



陈光 CHEN Guang

中国发明协会发明创业奖·人物奖
The Winner of the Creative Founder
Award, CAI
南京理工大学教授
Professor, Nanjing University of
Science and Technology

教授、博导,南京理工大学材料评价与设计教育部工程研究中心主任、金属纳米材料与技术联合实验室主任,江苏省优秀科技工作者、有突出贡献中青年专家、中青年科技领军人才、第六届“十大优秀专利发明人”。从事受控凝固与新材料、新型金属与先进复合材料、金属纳米与非晶合金(金属玻璃)、钢铁材料与冶金工程等方面的研究。荣获国家技术发明二等奖和教育部技术发明一等奖各1项、江苏省科技一等奖2项、中国产学研合作创新成果奖1项、中国专利优秀奖1项、省部级科技进步二等奖4项、三等奖1项、先进金属与金属间化合物材料国际研讨会杰出贡献奖。申请发明专利77项、已授权52项,发表学术论文200余篇,出版《非平衡凝固新型金属材料》、《金属玻璃及其复合材料》、《新材料概论》等。

知行合一，十年一剑

——访金属材料定向凝固专家，南京理工大学教授陈光

The Unity of Knowing and Doing, The Unity of Persistence and Hard Work

本刊记者 李丹

☞: PST TiAl 单晶获得的巨大成功与背后所做的努力工作分不开,可能经过几百次甚至上千次的讨论、构思、计算、试验和测试,您能为我们介绍一下背后所做的工作吗?

陈光: 每个有实用价值的重大成果一定是经历了长时间的潜心研究,正常情况下也一定得付出很多的

心血。即使是灵感,也是基于长期的积累,正所谓“机遇总是青睐有准备的人”,“站在巨人的肩膀上”。作为恢复高考制度的首届大学生,我本科专业就是“铸造”,学位论文就是铁铝金属间化合物的熔炼工艺与铸造性能研究。此后的学习和研究,始终围绕着“铸造”与“凝固”。攻读博士

学位期间,师从傅恒志院士,从事镍基单晶高温合金定向凝固与熔体热处理研究。从那时起,在导师的指导下,与课题组老师和师兄弟们一起,真正理解并学会了定向凝固技术,为我的研究工作奠定了坚实基础。

Nature Materials 在2016年15卷第8期发表的题为 *No easy solutions*


for aerospace (《航空航天无易事》) 的社评 (editorial) 认为: PST TiAl 单晶实现了高温强度、塑性和蠕变抗力的结合 (to obtain a combination of high-temperature strength, ductility and creep resistance)。德国材料科学家 Michael Schütze 在 *Nature Materials* 发表了专门述评我们工作的文章, 题为《高温合金: 单晶性能提升》(High-temperature alloys: Single-crystal performance boost), 指出: “陈等的工作为 TiAl 合金在更高温度的广泛应用做出了重要贡献 (the work of Chen et al. offers a significant contribution towards more widespread use of TiAl alloys at high temperatures)。”我们认为这些都是从实用角度出发的评价。

在科学上, 我们提出了界面各向异性可以调控片层取向的新理论, 突破了 β 相凝固 TiAl 合金片层取向无法控制的定论; 揭示了高温 PST TiAl 单晶优异强塑性能的获得来源于纳米孪晶强韧化等。显然, 这也是我们的成果得以在 *Nature Materials* 发表的重要因素。

以 β 相凝固 TiAl 合金片层取向控制理论研究为例, 我们大概连续花费了 3 年的时间。在这 3 年的时间里, 每周都要组织 1~3 次全组人员集中研讨这一问题。根据经典的 Burgers 关系, TiAl 合金 β 相与 α 相之间存在 12 个惯习面, 也就是说, 尽管由定向凝固获得了 $\langle 100 \rangle$ 取向的 β 相单晶, 但在 $\beta \rightarrow \alpha$ 的固态相变过程中, 还将有 12 种可能的变体形成。在这 12 种变体中, 8 种变体最终形成的片层取向为 45° , 4 种为 0° 。这意味着, PST TiAl 单晶的片层取向是随机事件, 而获得我们所期望的 0° 片层取向的概率只有 1/3。

在 TiAl 合金 β 相与 α 相之间存在的 12 个惯习面中, 是否具有某些可以利用的差异来调控片层取向呢? 如果有, 是什么呢? 这就是我们

连续花费 3 年时间, 无论是做哪个具体课题研究的组员, 每周集中 1~3 次反复研讨、持续攻关的问题。至今确实已经记不起来期间提出过多少构想, 又被不断地推翻否定了。

: 在您的成果报道之前, TiAl 合金的研究现状如何?

