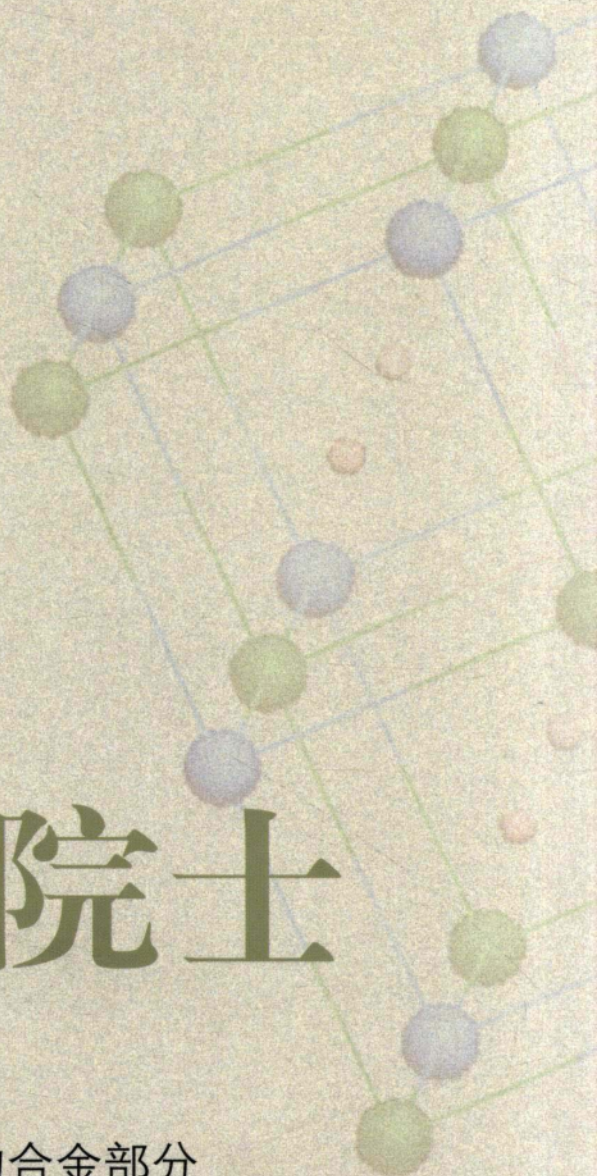


CHENGUOLIANG YUANSHI
LUNWEN XUANJI



陈国良院士 论文选集

高铌含量钛铝金属间化合物合金部分

林均品 张来启 郝国建 编



科学出版社

(TG-0111.0101)

陈国良院士

论文选集

高铌含量钛铝金属间化合物合金部分

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-033492-3



9 787030 334923 >

科学出版中心 数理分社
电 话: (010)64033664
E-mail: math-phy@mail.sciencep.com

定 价: 128.00 元

陈国良院士论文选集

——高铌含量钛铝金属间化合物合金部分

林均品 张来启 郝国建 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本选集汇编了陈国良院士及其研究组在钛铝金属间化合物合金研究领域发表的重要的文章。编者是想通过这本选集的出版,推动我国青年研究人员尝试做原创性的科研工作,提高兴趣和增强决心。本选集提供一个案例,探讨原创性科学研究工作的经验教训,特别是评价相关的问题。

本书适合研究生、教师、科研和工程技术人员等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

陈国良院士论文选集:高铌含量钛铝金属间化合物合金部分/林均品,张来启,郝国建编. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-033492-3

I. ①陈… II. ①林… ②张… ③郝… III. ①钛合金:铝合金-文集
IV. ①TG146.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 018385 号

策划编辑:陆有忠 责任编辑:刘信力 赵彦超/责任校对:张怡君
责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 26 3/4

