

深入探讨新型金属材料

——超级合金的性能与应用

◎ 孟超 著



深入探讨新型金属材料

——超级合金的性能与应用

◎ 孟超 著



图书在版编目(CIP)数据

深入探讨新型金属材料: 超级合金的性能与应用/
孟超著. -- 成都: 电子科技大学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5647-5671-0

I.①深… II.①孟… III.①铝合金-研究 IV.
①TG146.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第028273号

深入探讨新型金属材料: 超级合金的性能与应用

孟超 著

策划编辑 李述娜 李倩

责任编辑 罗国良

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 北京一鑫印务有限责任公司

成品尺寸 170mm × 240mm

印 张 20.5

字 数 324千字

版 次 2018年5月第一版

印 次 2018年5月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5671-0

定 价 74.00元

版权所有, 侵权必究



孟超

男，（1979—），河南沁阳人。焦作大学副教授，焦作市市级优秀教师。主要从事金属材料性能研究与应用和计算机辅助设计方面的教学与研究。

近年来，主持参与完成省级科研课题12项，省级教学改革课题1项；完成发明专利1项，实用新型专利4项。发表学术论文30余篇，其中EI收录6篇，中心核心期刊论文18篇；主编教材4部。

简介

长期以来，金属材料一直是最重要的结构材料和功能材料。铜、铁、铜合金、铝合金、钛合金、镍合金等都是最重要的和应用最广泛的传统金属材料。工业化应用对金属材料的使用性能的要求越来越高，金属材料本身也必须要发展以满足新的需要；同时，科学技术的新发展，也使得金属材料有可能得到新的大发展。我们可以预期，新型金属材料的发展和应用将成为 21 世纪金属材料工业的重要特征之一。新型金属材料的发展主要包括两个大方向，即目前大量应用的传统金属材料的新发展（俗称冶金新材料）和发展全新的完全不同于传统金属材料特性的新型金属材料。而新型金属材料是完全不同于传统金属材料的一类新的金属材料。新型金属材料具有某些优越的使用性能，是传统金属材料不具备的特殊性能。这种新型金属材料并非一定是新发现的，但在过去不可能作为一种工程材料实现工业化应用，只是在当今的科学和技术发展的条件下，才有可能成为工程材料得到应用。本文主要研究的是这一种新型金属材料，并结合大量的理论研究与实践应用，从七个方面入手详细研究了目前世界上技术比较先进、应用比较广泛的数十种新型金属材料（即文中的超级合金），尽量做到了内容翔实，言之有物。希望通过本研究能够对我国的新型金属开发与应用尽到自己的一份义务，也希望能够帮助到翻阅本书的朋友们。

目 录

- 第一章 绪 论 / 001
 - 第一节 超级合金概述 / 001
 - 第二节 超级合金选用与设计概述 / 003
 - 第三节 超级合金生产制备简述 / 005
 - 第四节 以钛合金为例对比中外合金的研究应用与发展趋势 / 009
- 第二章 高强高韧：新型工程结构用钢 / 015
 - 第一节 新型工程结构用钢及其发展 / 015
 - 第二节 第三代汽车先进高强度钢的开发 / 026
 - 第三节 现代社会的绿色建筑——抗震耐火钢结构 / 037
 - 第四节 西气东输管线钢的发展 / 045
- 第三章 性能强韧化：新型机械结构用钢 / 057
 - 第一节 高效节能的微合金非调质钢 / 057
 - 第二节 高强韧性齿轮钢 / 067
 - 第三节 高品质重大装备用轴承钢 / 072
 - 第四节 耐高温的金属间化合物结构材料 / 079
- 第四章 高性能、高精度：新型工模具用钢 / 083
 - 第一节 高速切削刀具及其特点 / 083
 - 第二节 模具材料概论 / 091
 - 第三节 激发模具活力的热处理技术 / 096
 - 第四节 新型模具材料综述 / 113
- 第五章 高性能化：特殊性能钢 / 131
 - 第一节 超级不锈钢的性能及应用 / 131
 - 第二节 火电机组用耐热钢的发展 / 140

