

· 综述 ·



## 特钢持续向“特、高、新”发展 庆贺《特殊钢》创刊 45 周年

翁宇庆

(中国金属学会, 北京 100000)

**摘要:**通过回顾特殊钢(特钢)自工业革命以来的发展历程,重点阐述了其核心特征的演变。从早期钢铁冶金技术的局限性,到电弧炉的发明对合金钢生产的革命性推动,再到不同国家对特钢概念的界定,揭示了“特、高、新”始终是特钢发展的固有趋势。随后探讨了“先进钢铁材料”概念的兴起及其与传统特钢的融合,强调了超细晶、高洁净、均质化等技术创新和“中国制造 2025”等国家战略对产业升级的驱动作用。在此基础上,展望了特钢未来的发展方向,包括精品制造、绿色制造、智能制造和服务化制造四大理念,以及先进冶金工艺、先进设计理念、结构用特钢创新(高强度、轻量化、结构-功能一体化)、绿色化及“双碳”技术的应用(电炉钢的绿电和制造、低碳冶金、新能源应用、资源再生利用)等,旨在为中国特钢产业迈向更高质量发展提供思考与借鉴。

**关键词:**特殊钢; 先进钢铁材料; 高性能; 高质量; 创新

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00144 **中图分类号:**TF142. 7

## Special Steel Continues to Develop towards "Specialization, Premiumization, and Innovation" — Celebrating 45 th Anniversary of 《Special Steel》

Weng Yuqing

(The Chinese Society for Metals, Bei Jing, China, 100000)

**Abstract:** This paper reviews the development of special steel since the Industrial Revolution, with a focus on the evolution of its core characteristics. From the limitations of early steel metallurgy to the revolutionary impact of electric arc furnace invention on alloy steel production, and further to the varying national definitions of special steel, it reveals that "Specialization, Premiumization, and Innovation" have consistently defined the industry's inherent tendency. Then the generation of the "advanced steel materials" concept and its integration with traditional special steel was discussed, and how technological innovations such as ultra-fine grains, high cleanliness, and homogenization alongside national strategies like "Made in China 2025" serve as drivers for industrial upgrading was emphasized. On this basis, future directions for special steel development was prospected, including four key concepts: Premium manufacturing, green manufacturing, intelligent manufacturing, and service-oriented manufacturing. And advancements in areas such as cutting-edge metallurgical processes, novel design philosophies, innovations in structural special steels (high-strengthening, lightweighting, structural-functional integration), and green/"dual-carbon" technologies (green-powered EAF steelmaking, low-carbon metallurgy, new energy applications, resource recycling) was detailed. This analysis aims to provide insights for China's special steel industry as it pursues higher-quality development.

**Key Words:** Special Steel; Advanced Steel Materials; High-performance; High Quality; Innovation

1963年8月,我从清华大学“金属学和金属材料”六年制专业毕业以后,被分配到钢铁研究总院从事合金钢的研发工作,至今还在钢研集团“特殊钢研究院”工作。在庆贺《特殊钢》杂志创刊45周年之际,我想就特钢过去和现在发展,汇报一下我的认识,供读者们参考,并请指正。

### 1 特钢发展的特点及历史简述

1776年瓦特发明了蒸汽机,开创了人类工业化发展时期。由于对蒸汽机及铁路、纺织工业的需求,冶金学从依靠铸铁、软钢制造铁器和兵器的时代不能满足需求,1856年形成贝氏麦酸性转炉新的冶金方式生产钢铁,并开始近代钢铁冶金。这种转

作者简介:翁宇庆(1940—),男,博士,中国工程院院士; **E-mail:**weng@csm.org.cn; **收稿日期:**2025-05-26

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

炉喷溅大,八年后(1864年)发明了酸性平炉炼钢。

这两类炼钢用的是酸性炉衬,不能脱除 MnS 等夹杂,因而 1879 年发明了托马斯碱性转炉,1888 年发明了碱性平炉,近代冶金的冶金流程建成了。

当时这个流程没有解决一些问题,例如:(1)大量飞溅的钢花泥尘,模铸的切头切尾难以回收利用;(2)工业化的机械工业、化工工业、工具行业等需要合金钢,后来合金钢逐步发展了八大钢类,质量提升发展逐步形成了普钢、优钢和特钢分类,而转炉不是合金钢的有效冶金手段。1879 年西门子发明了电弧炉,美国在 1907 年发明了最大(吨重达 3 t)的交流电弧炉,这样合金钢工业生产方式就基本形成。

