

氦气轮机装置的高温材料

吉桂明, 王 冲

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 鉴于氦气轮机装置的工作特点, 它们应用的材料要受到运行条件、环境因素和维护因素的制约。长的蠕变寿命、高温腐蚀和辐照影响将是选择材料所要考虑的关键问题。文中概述了用于 HTGR-GT(高温气冷堆-氦气轮机)发电设备的氦气轮机装置主要零部件, 包括涡轮叶片和轮盘、静子、轴系的候选材料, 认为具有保护涂层的定向结晶和单晶镍基合金是用于当前参数涡轮叶片最好的候选材料。对于冷却轮盘的设计方案, 镍基超耐热合金是候选的材料, 温度限制在 600 °C 下选择 IN 718; 对于更高的温度, 则选择粉末冶金 U720LI 和 MA6000。

关键词: 氦气轮机装置; 高温合金; 涡轮; 叶片; 轮盘

中图分类号: TM623.94

文献标识码: A

1 前 言

德国、俄罗斯、南非、日本等一些国家从 20 世纪 70 年代起开展了 HTGR-GT 发电装置的研究工作。2004 年, 我国正式启动与 10 MW 的 HTGR 直接连接的闭式循环氦气轮机装置的研制。中船重工第七〇三研究所承接了“高温气冷堆-氦气轮机直接发电试验项目”中的研制和生产氦气轮机工作。2005 年 1 月第七〇三研究所研制的 10 MW 高温气冷实验堆氦气涡轮压气机组项目已通过了方案评审, 将进入技

术设计阶段。

典型的 HTGR-GT 发电装置中的氦气轮机装置通常是中间冷却回热式闭式循环氦气轮机装置。鉴于以一回路冷却剂氦气作为工质, 氦气轮机装置各个部件应用的材料不能直接套用航空和陆用燃气轮机装置所应用的材料, 为此, 德国、日本、法国、俄罗斯等国在这方面开展了大量的研究工作, 并取得了一些成果。随着氦气涡轮压气机研制及生产工作的开展, 我国在此领域的工作也有待进行。

2 对材料的要求

鉴于氦气轮机装置各部件的工作环境和工作条件, 将根据物理/机械性能和加工性能问题来讨论对于材料的要求。长的蠕变寿命、高温腐蚀和辐照影响将是选择材料所要考虑的关键问题。

2.1 运行因素^[1~2]

预期 HTGR-GT 发电装置当前涡轮的进口温度为 850~900 °C, 进口压力为 7 MPa, 近期展望值相应为 1 200 °C 和 15 MPa。上述运行条件对材料强度特性提出了基本的要求(见表 1)。

此外, 涡轮叶片和轮盘采用或不采用冷却都影响到所应用材

料的选择。

2.2 环境因素^[3]

氦气轮机装置的工质氦气作为 HTGR 的一次冷却剂流过含有石墨作为结构材料的堆芯, 因此含有诸如 H₂O、H₂、CH₄、CO 和 CO₂ 那样的杂质, 杂质引起腐蚀会严重影响材料的机械性能。取决于各种杂质的分压力, 或是出现渗碳作用, 或是出现氧化作用。于是, 必须研究候选材料的耐腐蚀性能。此外, 虽然在 HTGR-GT 发电装置中设置有氦气净化系统, 但是放射性对材料的辐照可能仍是一个需要考虑的问题。与核环境有关的激活考虑出现了对于所选材料允许的钴含量的问题。

2.3 维护因素^[2]

氦气轮机装置的工质是一回路冷却剂氦气, 放射性可能仍是维护中的一个主要问题。放射性是由滞留在涡轮机表面、进口管与出口管表面上的裂变产物造成的, 预期人进入涡轮机进行维护是不可能的。考虑到维护的因素, 要求涡轮压气机材料的使用寿命为 60 000 h。

3 高温材料在氦气轮机装置各部件上的应用

表 1 涡轮最大应力的部件和元件的材料机械性能的最小值

(MPa)