字数: 513 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



谨以此书纪念我们敬爱的陈国良院士！

序

金属间化合物高温材料是金属间化合物新材料库中一个重要的分支，是一类新型的高温合金结构材料，这类材料的发展是在国际水平层次上的发现和创新历史的一部分。

早在 20 世纪 50 年代，人们就发现许多金属间化合物的强度具有反常的强度—温度关系，即随温度升高，其强度不是连续下降，而是具有先上升到一定温度后才开始下降的特点。这一科学发现立刻引起了一轮研究热潮，一方面企图在理论上深入了解金属间化合物的强度随温度升高而提高的物理本质，另一方面探索金属间化合物作为新一代高温结构材料的可能性。前者取得了很好的进展，对金属间化合物的变形特性和强度的反常温度关系机制有了较深的了解；但是在发展高温结构工程材料的探索方面则由于其严重室温脆性而受挫。1979 年，日本的 Izumi 发现硼可以明显提高 Ni_3Al 金属间化合物的室温脆性。随后，C. T. Liu 等进一步发现和认证了金属间化合物具有室温水汽环境脆性特性。这些科学发现使得人们看到了解决金属间化合物室温脆性的希望。由此，20 世纪 80 年代开始了新一代高温结构材料的开发热潮。当时重点是发展具有较好高温抗氧化性能、比重又轻的 Al 化合物金属间化合物结构材料。比重轻可以提高材料的比强度，从而可显著提高这类 Al 化合物高温结构材料的竞争力。到 21 世纪， A_3B 型金属间化合物，如 Ni_3Al 、 Ti_3Al 等高温结构材料研究取得了突破，这得益于研究发现可利用相应的固溶体相来韧化，即用 Ni 基固溶体来韧化 Ni_3Al ，Ti 基固溶体来韧化 Ti_3Al 等。但这类创新材料带来一些问题，那就是明显降低了原来金属间化合物的低比重的优势，同时加上 Ni 基高温合金和 Ti 合金自身的强韧化发展，就明显降低了这类金属间化合物高比强。近年来，第四代和更新一代的航空航天器的发展，对高温结构材料的比重和比强提出了更高的要求。由此， NiAl 、 TiAl 等 AB 型 Al 化物就成为发展的重点。单晶 NiAl 便是一种理想的材料，因为它既耐高温，又有高比强度。可惜其室温拉伸塑性为零，到目前尚未得到广泛应用。 TiAl 由于其点阵特性而具有少量室温拉伸塑性，且其比重较 Ni 基高温合金低一半，这些优势使它成为当前材料发展的重点。 TiAl 作为高温结构工程材料的第一个突破性发展是发现了 $\gamma+\alpha$ 复相组织强韧化新技术，全面提高了 TiAl 合金的强度和塑性，由此得到一代 TiAl 合金的应用，其典型代表是美国 GE 公司发展的 $\text{Ti}_{48}\text{Al}_2\text{Cr}_2\text{Nb}$ (4822 合金)。这一合金铸造叶片已经在美国 GENX 发动机上正式得到成功应用，这是 TiAl 合金首次应用于航空发动机，具有里程碑式的意义。陈国良院士研究组发现的高 Nb 合金化的 TiAl-Nb 系合金使

材料的使用温度提高 60°C , 并显著提高了抗氧化性能, 在高温处理后, 也不降低室温拉伸塑性. 这一创新成果被同行权威专家评价为 TiAl 合金研究进展的里程碑. 本书选编了他们发表的相关文章及其引用情况, 由此可以证明国际同行对这一创新成果的充分肯定.

本书选编了高 Nb 含量 TiAl 合金的研究成果, 作为一个案例, 很好地说明同行专家评价结合在国际专业会议及论文引用情况是一个很有说服力的评价创新性的标准, 其主要的原始创新点, 如高 Nb 合金化明显提高 TiAl 的抗氧化性和高温强度, 以及高 Nb 含量 TiAl 的相关性等, 都得到比较多的引用. 选编的文章还反映出, 深厚的材料科学基础是取得创新成果, 特别是原始创新成果的重要条件, 本书论文的 authors 们从 1987 年“863”计划立项开始算, 前 3—4 年主要从事艰苦而广泛的基础研究工作, 到 1990 年才有文章发表; 1991 年申请专利, 1992 年才比较系统地在国际专业会议上提出报告; 1995 年首次得到同行专家权威的方向性肯定, 认为这是发展高温 TiAl 合金的新方向. 此后, 陈国良院士又在材料的应用方面开展了更为系统的研究工作, 发现先进的冶炼技术是关键, 为此, 我还陪他到宝钢创造了工业生产条件. 此后还有更艰险的路要走, 就是实现合金的工程化. 所谓工程化就是生产稳定、性能数据齐全可靠. 所以, 一个创新的材料从构想到研究, 从研究到应用要走很长的路.