第六章	轻而强：新型非铁金属合金材料	/	160
第一节	铝锂合金在航空航天中的应用	/	160
第二节	多领域全面开发的新型钛合金	/	168
第三节	绿色最轻质金属——镁合金	/	197
第四节	粉末冶金新材料	/	206
第七章	神奇而多变：新型功能金属材料	/	213
第一节	新型医用金属材料及其生物功能化	/	213
第二节	金属家族中的“变形金刚”——形状记忆合金	/	220
第三节	储氢合金在新能源开发利用中的应用	/	237
第四节	电阻为零的超导合金	/	245
第五节	巨磁电阻合金	/	252
第六节	超塑性合金	/	257
第七节	金属玻璃	/	262
第八节	金属橡胶	/	265
第八章	多功能化：新型金属基复合材料	/	274
第一节	金属基复合材料概述	/	274
第二节	金属基复合材料的性能特点	/	278
第三节	金属基复合材料的制备工艺	/	290
第九章	超级合金开发与应用新进展	/	302
第一节	超级合金产品开发新进展	/	302
第二节	超级合金新产品	/	306
第三节	超级合金应用新进展——高铁轴承材料	/	310
	参考资料	/	319
	结 语	/	321

第一章 绪论

第一节 超级合金概述

一、超级合金的特性

超级合金是指以铁为基体，通过添加合金元素并辅之以洁净均匀化制备工艺，使其具备强韧、耐磨、耐热、耐蚀性能的特种钢铁材料。超级合金作为机械零件、工程构件以及复杂装备等重要的材料基础，具有重要作用，广泛应用于传动系统、动力系统、耐磨耐蚀以及航空航天等领域。随着工业生产技术的进步，构件设计向大型化和结构复杂化发展，对超级合金的性能也有了更高的要求。洁净均匀化、高强韧、抗疲劳、耐蚀性、抗蠕变成为超级合金的发展要求和基本特点。

超级合金的生产和使用一般经历“自然资源—材料—零件—构件—系统—废品/资源”的过程。与普钢需要大规模、连续生产维持竞争能力不同，超级合金一般生产规模小，经营分散，更新换代快，而且品种变化频繁。超级合金的技术含量水平是国家的工业化发展水平的重要代表之一。

超级合金具有若干“特”质：特别的合金元素及成分设计；特别的组织结构；特种工艺措施，包括热处理等深加工处理以及满足尺寸、表面精度的特殊处理；特种机械零件和工程构件制造材料；特种工程用途，如用于航天航空、高速铁路动车组、石油化工、核电、风电等能源行业、汽车工业、军工配套材料等领域。

二、超级合金的生命周期

一个复杂装备和工程可以被看做一个系统，是由机械零件或者工程构件组成并相互作用而形成的有机整体，系统之外与系统具有紧密联系的事

物总和则称为系统的环境。装备系统由机械零件和工程构件组成，而机械零件和工程构件则由材料形成。系统要求具备可靠性、安全性、维修性和耐久性。

产品（指机械零部件或工程构件）的抗力性能、使用条件、环境作用等都是随时间变化的过程，其服役过程复杂且具有大量的不确定性和不确定性，所以要综合考虑设计、检测、维护、使用等策略，对产品全生命周期的可靠性进行管理，保证系统和产品经济性以及环境友好性。

超级合金的制造流程基于相应的分类划分为超级合金的制备及其产品的后续加工制造两大类。这些过程并不是单独存在的，而是由一系列复杂的工艺组合而成。具体来说包括合金材料的制备、毛坯生产制形、零部件加工制造、产品改性和处理以及最后的装配和调节测试环节。每个工艺过程都可作为一个“输入—处理—输出（Input-Process-Output, IPO）”的单元过程，制造过程则是由一系列工艺 IPO 过程组成的工艺过程链，是一个更大的输入输出过程。