工作温度 / °C	涡轮部件	计算温度 / °C	屈服强度 $R_{P0.2}^T$	极限强度 R_m^T	在时间 t 期间的极限			蠕变强度 $R_{\Delta \epsilon 6000}^T$
					长期强度 R_{mt}^L			
					10 000 h	60 000 h	100 000 h	
850	工作叶片	830	176	304	228	—	140	128/164
850	喷嘴叶片	850	139	240	—	180	—	—
700	用于组装结构的	650(1)	422	731	—	392	—	270/295
	涡轮轮盘(冷却的)	700(2)	171	297	—	143	—	174/200
830	用于组装结构的	800(1)	422	731	—	392	—	—
	涡轮轮盘(不冷却的)	820(2)	171	297	—	143	—	74/100
830	静子	850	15	26	—	15	—	20/—
830	蜗壳	750	60	104	—	110	—	— /80
		850	30	52	—	30	—	— /40
500	轴系	500	309	536	—	273	—	—

注: 基于 60 000 h 给出的蠕变强度值(最后一列), 分子值为变形 0.2% 的蠕变强度值, 分母值为变形 1% 的蠕变强度值。

*—工作温度是对于最热的部件给出的, 精确度为 ± 12 °C。由于流量不均匀造成氦气温度的可能脉动为 ± 25 °C, 频率约为 1 Hz。

- (1)— 轮盘最大应力部分中总应力的计算。
- (2)— 沿轮盘周边局部应力的计算。

由于氦气轮机装置部件多、结构复杂, 各部件温度和受力情况等差别较大, 因此对材料的要求和选用也就各不相同。

3.1 涡轮叶片的候选材料

3.1.1 过去所选的材料^[4~9]

早期广泛研究了两类金属材料: 镍基铸造超耐热合金和钼基合金。

3.1.1.1 镍基铸造超耐热合金

合金 713LC、M21 和 Mar—M004 被确定为最合适的材料, 化学成份示于表 2。

合金 713LC 是一种铸造镍基沉淀强化合金, 具有广泛生产经验的优势。它通过大量的 γ' 相来强化, 只有非常少的钴并且不含有钼, 因此不会带来污染问题。合金 M21 是一种通过钨的存在, 使沉淀硬化和固溶硬化联合的低铬镍基合金。由于它在典型的 HTGR 的氦气环境中优良的耐腐蚀性, 已选择 M21 用于涡轮叶片。合金 Mar—M004 是根据合金 713LC 研制的, 并且由于添加钨而表现出更高的韧性。在氦气

表 2 叶片的铸造镍基超耐热合金和钼基合金的额定成份 (%)

(%)

	713LC	M21	Mar—M004	Mo—TZM
Cr	12	6	11.86	—
Co	0.04	—	—	—
Mo	4.65	2	4.42	剩余量
Al	5.82	6	5.95	—
Ti	0.74	—	0.41	0.5
W	—	10.5	—	—
C	0.07	0.1	0.065	0.02
B	0.009	0.02	0.018	—
Zr	0.1	0.1	0.1	0.8
Nb	2	1.5	1.6	—
Hf/Ta	—	—	1.3/0.3	—
Ni	剩余量	剩余量	剩余量	—

环境中, 它表现出与 IN 713LC 类似的蠕变性能。

3.1.1.2 钼基合金

在 HTGR 氦气环境中 Mo—TZM 表现出非常好的抗蠕变强度, 真空电弧熔炼的 Mo—TZM 表现出其蠕变断裂强度比 IN 713LC 的高 3 倍。于是, 在使用不冷却的叶片时为了满足预期的高工作应力, Mo—TZM 是最有前途的材料之一, 其化学成份也示于表 2。

已经考虑把它用于涡轮第一级叶片。从真空熔炼或粉末冶金的一块开始, 已完成了制造锻造的 Mo—TZM 叶片的尝试。

3.1.2 用于叶片的先进材料^[1~3,6~7]

用于航空和陆用燃气轮机的涂层技术允许把涂层叶片看作是有前途的用于高温反应堆的一个解决办法。况且, 存在涂层将允许考虑把具有高钴含量的高抗蠕

变强度超耐热合金用于 HTGR—GT 的涡轮叶片。

加入钴并增加钴的含量有助于提高合金的抗蠕变强度。这对于要求极长工作寿命的 HTGR—GT 涡轮部件具有极大的吸引力。因此, 在开发先进材料中都在合金中包含有很高数量的钴。