本书的出版说明了一个原始创新材料发展过程的前半部, 从开始构思到取得国际同行的承认, 就用了差不多 10 年的时光. 由此也说明, 从基础研究得来的原始创新成果多么珍贵, 所以一定要千方百计使之产业化, 否则仅仅是在文献宝库中添砖加瓦了.

师昌绪

2010 年 12 月 29 日

前言

——论原创性科学研究工作及其评价

这本选集选择汇编了我们研究组在 TiAl 金属间化合物合金研究领域发表的重要的文章. 目的是想通过这本选集的出版, 推动我国青年研究人员尝试做原创性科研工作的兴趣和决心. 此选集提供一个案例, 探讨原创性科学研究工作的经验教训, 特别是评价相关的问题.

我们科研组从事 TiAl 合金的研究工作始于 1987 年, 是我国“863”计划最早实施的项目中的一个. 经过四五年的高 Nb 含量 TiAl 合金的系统基础研究, 1991 年申请了专利并首次系统报道, 1992 年起在国际会议上进行比较全面的介绍. 1995 年在第一届美国 TiAl 合金国际会议上, 会议主席 Y-W Kim 在大会报告中指出, 高 Nb 含量 TiAl 合金是发展高温高性能 TiAl 合金的“首例”.^① 2005 年 Y-W Kim 给美国金属学会(ASM International)写信, 推荐陈国良教授成为 ASM Fellow. 他在信函中进一步指出: “His research work on intermetallics, especially, in the area of titanium aluminides is well known and recognized worldwide. Some of his findings and interpretations, such as in the effect of Nb additions in gamma alloys on oxidation resistance and phase relationships are becoming classical. More importantly, the pioneering work on the Nb effect became a milestone for the development of high performance gamma titanium aluminide alloys. These achievements have been clearly recorded in number of publications, most of which are widely referenced and cited.” 后来美国金属学会公布陈国良教授成为 ASM Fellow 的公告中指出: “For outstanding contributions to understanding relationships among composition, processing and their effects on the microstructure on mechanical properties of advanced materials, including superalloys and intermetallics, for high temperature structural applications.” 这些是本领域同行专家的正式评价, 说明我们在高 Nb 含量 TiAl 合金方面的研究是具有原创性的工作.

近来, 我们通过 Web of Science 查阅了我们研究组在 TiAl 合金领域发表文章的引用情况, 并据此选编了这本选集. 探讨文章引用情况和本领域同行专家评价之间的一致性和差异. 研究文章的引用率问题首先要明确一点, 因为不同学科文章的引用率的绝对值是相差很大的, 没有可比性, 应该在相同学科领域比较相对引用率. 据统计, 在材料科学领域, 顶级 1% 的文章的 10 年平均引用次数是 47 次^[1].

① His work was cited as “the first case” in the development of high temperature and high performance TiAl by the Conference Chairman Dr. Yong-Won Kim of UES at the First International Symposium on Gamma Titanium Aluminides, Las Vegas, Nevada, 1995.

根据这个考量,发现“专家评价”与“引用情况”两者的一致性是很高的,但也有更加深入的情况值得进一步探讨研究. Y-W Kim 指出,我们在高 Nb 含量 TiAl 合金方面做了开拓性的研究工作,有两方面的原始性创新,即 Nb 显著提高 TiAl 的抗氧化性和高 Nb 合金化 TiAl 合金的相关系. 同时也指出,高 Nb 含量 TiAl 合金的发展具有里程碑意义. 这些评价在文章引用方面得到了相应的验证. 我们早期发表的全面介绍高 Nb 含量 TiAl 合金研究的两篇文章分别有 61 次^①和 41 次^②的引用.

