

先进的高温金属材料

日本 山口正治

1. 现状和展望

喷气发动机和燃气轮机的涡轮叶片、涡轮盘、燃烧器等的高温、高应力下使用的 Fe、Ni、Co 基超合金的坯料、半成品大致区分为精密铸件、锻件、板和棒之类,但日本国内的生产量(例如精密铸件每年约 500 亿日元)与钢铁相比,都是极少的,大大落后于欧美。这是因为欧美政府把这些超合金,特别是 Ni 基超合金放在国防战略的重要材料的位置上,经常引导研究开发,继续采取将其成果应用于民用技术的产业扶植政策的缘故。

今后,为增强作为日本的战略骨干产业的高效率发电设备、航空宇宙、汽车等产业领域的国际竞争力,不仅超合金,而且在 TiAl 基轻型耐热合金、超耐热合金等新的耐热材料领域,飞跃提高技术能力是必不可少的。因为这些耐热材料的性能是决定各种热机的效率的重要因素,进而对直接关系到地球温暖化问题的二氧化碳排放量也产生很大影响。幸亏,通过以往的国家计划,有关日本的耐热材料的技术和知识基础在逐步配备和积累,若干材料的部件单体的试制水平,出现了超过国际水平的结果。但是,很遗憾,这些材料没有达到广泛应用。如果这些基础技术能在发电、航空宇宙、汽车产业等产业领域实用化,日本在金属系耐热材料领域就充分有掌握世界的主导权的素质。

2. 相关技术的现状和课题

2.1 Ni 基超合金

锻造合金 使用超高温高效率燃气轮

机的涡轮叶片和涡轮盘等的超合金,要求耐热性达到极限。严密的合金成分的控制和形状夹杂物的微量元素的彻底除去是不可缺少的。现在,合金锭有从 VIM/ESR 的双重熔炼向 VIM/ESR/VAR 的三重熔炼转移的倾向,而且,以高纯净度为目标,还提出用等离子体或电子束进行冷床重熔。这样,必须确立大型超合金锭的高性能熔炼设备和熔炼技术。

占航空发动机重量的相当部分的涡轮盘和涡轮壳体等大型结构件,使用着由欧美开发的 Inconel 718、Wasploy、Rene95、U720 等锻造合金。要求高疲劳强度、高韧性的这些锻造合金的研究,使发动机轻型化、高性能化是主要的论题之一。作为为得到材料特性的波动少的有可靠性的材料的研究,锻造模拟技术和支持该技术的材料特性,特别是关于使用环境下长时间使用的环境特性数据库的积累是必要的。但是,在日本还没有使用于涡轮盘等的锻造的大型锻压机(在美国,5 万吨压力机有 2 台),生产量也不增长,相关研究也没有长进。必须要打破这种现状。

铸造合金 铸造合金,也许可以说成涡轮机的心脏部位的高温高压的涡轮叶片用合金是很重要的。从锻造合金向普通铸造合金、定向凝固合金、单晶合金进行开发,单晶合金也是从初期的第一代合金向含有 3 质量% Re 的第二代合金,进而向含有 5~6 质量% Re 的第三代合金转移,现正在进行含有 Ru 等贵金属的第四代合金的开发。现在,第三代单晶合金 CMSX-10 和 Rene N6 分别在罗尔斯罗伊斯和通用电气公司的最

新式喷气发动机上实际应用。发电用燃气轮机,由于受大型叶片的制造性的制约,还是以定向凝固合金为主流,但对应于蒸汽冷却等新的冷却设备的导入,正在研讨第二代单晶合金 CMSX-4 和 Rene N5 等的导入。在日本,把 Re 抑制在 1.5~2.5 质量%,一面保持良好的铸造性,一面提高了高温强度和异结晶容许性的单晶合金,和含有 12 质量% Cr,确保了耐高温腐蚀性的大型单晶叶片用合金等独创的新合金正在开发。

燃气轮机叶片是失蜡精密铸造法制造的。与航空发动机用的叶片(~150mm)相比,发电用大型燃气轮机叶片全长在 250mm 以上,由于显著大型化,因而完全的单晶叶片的制造需要高超的定向凝固技术。现在,能制造大型单晶叶片的工厂限于美国的 Howmet 公司和 PCC 公司等几家公司,大型单晶叶片的大量生产技术还处于开发阶段。是超合金方面的未开拓领域之一。

