

高温合金材料应用实践

四一〇厂 郭志德

引言

高温合金材料多用于航空发动机最重要的部位。航空发动机的推力随其涡轮前温度的提高而增加。要提高涡轮前温度,必须有耐热温度更高的合金材料。所以,在一定时期内,高温合金的耐热水平基本上决定着涡轮前温度的水平。当然,后来气冷技术的发展又当别论。

高温合金与发动机的关系如此密切,那么高温合金的发展与应用就显得尤其重要。表1列出了几种发动机涡轮前温度及热部件选材演变情况。可见,随着机种的升级,其高温部件的选材也随之升级。

此外,发动机的改进、改型、延寿、排故也需要性能更好的高温合金材料来发挥作用。如6号发动机改型后,其导向叶片由K1改为K3,一级涡轮叶片由GH37改为GH49,涡轮盘由GH36改为GH135,后来又改为GH33A,加力

燃烧室由GH39改为GH128;7号发动机改型后,其一级涡轮叶片由GH49改为K17(铸造、空心、气冷),二级涡轮叶片由GH37改为GH49,涡轮盘由GH33改为GH33A,加力燃烧室由GH44改为GH128;美国J79发动机火焰筒由早期的L605改为Hastelloy X合金,一级涡轮叶片由Udimet 500改为Udimet 700,二级涡轮叶片由M-252改为Udimet 500;英国奥林巴斯593发动机的涡轮盘由早期的Waspaloy改为Rene'41,一级涡轮叶片由Nimonic105改为IN100等等。总之,任何发动机的型号和批次的演变,无不与材料的演变相联系。有时,选材的改进对发动机性能的提高起着决定性的作用。

试验鉴定程序

多年的使用经验告诉我们,高温合金新材料的试验鉴定须遵循一定的程序,就是说,要受客观规律的约束。这是因为新材料有若干问题需在实践中认识和解决。这个过程安排得合

表 1

发 动 机 No.	涡轮前温度 °K	火 焰 筒 材 料	涡 轮 材 料			加力燃烧室 筒 体 材 料
			导 向 叶 片	涡 轮 叶 片	涡 轮 盘	
5	1073	GH30	K10	GH33	GH34	1Cr18Ni9Ti
6	1153	GH140 GH128	K1	GH37	GH36	GH140
7	1188	GH44	K3	GH49 GH37	GH33	GH44
13	1243	GH44	K3	GH220 GH49	GH698	GH44
15	1410	GH44	K3	BJKJ-12y GH220	GH698	GH99

理就能加速新材料的应用进程，满足发动机需求，反之亦然。

首先，新材料入厂前应具备如下条件：完成新材料的试验室研究，探索成分范围，进行性能摸底，研究相组成及转变规律等；而后转入工业规模试制，确定冶炼工艺、加工工艺和热处理工艺，测定全面性能。上述过程的重要性在于：为合金的应用和扩大应用提供必要的工艺参数和性能数据，为合金技术条件的制定提供依据，所以是必不可少的。

新材料入厂后，进行试用（试车）之前，要做以下工作：组织新材料的理化复验（除按临时技术条件规定的项目检验外，还要根据产品使用条件增加一些技术条件之外的性能检验）；进行工艺试验，如叶片合金要作模锻试验，板材合金要作焊接试验；必要时还要作热处理工艺、可加工性、电加工工艺等试验。其中有些试验可结合零件制造过程进行。在零件制造过程中，必须执行特殊管理，如装箱周转、特殊标记、废品专门保管等，严防混料。这一系列试验完成后，由供、需双方主管部或由部责成的厂、所组织试车前的预鉴定。预鉴定应从技术上审查新材料研究、试制、复验及工艺试验、零件制造工艺情况等，对是否具备参加试车条件作出结论。

新材料试车成功后，根据其类别由供、需双方的主管部或双方工厂组织鉴定。高温合金鉴定前须具备以下文件：合金的成分研究；合金的生产工艺总结；合金的热处理及全面性能总结；合金的有关工艺说明书（冶炼、锻造、轧制、热处理、焊接等）；合金的使用情况总结；技术条件草案等。合金鉴定后，其鉴定证书视其类别分别要报主管部批准或备案，而后方可贯彻于生产。较重要的零件还要经过小批生产——定点试飞考验。

