

师昌绪在高温合金领域的重大贡献

朱耀宵

中国科学院金属研究所, 沈阳 110016

摘要 师昌绪是当代著名的金属学及材料学科学家。在高温合金领域,最先提出并攻克了包套挤压工艺难关,为变形高温合金的生产开辟了一条新的途径;铸造高温合金方面,研究出中国第一代空心气冷铸造镍基高温合金涡轮叶片,使中国成为世界上第二个采用这种叶片的国家;发现了凝固偏析的新规律,总结了“低偏析合金技术”,推动了高温合金的发展,被美国同行尊称为“中国高温合金之父”。

关键词 师昌绪;高温合金;包套挤压;铸造空心涡轮叶片;低偏析合金技术

师昌绪先生 1955 年回国,为祖国服务了整整 60 年。他前 30 年就职于中国科学院金属研究所,主要从事高温合金、耐热合金和耐蚀合金方面的研究,做出了多项开创性的成果,是一位材料科学领域开创性的科学家;后 30 年在中国科学院和国家自然科学基金委担任领导工作,为国家重大科技决策及科学发展做出了重大贡献,是一位战略科学家。

1956 年,笔者从北京钢铁学院毕业,分配到中国科学院金属研究所,一直跟随师先生从事高温合金研究。师先生领导我们课题组做出了一些开创性的研究成果,是一位开创性的科学家。

1 难变形合金的包套挤压工艺

1956 年,苏联援助了中国 156 项重大工程项目,其核心内容是“两弹一机”,即原子弹、导弹和战机。为配合苏联的援助,尽快建立中国自己的战机研制能力,关键是要掌握喷气涡轮发动机的制备技术。因此,国家在沈阳设立了中国第一个喷气涡轮发动机公司,中国

航空工业集团沈阳黎明发动机制造公司(简称 401 厂);指定抚顺钢厂生产发动机所需的各种高温合金;指定中国科学院金属所研究高温合金,以满足中国战机发展的需要。

1) 成立开展高温合金研究的“205”研究组。

中国科学院金属研究所接到任务后非常重视,专门成立了“205”研究组开展高温合金的研究,组长是李熏,副组长是张沛霖、师昌绪、郭可信和庄育智,龙期成担任秘书,该课题组几乎集中了当时所有能参加的科学家。第一批组员有 3 人,包括王仪康、朱耀宵和吴平森。李熏认为发动机性能主要取决于涡轮叶片承温能力的高低,因此课题组决定主攻涡轮叶片用高温合金。

2) 师昌绪提出采用包套挤压的方法制备“519”合金,解决了合金热变形困难、成材率极低的问题。

在“519”合金的研发过程中遭受了很多挫折,其中最大的难点是合金热变形困难、成材率极低,研究工作根本无法进行。师昌绪通过研究分析,结合工厂实情,提出可以采用包套挤压的方法进行制备,即在“519”合金锭外包上一层低碳钢,再进行挤压,按照师昌绪的方

收稿日期:2018-08-23;修回日期:2018-09-29

作者简介:朱耀宵,研究员,研究方向为高温合金及合金钢与开发,电子信箱:yxzhou@imr.ac.cn

引用格式:朱耀宵. 师昌绪在高温合金领域的重大贡献[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 21-25; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.19.004

法,最终成功加工出了变形态的合金。并由此很快测定了“519”合金的全面性能,较当时国外性能最好的英国 Nimonic 115 合金更为优异。

3) 第一个涡轮叶片材料“519”合金的研制成功。

当时的观点是涡轮叶片受力复杂,只能用变形镍基高温合金,课题组开始工作时也是沿着变形合金的思路进行,因此研制出的第一个涡轮叶片材料被称为“519”合金,其中“5”代表“205”研究组研究的第5种合金,后两位数“19”代表在进行合金成分研究时,第19炉的成分达到了预期的性能,该成分即为合金的基本成分。此后,课题组认为镍基变形高温合金作涡轮叶片材料的潜力已不大,改为进行铸造涡轮叶片高温合金的研究。但包套改善难变形合金的热变形这一工艺后来被发扬,不但在挤压时包套,在轧制、锻造时也包套,包套方式上分为“硬”包套和“软”包套,“软”包套又分各种包套材料,因而解决了一些难变形合金的热变形问题^[1]。

2 铸造高温合金

“205”课题组成立之后,李熏一直思考高温合金的研究如何进行。经过近半年的时间,师昌绪于1957年底,提出喷气涡轮发动机的性能主要决定于燃气进气温度的高低,进气温度高,性能就好。影响燃气进气温度的因素有2个,一是燃油理论燃烧温度,二是涡轮叶片的承温能力。航空汽油的理论燃烧温度是980℃,而当时的涡轮叶片材料的承温能力仅950℃,所以,限制燃气进口温度提高的限制性因素是涡轮叶片的承温能力。