电炉钢的灵活性和特点还在于电炉钢全熔后前期为氧化渣,脱磷后全扒渣,造还原渣后再加合金元素,以后进一步发展二次冶金,这样脱氧、脱硫完成后铁合金的收益率得以明显提高,高合金钢和低氧合金钢得以发展,例如,有名的高速钢(P18, W18Cr4V)是 1898 年正式发明的;有名的轴承钢(GCr15,  $1\%w[\text{C}]-1.5\%w[\text{Cr}]$ )是 1901 年正式发明的;有名的不锈钢(304,  $18\%w[\text{Cr}]-8\%w[\text{Ni}]$ )是 1916 年正式发明的。电炉钢、合金钢和逐步形成的高质量钢被认为是同一范畴的钢。

特殊钢是在机械制造、化工制造和电力工业发展三者需求基础上出现的,也就是第二次工业革命后发展起来的。机械工业发展,齿轮、轴承、弹簧等合金结构钢相应适应;工具、模具、高速钢等高工、合工钢进一步提高,化工制造产生了大量的不锈钢需求,电力工业要求电磁转换,出现了硅钢,现在形成了电工钢类。近代又出现了精密合金、高温合金、耐蚀合金,它们逐步成为特钢就是八大特钢。目前,这八大钢类在需求扩大后形成了十六类特钢<sup>[1]</sup>。

1943 年,二战中的德国 Eduard Houdremont 将特殊钢从物理概念上明确为“特殊钢是具有特殊性能的钢铁合金”,细分特点为特殊合金成分;特殊生产工艺;特殊组织与性能。

这个概念既包含了合金钢,也包含了电弧炉初炼和随后的二次冶金钢(二战后 LF、VD、RH 陆续成熟,这样转炉流程也可以生产特殊钢了)。而特殊组织与性能的提出,是物理冶金学发展形成的,物理冶金包含了钢铁的组织及调控,检验组织变化的方法,用相图代表平衡组织,用快冷位错理论和热

处理工艺揭示了不平衡态组织,用透射电镜、扫描电镜 X 光衍射等光电子技术揭示了多层次的钢铁结构。

1959 年苏联 A. C. 札依莫夫斯基院士(Займовский)等编著的《特殊钢》巨著,中文译为三册,约 1000 页。它在引用德国克虏伯公司积累的特钢技术和苏联特钢生产基础上写成的,这本书指出:化学成分、特殊生产方法、特殊服役性能三因素中,只要具备一个因素“特殊”,就可称为特钢<sup>[2]</sup>。

特殊钢在世界各国发展历史中,不同国家还有一些不同的观点和分类。

1)法国在 1986 年的标准认为:特殊钢可以是合金钢或非合金钢。从质量分类为普钢、优(质)钢和特(殊)钢后,与优质钢相比,特殊钢满足更严格或更多的使用标准。

我国在苏联国家标准(ГОСТ)基础上,1959 年颁布了普通钢、优质钢、高级优质(A)和特级优质(E)钢,当时认为,钢中  $w[\text{S}] \leq 0.035\%$ 、 $w[\text{P}] \leq 0.035\%$  就达到普通钢质量;若钢中  $w[\text{S}] \leq 0.015\%$ 、 $w[\text{P}] \leq 0.015\%$  就达到优质钢质量,对于特殊钢而言,和法国叙述的要更多衡量标准一样,按照应用和用户需求,除 S、P 元素要求外,对钢材断面的均质性(偏析、疏松、带状、网状……);高倍夹杂含量的纯洁性(根据要求疲劳、断裂、纵横向韧性不同而有不同级别);各种残余元素(特别应用的危害性程度)的含量上限;钢中气体元素(氧、氢、氮……)含量限制;晶粒度、淬透性、表面脱碳……各个方面,钢种不同,用户应用条件不同,钢材尺寸(厚度、大小……)不同都有标准或使用标准。因此,法国和我国对特钢的高质量基础作出了严格要求。

