassen T., Bormann R. Mechanical Behavior of Submicron-Grained  $\gamma$ -TiAl-Based Alloys at Elevated Temperatures [J]. *Intermetallics*, 2001, 9(7): 559-569.
- [31] Sun F., Lin D. Superplastic Phenomenon in a Large-Grained TiAl Alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2001, 44(4): 665-670.
- [32] Imaev R M., Salishchev G A., Senkov O N., *et al.* Low-Temperature Superplasticity of Titanium Aluminides [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 300(1-2): 263-277.
- [33] Zhang B., Wang J N., Yang J. Superplastic Behavior of a TiAl Alloy in Its As-Cast State [J]. *Materials Research Bulletin*, 2002, 37(14): 2 315-2 320.
- [34] Kim J., Chang Y., Lee C., *et al.* High-Temperature Deformation Behavior of a Gamma TiAl Alloy-Microstructural Evolution and Mechanisms [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, 34(10): 2 165-2 176.
- [35] Wang Y., Wang J N., Yang J. Superplastic Behavior of a High-Cr TiAl Alloy in Its Cast State [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 364(1-2): 93-98.
- [36] Imaev R M., Kaibyshev O A., Salishchev G A. Mechanical Behaviour of Fine Grained TiAl Intermetallic Compound-II. Ductile-Brittle Transition [J]. *Acta Metallurgica Et Materialia*, 1992, 40(3): 589-595.
- [37] Barnes A J. Superplastic Forming 40 Years and still Growing [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007, 16(4): 440-454.
- [38] Serra D. Superplastic Forming Applications on Aero Engines. A Review of ITP Manufacturing Processes [C]. Carcassonne: 6th Eurospf Conference, 2008.



特约撰稿人李金山



特约撰稿人李臻熙



特约撰稿人陈玉勇



特约撰稿人贺跃辉

**李金山**: 男, 1966年生, 博士, 西北工业大学教授、博导; 现任凝固技术国家重点实验室副主任, 陕西省先进材料与凝固加工工程研究中心主任, 西北工业大学稀有金属材料与加工研究所副所长; 先后主持国家、国防 973 计划子课题, 国家自然科学基金重点项目, 863

课题, 国防基础科研课题, 国防预研课题, 国家高技术产业化示范工程项目等 30 余项研究工作; 在国内外高水平期刊、会议发表学术论文 100 余篇; 申请国家、国防发明专利 10 余项, 获省部级科技进步一等奖 1 项, 二等奖 4 项。

**李臻熙**: 1973 年出生, 博士, 北京航空材料

研究院高级工程师; 承担并负责了国防 973、国防预研、型号研制、航空支撑、国防预研基金等重要项目的研究工作; 在国内外学术期刊发表 TiAl 合金研究论文 10 余篇, 其中 SCI 收录 5 篇。

**陈玉勇**: 1956 年出生, 教授、博导; 现任哈尔滨工业大学材料工程系主任, 钛合金研究

室主任, 国家科技部国家科技奖评委; 主持国家及省部级科研项目 30 余项, 获省、部级科技进步二等奖 7 项, 三等奖 2 项; 发表科技论文 200 余篇, 被 SCI、EI 检索 100 余次, 被国内外同行引用 150 余次; 申请国家发明专利 20 多项, 获得国家发明专利 10 项。曾获首届中国科学

技术协会青年科技奖和航空航天部首届“十佳航天科技青年”称号, 入选劳动人事部第一层次“百千万跨世纪人才”计划, 并被评为国防科工委“511 人才工程”学术技术带头人。

**贺跃辉**: 男, 1963 年出生, 博士, 中南大学教授、博士生导师; 现任粉末冶金国家重点实验室常务副主任、中南大学粉末冶金研究院总工程师; 1999 年 1 月至 2001 年 1 月在美国橡树岭国家实验室和田纳西大学作为高级访问学者从事联合研究工作; 2008 年度国家杰出青年基金获得者; 教育部长江学者特聘教授。