另有 3 篇文章^③分别系统介绍了高 Nb 含量 TiAl 合金的相关系、超级抗氧化性及其机理和 Nb、Al 强化作用,分别被引用了 70 次、40 次和 41 次. 这 5 篇论文的引用率都可以认为是材料科学与工程领域引用率很高的研究成果.

除这几篇论文以外,在这方面还有 8 篇相关文章被引用了 20—40 次,也是水平较高的论文. 有一篇 2005 年发表的论文,短短几年内已经被引用了 22 次,是引用率很高的论文^④.

总之,只要是原始开拓性高的研究工作,小同行权威专家(如 Y-W Kim)的评价和相关研究论文的引用两者是相互印证的. 由此看来,同行专家的认同度和重要文章的引用率相结合是正确评价研究的原始创新性,以及研究人员水平和贡献的有效方法.

根据此评价方法,可以发现下面几种可产生误导正确认识的非正常情况:

- 某课题组的研究成果得到国家科技一等奖或连续在多个不同研究方向上得到国家科技奖,但课题组负责人从未在相同研究领域的重要国际专业学术大会上做过邀请报告或大会报告,文章引用率一般. 这种属于非正常情况,在多数情况下,原始创新性及领导人的学术水平和贡献值得商榷,可能他在本单位的地位较高、组

① Chen G L, Zhang W J, Wang Y D, et al.. Ti-Al-Nb intermetallic alloys based on the ternary intermetallic compound. 1st International Symposium on Structural Intermetallics, SEP 26–30, 1993 CHAMPION, PA. Proceeding “STRUCTURAL INTERMET-ALLICS”, 1993: 319–324. 被引频次: 61

② Chen G L, Sun Z Q, Xing Z. Oxidation and mechanical-behavior of intermetallic alloys in the Ti-Nb-Al ternary-system. *Proceedings of the Second International ASM Conference on High Temperature Aluminides and Intermetallics: Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing A*, 153, 1992, 1-2: 597–601. 被引频次: 41

③ Chen G L, Zhang W J, Liu Z C and Li S J. Microstructure and properties of high nb containing TIA BASE ALLOYS. in *Gamma Titanium Aluminides*, 1999. ed. By Y-W Kim, D M Dimiduk, and M H Loretto, TMS, 371–380 被引频次: 70

Chen G, Sun Z, Zhou X. Oxidation of intermetallic alloys in Ti-Al-Nb ternary-system. *Corrosion*, 1992, 48(11): 939–946 被引频次: 40

Liu Z C, Lin J P, Li S J and Chen G L. Effects of Nb and al on the microstructures and mechanical properties of high Nb containing TiAl base alloys. *Intermetallics*, 2002, 10(7): 653. 被引频次: 41

④ Xu X J, Xu L H, Lin J P, Wang Y L, Lin Z and Chen G L. Pilot processing and microstructure control of high Nb containing TiAl alloy. *Intermetallics*, 2005, 13: 337. 被引频次: 22

织能力较强.

- 以第一作者在顶级学术期刊(如 *Science*, *Nature*)发表了一篇或在不同研究方向上的数篇论文,并且引用率也高.但其本人在专业会议上报告一般,同行专家中认知度不高,在该研究方向的实际影响不显著.这种情况往往是在高水平学术领导人领导下的工作,第一作者不一定在学术上具有强的独立创新能力,更不一定是能引领一方研究的独立学术领导人.

- 能够得到某个外国知名专家或国内知名专家的泛泛的称赞或信件,有时还具有十分优良的研究条件、设备、研究项目和经费,但缺少引用率高的文章,虽然在外行和领导中声誉很高,但大多数同行专家不知其具体创新贡献,认同度不高.这种是非正常情况,可能说明该科研人员没有突出的创新成果,但非学术活动活动能力很强.