法国标准认为:“事实上,在相对传统的标准框架之外,现代特殊钢首先必须是能够以精确、可重复和可靠的生产方式实现较高技术指标、较好的成型能力,以及在服役状态下达到起初设计要求的高性能钢材”。

法国对特钢高质量和高性能要求的管理,和我国特钢发展的“特、高”发展趋势一致,这是个永恒的课题。

2)1962 年德国的 Franz Rapatz 提到了欧洲标准的特钢包含一种重要要求:“不同于大量的优钢,特殊钢是通过热处理获得特性和/或具有特殊物理或化学性能的一类钢”。欧洲标准将特钢和热处理捆

绑在一起,是说明钢材性能,只有经过热处理才能充分发挥其性能优势。欧洲一些钢厂(瑞典、法国、德国、西班牙、意大利……)都有特殊钢厂和机械制造的零部件厂建在同一企业内,他们的联系不仅上下游,还有热处理车间保证产品性能(不是钢材,而是机械零部件,甚至装备制品),当然中间过程少,企业作业率高,钢厂-机械厂紧密联系,不再经过市场产销干扰,存储中间产品库存减少,废钢回收分类容易……,这种不受市场干扰,尤其钢材不受供需市场波动,这些企业在我国也有,欧洲都是“百年老店,长制(造)不衰”。这种企业发展模式可以讨论,更可借鉴,但并不是特钢发展的唯一模式。

3)2006年,日本谷野满(曾任新日铁技术副社长、日本东北大学教授)和铃木茂发表著作《钢铁材料的科学》。日本特钢高品质控制是国际典范,以八大特钢为代表的分类也影响久远,但他们认为特钢定义并不严格,合金钢是特钢,高品质碳素钢也是特钢,强度超过600 MPa的低合金钢也是特钢。例如, $w[C]>0.6\%$ 的中高碳钢、含硫易切钢、Mn系H型钢(保淬透性)、超过特定合金元素下限的特定钢种都是特钢。按此范围,日本特钢产量占总产量的20%~25%,日本特钢约68%都由转炉流程生产。我国特钢协统计与日本概念不同,也使得我国深思,究竟什么才算中国的特殊钢?

4)美国钢铁体系对特钢有较严格区分,美国SSINA(北美特殊钢协会)、AISI(美国钢铁协会)认为:特殊钢是纯铁、电工钢、合金钢、不锈钢、工具钢、高温合金等特殊合金的统称。他们将占我国特钢半壁江山的合金结构钢类等列为工程用钢(Engineering Steel),质量钢(Quality Steel),SBQ(特殊长材质量钢,Special Bar Quality)。

综上所述,特钢的分类、产量、发展态势在各国认识中都不同,占钢铁材料产量和使用量也都不同,因而缺乏相比性,但“特”、“高”和要发展的“新”是相同的。

## 2 “先进钢铁材料”(Advanced Steel)和特钢的融合发展

我国特钢协会及钢铁协会按照认定的分类,近年来中国特殊钢产量见表1,优特钢产量见表2。

从表1、表2中产量变化说明,无论优特钢还是特钢,近年来供应需求是“量稳定、质提升”。量见表,质要用研发态说明。

从表1和表2看后有一疑问,为什么年产量在

表1 中国特殊钢产量

Table 1 Production of special steel in China

年份	产量/万吨
2018	4 578
2019	4 449
2020	4 712
2021	4 683
2022	4 760
2023	4 214
2024	4 761

注:不同口径,不同定义,使得特钢产量无公认权威数据,表1数据来源于中国特钢企业协会,仅供参考。

表2 中国优特钢产量

Table 2 Production of special quality steel in China

年份	产量/亿吨
2019*	1.1
2021	1.37
2022	1.41
2025(预测)	1.3 ~ 1.4

注:又有网报,2019年全国重点优特钢企业年产量1.29亿吨(Deep-Seek协助)

