

高温材料在燃气轮机中的应用和发展

荀柏秋, 李琦, 赵乌恩

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 高温合金材料是燃气轮机材料中极其重要的组成部分。在燃气轮机燃烧室、导向叶片、涡轮动叶片以及涡轮盘等部位上都有着极其广泛的应用。本文就当前燃气轮机所采用高温合金的主要特点及新技术的应用情况进行了分析和说明, 并对目前世界主要国家的研制水平和发展趋势进行了深入的介绍。

关键词: 燃气轮机; 高温合金

中图分类号: TK47

文献标识码: A

1 概述

高温合金材料是现代燃气轮机所必需的重要金属材料, 它能在高温(一般指 600~1100℃)氧化气氛中和燃气腐蚀条件下承受较大应力, 并长期使用。20 世纪 40 年代初, 英国在镍-铬电热材料的基础上用铝和钛等元素对合金进行强化, 促进了镍基高温合金的发展, 同时也为燃气轮机性能的提高创造了必要条件。随后, 美国和前苏联也相继研制了高温合金。我国自 20 世纪 50 年代末至今, 从无到有, 由仿制到独创, 基本上形成了我国的高温合金材料系列和科研生产基地。

2 高温合金材料的分类

高温合金按基体分类有铁

基、镍基和钴基合金。实际上加入了大量的合金元素而成为多组元为基的合金, 如铁-镍-铬基合金; 镍-铬-钴基合金等。发展最快、使用最广的是镍基合金, 其次是铁基合金。钴基合金在国外也有相应发展, 但限于资源, 我国很少研制应用。

高温合金以成型方式分为变形合金和铸造合金。

铸造合金近年来又发展了定向结晶和单晶合金。利用定向结晶技术又发展了共晶合金。由于高温合金粉末冶金技术的发展, 还可以将一般难以变形的高性能铸造合金转为变形合金。

3 高温合金的组织 and 相

对高温合金性能要求, 总的来说必须具有良好的热稳定性、热强性和使用条件下的长期组织稳定性。因此, 必须根据不同的使用要求, 合理选择基体, 审慎进行合金化, 并通过一定的工艺和热处理制度得到必要的组织和性能。高温合金的强化途径有固溶强化、时效沉淀强化和晶界强化, 此外还有氧化物弥散强化。

高温合金性能主要取决于合金成份和它的组织结构。组织中特别重要的是析出相的类型、结

构、形状、大小、数量和分布情况等。

4 高温合金在涡轮发动机各部位上的应用及特点^[1]

由于燃气轮机结构较为复杂, 各部位温度和受力情况等, 差别较大, 因此对材料的要求和选用就各不相同。

4.1 燃烧室用高温合金

燃烧室所受的机械应力较小, 但热应力较大, 对材料的要求主要有: 高温抗氧化和抗燃气腐蚀性能; 足够的瞬时和持久强度; 良好的冷热疲劳性能, 良好的工艺塑性(持久, 弯曲性能)和焊接性能; 合金在工作温度下长期组织稳定。

4.2 导向叶片用高温合金

导向叶片的第一级是涡轮发动机上受热冲击最大的零件之一。但由于它是静止的, 所受的机械负荷并不大。通常由于应力引起的扭曲、温度剧烈变化引起的裂纹以及过燃引起的烧伤, 使导向叶片在工作中经常出现故障。根据导向叶片工作条件, 要求材料具有如下性能: 足够的持久强度及良好的热疲劳性能; 有较高的抗氧化和抗腐蚀的能力; 如用铸造合金, 则要求具有良好

的铸造性能。

4.3 涡轮动叶片用高温合金

涡轮工作叶片是涡轮发动机上最关键的构件之一。虽然工作温度比导向叶片要低些,但是受力大而复杂,工作条件恶劣,因此对涡轮叶片材料要求有:高的抗氧化和抗腐蚀能力;高的抗蠕变和持久断裂的能力;良好的机械疲劳和热疲劳性能以及良好的高温和中温综合性能。

4.4 涡轮盘用高温合金

涡轮盘在工作中受热不均,盘的轮缘部位比中心部位承受较高的温度,产生很大的热应力。榫齿部位承受最大的离心力,所受的应力更为复杂。为此对涡轮盘材料要求有:合金应具有高的屈服强度和蠕变强度;良好的冷热和机械疲劳性能;线膨胀系数要小,无缺口敏感性,较高的低周疲劳性能。