为了达到高的蠕变强度, 考

虑采用定向结晶 (DS) 多晶粒材料和单晶 (SC) 材料。

3.1.2.1 定向结晶材料

晶粒边界的法线垂直应力轴能通过减少潜在缺陷发生的场所来提高高温延展性, 从而得到精细的 γ' 显微结构, 并可改进蠕变强度。

鉴于它们良好的耐腐蚀性,

已考虑使用 4 种合金: 第一种是 IN 792 定向结晶合金, 是氧化铬形成物; 第二种是 CM 247LC 定向结晶合金, 是氧化铝形成物; 另外两种是 IN 738 和 Udimet 520 合金。它们的化学成份示于表 3。上述 4 种合金满足对当前涡轮进口参数 (850 °C 进口温度) 下不冷却叶片的技术要求。

表 3 定向结晶/单晶候选材料的额定成份

(%)

	IN 792 定向结晶	CM 247LC 定向结晶	IN 738 定向结晶	Udimet 520 定向结晶	PWA 1483 单晶	CMSX4 单晶
Cr	13	8	16	19	12.8	6.5
Co	9	9	9	12	9	9
Ti	4.2	0.7	—	3	4	1
Al	3.2	5.6	3.4	2	3.6	5.6
Mo	2	0.5	2	6	1.9	0.6
W	4	10	2.6	1	3.8	6
C	0.2	0.07	0.11	0.05	—	—
B	0.02	0.015	—	—	—	—
Zr	0.1	0.1	—	—	—	—
Nb	2	—	0.9	—	—	—
Re	—	—	—	—	—	3
Hf	—	1.4	—	—	—	0.1
Ta	—	—	2	—	4	6.5
Ni	剩余量	剩余量	剩余量	剩余量	剩余量	剩余量

与单晶材料相比较, 定向结晶技术表现出非常好的性能, 具有低成本及部件可生产性。

3.1.2.2 单晶材料

在工业的单晶材料中, 已经选择了一种品级的氧化铬形成物 (PWA 1483) 和一种品级的氧化铝形成物 (CMSX4)。它们的化学成份示于表 3。虽然和选择的定向结晶材料相比, 它们表现出改进的机械性能, 但由于它们成本高并且很难制造大的单晶部件, 并未把它们看作是当前参数 (850 °C 运行温度) 下氦气涡轮叶片主要的候选品级, 而是把它们视为用于超过 900 °C 氦气温度的叶片候选材料。

表 4 铸造和锻造的镍基超耐热合金的额定成份

(%)

	IN 706	IN 718	U720	Waspaloy
Ni	41.5	52.5	55	剩余量
Fe	37.5	18.5	—	—
Cr	16	19	18	20
Co	—	—	14.8	13.5
Ti	0.75	0.9	5	3.0
Al	0.2	0.5	2.5	1.3
Mo	—	3	3	4.3
W	—	—	1.25	—
Zr	—	—	0.03	0.06
Nb	2.9	5.1	—	—
C	0.03	0.08	0.035	0.08
B	—	—	0.033	—

3.2 涡轮轮盘的候选材料^[2-7]

鉴于对氦气涡轮轮盘的要求, 现有技术没有可用的工业材料。特别是轮盘的机械性能和尺寸的结合淘汰了所有用于宇航或电力生产燃气轮机工业的传统材料。HTGR-GT 的设计宣称要使用不冷却的轮盘, 这就导致了合金本身很高的温度。

考虑到可能采用轮盘冷却以便得到更低的运行温度, 可以设想选用镍基超耐热合金。

3.2.1 铸造和锻造的镍基超耐热合金^[2-5]

用于涡轮轮盘的铸造和锻造的镍基超耐热合金的化学成份列于表 4。

在过去的 HTGR-GT 项目中, 甚至在日本近期项目内合金 IN 706 被看作是用于轮盘的标准材料。它是一种大量加入合金成份的材料, 并来源于广泛用于航空发动机的 IN 718 品级合金。为了生产大直径合金, IN 706 部件的熔炼技术很复杂。其最大工作温度约为 600 °C。