如何提高涡轮叶片承温能力是提高发动机性能的关键。对此,师昌绪进一步提出,纯镍熔点仅1455℃,加入各种合金元素后,降到1200℃左右,所以,做涡轮叶片的潜力已不大,应该转向研究高熔点材料,例如钨、钼,熔点分别高达3380℃和2610℃,以及金属陶瓷等熔点更高的材料。虽然钨、钼有氧化问题,陶瓷有脆性问题,但这正是需要进行研究解决的问题。据此,李熏对“205”研究组进行了改组,“205”研究组仍保留,继续研究镍基高温合金,按英国的研究体制,师先生为指导老师,朱耀宵担任“205”组组长;新成立“206”研究组,研究难熔金属(主要是钨和钼),指导老师是庄育智,组长是吴平森;新成立“207”研究组,负责抗氧化涂

层的研究,指导老师是李熏,组长是李铁蕃;新成立“208”研究组,进行金属陶瓷的研究,指导老师是郭可信,组长是代受惠。“208”研究组经过一段时间的运行,未能找到解决陶瓷脆性的有效办法,因此停止。钨和钼的抗氧化问题,特别是长期使用条件下的抗氧化问题,一时也难以解决,因而将工作重心转向了航天领域短期使用的高温材料。“207”研究组原本主要为“206”研究组的难熔金属研究服务,后又转向为“205”研究组的镍基高温合金服务。

从此,师昌绪先生开始正式领导高温合金的研究工作。当时,摆在师先生面前必须首先回答的问题是——镍基涡轮叶片材料的研究如何行进。经过前一阶段的实践,认识到要提高涡轮叶片的承温能力,首先要求合金高温时有较高的强度,当合金高温强度高时,必将难变形,因而这对矛盾是无法克服的。当时的变形高温合金承温能力已达950℃,进一步提高的潜力不大。那么是否可能改为铸造方法生产涡轮叶片?英国是当时高温合金的国际研究中心,英国的研究人员认为对于高速转动的涡轮叶片,受力极其复杂,选用力学性能不稳定的铸造涡轮叶片是不适宜的,这一观点,被当时绝大多数研究者接受。因此,要打破这一观点,需要慎重对待,师先生领导课题组经过反复讨论和实践,最后得出以下3个结论。

1) 所谓铸造合金性能不稳定是因为高温合金中加入了大量易氧化的铝和钛,在大气下熔炼和浇注,易形成大量氧化物夹杂,使力学性能不稳定。现在在真空下熔炼和浇注,则不再有性能不稳定的问题。

2) 根据大量的统计,涡轮叶片损坏的主要原因是疲劳折断。用铸造方法生产涡轮叶片,叶片可以带冠,带冠后,在相同的激震力下,叶片承受的疲劳应力,可成倍地降低,因而铸造带冠叶片比不带冠的热变形叶片使用更可靠。

3) 用铸造方法生产涡轮叶片,免去了热加工的困难,因而可进一步提高合金化程度,提高合金承温能力。

不转动的导向叶片在当时是用铸造方法生产的,采用空心叶片气冷技术,使叶片承温能力大幅提高,那么,转动的涡轮叶片用铸造方法生产后,也可能采用空心叶片气冷技术,从而大幅提高承温能力。经过讨论和实践,总结出铸造合金涡轮叶片不仅可能实现,而且前景可观,在李熏的大力支持下,1958年,“205”研究组

立即开展了相关的研究工作,不到半年时间内便在实验室中研究成功了第一个用“916”铸造镍基高温合金涡轮叶片,并测定了全面性能,其承温能力比当时最好的变形高温合金提高了 25°C 。研究组用“916”合金的数据要求进行试车,但在当时,苏联专家不同意,理由有二:一是铸造合金性能不稳定;二是真空熔炼,工厂无法实现。

关于铸造合金性能不稳定的疑问比较容易解决,由研究组提供几十根铸造样品请410厂测试,结果表明铸造样品性能很稳定。关于真空炉的问题,联系了锦州新生机械厂对研究组设计的真空炉进行测绘仿制,并于1958年底,仿制成功了25 kg真空感应炉;不久,锦州新生机械厂又仿制出了200 kg真空炉,解决了工厂生产设备问题。两个问题得到解决后,研究组又提出进行试车,但又被苏联专家否决了,理由是铸造合金冲击功太低,要求必须提高到 $2\text{ kg}\cdot\text{m}$ 以上,研究组只好再摸索提高合金的冲击功,经过努力,由原来的 $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}$,逐步提高到 $1.7\text{ kg}\cdot\text{m}$ 左右,再无法提高。后来的实践证明,要求冲击功提高到 $2\text{ kg}\cdot\text{m}$ 以上,是完全没有必要的。