5 高温合金的发展趋势和新技术

为满足新一代的燃气轮机对高性能材料的需要,除在定向凝固铸造技术和单晶铸造技术等方面继续发展以外,粉末高温合金技术和新型的抗高温氧化、抗燃气冲刷防护涂层技术也得到了广泛的应用。

5.1 粉末高温合金技术^[2]

FGH95 粉末高温合金是采用粉末冶金工艺制备的 γ 相沉淀强化型镍基高温合金。该合金 γ' 相的体积分数为 50% 左右,其形成元素的原子分数为 12.8%。合金盘件的制造工艺路线是采用真空感应熔炼制取母合金,然后雾化制取预合金粉末,进而制成

零件毛坯。与同类铸、锻高温合金相比,它具有组织均匀、晶粒细小、屈服强度高和疲劳性能好等优点,是当前 650 °C 工作条件下强度水平最高的一种高温合金。该种高温合金主要用于高性能发动机的转动部件,如涡轮盘和承力环件等。

5.2 新型涂层技术

要提高燃气轮机涡轮叶片零件工作温度和延长其寿命,对防护涂层,特别是在可能热腐蚀条件下工作的涂层提出了苛刻的要求。传统的扩散铝化物涂层和渗铝硅涂层已经不能满足高压涡轮叶片抗高温氧化和抗高温燃气高速冲刷的工作要求,只能用于低压涡轮导向器和整流支柱表面的保护。两种新型涂层——等离子喷涂 CoCrAlSiY/ZrO_2 剃度涂层和电子束 CoCrAlY/ZrO_2 剃度涂层已经在燃气轮机涡轮叶片上得到了应用,由于具有最佳成份的厚度,既满足了叶片的工作条件要求又大大增加涂层与叶片基材的结合强度,极大地提高了叶片的使用寿命。

在目前的使用中,等离子喷涂 CoCrAlSiY/ZrO_2 涂层主要应用于高压涡轮导向器上,而电子束 CoCrAlY/ZrO_2 涂层主要应用于高压涡轮动叶表面。等离子喷涂 CoCrAlSiY/ZrO_2 剃度涂层是沿高温合金基体至涂层表面的厚度方向上, ZrO_2 含量逐渐增加, CoCrAlSiY 含量逐渐减少,表现出涂层成份剃度化分布,剃度涂层与层间无明显的成份突变,组织呈连续变化,大大提高了涂层与基材的结合强度。该种涂层最大厚度可达 180 μm ,可降低 100 ~ 150 °C 的工作温度。电子束 CoCrAlY/ZrO_2 剃度涂层是通过制

备一定直径的靶材,当电子束射击靶材时,通过靶材中的元素蒸发和真空室中连续供给氧气的技术,使金属 Zr 和 Y 原子在 CoCrAlY 涂层表面形成在 Y_2O_3 中稳定的 ZrO_2 涂层。涂层成份的变化通过控制电子束喷涂设备的功率来调整。该种涂层最大厚度可达 120 μm 。

可以预见,今后将会有更多的不同元素组成的涂层应用于燃气轮机高温部件上,这样就可以大大提高燃气轮机的效率、可靠性和经济性,满足不同用途燃气轮机的使用要求。

6 现有水平及发展趋势^[3~5]

美国在 20 世纪 90 年代推出了一些新型镍基合金,如 Haynes 242、230、214 和 556 等。新型 Inconel 718 合金已用于美国 F-117 飞机发动机的尾喷管蜂窝夹芯板,该蜂窝夹芯板用超塑性成形/扩散连接加工而成,能耐高温、压力和声压。

Haynes 242 为 Ni-Mo-Cr 时效硬化合金,具有较高的强度和塑性、良好的抗氧化性和低热膨胀系数,可不用涂层防护,目前这种合金制成的发动机构件现已进入试车阶段,主要用于发动机环形件和管件。Haynes 230 成份为 Ni-22%Cr-14%W-2%Mo,主要用于发动机燃烧室部件和密封件等。Haynes 214 的成份为 Ni-16%Cr-4.5%Al-3%Fe-Y,它是一种优良的抗氧化材料,用于蜂窝密封件时,其性能为 HastelloyX 的 8 倍。Haynes 556 为 Fe-M-Co-Cr 合金,为用于高温合金的新型焊接材料,主要也用于发动机构件。