在高温下, IN 718 比 IN 706 表现出更高的机械性能。熔炼技术和热力机械加工方面的最新进展已经允许成功地生产直径达到 710 mm 的 IN 718 大型锭块。同时, 检验能力技术已经得到发展, 以便允许精密控制大型轮盘的显微结构。这样的锭块尺寸允许生产直径是 2 000 mm、高是 325 mm 的锻造轮盘。IN 718 的最大工作温度约为 650 °C。在最新的研究中已经提议把 IN 718 用于 HTGR-GT 发电装置涡轮的轮盘。

在锻造和铸造的高强度镍基超耐热合金中, U720 在高达 700 ~ 750 °C 的温度下表现出更高的蠕变强度, 并且有良好的耐腐蚀性。U720 合金能够在低于 750

°C 温度下工作, 并被认为是最有前途的候选材料。

3.2.2 粉末冶金镍基超耐热合金^[2-3]

用于涡轮轮盘的粉末冶金的镍基超耐热合金的额定成份列于表 5。

表 5 粉末冶金的镍基超耐热合金的化学成份 (%)

	MA 6000	U720LI
Ni	剩余量	57
Fe	—	—
Cr	15	16
Co	—	15
Ti	2.5	5
Al	4.5	2.5
Mo	2	3
W	4	1.25
Zr	—	0.03
Nb	—	—
C	0.05	0.015
B	—	0.018
Ta	2	—
Y ₂ O ₃	1.1	—

MA6000 是一种具有高的强度和显微结构稳定性的氧化物弥散强化超耐热镍基合金。该合金结合利用钨和钼的固溶强化、依据 γ' 共格相 (Ni₃Al) 的沉淀强化和利用氧化钇的弥散强化。沉淀强化提高了在中等温度下的强度, 弥散强化改进了大于 950 °C 温度下的强度。MA6000 的蠕变强度在 850 °C 下对于 60 000 h 可以达到高于 185 MPa 的值。该合金的蠕变性能表明, MA6000 可用于不冷却的条件。俄罗斯 OKBM (机械制造试验设计局) 也认为 MA6000 是唯一能满足涡轮轮盘用材要求的高温合金。

U720LI 是最高度合金化的镍基超耐热合金, 但是铸造和锻造的 U720LI 只用于制造小尺寸的轮盘。需要在熔炼和热力机械

工艺过程两方面做进一步的技术开发, 以便生产大尺寸粗晶粒的 U720LI 轮盘。为此, 现在正对粉末冶金 U720LI 合金进行广泛的研究, 以使用它来制造在更高温度 (大于 650 °C) 下工作的涡轮轮盘。

3.3 静子的候选材料^[2]

推荐的静子材料是 Nimonic 90, 蜗壳的候选材料是 Nimonic 105。

3.4 轴系的候选材料^[2]

推荐的轴系的候选材料是 Inco 901 和 Nimonic 80A。

4 热障涂层^[9]

与传统的航空、陆用和船用燃气轮机一样, 预期应用热障涂层能有效地提高氦气轮机涡轮叶片的工作温度、减少腐蚀并延长其使用寿命。此外, 应用涂层将允许考虑把具有高钴含量的高蠕变强度的镍基超耐热合金用于涡轮叶片。

法国等一些国家当前正通过开发不同的热障涂层 (氧化钇稳定的二氧化锆涂层和氧化铝涂层等), 各种氧化铝形成物粘接涂层 (NiCrAlY, NiAl, NiAl-Pt), 不同的成层方法 (EBPVD (电子束物理气相沉积法)、CVD (化学气相沉积法)、等离子喷涂法) 和不同层的显微结构, 特别是毫微结构涂层来研究涂层的可行性。

5 结 论

(1) 对于涡轮材料的要求源于在当前参数下基于不冷却的氦气轮机设计 (通常是叶片不冷却, 轮盘冷却)。

(2) 与常规的电力生产燃气轮机相比较, HTGR-GT 装置涡轮

的运行寿命更长(达 60 000 h), 并将在含有杂质的氦气下运行, 预期合金自身的温度会达到 850 °C。与核环境有关的激活考虑出现了对候选材料允许钴含量的问题。

(3) 要求给叶片加上耐腐蚀的保护涂层。对于当前的参数, 定向结晶和单晶超耐热镍基合金是适用于涡轮第一级叶片的候选材料。

(4) 在冷却轮盘设计方案的情况下, 镍基超耐热合金是候选材料。若把温度限制在 600 °C, IN 718 是所选择的材料。对于更高的温度, 则应考虑粉末冶金 U720LI 和粉末冶金 MA6000 镍基合金。

参考文献:

[1] RAULE G, BAUER R. Properties of mate-

rials for the high temperature helium turbine under mechanical and thermal loading [R]. Mannheim: BBC Central Materials Laboratory, 1982.