新材料定型前，订货数量不能太多，只够试验用即可，需重复试验者，可再次少量定货。这样做是为了防止造成积压浪费，同时便于把试验中暴露出的问题放在第二轮试验中加

以解决。

对于老材料转厂生产（按照老厂批生产工艺），要由新生产厂在试制后进行工艺和全面性能总结，并将样品交由用户复验，用户认为已经达到了老厂的质量水平，方可投产，并报部备案。

此外，每个新合金都须建立技术档案。定型的新材料档案应包括合金的研究报告、工艺总结、说明书、性能数据、复验及使用情况、技术条件及鉴定文件等。这些技术档案资料对合金在使用过程中技术问题的处理以及进一步扩大应用，以至合金本身的改进都具有重要意义。

发动机选材

正确、合理的选材，对合金的应用是至关重要的。选材时，不能只看性能数据，还要考虑以下因素：

1. 尽可能选用现有的科技成果

设计人员在研制或仿制一种发动机时，往往要求大量选用新材料或全套仿制新材料，而每研制一种新材料都需要巨额资金。如果可利用的成果不利用，势必给国家造成很大浪费。例如：某机种需要仿制 $\Theta\text{И}4376y$ 合金（ $\Theta\text{И}437Б$ 的改型牌号），我国已经有了 $\text{GH}33\text{A}$ 合金，性能优于 $\Theta\text{И}4376y$ ，并且有一定的使用经验，因此 $\Theta\text{И}4376y$ 合金可不必仿制。如果在选材时经过认真论证，实事求是，合理地利用国内现有的新材料科技成果，那么节省数十万元资金是轻而易举的事。

2. 尽量选用已有使用经验的材料

材料使用经验是宝贵的。一种新材料从试制到成功地使用，往往要经历曲折的过程，一帆风顺者很少。这是因为大多数新材料要经若干工艺上甚至成分上的调整和改进行才能成功使用，有的材料经过多次改进后才成熟起来。表 2 列出一些高温合金在使用中遇到的问题及其解决的办法。可见将一种没有使用经验的新材

料投入使用，并指望它一次成功是不现实的。

然而，使用经验是靠实践积累的，没有平时的试验积累（即技术储备），便无从获得较成熟的材料。因此，工厂应有意识地在老机种上考验某些新材料，目的不一定是正式采用，而是为新机选用积累经验。不认识这一点，就是缺乏技术远见。

表 2 某些高温合金使用中
的问题及处理办法

合 金 牌 号	发动机 No.	零 部 件	使 用 中 遇 到 的 问 题	处 理 办 法
GH135	5	涡轮叶片	试车时折断	淘 汰
GH151	6	涡轮叶片	工艺塑性太差	淘 汰
GH140	6	火焰筒 加力筒体	高温拉伸强度 偏低	调整铝钛含量
GH131	6	调节片	热处理时产生 腐蚀	降低热处理温 度
GH136	6	涡轮盘	严重锻造裂纹	大批报废
GH118	6A	涡轮叶片	超声波探伤杂 波	增加扩散处理 工序
GH49	6A 7A	涡轮叶片	叶片粗晶报废 率高	尚未有效解决
GH33		涡轮盘	使用后外径伸 长	调整成分，变 为 GH33A

当然，有使用经验的材料不一定是成功的。如用 GH49 合金做涡轮叶片，使用很长时间，但粗晶报废率仍很高，至今未得到理想的解决。GH 36 也是很老的材料，其使用故障之多是众所周知的。所以选材时，对使用很长时间的老材料也要作具体分析。

3. 注重质量和工艺的稳定性

有些合金，从性能数据看是完美无缺的，但质量不稳定和工艺上存在问题不易解决，这样的材料也不能贸然选用。如 GH135 合金，长期以来存在冶金缺陷（点状偏析）和切削加工困难等问题；GH151 合金存在工艺塑性太差的问题等。这些合金尽管在性能上能满足设计要求，但在使用时工艺和质量上会遇到很大障碍，以致不得不改变选材。