超级合金制造过程的输入资源包括一系列所用到的物料资源，例如原材料及半成品制品、所消耗的能源以及所用到的设备等；超级合金制造过程的输出资源是指精加工制造形成的合格产品以及相应的环境排放物等（具体指一些有形及无形的附属产品的产生）。

在一个产品生命周期结束时，要选择和决定环保处理的方式。其中，产品再制造也是一个非常重要的选择，当然这取决于产品设计中赋予的再制造性，也与产品使用等过程密切相关。

产品报废也是一种选择，但要考虑钢废弃后的回收循环使用，减少废弃过程对环境的负面影响。

三、超级合金的基础作用

超级合金在产品以及复杂装备系统具有基础作用。超级合金性能、质量及产品质量、产品环境适应性共同构成复杂装备与工程系统功能的基础，最终形成装备系统的市场适应性。因此，超级合金选用与设计对复杂装备系统具有重要作用。

第二节 超级合金选用与设计概述

超级合金选用与设计是产品全寿命周期管理的重要环节，是全寿命周期质量的重要影响因素。超级合金选用与设计包括材料选用、材料设计和产品设计三部分内容。材料选用原则包括材料使用性能、工艺适应性以及经济性原则；设计包括产品和材料设计，产品设计主要包括产品功能、制造过程以及产品成本核算。超级合金产品以及装备日趋复杂化，随着计算机技术与基础理论的发展，以及数据库和标准规范的建立，材料选用与设计采用系统工程思想与方法组织，同时材料选用与设计系统逐渐趋于科学化、一体化、并行化。

一、超级合金的选用

服役性能是材料选用的重要基础与依据，在可供设计人员进行选用的超级合金全部性能要求中须同时具备基本性能和辅助性能的要求，以满足确定的服役环境。

二、超级合金的设计

超级合金设计的根本任务是满足工程构件或机械零件服役环境的使用性能要求。使用性能主要包括两类性能参数：一是基本参数，如强度、塑性、韧性、疲劳极限等，能够直接用于设计计算。二是综合参数，如耐磨、耐蚀性能，综合参数一般不能单纯进行材料度量，也不能直接用于设计计算，但可用来确定材料选用的顺序。超级合金工艺适应性是指超级合金加工制造板、棒、管、丝等品种钢材或者机械零件和工程构件过程中所呈现出的凝固、变形、焊接、表面处理、整体处理、机械加工等成型性能。

一般来说超级合金的使用性能影响因素比较多，具体包括合金的内部成分、显微组织结构、合金内部含有的杂质以及含有的结构缺陷、合金体表面的组织结构和应力状态等诸多因素。其中，超级合金的化学成分和组织特征具有主要作用。超级合金的设计首先要进行满足性能要求的成分和组织设计。钢的成分与组织设计基础包括：

①钢的组成合金元素、元素间交互作用以及组成元素所形成的组成相形貌、分布以及特征；

②钢的强韧化机制、工艺性能以及耐热、耐蚀、耐磨性能的物理本质和基本理论；

③钢的化学成分、组织与强度、塑性和韧性间定量或半定量的变化关系；

④钢的组成相，在热力介质耦合作用下的形态与分布演变过程和特征；

⑤钢的组成相的形变，形变强化以及在服役过程中的变化、断裂情况。

上述各项相互联系、相互渗透，并相互影响。对于结构组织的选择问题，不应该单单以超级合金的终极性能作为评价选择的唯一标准，也应该考虑其他因素的影响，比如制造过程中工艺的适应性，以及经济合理性，只有两者相结合，综合考虑各个因素的影响关系，才能避免出现高成本的超级合金的工艺和使用性能不能满足服役环境的情况要求。