经过了种种磨难,1960年,由于处在国家极其困难时期,铸造涡轮叶片工作被迫暂定。1963年,苏联专家撤走了。这时,中国航空研究院提出研发强制冷却 100°C 的空心涡轮叶片,并组成设计(中航工业沈阳发动机研究所,即606所)、生产(410厂)和研究(中国科学院金属研究所)三结合小组进行攻关。中国科学院金属研究所非常重视这项任务,调集了全所各方面的力量,组成AB-1任务组。师昌绪担任组长、胡壮麒为副组长,朱耀霄和赵惠田为题目秘书,分工为:朱耀霄主持合金,张顺南主持冶炼,赵惠田主持铸造,姜晓霞负责脱芯工艺,万耀光负责测厚。由于有研制铸造高温合金的经验,仅在叶片气冷小孔上费了一点周折,但也很快突破,在实验室试制成功后,马上到410厂试生产正式叶片,并进行试车。

1966年,第一台套气冷空心叶片正式进行试车,但运行不到2小时,一片叶片就飞了。要想能继续下去,就必须弄清原因,并彻底解决。因此立即成立了设计、生产和研究三家联合调查小组,师昌绪派朱耀霄参加调查小组。经认真调查、分析后,认为是由于涡轮叶片榫齿的公差当之故。苏联没有留下设计图纸,叶片榫齿尺寸是根据实物测绘结果给出的,当时给的是正公差。当叶片榫齿处于正公差时,第1榫齿受较大的离

心应力,且震动负荷集中在第1齿,两者叠加,使第1齿折断;第1齿折断后,第2齿成为第1齿,又折断了,这样逐个折断,叶片便飞了。假如将正公差改为负公差,这时叶片的离心力主要在第4齿和第5齿,而第1齿受的离心力很小,主要承受震动负荷,这样,叶片的5个齿受力比较均匀,就不会发生折断了。分析是否正确,需要用实践来验证。研究组立即按负公差再生产一台套,进行试车,结果非常顺利,试车通过了。

试车成功后皆大欢喜,但问题又接踵而来。为了试车,可以不考虑成品率,但若转入生产,成品率太低是不可行的。当时叶片的成品率仅为 $2\%\sim 3\%$,主要问题是断芯和脱不出芯。由于石英管与膜壳的热胀系数不同,膜壳加热时,石英管容易折断;石英管外径仅为1 mm,内径更细,脱芯时易被堵塞。所以,提高生产叶片成品率成为任务能否完成的关键。

对此,师昌绪要求“一竿子插到底”,即叶片走到哪里,科研人员必须跟到哪里,与工厂的技术人员和工人一起解决出现的各种问题。贯彻师先生这一方针,也是保证创新产品能成功的前提,师先生本人更是身体力行。根据当时国家安排,气冷空心叶片的生产转移到贵州新艺机械厂(170厂),这是一座在深山老林中的三线工厂,生活非常艰苦。为了提高叶片成品率,师先生亲自带队去170厂,深得工厂技术人员和工人的欢迎。经过攻关,研究组发明了“自由端工艺”,使断芯明显减少;由氢氟酸脱芯改为高温高压碱液脱芯,大大提高了脱芯效率。叶片成品率逐步提高,由10%提高到20%,最后提高到30%,因而具有了大批量生产的条件。所生产的叶片不仅满足了我国空军的需要,还大量出口,仅170厂一家产量便超过40万片。

苏联的米格21战机,是当时世界上较先进的战机,其发动机的涡轮叶片用的是实心变形高温合金,而我们用气冷铸造空心涡轮叶片替换,因而使涡轮进口温度提高了 100°C ,使发动机性能大幅提高,战机性能也大幅提高,这种战机被称为歼-7和歼-8战斗机,这种战机成为我国空军主力长达近50年,近年才逐渐退役,没有因为铸造空心叶片出过重大事故。

在20世纪60—70年代,只有中国和美国有气冷空心铸造涡轮叶片,其战机性能远高于英国和苏联的战机。20世纪70年代,埃及既有中国的歼-7、歼-8战斗机,又有美国当时最先进的F-4战斗机,当时埃及派了4架歼-7和4架F-4战斗机上天,进行空中格斗比武,结果是