陈光: TiAl 金属间化合物是一种新型轻质高温结构材料, 其密度只有 $3.9\text{g}/\text{cm}^3$, 而镍基高温合金约为 $8.5\text{g}/\text{cm}^3$, 并具有高比强、高比刚、耐蚀、耐磨、耐高温以及优异的抗氧化性和抗蠕变等优点, 是目前除陶瓷以外, 唯一能够应用于 600°C 以上氧化环境的轻质金属材料。

TiAl 合金的研究可追溯到 20 世纪 50 年代, 当时侧重于电子显微结构分析。70 年代, 对其合金化与性能开展了研究。到了 80 年代, 美国空军实验室对不同成分和性能的 TiAl 合金进行了总结, 提出了成分为 Ti-48Al-3V-0.3C 第一代双相组织 TiAl 合金, 室温塑性可达 2%, 但因综合性能不能满足发动机高温部件使用要求而被迫放弃。80 年代末, 美国 GE 公司开发出了最具代表性的第二代合金, 成分为 Ti-48Al-2Cr-2Nb (即 4822 合金), 其综合性能明显优于第一代 TiAl 合金。

1993 年, 美国 Howmet 公司首次采用 4822 合金铸造出低压涡轮叶片, 并在 CF6-80C 发动机试车。2006 年, 美国 GE 公司宣布将采用 4822 合金制造 GENx™ 发动机低压涡轮叶片。直到 2011 年, 4822 合金正式应用于波音 747-8s, 每架飞机装有四台 GENx™-2B 发动机, 最后一级低压涡轮叶片使用 4822 合金。2012 年, 又应用于波音 787-8, 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, 使发动机减重约 400 磅。新合金及相应的设计制造工艺, 实现了节油 20%、降噪 50%、减少 NO_x 排放量 80% 的显著效果, 成为当时航空和材

料领域轰动性事件。

随后, TiAl 合金的使用量快速增加。截至到 2016 年 2 月, 先后制造出 25 万个 (超过 160 万磅) TiAl 叶片, 累计飞行 660 万小时和 110 万运行周次, 其中有 19 万个叶片每天飞行在 229 架 787-8 和 101 架 747-8s 中。GE 伙伴 SNECMA 计划使用 4822 合金作为 LEAP™ 发动机低压涡轮叶片, 取代 CFM56 发动机装配在波音 737、部分 A320neo 和中国 C919 飞机。TiAl 合金替代 Ni 基高温合金用作飞机发动机低压涡轮叶片受到了包括 GE 和 Rolls-Royce 等发动机制造公司的高度重视。

但 TiAl 合金还存在两大致命缺点。一是室温拉伸塑性低 ($<2\%$), 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和全新的发动机设计框架, 增加了设计与制造成本, 且不敢用于前部的压气机。若能将 TiAl 合金室温拉伸塑性提高到 3%, 就可将其由只应用在最末两级低压涡轮叶片, 扩大至前部的压气机叶片, 同时可以采用通用的设计安装方法, 降低设计制造以及维护成本。二是 TiAl 合金在约 700°C 强度急剧下降, 限制了其在更高的温度范围替代镍基高温合金。

高温 PST TiAl 单晶实现了高温强度、塑性和蠕变抗力的优异结合, 室温拉伸塑性由 $<2\%$ 提高到 6.9%, 屈服强度和断裂强度分别高达 708MPa 和 978MPa, 强度急降温度由约 700°C 提高到 950°C 以上。900 $^\circ\text{C}$ 拉伸屈服强度为 637MPa, 最小蠕变速率和持久寿命均优于美国已经成功应用于 GENx™ 发动机的 4822 合金 1~2 个数量级, 具有重要的应用前景。

TiAl 合金在我国许多高校和科研院所也都开展了大量卓有成效的研究工作, 取得了可喜进展。有些还是中国原创, 如高 Nb-TiAl 就是北京科技大学陈国良、林均品教授课题组

发明的,有效提高了 TiAl 合金的承温能力、高温抗氧化性和室温强度,引领了 TiAl 合金研究新的发展方向,并得到国际同行高度认可。傅恒志、陈瑞润教授等创造性提出并发明的 TiAl 合金冷坩埚定向凝固法,成功制备了工业尺寸定向组织高 Nb-TiAl 合金,室温和高温力学性能都得到明显改善和提高,是一种非常有前途的定向凝固 TiAl 合金制备方法。

曹春晓院士用“原创性、突破性、引领性和基础性”评价您团队发明的这一新材料。未来 PST TiAl 单晶毫无疑问将是先在国防领域应用,如航空发动机,这对我国的航空航天事业的发展具有重大价值。PST TiAl 单晶涉及的核心内容就不单单是您的事情了,还关系到国家利益,在保密方面您们有哪些规划?