- 有一种倾向,认为在国际会议上发表的文章都不是高水平论文.其实,一律低看在重要的专业性国际会议上发表大会报告及其文章的水平,认为只有在高影响因子的杂志上发表的论文才是高水平的,是一种片面的看法.开拓性有原始创新的文章在同行广泛参加的专业国际会议上大会发表是取得同行专家认同的重要途径,也是同行专家认同的重要表现.上述我们 5 篇高引用率的文章中有 3 篇是在金属间化合物专业国际会议上发表的.事实证明,在专业国际会议大会报告也有利于文章被引用.相反,文章在高影响因子杂志上发表,虽然杂志的影响因子高,文章水平和受关注的程度在一般意义上应该要高些,也应该有利于引用率,但文章发表所在杂志的影响因子并非是决定某篇具体文章水平和高引用率的关键因素.同时,能否在高影响因子杂志上发表文章受很多其他因素的影响,影响大、引用率高的文章不一定能在高影响因子杂志上发表.决定高引用率的关键因素还是文章本身的研究热点或前沿,以及研究内容的原始创新性,也和同行专家的认同度有关.*Nature* 和 *Science* 等杂志每年有上千篇文章发表,并非都是引用率高的,个别甚至是有问题的.国际知名专家 Robert W. Cahn 教授曾送我一本书,是他的论文选集,有 362 页厚,收集了他的 100 篇文章,其中 84 篇是在 *Nature* 发表的文章,多数是 1—2 页纸的评论性短文;其他 16 篇大多在 *Advanced Materials* 发表.

- 有人说,对搞工程学科的人的贡献,不能对文章要求太高,主要看工程成果和效益.由此外推,一个大工程的完成,必然带来一个国家级的科技大奖,一个代表人物成为大师级学术带头人的候选人.其实这里有很大误区,一个大工程的完成是一大政绩,的确有显著的经济效益,可以证明领导人物的领导能力.但作为科技领域创新成果,必须要明确是属于那个专业领域的科技创新,必须有发表文章、专利等正式文本的贡献(保密除外),通过本学科领域的引用率的相对表现,证明是得到小同行专家广泛认可的科技创新.尤其是对于年轻一代工程学科人才,

其科技创新的要求和评价方法应该和其他学科是一样的。

科技创新,尤其是原始创新是很难的。总是要经过艰苦的和长期的努力才能得到的,首先,研究要有高的起点,其间还要承受各种各样的考验,所以,能否搞原始创新的研究工作的关键,是有很高要求和有没有决心的问题。在目前的社会环境下,许多年轻研究人员缺乏这种品质,或是不愿意这样做。这是当前要解决的首要问题。以我们高 Nb 含量 TiAl 研究为例,我们在 1987 年立项后,经过仔细思考和研究,选择高起点的国内外尚未涉足的 Ti-Al-Nb 系,做了四五年的广泛而系统的基础研究,直到 1991 年才开始发表研究文章、申请专利,才肯定研究大方向是正确的。如果当时我们走另外一条研究道路,即选择国外已经发展的比较成熟的合金为基础,做进一步调整成分、开发制备工艺的研究工作。这种研究路线技术难度较小,成功的把握较大,能在较短的时间内取得成果,但不会有原始创新的成果。因此,我认为对于在国家级研究单位,例如国家重点实验室的中青年研究人员就必须有做原始创新的要求和决心。也许对于国家重点学科的高端研究组也要有做原始创新研究工作的要求和决心。

进行原始创新研究的道路是漫长的,自 1990 年代以来,我们在合金体系的成分和组织及性能基本规律方面、合金强化机理和超级抗氧化性机理方面、冶炼加工材料制备技术方面、提高金属间化合物材料高温塑性方面做了大量工作,在科学和技术层面上克服了许多未知和难点,才得到了高水平的成果。在此过程中,我们研究组的教师、师生间经过无数次的争论和反复讨论,才能搞清楚一个个学术问题,例如我们历时 16 年的努力,才比较清楚地搞明白 Nb 原子在 TiAl 点阵中的分布特征:当 Nb 含量低时,少量 Nb 原子易取代 Ti 原子;当 Nb 含量增加后,会导致 Nb 原子的有序化分布倾向,出现连续有序化现象,最终结果会形成新的 Nb 原子的亚点阵,形成具有 Ti 原子、Al 原子和 Nb 原子三个亚点阵组成的新的三元金属间化合物相,并确定了这个新的三元金属间化合物的对称性和空间点阵结构。其实,科学技术层面的困难,只要不懈努力总是能够解决的。要使研究工作能够不断得到支持,还需要根据国家需求和国家支持项目的特点及要求,不断变换研究重点和切入点,提出新的研究课题。我们就是通过这种途径,得到了国家自然科学基金委员会面上项目、重点项目和重大项目,国防科学技术工业委员会预研项目,“863”项目,军工基础研究平台等项目的支持,才能把研究工作由基础研究,逐步向工程合金、工程化技术和实际应用方向推进。