10亿吨的中国钢铁,特钢年产量仅占4%~5%,优特钢总产量不及15%?而瑞典特钢产量占40%左右,日本在20%~25%左右?这个比例不同,是各国定义和分类不同造成的。自从1956年奥地利发明氧气炼钢(从顶吹、底吹到复吹),以后将模铸淘汰发明连铸,精炼工序跟随连铸成熟化,轧钢板带轧机从1930年出现,但在二战后的自动化、连续化发展,完善的长流程(高转流程)问世,使钢铁厂生产效率、产品质量、规模品种,特别是板带品种达到了工业种类的先进典范。它们对汽车工业、交通运输(铁路、舰船)、海洋工程、能源工业……,提供大量优质产品。在轧制工艺上,出现了控轧控冷(TMCP)、中温相变控制、微合金化发展等若干20世纪的重要产品质量和技术提升,材料性能呈高性能化发展。尽管它们的总产量远远高于原有特钢概念的特钢,尽管它们的“特”、“高”及“新”不亚于原特钢品种及质量,但由于特殊钢概念的封闭化,因而特钢的范畴被凝固化,我国统计特钢产量只有总产量的4%~5%这一现实值得我们深思。

1998年,日本钢铁界认为战后50年了,过去的基础建设和钢铁材料性能变化已要求品质迅速更新换代,他们提出研制“超级钢”,目标是钢铁材料“强度翻番、(使用)寿命翻番”。几个月后,韩国响应,以浦项钢铁为首组成“超级钢”的韩国研发队

伍。当这波旋风吹起时,我国科技部要求我们在研发微合金钢的攀登项目国家队快速调整,扩大项目进入第一批国家973重大基础项目研究。我们三国都是超细晶化为核心的工作路线,因为在强化(提高强度)的技术方案中,固溶强化、位错强化、析出强化和细晶强化都可以使钢的强度提高,但只有细晶强化在提高强度同时塑性和韧性基本不降低,其余三种是强度提高,韧性和塑性下降。发展“超细晶技术”,以强度翻番为目标的三个国家队共同努力、协同交流。中国考虑到了我国当时钢铁质量纯净度不高,低倍质量,尤其大尺寸坯偏析严重,均质性不好,故提出“超细晶、高洁净、均质性”三目标的国家973“新一代钢铁材料的重大基础研究”。经过前后约十五年的努力,(约20个单位、400位科研人员形成大团队),获得一批重大成果,尤其在建筑用钢中,淘汰了 $R_p=355$  MPa的螺纹钢,据建研院推广统计说明,全部达2亿吨建设用钢被升级换代,获得了2004年冶金特等奖和国家科技进步一等奖,以后超细晶技术采用形变诱导相变,发展组织细化(Microstructural Refinement),亚稳相变(Metastable Transformation)和多尺度(多相)结构控制(Multiphase-structure Control)为核心的称为 $M^3$ 组织调控技术,获得了2018年国家发明二等奖,为钢铁材料的“特”、“高”、“新”发展做出了贡献。

在1998年中日韩分别开展“超级钢”研究后,2001年第一次国际“超细晶钢”会议在中国召开,2002年三国同意将名称扩大为“先进钢铁结构材料”国际会议,以后中-日-韩-印度-澳大利亚轮流主持召开“先进钢铁材料”(Advanced Steel)国际会议,共同推进提升钢铁质量和性能的工作,今年11月,将在上海召开第八次国际会议,由中国和澳大利亚担任双主席。

2015年,“中国制造2025”国家制造业强国计划启动,今年将结束。这个计划的前瞻性、战略性,为提升我国成为第一制造强国的征途起到了灯塔作用,有目共睹。在这个项目中,安排了十大重点领域(新一代信息技术、数控机床和机器人、航空航天装备、节能与新能源汽车、海洋工程和高技术船舶、铁路装备、新材料等),实施五大工程,包括制造业创新中心建设工程,智能制造工程等。同时,也出台一系列政策深化制度改革,加强财政支持,这个强国战略,是第一个十年制造业的行动纲领(2015年8月-2025年底),这个战略有两点对特殊

钢发展起到巨大影响。

1)新材料被提到“十大重点领域”之一,我国材料界从20世纪90年代就对新材料和先进材料两种提法形成争议。新材料最初是在材料科技界和生产企业提出,按照我的认识,以下三点中任意一点达到要求都被称为新材料:

(1)过去在材料设计、材料工艺、材料应用中沒有出现过的材料;

(2)已有材料,凡在设计、制造、服役中有改变(哪怕是小加修改)形成的材料;