4. 价 格

选材时，在满足设计要求的前提下，必须考虑材料的价格，这关系到发动机的成本。如

GH39 与 GH140 是同水平的合金，选用 GH140 比 GH39 每吨可节省 27500 元；选用 GH131 代替 GH 44，每吨可节省 10900 元。

但是，选用新材料时，其价格可能要比老材料高一些，因为新材料在试制期间（定型以前）普遍价格较高，定型以后，会大幅度下降。另外，在考虑价格的同时，还要把选用新材料后提高质量、延长寿命、降低废品的因素考虑在内。

合金的改进

对批生产中的高温合金材料进行改进，是高温合金发展的重要途径。这里所说的改进，大致有两个方面：一是改进工艺，主要是为了提高和稳定合金的质量，牌号不变；二是调整成分，在提高性能同时改变合金的牌号。前者如 GH36、GH140 合金由电弧炉一次熔炼改为电弧炉+电渣双联熔炼，从而显著地改善了材料的冶金质量；后者如 GH33 合金提高了铝、钛含量，加入少量铌发展成 GH33A，使合金屈服强度大幅度提高，解决了涡轮盘外径伸长问题。这种改进在国外更是常见。如苏联的 ЭИ437A 改型为 ЭИ437Б，又改为 ЭИ437Бγ；ЭИ617 改型为 ЭИ826；ЭИ929 改型为 ЭИ 929A；ЭИ 696 改型为 ЭИ696M 等。美国的 Udimet 500 改型为 Udimet 700；IN100 改型为 Rene 100；GMR 235 改型为 GMR 235D 等。英国的 Nimonic 105 改型为 Nimonic108；Nimonic115 改型为 Nimonic 118 等。以上列举的合金演变，有的是调整或控制成分，有的是改进冶炼工艺。一个批生产的老合金，不但使用经验丰富，而且从组织到全面性能以及理论方面的工作都比较完善，以此为基础进行改进，就能省时、省力、省资金，因此，国外都很重视这一发展途径。

因为高温合金是随航空工业发展而发展起来的，所以我国历年来随着某些机种的引进，仿制了苏联、英国、美国的一系列合金，因而对现有合金的改进考虑较少。目前，国内高温

表3 苏、美、英的一些同水平合金的固溶温度与持久、疲劳性能的比较

合金牌 号	国 家	主 要 元 素, %							固 溶 处 理 制 度	100 小时 持 久 性		疲 劳 性 能		
		C	Al	Ti	W	Mo	Cr	Co		Fe	Ni	温 度*	应 力*	温 度*
ЭИ4376	苏	≤0.06	0.75	2.5	—	—	20	—	—	基	700	45	700	38
N.80A	英	≤0.10	1.4	2.3	—	—	20	—	—	基	700	40.16	700	41.37
ЭИ929	苏	≤0.12	4	1.7	5.5	5	10.5	14	—	基	900	21	700	33
Udimet 500	美	0.08	2.9	2.9	—	4	19	19.5	—	基	871	21	815	32
ЭП220	苏	≤0.08	4.35	2.55	6	6.5	10.5	15	—	基	950	20	800	35
N.118	英	0.16	4.8	3.85	—	3.5	15	14.9	—	基	950	17.2	800	41
ЭИ698	苏	≤0.08	1.5	2.55	Nb ₂	3	14.5	—	—	基	700	55	650	34
Waspaloy	美	0.07	1.4	3	—	4.3	20	13.5	—	基	700	58	650	36.5
ЭИ868	苏	≤0.10	≤0.3	0.5	14.5	—	25	—	—	基	900	5.2	900±20	56***
Hastelloy X	美	0.10	—	—	0.6	9	22	1.5	18	基	900	4.3	900±20	89***
ЭИ696M	苏	≤0.10	≤0.8	2.9	—	1.3	11.5	—	基	23	650	49	—	—
V-57	美	0.05	0.2	3	—	1.3	14.75	—	基	27	650	45	650	38
ВЖЛ-8	苏	0.15	3.0	2.2	—	5.2	15.5	—	—	基	900	15	900	20
GMR235D	美	0.15	3.6	2.5	—	5.2	15.5	—	—	基	870	16.9	900	26
ВЖЛ-12у	苏	0.16	5.6	4.5	1.3	3.2	9.8	14.5	Nb _{0.85}	基	900	32	900	26
IN100	美	0.17	5.5	4.75	—	3.0	9.5	15	—	基	900	32	900	30