陈光:南京理工大学是由哈军工分建发展而来,经历了中国人民解放军炮兵工程学院、华东工程学院、华东工学院、南京理工大学等办学阶段,是著名的国防七院校之一,具有严格的保密体系、保密制度和优良的保密传统。论文发表、成果发布等信息公开均须履行保密审查审批程序,并有相应的管理部门归口管理。任何个人不得超越已经公开的范围擅自泄露国家秘密和技术秘密。学校对涉及国家秘密和单位利益的技术、成果、构想等均有严格的保密规划和措施,我们只须严格执行就可以了。

通过您 20 年来对高温合金的研究,您认为高温合金未来会向着什么方向发展?

陈光:为了不断提高航空发动机叶片的承温能力,高温合金的发展经历了变形-铸造-定向凝固-单晶等几个发展阶段。镍基单晶高温合金叶片是目前航空发动机中最耐高温的关键旋转件。新型钴基合金熔点有望比镍基合金高出 100~150℃,拥有更高熔点的钼基和铌基难熔合金、高熵合金以及陶瓷基

复合材料等都在研究中,今后有可能应用于航空发动机,进一步提高涡轮前进气温度,提高发动机效率。

TiAl 合金由于减重效果显著,已经成功替代镍基高温合金用于 650~750℃ 温度范围的低压涡轮叶片。一旦 TiAl 合金室温拉伸塑性突破 3%,则可扩大其应用到压气机叶片。随着高温 PST TiAl 单晶研究的深入和技术成熟度的提高,有望将 TiAl 合金的应用温度范围提高到 950℃ 以上。但无论如何,更高温度的叶片还将由镍基单晶高温合金制造,更高熔点的新材料的实际应用还有待时日,任重道远。

关于怎么出高水平、有显示度的成果,您有哪些经验和建议与我们分享?

陈光:我想从两个方面来讨论这个话题,一是外部环境,二是研究者自身。

外部环境包括国家、社会和单位。从管理的角度,考核是必须的、无可厚非,在任何单位、对任何工作的管理都离不开考核。但对科研人员过于功利、简单数数的计“工分”式考核,在改革开放之初虽然起到了一定作用,但发展到今天,已经弊大于利,显然不利于高水平原创标志性重大成果的产生,客观上反倒成为催生浮躁,甚至导致抢发论文、一稿多投、弄虚作假等学术不端行为的助推器。近期,学术界和国家主管部门都已经注意到了这个问题,开始以重大标志性成果考核为导向。有的单位已经或计划实行分级考核,实施长聘教授制。我们校长提出“人员进团队,项目进方向,设备进平台”,改对全员考核为对团队考核……。我个人认为这些都是在朝着有利于标志性成果产出的方向发展。事实上,对从事创造性脑力劳动的科研人员,管理的最高境界应该是营造宽松、自由、不用扬鞭自奋蹄的氛围,以最大限度地激发科研人员的积极性、主动性、创

造性为目标。

自身包括研究者个人和团队,应该有理想、有目标、有追求、有胸襟、有境界,“仰望星空、脚踏实地”,“不畏浮云遮望眼”,“躲进小楼成一统”,“衣带渐宽终不悔”,不忘初心,排除干扰、淡泊名利。

通常人们对“干扰”的认识往往停留在打击、迫害、压制等消极负面的层面,今天我所说的干扰除此之外,更主要是指那些通常看来是正面的因素。如为了引导和激励科研人员多出成果,很多单位实施了奖励政策,分别按 SCI、EI、核心期刊论文篇数核发奖金,评职称、晋级等也基本看论文。但职称、奖金本身就是名利,人们很容易受其诱惑干扰而放弃科研理想和目标、忘记初心,变成为论文数量而奋斗,这就不利于产生原创性重大标志性成果了。因此,作为研究者和团队自身必须要排除一切干扰,不为任何名利所动,甚至背负屈辱、牺牲眼前利益,“一根筋”到底,不忘初心,方得始终。事实上,我们团队近 10 年来就是在单位按 SCI 论文篇数发奖金的情况下严格控制论文发表的,当然也因此少得了不少奖金(笑)。但也有因禁不住诱惑,擅自投稿而被批评、写检查的。如果以团队考核,就不会出这样的问题了,因为团队讲求分工协作,绝不容许任何人把别人的“idea”擅自拿去做研究、发论文、领奖金。团队负责人知道谁的贡献大、谁更刻苦努力、谁更有发展潜力,绝不单纯看谁的论文多!我们这个 *Nature Materials* 成果在很多年前刚刚取得初步结果时,学生就想投 *Scripta Materialia*,我没同意,要求继续研究。当取得了新的阶段性成果后,学生又想投 *Acta Materialia*,我还是没同意,并提出了新的研究目标,要求再继续进行更深入的系统研究,……直到完成了 *Nature Materials* 文章的全部内容。

(责编 海山)