原始创新性研究工作真正的困难是来自两个方面。首先是相关企业的支持并愿意介入原始创新性研究工作的课题。TiAl 金属间化合物合金是高温结构材料,只有相关企业介入后,才有可能发展成为能有效提供的工程合金及技术(affordable engineering materials and technology)。但我国企业的现状是有兴趣于能够马上投产

获得利润的项目,对于要下大功夫和长远效益的项目兴趣不大,所以我们虽然有这么多国家重大科技研究项目的支持,但并无一家国内有能力的大型央企有兴趣关注此类研究并愿意参与。相反,巴西的国际 Nb 公司听了我们的学术报告,由于我们高 Nb 含量 TiAl 合金中含较高的 Nb 量,他们非常感兴趣,主动找到我们,愿意出资支持我们向工程化技术发展。他们出资帮助我们在英国用最新的等离子冷坩埚熔炼技术熔炼上百公斤的大锭材,又在美国找公司进行挤压和热加工成材,把材料发给我们进行工程化技术研究。后来公司又自己引进了一台大功率的生产型等离子冷坩埚熔炼炉,在安装调试成功后,邀请了全世界各国用 Nb 元素的各类合金材料研究人员(包括我们),在巴西工厂举行大型学术会议,同时举行宣传和庆祝大功率的生产型等离子冷坩埚熔炼炉试炼钢成功,产生很大影响。他们的企业有国际化的大视野,非常注意国际上各种与 Nb 生产有关的新技术新合金的发展,有很高的敏感性,有利用新技术提高公司创新能力的热心和决心。我们为了推动企业介入,也做了大量工作,邀请了以师昌绪院士为首的 5 位院士,国防科学技术工业委员会、航空和航天各级领导,以及设计部门的专家,一起到宝钢集团游说,鉴于有利于生产低夹杂物高纯洁度的转动部件 Ti 合金、高温合金和 TiAl 合金,能够大大提高军工产品的质量,建议宝钢购买一台大功率的生产型等离子冷坩埚熔炼炉。这项建议取得了宝钢董事长等领导的支持。目前虽然炉子已经安装,但离发挥作用在指导思想和技术上还有很多工作要做,对比巴西国际 Nb 公司的热心,深有感触。与此同时,我们支持丹阳一家民营企业引进专业人才和生产线装备,发展 TiAl 合金铸件生产。他们的工作很有起色和效率。对比之下,我深感我国要发展以企业为主体、产学研结合的技术创新体系,必须要强化企业自主创新意识,央企的一套庞大行政管理体系和制度是公司内外科技人才进行原始创新性研究工作的最大制约因素。

另一个原始创新性研究工作真正的困难是推向实际应用的困难。由于高 Nb 含量 TiAl 合金用于航空航天发动机关键部件,意义重大,责任也重大。我国的设计人员一般会被鼓励进行研究,但由于高 Nb 含量 TiAl 合金是新型的金属间化合物合金,本质上只有 1%—2% 的拉伸塑性,要进入型号实践是难下决心的。这个问题几乎成为不可逾越的困难。2008 年,美国 GE 公司正式宣布, TiAl 合金铸造叶片在波音 787 飞机 GENx 发动机上应用成功,正式投入生产;2009 年又推广用于其他重要的发动机叶片,我们国内专家才没有在正式场合继续强调塑性低不能使用。看来,我国目前的科学技术和企业界和设计部门大多数还没有思想准备去做国内外第一个吃螃蟹的创新者。

目前的情况有了很大改观,各种困难似乎有可能解决了,希望通过国家“973”项目的支持,发展到型号研究,高 Nb 含量 TiAl 合金在航空航天领域也许能够得到

实际应用, 预计最顺利也还要需要 10—15 年时间. 由此可见, 一个原始创新合金的发展要多长时间的努力和克服多大的困难, 才可能得以成功. 这里有一个附带的提示, 有关领导部门必须认识到, 要提前和持久的支持重要创新材料的发展, 不能等到要应用了才安排研究工作. 其实, 美国已经实际使用的 GE 公司自主发展的 4822 TiAl 合金也经历了 20 多年的努力才得以成功.