(3)已有材料,从研发、制造时没有变化,但有新用途,找到新服役环境的材料。

这样的理解是“从摇篮到坟墓”全生命周期中材料的新与旧(或传统),而中国工信部在推进2025中国制造的“新材料”领域时,于2017年正式在基础材料(钢铁、有色、化工、建材、轻工、纺织等材料称为基础材料)中划出一块,成为“先进基础材料”(Advanced Materials),按照我的认识,它至少有(不限于)四个特点:高性能(High Performance);高质量(High Quality);自主可控(从研发源头至服役寿终,全过程国家和各环节主体自主可控);融合创新(大家讲的政-产-学-研-用结合,特别是科技创新和产业提升融合)。

先进基础材料的提出,将狭义的新材料扩展为有政治生命、经济要求、有更高的社会适应性。从2017年开始,中国工信部每年都有指南,对国家财政拟支持的先进基础材料有项目指南。其中,当然有先进钢铁基础材料(Advanced Steel),这种分类正和国际开展的Advanced Steel发展相吻合。国际的交流支持了我们提升钢铁材料的发展。

特钢,特别是新的特钢和高端特钢,当然属于先进钢铁材料。我建议特钢界同仁们,研究这两种提法的融合性,从经典定义和认识中走出去,从国家走强、社会发展、生态经济要求、人民福利方面来提高观点,提升特殊钢的概念。

2)在“中国制造2025”中提到制造业研发体系的改革,要求在大型制造企业建立以企业为主的科研体系。2024年统计,已有13个钢铁企业,在年度R&D投入占销售额的比重提升3%以上,少数企业达5%以上,保证了科研体系的运行。国家将重点建设一批国家实验室,在钢铁界的汽车用钢(宝武)、海洋用钢(鞍钢)、不锈钢(太钢)建立了国家重点实验室。最近两年,又提升了海洋装备用金属材料

料全国重点实验室(鞍钢、清华、中船总共建);改建了全国合金钢重点实验室(钢研集团、中信特钢、上海大学共建)和不锈钢全国重点实验室(太钢等),一批新材料研究基地已在企业建成,为先进钢铁制造奠定发展基础。相信未来,特钢研发有了国家支持和企业保障的人力和资金双基础。

### 3 特钢未来发展的几个重要方向

1)我在2021年12月出版的《中国特殊钢》一书的序言中讲到,特殊钢要发展精品制造、绿色制造、智能制造和服务化制造,这是制造业发展的共同目标,这四个制造是相互依存,共同发展<sup>[1]</sup>。绿色制造是企业生存的社会基础,在超低排放、环境友好基础上才能生产,特钢历来是工艺精湛、充满工匠精神 and 精雕细琢的行业,但在今天智能制造发展中,要把全企业和全过程在数字化转型、人工智能(AI)协力发展,在提升自动化和现代流程基础上达到灯塔工厂高度。而精品化是特钢的核心,高质量和高性能产品是特钢产品的核心要求,应在原有工艺精湛的产品基础上做好“两高”,才能有品牌效应,才有企业效益,也才能形成“百年老店”,屹立于市场。而服务化是通过物联网“用户至上”,产品全生命周期服务于客户(服役),不断完善和提高供应周期的效率和反馈客户需求而不断提升“双高”(高性能、高品质)。

2)用先进冶金制造工艺保证冶金质量。特钢的特,没有先进制造,出不来先进钢铁。以图1所示,瑞典Ovako(前身为SKF, Sandvik轴承)过去50年轴承钢氧含量的变化,当60年代认识到轴承钢疲劳寿命主要取决于氧化物夹杂的含量和大小( $Al_2O_3$ 和其他氧化物夹杂是接触疲劳起裂的主要原因)后,便从冶金工艺过程保证洁净钢的生产,由图1看出,Ovako从1990年后一直几十年 $w[O]$ 稳定在 $5 \times 10^{-6}$ 水平,达世界一流水平。日本后来在瑞典技术水平上,发展LF-RH精炼工艺代替欧洲的LF-VD工艺,虽然总水平和瑞典相似(见表3),但日本

山阳 $w[O]$ 最低水平可达 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ ,最大夹杂物尺寸 $\leq 11 \mu m$ 。