镀层 为了提高燃气轮机的热效率,燃烧气体温度时常处于升高的倾向,为了提高动叶片、静叶片、燃烧器等的耐热性,实施防止基体的腐蚀和氧化等的高温耐蚀抗氧化镀层和谋求降低基体的金属温度的隔热镀层(TBC)。前者是 0.1~0.2mm 厚的 MCrAlY(M: Ni, Co)系合金的用等离子喷镀、电子束蒸镀或高速火焰喷镀的基体表面镀层,后者是在这种耐蚀抗氧化镀层(粘结镀层)上用等离子喷镀或电子束蒸镀进行的热传导率低的 ZrO_2 - Y_2O_3 系陶瓷(0.2~0.5mm)镀层。为了隔热镀层的长寿命化和提高可靠性、要求进行关于为降低热应力的陶瓷组织(气孔,微细裂纹等)和粘结镀层/隔热陶瓷的界面状态的最佳化的研究。

2.2 超过 Ni 基超合金的耐热极限的耐热合金

难熔超合金: 只要把 Ni(熔点 1455℃)用作基体,要飞跃提高超合金的耐热性是困难的。因此,正在开发基体金属使用 Ni 以

外的难熔金属,重现了与 Ni 基超合金同样的显微组织的难熔超合金。例如,通过把 Ir(熔点 2447℃)用作基体,能制得发挥 200~300MPa/1800℃ 的强度,在抗氧化性方面也大幅度超过了以往的难熔金属及合金。虽然合金的比重、价格、有无合适的需要是个问题,但这个日本独创的合金。

Nb 基难熔合金: 在具有 2000℃ 以上的熔点的难熔金属中,具有室温延性和比 Ni 小的密度的 Nb 用作高温材料也是有魅力的。以这种 Nb 为基体,在 1500℃ 以上的高温下未冷却就能使用的难熔合金正在开发。假如限于高温强度、抗蠕变性、韧性的话,就发现 Nb-Mo(30at% 以下)-W(20at% 以下)合金,再添加了 Ir(3at% 以下)的合金,由硅化物相引起的析出强化合金(Nb-20Mo-22Ti-18Si 合金)等显示优良的特性的合金。但是,在 Nb 基合金的场合,抗氧化性是最大的问题。具有能经得起实用的抗氧化性的合金(也包括涂层用合金)如果被开发,那是划时代的。

2.3 轻型耐热合金

TiAl 基合金作为新的轻型耐热材料是最期待的,而且正在进行广泛研究。比强度比得上 Ni 基超合金,比刚性超过 Ni 基超合金。作用着离心力的旋转叶片的最大圆周速度与比强度的平方根成正比,而且轻型叶片从起动达到运转转速的时间缩短等,用作旋转叶片,具备有利的特性。据美国 GE 公司报道,在航空发动机用的低压涡轮叶片方面的应用正在试验,技术性问题大体解决,但装载于实际的发动机,据说大部分依赖于国际飞机市场的动向。除了飞机发动机关系以外,1999 年终于由日本的重工业工厂完成了在市售的轿车涡轮充电器的转子叶片方面的正式应用。现在,正在尝试在利用了轻型性、高比强度、高比刚性的更新的用途方面的应用。

TiAl 基合金涡轮充电器转子叶片的实

用化成功的新闻,使有关该领域的研究、开发的国内外的研究人员受到强烈的冲击。关于日本的 TiAl 基合金的基础研究的水平处于国际最高点的事实就要被国内外广泛承认。TiAl 基合金将成为无论哪种轻型高温材料领域的骨干材料。这时,重要的是日本将掌握着有关 TiAl 基合金的开发、制造和应用技术的事实上的标准。

3. 总结——今后的战略

现在运转中的火力发电设备的平均热效率为约 40%,最新的使用了 1500℃ 级燃气轮机的联合成套设备的热效率据说为 53%。并且,涡轮入口气体温度 1700℃,热效率 55% 的高效率燃气轮机用耐热材料的开发已作为国家计划在进行着。今后,不但材料开发计划,而且把燃气轮机设备、航发发动机等作为整体,确立作为开发证据的大

型计划,其中纳米关系到材料的国产技术、把使用的实际成绩积累起来,这在耐热材料领域确保国际竞争力方面是重要的。同时,在耐热材料领域必须继续对正在萌芽的新合金进行先行投资(基础、开发基础研究)。没有肥沃的土壤,就不会有丰富的收成。

耐热材料的研究开发需要很长的时间。并且,假如用数值来表达耐热温度的提高和由此引起的热效率的升高的话,那么乍一看似乎非常小。但是,不应该忘记,在发电等巨大设备的背后,微小的热效率的提高,在整个国家来看,将带来巨大的节能和环境保护效果。

徐金璋译自《まてりあ》Vol. 40 (2001)
No. 5, P. 490 ~ 491

张毅 校