美国为节约短缺的战略元素, 由 NASA 的刘易斯研究中心、加州大学和联合技术研究中心共同研制成功一种具有优异性能的铁基高温合金, 成份是 20%Cr、20%Mn 和 3.2%C, 其余为 Fe, 其组织特征是含有成排的碳化物。该合金性能可与镍基合金 MAR-M200(DS)相匹敌。

前苏联在变形高温合金方面发展了一系列镍基合金, $\Theta\Pi 666$ 为 Ni-Cr-Fe-Mo 合金, 在 800 °C 下抗拉强度为 400 MPa。 $\Theta\Pi 698$ 在 750 °C 下 100 h 持久强度为 392 MPa, 用于制造模锻涡轮盘。 $\Theta\Pi 868$ 为 Ni-Cr-W 热稳定合金, 在 700 °C 下的抗拉强度为 510 ~ 560 MPa。

国外在铸造和粉末冶金高温合金方面也研制了大量新型合金, 用于制造涡轮盘和壳体等, 如镍基铸造合金 (Ni-Cr-Fe 合金) 用于制造氢氧发动机转子, 在超低温下抗拉强度为 1 200 MPa, 在 800 °C 下抗拉强度仍为 600 MPa。BMA-6 抗拉强度 $\geq 14\ 000$ MPa, 用于制造氢泵。而 $\Theta\Pi 741\Pi\Pi$ 粉末冶金合金在 750 °C 下 100 h 持久强度比 $\Theta\Pi 742$ 高 30%, 达 666 MPa, 曾用于制造能源号火箭二

级发动机转子和一级发动机整体 (带轴) 叶轮。

近年来单晶高温合金的研究普遍展开, 多种单晶合金不断问世, 现已发展到第三代, 新材料有 PWA 1487 和 MCZ CMSX-4 等。此外新的定向结晶高温合金作为高温合金的一个发展方向, 近期发展较快。

美国在高温合金的研究应用方面一直处于领先地位, 研制成功的 Inconel 718 镍基合金已在飞机发动机上得到应用。Inconel 718 的产量在美国高温合金中已占第一位。为满足航天器结构及飞机发动机结构的高性能要求, 美国不断开发新型高温合金材料, 如 Haynes International 公司研制的 Haynes 242、Haynes 230、Haynes 214 和 Haynes 556 等, Cannon-Muskeyon 公司的 CMSX-4, PWA 公司的 PWA1487, 通用公司 (GE) 的 Alloy 800 合金等。

日本在镍基单晶高温合金 (如 TiMS-26)、镍基超塑性高温合金 (如 TMP-3) 和氧化物晶粒弥散强化高温合金 (如 TMO-2) 方面取得了较大的成功, 上述 3 种镍基合金的研究采用了计算机合金设计。其中 TMS-26 单晶合金叶片

在 1 040 °C 和 137 MPa 下的蠕变断裂寿命超过 1 000 h。MTO-Z 等晶粒弥散强化合金的高温强度比单晶合金还高得多。

英国较早地开展了高温合金的研究和应用, 形成自己的一系列高温合金体系, 如 Nimonic 系列等。近年来也不断推出新型号的合金材料, 如国际镍公司发展的低膨胀系数合金 4005 (42Ni-29.5Fe-18Co-6Al-3Nb-1.5Ti) 等。合金发展的一个主要特点是日益提高加入合金元素的总量。

参考文献:

- [1] 刘伯操. 航空材料选用目录 [M]. 北京: 中国航空工业公司出版社, 1995.
- [2] 颜鸣皋. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [3] IRWIN STAMBLER. Europe has it's own technology base to compete with ATS program in us [J]. *Gas Turbine World*, 1995, 25(6): 26-29.
- [4] IRWIN STAMBLER. Technology base is in place for next phase of ATS development program [J]. *Gas Turbine World*, 1995, 25(6): 40-44.
- [5] MICHAEL T BURR. Top developers of 1996 [J]. *Independent Energy*, 1997, 5(4): 24-31.
- [6] LOZONSKI M G. High temperature metallography [M]. London: Pergamon Press Ltd, 1981.