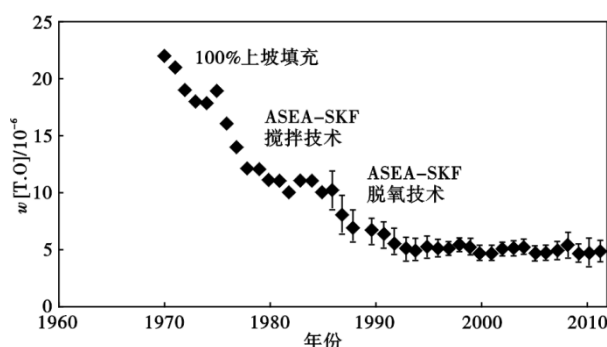


图1 瑞典Ovako轴承钢总氧量的变化

Fig. 1 Variation of total oxygen content in Swedish Ovako bearing steel

纵观国内轴承钢质量水平,大多 $w[O]$ 在 $(6 \sim 9) \times 10^{-6}$ ,因此,轴承钢疲劳寿命比瑞典、日本有较大差距,先进装备不敢采购国内一般轴承钢。幸运的是,兴澄特钢分析了全流程控制要点,在原料和铁合金净化、耐火材料稳定性及净化,LF/RH的强力脱氧,经过多方面努力(还包括中间包冶金、钢水凝固液面静化等技术提升),目前,兴澄轴承钢居世界一流质量水平,全年 $w[O]$ 平均在 $4.5 \times 10^{-6}$ 左右,最低 $w[O]$ 达 $2.4 \times 10^{-6}$ ,疲劳寿命检测(国际评比)达世界第一团队水平。最近南钢股份轴承钢 $w[O]$ 也低于 $5 \times 10^{-6}$ ,这说明只有流程严格且先进的控制,才有高质量的特钢。

遗憾的是,我国特钢高质量产品除轴承钢以外,在国际类比角度还少有称为“国际一流”质量及性能水平。但先进制造业要求却已呈现,例如,近年来我国高端汽车、新能源汽车及机器人制造(特别是医用机器人和精密机器人)要求高质量齿轮,特别是精密和无噪声齿轮,根据分析,问题不在钢种设计和齿轮制造,而是齿轮钢带状组织拖了后腿。齿轮钢中沿轧制方向呈现条带状分布的铁素

表3 国内外高品质轴承钢生产工艺流程对比

Table 3 Comparison of production processes of high quality bearing steel at home and abroad

公司名称	生产工艺流程	$w[O]/10^{-6}$	夹杂物
瑞典SKF	KSF-MR(熔炼+精炼)工艺:双壳炉熔炼(C、P含量调整到允许值)→除渣→感应搅拌→加热→脱氧→合金化→脱硫→真空脱气→模铸3.4t钢锭	5	夹杂物含量达到极低程度
日本山阳	SNRP超纯净轴承钢生产工艺:90t UHP电弧炉炼钢→偏心底出钢→LF→RH→完全垂直连铸	5	夹杂物尺寸 $\leq 11 \mu m$
日本大同	MRAC-SSS工艺:EAF→除渣→LF→RH→CC	$\leq 5$	氧化物夹杂极细小
中国大冶	铁水+废钢→60t电弧炉→LF→RH→5t锭铸模→热轧/热锻工艺	6.5~6.7	B类、D类夹杂物级别小于1级

体和珠光体带状组织降低了冲击韧性、塑性和横向性能,增加后部热处理变形风险,影响齿轮啮合精度,产生工作噪声。带状组织是由钢坯凝固偏析和热轧-冷却控制水平而决定它的严重程度,退火制度也有影响,目前各企业波动很大,有时 0.5~1 级,有时 3~4 级,国内平均在 2.5 级左右,而日本、瑞典通常可做到 1 级,日本高端在 0~0.5 级。这消除带状组织还需要特钢科技界在 AI 助力、智能控制等工作中结合物理因素分析,制定方向!

3) 先进特钢需要先进设计的理念。特钢品种发展百年来,都是依据材料物理、材料力学为基础发展钢铁结构材料,基本上是以实验室的试错法工作为基础,发展小型试制—中间实验—生产验证的路走过来的。我这一代人这么走,现在年轻一代也没有摆脱试错法,因而费人费时费钱!