三、超级合金产品设计

超级合金产品设计系统包括产品构思、服役性能、产品设计、产品制造、表面工程、试验评估、产品使用和产品维修等体系。产品设计中，应将产品看做一个系统，用系统工程的方法进行设计。系统工程采用了“自上而下”途径与“自下而上”途径相结合的整体性设计思想，产品系统设计过程具有不断迭代、逐步收敛和反复评价的特征，表现为一个不断反馈与修正的过程。“自上而下”的途径有助于将复杂系统分解为它的子单元。这种“自上而下”的途径适用于系统的不同层次，它强调从需求出发，将系统功能要求进行分解，最终输出的结果是一组系统功能单元。而“自下而上”的途径则侧重于通过系统各功能单元的设计、组装、集成、综合，最终的输出结果是系统功能要求的实体。通过这两种途径的有机结合，可实现对复杂装备系统的先分解后协调，反复迭代。

产品外观属于产品功能一个组成部分。外观首先取决于该产品所需承担的工作性质，取决于产品的功能。短期服役的产品不需要细致的外观设计；简单产品零件外观复杂化，将导致难以清理和维护，如汽车覆盖件首先满足服役工作需求，其次才是外观设计。1915年英国设计和加工协会成立时提出了一条座右铭：适用第一。1944年成立工业设计委员会，定期选

择最好的设计进行展出。伦敦的皇家艺术学院和我国的清华大学已开设了工业设计研究生课程，大型工业机构雇用了专职或兼职的专业工艺美术家，保证产品符合美学要求，为人类的生活和工作创造一个协调而愉快的环境。“适用第一”加上综合性能，可以确保材料制品使用的可靠性、安全性、经济性和耐久性。

产品成本包括产品全寿命周期费用，即产品设计、产品制造、产品使用以及环保处理的所有费用。设计或对设计修正的风险定量化是设计程序的一个必要组成部分。

因为产品失效主要是由于材料未达到其预期的服役性能所导致，所以在材料选用与设计中心须进行产品失效风险评估。风险的定义为：

$$\text{风险} = \text{失效概率} \times \text{零件的数量} \times \text{失效费用}$$

失效费用应包括全部直接的费用、由此引发的费用以及损失赔偿费用。风险的费用必须与采用新的设计或对设计进行修正所带来的潜在效益相比较。这种分析是主观的，因为它包含着对还未曾服役的零件发生失效的概率责任评估。作为风险评估的一个组成部分，责任评估可以确定失效的代价。若即将发生的失效发现于例行性的维护期间，就能够避免连带惩罚性损失。惩罚性损失往往是由于设备的制造者或操作者的重大过失而需承担的损害赔偿，如因为漏油造成了大范围的环境污染，需要支付相应的清洁费用。设计与制造成本增加可提高产品可靠性，产品可靠性则会降低产品售后费用，通过权衡可以使总成本降低。

第三节 超级合金生产制备简述

一、超级合金的冶金水平

冶金技术包括钢的熔炼、成型和性能控制等。冶金技术水平是超级合金设计发展的重要基础，也是影响超级合金性能和质量的重要因素。总的来讲，冶金工程的质量控制主要有以下几方面的内容：①应该在合金化成分满足设计要求的前提下，尽量控制成分的波动区间，使得少量和添加的微量元素可以均匀且有效地分布到钢材中；②钢锭会存在宏观和微观上各

种偏析现象，导致钢坯出现非均匀的状态，应该采取有效手段尽量避免；③在钢材制造过程中难免会混入各种有害气体或非金属杂质，应该采取有效措施，减少这种情况的发生；④对于锻造过程中的 S、P、As 和 Cu 等杂质元素，应该对其在钢材中的形态和分布做有效的控制。

冶金质量对钢的强韧性具有重要作用，合适的熔炼工艺、提高纯净度等是达到设计指标、获得高强韧性的重要保证。钢的精炼技术的发展，显著降低了钢中杂质和有害元素，使钢的强度韧性不断提高，如双真空熔炼改用等离子熔炼加真空自耗熔炼后，18Ni 马氏体时效钢中的硫含量由 0.003% 降低到 0.0006% 水平，拉伸强度 2 100MPa 下的断面收缩率由 40% ~ 50% 升高到 60%，低硫含量时超高强度钢的冲击韧性与硫化物夹杂含量呈线性关系。