* 产生0.5毫米裂纹的循环次数。

** 温度为°C, 应力为公斤/毫米²。

合金牌号已经不少,今后应在改善现有合金综合性能、提高质量方面引起注意,这方面潜力是不小的。例如在我国现有合金中,苏联系列的较多,而苏联合金普遍特点是:为追求高的持久强度而选用较高的固溶处理温度。这样,带来了晶粒粗大、降低疲劳强度的不良后果。从实际使用出发,适当牺牲一点持久强度来提高一些疲劳强度是有益于延长使用寿命的。表3列出苏、美、英一些同水平的高温合金固溶温度与性能的比较。从表3可以看出,在合金化水平相当的条件下,英、美合金普遍比苏联合金固溶温度低或保温时间短,因而疲劳强度较高。事实上,英、美发动机寿命都较苏联的长,其原因之一就是材料疲劳性能好。

结 束 语

目前,国内高温合金牌号相当繁多,但尚未正式使用的为数不少。已正式使用的合金,还有许多实际问题有待解决。此外,我国高温合金材料从开始试制到正式应用周期很长,一

般需5~10年,有的更长(美国普拉特·惠特尼公司已将这个过程缩短为2~4年,有的不到2年)。说明我国高温合金的应用这一环节比较薄弱。我们认为,今后在材料应用方面应注意:

1. 发展和普及接近使用条件的性能测试手段,如低周疲劳、加载冷热疲劳、周期持久等。

2. 发展各种模拟试验、部件试验及等效试验,代替或缩短长期试车考验和试飞考验。

3. 研究各重要零部件的工作条件,准确测试出各状态下的工作参数。

4. 进行发动机使用故障调查和故障研究,根据研究结果,有目的地改善材料某方面的性能,以满足发动机需要。

5. 材料研究与工艺研究配套。如高合金化的材料一般抗氧化性能都差,若以最佳的表面防护工艺相配合,就能扬长避短,充分发挥材料的长处。

(参考文献从略)

第二次全国特种高分子学术报告会在杭召开

国家科委新型化工材料专业组于1982年12月1~5日在杭州召开了第二次全国特种高分子学术报告会,来自全国73个从事特种高分子材料科研工作的高等学校、研究院、所和工厂的200多名代表参加了会议。专业组组长、化工部技术委员会主任陶涛同志主持了会议。会议检阅了自1979年召开第一次学术报告会以来全国在有机硅、有机氟、特种合成树脂和工程塑料、特种胶粘剂和涂料,以及特种橡胶、特种纤维等方面的科研成果。会议共收到有关研究报告和论文180多篇,会上宣读和书面交流了153篇。

与会代表认为,三年来我国在特种高分子材料的合成、加工、性能、应用等方面的研究工作取得了不少成绩,但就产品品种、生产规模、推广应用等方面

来看,还远不能满足四化建设的需要。今后应特别重视品种的开发,以及加工技术、推广应用等方面的研究工作。有关部门、单位及科技人员应加强协作,互相配合,为发展我国特种高分子材料作出贡献。

会议期间,专业组还讨论了新型化工材料“六五”计划期间国家组织的技术攻关项目。化工部领导对这次会议十分重视,副部长杨光启同志参加了会议,并作了重要发言。

航空材料研究所应邀参加了会议,并在会上作了若干有关专业的应用研究成果的报告,赢得了普遍好评。

(特约通讯)