本选集还选录一些论文, 其引用率从几次到十几次, 不是很高. 其实, 这些文章的内容是新颖的发现, 主要包括高 Nb 含量 TiAl 合金中的 γ 和 α_2 片层界面非平衡结构研究、形变诱导 $\gamma \leftrightarrow \alpha_2$ 片转变、应力诱导 9R 长周期结构变化、孪晶形变及交截机制等. 但是由于我们选择文章的题目比较专和窄, 影响了引用率. 下面这篇文章是在北京召开的第二届金属间化合物国际会议上发表的邀请报告, 综合性报道了非平衡界面结构变化, 首次报道了界面 $1/3 \langle 111 \rangle$ Frank 位错的形成和作用, 所以, 虽然是在中国开的国际会议, 参加的外国专家有限; 虽然是在我国《金属学报(英文版)》发表, 其引用率还能有 20 次.^①

由此我们得到了一个经验, 要仔细把握文章的题目和内容, 才能使你的创新性研究结果为更多同行的注意, 提高文章的引用率. 实际上, 我们研究片层界面非平衡结构变化、形变诱导 $\gamma \leftrightarrow \alpha_2$ 相转变、9R 长周期结构变化, 特别是孪晶形变及交截, 都是为了研究高 Nb 含量 TiAl 合金的高低温塑性问题, 金属间化合物材料的本质是低塑性的, 但我们用 Nb 合金化后, 高低温强度提高了 300—500 MPa, 仍可保持原有的室温塑性而不因提高强度而降低. 热加工变形量可高达 70% 而不产生裂纹, 就是因为界面可以出现孪晶变形, 各种界面非平衡结构, 形变诱导相转变等结构变化, 松弛了应力, 避免了裂纹形成. 所以, 如果我们选择塑性与变形机制为题写一篇文章, 引用率效果应该会更好些.

本文把我们自 1987 年以来进行的高 Nb 含量 TiAl 金属间化合物合金研究作为一个案例, 探讨进行原始创新性研究及其评价的问题, 供各级领导、各位专家和青年研究人员参考, 希望能有利于推动原始创新性研究工作的发展, 有利于给进行原始创新性研究以更好的社会环境和工作条件, 有利于正确评价科研工作的创新性. 文章涉及的问题较广, 篇幅有限, 不能展开, 只是抛砖引玉, 如有一点启发, 就达到目的了. 不当之处, 也请指出.

我们的科研组中参加高 Nb 含量 TiAl 金属间化合物合金研究的人员很多, 在 20 多年的岁月里, 人员变化很大. 我的许多同事已经独立组建自己的研究组, 进行独立的研究. 我的许多研究生也已经毕业, 目前在国内外各行各业已经做出了成

① Chen G L, Wang J G, Zhang L C, Ye H Q. Strain induced structural transition of interfaces and twin in a hot-deformed dual-phase TiAl alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English letters)*, 1995, 8(4-6): 273 (引用 20 次)

绩. 他们之中尚在国外发展的, 有的已经是著名教授或长江学者, 有的已经成为著名企业家. 他们和我都有密切的联系, 他们对那一段研究工作都有美好的记忆, 感到经受了一次自强指导思想、创新思维、严谨学风、实验训练的严格锻炼, 对他们终身有益. 这里, 我要对他们表示衷心的感谢, 许多原始创新发现都与他们的贡献分不开的.