4:0, 歼-7将4架F-4全击中, 而自己无一损伤, 这说明中国生产的歼-7、歼-8战机的性能走在了世界前列。这个结果震惊了美国, 美国从埃及高价买走了歼-7、歼-8战斗机飞机, 进行研究。

中国于1958年应用铸造涡轮叶片, 在战机性能方面本有可能优于美国, 但由于当时苏联专家的阻拦, 美国先于中国, 于1963年通过了试车, 而中国晚了3年, 于1966年才试车成功。铸造空心涡轮叶片的研制成功大大推动了航空工业的发展。不仅使铸造高温合金成为高温合金的重要分支, 还衍生出定向柱晶高温合金和单晶高温合金, 使涡轮叶片的承温能力由950℃提高到1100℃; 在气冷技术方面, 由冷效100℃的第一代空冷技术, 进一步发展出冷效分别为300℃与500℃的第二代、第三代空冷技术。

3 低偏析技术

20世纪70年代末, “205”研究组用简单的热处理和金相法做了一些研究工作, 发现了一个新现象。研究发现, 高温合金的初熔温度不是当时大家公认的1250℃左右, 而仅仅是1100℃左右。这一问题很重要, 因为高温合金在高温下使用, 初熔温度不仅严重影响高温合金的承温能力, 而且限制了变形高温合金热加工的上限温度。首先要弄清这是个别现象, 还是普遍的问题。因此, 研究组收集了当时能收集到的几十种国内外生产的高温合金进行了测定, 结果发现所有高合金化的镍基高温合金和铁镍基高温合金的初熔温度, 都是1100℃左右, 为了验证如此之低的初熔温度, 研究小组用探针法测定了微量初熔区的成分。合金中含磷(P)仅0.005%, 而初熔区高达5%, 富集了千倍; 合金中含锆(Zr)仅0.1%, 而初熔区高达10%, 富集了百倍; 此外, 初熔区还富集了大量的硼(B)和硅(Si)等元素。由于这些元素与镍(Ni)形成低熔点共晶, 如Ni-P的共晶温度仅890℃, 且最大溶解度又较低, 因而当这些元素富集后, 剧烈降低熔点。但是, 由于合金中这些元素含量都很低, 只当凝固到最后极少量液体时, 才富集到能明显降低熔点的程度, 所以初熔量很少, 用一般的热差分析方法, 因无法觉察而被忽略。将这样的结果向师昌绪汇报后, 得到了他大力支持, 并要求我们针对该问题开展系统性的研究。

某些微量元素剧烈降低熔点问题的本质, 是合金的凝固偏析问题。为此, “205”研究组创建了一套简单实用的合金凝固设备, 再配合以金相和探针法, 对高温合

金的凝固偏析开展了系统的研究。进一步发现, 某些微量元素不仅本身发生严重的偏聚, 而且促进某些主元素的偏聚成倍增加; 反之, 某些主元素也促进某些微量元素的偏聚; 此外, 还发现某些微量元素, 可以通过加入某些元素而消除有害的偏聚等。进一步总结验证后整理出一套减少合金凝固偏析的办法, 使合金性能得到大幅提高, 该方法称之为低偏析合金技术。研究组利用低偏析合金技术, 研发出了一系列低偏析铸造高温合金、定向柱晶高温合金和单晶高温合金, 都比现有同类高温合金承温能力提高20~25℃; 使热变形高温合金开锻温度提高了100℃, 大大改善了热加工性能, 推动了高温合金的发展。

合金中的微量元素, 不仅对合金的凝固偏析产生影响, 还将可能对力学性能和熔点产生严重影响, 如铁素体不锈钢中的室温脆的问题, 可通过降低碳(C)和氮(N)之和而解决, 如镍基耐蚀合金的热加工难和焊接难的问题, 可通过降低合金中的硫(S)解决。因而, 促进了近年来各国通过控制微量元素含量改善合金性能的研究热潮。

合金中微量元素的研究, 首先要研究各种合金系中的各种微量元素的作用。例如, 在镍基高温合金中, 影响初熔温度的主要是P、Zr; 而对镍基耐蚀合金, 则主要是S。同是镍基合金, 但差别很大, 因为Ni-S共晶温度是650℃, 比Ni-P(980℃)更低, 且最大溶解度也更小, 因而S比P对镍基合金熔点更敏感, 合金中只要有极少量的S(0.0005%)即可产生明显的影响, 而P需要较高浓度(0.005%)才会明显降低熔点, 所以S对Ni的作用比P大得多。但镍基高温合金中, 含有较高的钛(Ti)。在凝固过程中, Ti、S都不断富集, 凝固后期, Ti、S富集到一定程度, 将形成高熔点的Ti(CS), 因而消除了S降低熔点的有害作用, 而作用相对较小的P的有害作用显示了出来; 而镍基耐蚀合金中不含Ti, 因而S成为降低熔点的主要作用者。