提高纯净度可以净化晶界，提高钢的性能。纯净度已成为一个有效地强化以及冶金质量提高的因素，并对高强度钢的韧性产生重大影响。当前，精炼技术达到的高纯净度为高性能超级合金的设计奠定了基础。

新一代超级合金的发展与高纯熔炼紧密相关。试验结果表明，将轴承齿轮钢氧含量从 40×10^{-6} 降为 10×10^{-6} ，其疲劳寿命将提高 10 倍；若再降低到 5×10^{-6} ，疲劳寿命将提高 30 倍。新一代轴承齿轮钢具有耐蚀性能和高温性能及超高强韧，在抗拉强度和屈服强度分别大于 1 800MPa 和 1 500MPa 的基础上，断裂韧性仍然达到 $90\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，高纯熔炼制备技术作为超级合金性能和服役寿命的保证基础而获得迅速发展。

真空冶金制备技术改变了在常压下的物理化学反应条件，降低了气相压力，实现了活性元素控制、真空下碳氧反应，提高了钢的洁净度水平。

二、超级合金的生产过程

与普通钢生产相比，超级合金生产工艺技术水平高，装备水平高，设备专业化程度高，自动化程度和自动化水平高，是多种技术的集成。

超级合金生产有转炉流程、电炉短流程和特种熔炼三种主要流程。转炉流程：高炉冶炼—铁水预处理—转炉冶炼—二次精炼—连铸（热送热装）—轧制；电炉短流程：电炉冶炼—二次精炼—连铸（热送热装）—轧制；特种熔炼：真空感应熔炼、真空自耗熔炼、冷坩埚熔炼、电渣重熔、真空电弧重熔、电子束重熔、等离子熔炼或重熔—模铸—锭子锻造或轧制、

挤压。例如轴承钢、耐热钢、齿轮钢等超级合金生产采用超高功率电炉冶炼—炉外精炼—方坯（管坯）连铸—棒线材（管材）连轧—精整热处理生产线；高工合金模具钢的生产采用冶炼—精炼—模铸—快锻开坯—精锻成材—制品加工生产线。

鉴于以上对超级合金生产工艺的介绍，结合现在超级合金的发展要求，超级合金的工艺要求发展趋势分为下面几个内容：首先，对于超级合金的质量和性能方面，应该提高其纯度、组织均匀程度以及高精度控制；其次，对于超级合金的生产成本方面，应该使用减少成本的生产工艺，包括使用连铸连轧技术以及良好的控扎控冷技术等；然后，对于超级合金的生产零部件加工方面，应该着重开发在线退火、易切削、非调质等优势技术，在实现高控制精度的同时也提升合金表面的质量；最后，应该对于现行各种先进超级合金生产技术进行分析对比，整合各项工艺技术，达到系统的最优化。

三、超级合金的特炼工艺

超级合金特炼生产工艺流程主要包括真空感应熔炼和真空自耗工艺。真空感应熔炼冶金效果如下：

①提纯精炼：钢的纯净度指合金中氮、氢、氧等有害气体，硫、磷、铅、铋、铊、砷等有害元素以及非金属夹杂物含量。真空感应炉熔炼独立调节反应温度、压力和时间等熔炼参数，进行提纯反应净化。通过碳和氧形成 CO 气泡的反应，去除氮和氢气体元素；加入活性元素铈、钙和镁形成 CaS 及 Mg_2P 等化合物，去除硫、磷。通过真空气氛挥发，去除铅、铋、铊、砷残余元素；夹杂物通过分解及在熔池中的浮升予以去除，控制夹杂物尺寸不大于 0.01mm，且分布弥散（300M 钢通过真空感应炉氧、氮分别控制到 10×10^{-6} 和 12×10^{-6} ）。