2010 年 12 月 20 日

目 录

序 前言

A —— 早期开拓性工作

Oxidation and mechanical behavior of intermetallic alloys in the Ti-Nb-Al ternary system.....	3
Ti-Al-Nb intermetallic alloys based on the ternary intermetallic compound.....	10
Characteristics of heat resistant alloys Ti10Nb45Al and Ti18Nb48Al.....	21

B —— Nb 提高 TiAl 抗氧化性原始文章

Oxidation of intermetallic alloys in Ti-Al-Nb ternary system.....	29
Oxidation of ternary Ti18Nb48Al and Ti10Nb45Al alloys.....	39

C —— 高 Nb TiAl 相关系的原始文章

Microstructure and properties of high-Nb containing TiAl-base alloys.....	47
Continuous ordering in the TiAl + Nb system.....	60
Investigation on the 1000, 1150 and 1400°C isothermal section of the Ti-Al-Nb system.....	69
A new intermetallic compound in TiAl + Nb composition area of the Ti-Al-Nb ternary system.....	82
The 1400°C isothermal section of the Ti-Al-Nb ternary system.....	94

D —— 高 Nb 强化及变形机构重要文章

Effects of Nb and Al on the microstructures and mechanical properties of high Nb containing TiAl base alloys.....	105
On the origin of superior high strength of Ti-45Al-10Nb alloys.....	115

Deformation mechanisms in a high-Nb containing γ -TiAl alloy at 900°C121

Dislocation structure in a Ti-45 at.% Al-10 at.% Nb alloy deformed at room temperature.....132

Determination of stacking fault energies in a high-Nb TiAl alloy at 298 K and 1273 K139

E —— 形变诱导相变，片层界面机构方面重要文章

Strain induced structural transition of interfaces and twins in a hot-deformed dual-phase TiAl alloy149

Formation of stress-induced 9R structure in a hot-deformed Ti-45Al-10Nb alloy.....161

Deformation-induced $\gamma \leftrightarrow \alpha_2$ phase transformation in a hot-forged Ti-45Al-10Nb alloy.....168

Nonequilibrium α_2/γ interfacial structures in a γ -TiAl-based two phase alloy after hot-working and annealing177

TEM study on lamellar microstructure and α_2/γ interfacial structure in a hot-deformed two-phase γ -TiAl-based alloy.....186

Study on the stress-induced $\gamma \rightarrow \alpha_2$ transformation in a hot-deformed Ti-45Al-10Nb alloy by high-resolution transmission electron microscopy197

F —— 塑性及孪晶变形

TEM observations of mechanical twins in a hot-deformed Ti-45Al-10Nb alloy207

Deformation mechanism at large strains in a high-Nb-containing TiAl at room temperature.....222

Twin-intersection-related nanotwinning in a heavily deformed γ -TiAl-based alloy ...234

TEM investigation of twin intersection in a Ti-45Al-9Nb-2.5Mn alloy deformed at room temperature240

Substructures of deformation twins and twin intersections in a Ti-45Al-8Nb-2.5Mn alloy heavily deformed at room temperature.....249

Formation of a triangular striated structure in the twin intersection area in γ -TiAl during room-temperature deformation262

G —— 热处理及高温性能

A preliminary study on the creep behavior of Ti-45Al-10Nb alloy.....273

Formation of α phase in the massive and feathery γ -TiAl alloys during aging in the single α field	279
Microstructural stability of lamellar TiAl-based alloys at high temperature	290
Necking and spheroidization of α_2 plates in lamellar microstructure of a hot-deformed two-phase TiAl alloy during annealing	301

H —— 近期发表的高引用率文章

Pilot processing and microstructure control of high Nb containing TiAl alloy	311
High temperature deformation behaviors of a high Nb containing TiAl alloy	319
Microsegregation in high Nb containing TiAl alloy igots beyond laboratory scale	330
Microstructure and mechanical properties of as-cast Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) alloy with industrial scale	340
On the microsegregation of Ti-45Al-(8-9)Nb-(W, B, Y) alloy	349
Strain rate sensitivity of tensile properties in high Nb containing TiAl alloys	357
Fabrication and SPS microstructures of Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) alloying powders	365
Influence of Y addition on the long time oxidation behaviors of high Nb containing TiAl alloys at 900°C	380
Pore structures and thermal insulating properties of high Nb containing TiAl porous alloys	397