合金中对微量元素的研究, 更重要的是如何将合金中的有害微量元素降到无害的程度, 在这方面的研究, 中国走在了世界前列。

1) 将合金中的S降到0.0003%以下, 生产的难以热变形的Ni-Cr-Mo耐蚀合金可生产无缝管, 而国外只能生产焊接焊管。

2) 将高铬铁素体不锈钢的(C+N)降到0.012%以下, 彻底解决了室温脆化的问题。

高铬铁素体不锈钢是美国20世纪60年代发明的一

种耐蚀合金,由于合金中不含贵重的镍,所以原料成本很低,与常见的18-8不锈钢相当;又由于钢中含26%~32%高含量的铬,加入一些钼后耐蚀性增强,可以替代昂贵的镍基、铁镍基耐蚀合金和超级奥氏体不锈钢,年需求量达百万吨,但由于有室温脆性而影响了实用。美国采用电子束三联工艺能生产出(C+N)低于0.015%,室温不脆的高铬铁素体不锈钢,但由于工艺费用太贵,限制了其使用,现只在少数非用它不可的领域选用。我们研究组用现有的一般设备即可生产出(C+N)低于0.012%,室温不脆的高铬铁素体不锈钢,工艺成本很低,为其大规模推广创造了条件。并将对各种合金中的微量元素作用研究及降低其含量的办法,称为超纯合金技术。

金属材料是工业发展的基础。20世纪90年代之前主要依靠调整合金成分来满足要求,如各种钢、镍基合金、钛、铜、铝等。但是,经过多年的挖掘,潜力渐渐减少。近30年来,逐渐转向依靠提高合金纯度的办法改善合金的性能,以满足工业发展的需要,而低偏析合金技术,正合时代的潮流,推动了国内外超纯技术的发展,因而得到了国内外特别地重视。因低偏析合金技术的发明,在国内先后获得国家级自然科学奖和发明奖4项;在国际上,获得国际材料研究学会授予的“In-norations in Real Marterials Award”(实用材料创新奖),该奖共颁发了12项研究成果,美国6项、欧洲3项、日本2项、中国1项。低偏析合金技术1993年被《大不列颠材料学和工程》增补版收录^[2]。

Shi Changxu's major contributions in the field of superalloy

ZHU Yaoxiao

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract Shi Changxu is a famous scientist in the field of metal science and materials science. In the field of superalloy, Shi Changxu first put forward the technology of package extrusion, It opens up a new way for the production of deformed superalloys. Shi Changxu invented a method of casting superalloy for turbine blades, studied the first generation of hollow gas cooled casting nickel based superalloy turbine blades in China. Shi Changxu discovered the new rule of solidification segregation and summarized it as "low segregation alloy technology", which promoted the development of superalloys and was honored as "the father of China superalloys" by American scholars.

Keywords Shi Changxu; superalloy; pack extrusion process; cast hollow turbine blade; low segregation alloy technology ●



(责任编辑 卫夏雯)

4 结论

师昌绪在高温合金领域做出了突出的贡献,特别是铸造空心涡轮叶片和低偏析合金技术2项开创性的研究成果,推动了高温合金的发展,加之师先生在其他领域的重大成就,2010年被授予“国家最高科学技术奖”。

师先生之所以能取得如此大的成绩,与他的品德分不开的,他以国家和人民的利益为先,党叫干啥、就干好啥;强调创新,他认为科研就是创新;他发扬学术民主,听取各方意见,调动各方积极性,形成一支有战斗力的队伍;他深入实践,主张一竿子插到底。他不仅要求他的学生做到,自己也身体力行,战斗在第一线,所以被一线技术人员和工人称为材料医生。如今,我们后辈认真学习师先生科研工作的4大特点,做好科研工作,也是纪念师先生百岁诞辰的最好行动。

参考文献(References)

- [1] 师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金五十年[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 52-56.
Shi Changxu, Zhong Zengyong. Fifty years of superalloys in China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 52-56.
- [2] Zhu Y, Hu Z. Superalloys: Control of segregation during solidification[A]//Robert W. Cahn. Encyclopedia of Materials Science and Engineering[C]. Oxford: Pergamdn Press, 1993: 2025-2028.