②控制成分：真空感应炉熔炼可以精确控制所熔炼的超级合金化学成分。

③提高性能：真空感应熔炼能精确控制化学成分，提高纯净度，从而显著提高超级合金的物理和力学性能。真空感应熔炼钢中非金属夹杂物减少后，疲劳强度显著提高，GCr15 与 W18Cr4V 两种轴承钢在 108 次循环下疲劳强度提高 50%。

真空感应熔炼作为超级合金合金化的基本手段，应用趋于广泛。

真空电弧重熔 (Vacuum Arc Remelting, VAR) 为超级合金另一种高纯度冶炼制备方式。将超级合金通过真空感应炉制成自耗电极, 在真空条件下 ($10^{-2} \sim 10^{-1} \text{Pa}$), 利用直流电弧作热源, 将自耗电极逐渐消熔, 熔化金属滴入水冷铜结晶器内, 再凝固成自耗锭; 反应的气态产物被真空泵抽走。真空电弧重熔将提纯净化、改善铸锭结晶结构集中在一道工序完成。

①脱气、杂质元素挥发、夹杂物去除效果在真空、电弧区高温和压力作用下, 脱气及 As、Sn、Sb 等元素的挥发, 分解不稳定的氧化物、氮化物。电弧作用力使夹杂物分散、飘浮, 弥散分布于铸锭。

②改善铸锭结晶真空电弧重熔中由于底部及周缘水冷铜结晶器冷却, 熔池存在最大温度梯度, 柱状晶发达, 垂直凝固面生长, 结晶方向性有利于铸锭热加工。强制冷却使局部凝固时间缩短, 有利于改善钢锭显微偏析。

③提高力学性能真空电弧重熔钢中氢降低。氧含量降低, 氧化物夹杂减少及细化, 提高了钢的韧性。经真空电弧重熔, 超级合金的力学性能都有提高, 特别是横向性能。30CrMnSiNi2A 进行真空电弧重熔后疲劳强度都有明显提高。由表 1-1 可见, 30CrMnSiNi2A 经重熔后, 横向疲劳强度几乎增加 70%。真空电弧重熔不仅提高超级合金塑性, 使钢的性能均匀一致。用真空电弧重熔生产的铸锭不同部位与方向性能的可再现性高于一般大气熔炼, 甚至优于真空除气处理后的钢锭。

表1-1 真空电弧重熔对高强度钢以及渗碳齿轮钢疲劳强度的影响

钢的牌号	疲劳强度极限		
	熔炼方式	纵向试样	横向试样
30CrMnSiNi2A	大气熔炼	650 ~ 700	400 ~ 500
	真空自耗	850 ~ 900	700 ~ 800
40CrNi2SiMoA	大气熔炼	550 ~ 650	350 ~ 450
	真空自耗	800 ~ 850	700 ~ 800
12Cr2Ni4A 渗碳	大气熔炼	800 ~ 850	800 ~ 850
	真空自耗	1 100 ~ 1 150	900 ~ 950

注: 单位 (MPa)

四、超级合金生产质量管理

超级合金在生产质量管理上,逐步建立以用户需求为导向的生产流程、技术、标准的一贯制体系,该体系主要包括质量体系管理、人员素质管理、设备功能精度管理、一体化生产计划规程、质量信息化管理、过程质量管理、冶金数据库建设等,具有如下一些特征:

①集成质量管理,确保从原料到产品用户使用的整个过程的优化。

②运用产品质量在线检测、产线运行诊断和分析、设备状况实时检测“三合一”的系统诊断技术,确保设备稳定,提高生产效率,优化产品质量。

③精细化管理,制定标准作业程序,强化过程控制能力,持续提升现场管理水平。

④建立与完善高质量特殊钢技术与标准管理体系。

基于一贯制质量管理体系,超级合金产线的每个工序进行生产过程质量的控制和测试,实现生产质量的全过程管理。通过工序失效模式的预测、分析和控制,实现每个工序的精确控制,识别失效模式,对每个失效模式的失效原因提出系统识别,计算出风险顺序数,建立超级合金生产工艺流程。实现生产工艺过程以及产品质量信息化,建立在线表面质量检测系统、在线质量判定系统、在线质量判定查询系统、产品综合查询系统,并建立系统数据跟踪、数据核对、数据统计分析、数据库,以提高产品结构调整及产品质量要求的适应性。安装在线粗糙度仪、测厚仪等检测设备,组织在线质量判定系统开发人员,确定出一整套适合于超级合金生产特点的“过程质量管控”管理办法,优化整合生产计划、工艺技术、人员操作、设备功能精度保障、原料质量等,实现高质、高效、稳定生产。

第四节 以钛合金为例对比中外合金的研究应用与发展趋势

一、国内外钛合金发展现状

(一) 国内外钛合金发展概况

钛合金是以钛为基础加入其他元素组成的合金。在近代工业中,钛合

金以其优良的高强度、耐腐蚀性及耐热性等特点已成为高性能结构件的首选材料。此外，钛具备生物相容性、超导、储氢、形状记忆等独特功能，被广泛应用于医疗器械、化工、航天航空、舰船等领域。

目前，已有上百种钛合金问世，其中最著名的合金有 20 ~ 30 种。钛合金可以分为 α 合金、 $(\alpha+\beta)$ 合金、 β 合金及金属间化合物钛合金。近年来，新型钛合金主要有四种类型：高温钛合金、高强高韧 β 型钛合金、钛铝基合金及其复合材料与阻燃钛合金。我国于 1956 年开始钛及其合金的研究，20 世纪 60 年代中期开始钛材的工业化生产。常见的钛合金为铸造钛合金及变形钛合金。

（二）钛合金生产技术的发展现状

钛合金生产技术关系着钛合金的质量。钛合金熔炼、铸造、成型等技术近年来得到了极大的发展。

1. 钛和钛合金的熔炼技术

钛及钛合金的熔炼主要分为两类：真空自耗和真空非自耗熔炼。

在钛和钛合金的工业化生产中，最常用的技术是真空自耗电弧熔炼（Vacuum Arc Remelting, VAR）和冷床炉熔炼。

VAR 技术在钛合金熔炼中可以细化铸锭组织，提高产品的纯净度。该技术在近年来的主要发展表现在以下几个方面：①全自动 VAR 重熔工艺。先进的计算机技术的发展也应用到 VAR 工艺中，自动电控盒数据收集系统可以为特定的铸锭和合金建立优良的熔炼模式。除此之外，还可以分析熔炼过程中出现的问题，提高金属成品率。②铸锭尺寸大型化。大型 VAR 炉可熔炼质量达 30t 的钛铸锭，国外熔钛用真空自耗电弧炉吨位大多为 8 ~ 15t，我国近年来也实现了 8 ~ 15t 熔钛吨位。③供电方式采用了同轴型供电方式，可以抵消磁场，防止产生偏析。④数值模拟技术的发展。国内外学者利用数值模拟方法研究 VAR 工艺取得一定的进展。国内学者探索了铸锭温度场的分布规律并建立了预测凝固组织形貌、铸锭成分及缺陷分布的模型。

冷床炉熔炼是以等离子体（Plasma Arc）或电子束（Electron Beam）为热量来源，分别形成等离子体冷床炉及电子束冷床炉熔炼的两种工艺。电子束冷床炉熔炼与真空自耗电弧熔炼相比有许多优势：①可以采用如残料、散状海绵钛以及钛屑等多种形式的原材料及经济的原材料；②可以除去钼（Mo）、钨（W）及钽（Ta）等高密度杂质和氧化物等低密度杂质及易挥发