挠性叠片联轴器设计准则、强度分析、优化设计和 CAD 研究

挠性叠片联轴器是一种新型的联轴和补偿装置。它不但能起很好的联轴作用, 而且有很好的补偿能力和很好的动力特性吸收振动, 是一种很有发展前途的联轴装置。

研究表明, 根据理论和工作实验, 提出“单片特性”创造性地解决组合层板有限元的位移应力和强度计算, 其理论分析是正确的, 经试验验证满足工程需要。计算了应力、扭矩、轴向位移和角向位移, 又根据古德曼理论进行了综合, 得到了设计准则。在 CAD 和强度计算的基础上进行了外形优化设计, 得到了最优的设计结果。在系统设计方法和动静态的试验、高速测量技术方面均达到了国内领先水平。

对进行非线性大变形的有限元理论和强度及振频振型的分析、微动磨损和动态响应的分析, 理论分析与试验结果吻合较好。

叠片在承受各种载荷时应力分布、应力最大的地方和几何尺寸的关联, 已经创造性研究出新型挠性叠片联轴器, 承载能力和补偿能力都有很大提高。

燃煤锅炉再燃技术中再燃燃料的特性与选择 = **The Characteristics and Selection of Reburned Fuels Involved in the Reburning Technology of a Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / FANG Bing, LUO Yong-hao, LU Fang, et al (Thermal Energy Engineering Research Institute of Mechanical and Power Engineering College under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 443 ~ 446

Reburning reaction mechanism and characteristics are discussed regarding the use of a variety of reburned fuels in the reburning technology of a coal-fired boiler. Such reburned fuels include hydrocarbon gases, oil, coals and biomass, etc. The effectiveness of NO_x reduction of various fuels under specific combustion conditions is analyzed and compared along with a summing-up of the principles to be observed for selecting reburned fuels. **Key words:** combustion, NO_x , reburning, reburned fuel, reduction

高温材料在燃气轮机中的应用和发展 = **Application and Development of High-temperature Alloys for Gas Turbines** [刊, 汉] / XUN Bai-qiu, LI Qi, ZHAO Wu-en (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 447 ~ 449

High-temperature alloy materials represent a very important integral part of the gas turbine materials. They are very widely used to make major components and parts of a gas turbine, such as combustors, guide vanes, rotor blades and turbine discs, etc. The authors have analyzed and explained the main features and new technology of the high-temperature alloys currently used in gas turbines. Moreover, an in-depth and detailed account is given of the research and development status and tendency of these alloys in some developed countries worldwide. **Key words:** gas turbine, high-temperature alloy

烟气脱硫循环流化床内气固流动的 PDA 试验研究 = **Experimental Study of Gas-solid Flows in a Circulating Fluidized Bed of Flue Gas Desulfurization by the Use of a Particle Dynamics Analyzer** [刊, 汉] / Dong Yong, MA Chun-yuan (College of Energy & Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), QIN Yu-kun (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 450 ~ 453

Flue gas desulfurization technology is proposed on the basis of a circulating fluidized bed composed of a two-stage separation system. With the help of a particle dynamics analyzer measurements were taken of particle transverse and axial velocities, particle diameter as well as concentration distribution at different height levels in the bed. As a result, obtained were the momentary pulsation characteristics of the gas-solid flows and overall gas-solid flow behavior in the fluidized bed. These results can provide a solid basis for the structural design and optimization of new technology schemes of a flue gas desulfurization process. **Key words:** flue gas desulfurization, circulating fluidized bed, particle dynamics analyzer, gas-solid flow

CaO 颗粒烟气脱硫反应最佳反应温度的实验研究 = **Experimental Investigation of the Optimum Reaction Temperature of Flue Gas Desulfurization Reaction Involving CaO Particles** [刊, 汉] / WANG Shi-chang, XU Xu-chang, YAO Qiang (Key Laboratory of Thermal Power Engineering and Science Affiliated to the Thermal Engineering Department of Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 454 ~ 457

The desulfurization reaction of flue gases with CaO is subject to a comprehensive influence of the following factors: flue gas composition, reaction temperature and CaO particle inherent characteristics. Through an experimental study and on the basis of summing up the past experience of predecessors it has been proven that the optimum reaction temperature of CaO particles in the circulating fluidized bed of flue gas desulfurization is 800°C . At this temperature it is possible to basically avoid the competitive reaction of such compounds in flue gases as NO , CO_2 , etc with respect to a desulfurization