2011 年美国启动材料基因组计划(我国 2016 年也有对应的材料基因工程重点专项),是借鉴生物学基因工程的理念,通过整合高通量计算、高通量实验和材料数据库三大要素,构建材料研发的“理性设计—高效实验—大数据驱动”模式发展新(先进)材料。十多年来在相变材料、二维材料、光电晶体和能源材料研发上有闪光的业绩。金属材料由于它的多层次(电子、原子、纳米、亚微米、微米)、多相构成,目前,没有看到仅依靠材料基因,摆脱试错法的新特钢或先进钢铁材料。

目前,在推进材料基因工程同时,数字转换、人工智能(AI)等一批技术近年已有大量进展。我们特钢设计工作应尽力学习和依靠包括材料基因、AI 及数字技术等方法,结合材料的物理、化学、力学、焊接、腐蚀等专业知识,共同努力来减少特钢试错法的实验室工作,在上述工程和模型优化、知识挖掘和数字挖掘上多做工作,形成机器学习和深度分析后的“精选”试错,减少科技开发人力及费用,缩短新材料到服役应用的时间。

这个工作,大型特钢企业研究院应尽早开始,在高校和研究院所融合合作中,闯出中国特钢设计新的一页!

4) 在结构用特殊钢中,发展高强度、轻量化和结构—功能一体化新特钢。如果把钢铁材料按以结构使用(满足强度、韧性、塑性等力学性能要求)和功能使用(满足电磁、光电、抗环境腐蚀和耐热抗冷等服役环境性能要求)来区分,85%~90%的钢铁材料都是结构材料。我个人认为,以结构性能要求

的特钢应当有三方面发展:

(1) 在保证塑—韧性前提下发展高强特殊钢,以适应装备承载、受力日益严苛的要求,同时高强带来材料用量的减少,适应运载工具和移动装备的快速发展。

一般合结钢类热处理采用淬火—高温回火(调质钢)处理,最终强塑和强韧性配合较好,但强度( $R_m$ )只有 800 MPa 左右;采用低合金的淬火—低温回火钢  $R_m$  在 1 200~1 500 MPa;进一步高合金化配之位错强化(冷轧)或析出强化(第二相强化), $R_m$  可达 1 800 MPa。目前已出现  $R_m \geq 2 000$  MPa,国内各大学(北科大、清华、东北大学、上海大学等)都在研发  $R_m \geq 2 000 \sim 2 500$  MPa 钢铁材料,从组织、结构等设计工作已有一定进展,图 2 是不同合金钢类满足  $R_m \geq 1 500$  MPa,同时冲击韧性满足  $C_{EV} \geq 100$  (J),或者  $R_m \geq 1 500$  MPa,  $K_{IC} \geq 100$  MPa·m<sup>1/2</sup> 的各类特殊钢和合金的汇总图。在部分情况下,已经由普通冶金冶炼后还要用特种冶金(真空冶金、电渣、自耗…)做最后精炼。这里要注意,目前超过 1 500 MPa 钢种采取高合金路线较多,究竟高合金(High alloyed steel)的价格昂贵,但从性价比、质量稳定性和安全性,最终满足高端装备和运载工具服役看,还是有明显的优势。因此,合金化理论和多相多尺度组织结构优化,还需深入研究。目前,纳米化新特钢,结构功能一体化新特钢都有新发展。

#### (2) 轻量化合金钢

从 20 世纪 70 年代以来,在研究 Cr-Mn-N 不锈钢时代就发现低密度化钢可能出现,以后 Mn-Al-C-Fe 系(密度  $\rho \leq 7.0$  g/cm<sup>3</sup>)和 Al(Si)-Cr-C-Fe 系(密度  $\rho = 6.5 \sim 7.0$  g/cm<sup>3</sup>)引起广泛的注意。目前低密度高强钢在机械零部件、汽车、海洋舰船等陆续开始试用,但连铸凝固还未突破,而多采用模铸成型,争取近期连铸完全成功!而价格可控,不析出 K' 相而引起脆性,也没有完全掌握,还要工作。我国是海洋大国,21 世纪是海洋世纪,采用低密度高强轻质钢,同时,发现它们抗海水腐蚀性能也优良,利用单相  $\gamma$  (奥氏体)钢还有电磁性能特殊(导磁率达 1H/m 左右,有隐身功能),对国防安全都有意义。

#### (3) 结构功能一体化钢

实际上,耐候钢、建筑用不锈钢、低温钢……都是同时有结构性能要求和功能性能要求的特钢。耐各类环境和随环境影响的深入分析和需求,结构功能一体化用钢的研发还相对滞后。各

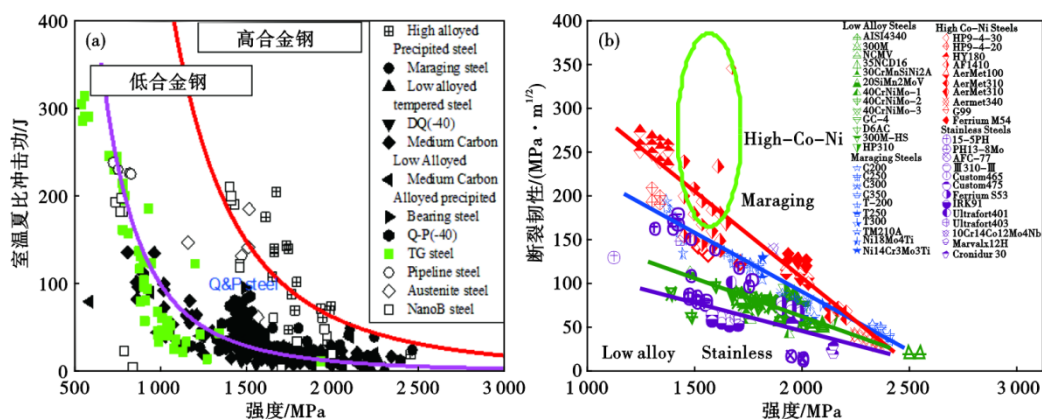


图2 各类特殊钢冲击韧性  $C_{EV}$  和  $K_{IC}$  与合金强度关系图: (a)  $C_{EV}$ , (b)  $K_{IC}$

Fig. 2 Relationship between  $C_{EV}$  and  $K_{IC}$  of impact toughness and alloy strength of various special steels : (a)  $C_{EV}$ , (b)  $K_{IC}$

特钢大公司的研发机构缺乏这类研发人员和研究分析手段, 积累经验和数据也不多, 难以大范围采用。

目前, 从三峡水电机组开始, 就希望有不仅高导磁, 同时, 还应有高强度的电工钢带; 舰船是用涂装表面防锈防腐, 但低温用船舶钢 (适用北极航线)、耐腐蚀的油气管道和海工用钢都提出许多需求 (油漆耐冰蚀性能不好)。进一步发展特钢应用场, 例如, 磁性材料、光电材料、能源材料 (铁基电池……), 传感性 (性能转换) 的许多铁基合金, 它们的发展对高科技产业, 同时对新特钢的开拓会起到新的突破。

5) 绿色化及“双碳”技术的应用, 也注意新冶金工艺对特钢生产的新发展。目前, 电炉钢的绿电和制造, 低碳冶金 (富氧、C-H 反应), 新能源的应用, 例

如, 高效电磁、物理场转换、微波冶金和资源再生利用, 以及全生命周期的扩展服务、碳足迹的监管和贸易……一系列的制造过程现代化要求我们参与合作和运用。

特别是, 除了铸造、轧钢、锻造工艺以外, 特钢, 尤其高合金特钢, 还有制管 (无缝、管线钢焊接) 挤压、旋压等工艺运用, 它们比普通钢材应用多很多, 关系更密切。近年来特种粉末冶金、3D 打印、金属基复合材料都在迅速发展。要不要把它们纳入特钢行业? 要不要开展合作共生? 会不会产生新的特钢分类? 这些都是新课题, 需在新旧转换时特钢同仁界考虑的。

最后, 感谢中国金属学会的李东迟主任工程师和兴澄特钢研究院孟羽主任在本文写作过程中的帮助, 本文不对之处, 敬请批评!

参考文献

[1] 钱刚, 中国特殊钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.

[2] A. C. 札依莫夫斯基, 特殊钢[M]. 苏联: 中国工业出版社 (译), 1965.