[2] KODOCHIGOV N G, ROMANTSOV A A, DOLGOV S A. Materials used for the main elements of high-temperature elements of HTGR turbocompressor [A]. 2nd International Topic Meeting on High Temperature Reactor Technology [C]. Beijing: Department of Nuclear Energy Engineering under the Tsinghua University, 2004. 1—13.

[3] NATESAN K. Materials behavior in HTGR environments [R]. Washington: U S Department of commerce, National Bureau of Standards Special Technical Publication, 2003. NUREG/CR—6824, ANL—02/37.

[4] JAKOBEIT W, PFEIFER J P, ULLRICH G. Evaluation of high temperature alloys for helium gas turbines[J]. **Nuclear Technology**, 1984 **66**: 195—206.

[5] SCHUSTER H, JAKOBEIT W. High temperature alloys for the power conversion

loop of advanced HTRs [A]. **Proceeding of the Symposium Gas-Cooled Reactors with Emphasis on Advanced Systems** [C]. Jülich: IAEA, 1976. 401—418.

[6] SERAN J L, BILLOT P, BURLET H, *et al.* Metallic and graphite materials for out-of-core and in-core components of the VHTR: first results of the CEA R&D program [A]. 2nd International Topic Meeting on High Temperature Reactor Technology [C]. Beijing: Department of Nuclear Energy Engineering under the Tsinghua University, 2004(E15). 1—16.

[7] HALL B, ROAD C, CHESHIRE K. Results from EU 5th framework HTR projects HTR—M & HTR—M1 [A]. 2nd International Topic Meeting on High Temperature Reactor Technology [C]. Beijing: Department of Nuclear Energy Engineering under the Tsinghua University, 2004(E12). 1—15.

(渠源 编辑)

(上接第 4 页)

[4] TENG H, SUUBERG E H. Chemisorption of nitric oxide on char. 2 Irreversible carbon oxide formation [J]. **Ind Eng Chem Res**, 1993 **32**(3): 416—423.

[5] YANG J. Reaction of NO with carbonaceous materials. 1. Reaction and adsorption of NO on ashless carbon black [J]. **Carbon**, 2000, **38**: 715—727.

[6] CHAMBRION P, KYOTANI T, TOMITA A. Role of N-containing surface species on NO reduction by carbon [J]. **Energy Fuels**, 1998, **12**(2): 416—421.

[7] LI H Y, LU G Q, RUDOLPH V. The kinetics of NO and N₂O reduction over coal chars in fluidised-bed combustion [J]. **Chem Eng Sci**, 1998, **53**(1): 1—26.

[8] LEE K B, THRING M W, BEER J M. On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame [J]. **Combust Flame**, 1962, **6**: 137—145.

[9] INDREK AARNA, SUUBERG ERIC M. A review of the kinetics of the nitric oxide-

carbon reaction [J]. **Fuel**, 1997, **76**(6): 475—491.

[10] LEVY J M, CHAN L K. NO/char reaction at pulverized coalflame conditions [A]. **Symposium Institute Combust 18th Symposium (Internation) on Combustion** [C]. Pittsburgh: Combustion Institute, 1981. 111—120.

[11] LEE J G, KIM J H, LEE H J, *et al.* Characteristic of entrained flow coal gasification in a drop tube reactor [J]. **Fuel**, 1996, **75**(9): 1035—1042.

[12] SUZUKI T, KYOTANI T, TOMITA A. Study on the carbon-nitric oxide reaction in the presence of oxygen [J]. **Ind Eng Chem Res**, 1994, **33**(11): 2840—2845.

[13] YAMASHITA H, TOMITA A, YAMADA H, *et al.* Influence of char surface chemistry on the reduction of nitric oxide with chars [J]. **Energy Fuels**, 1993, **7**(1): 85—89.

[14] CHEN S G, YANG R T, KAPTEIJN F, *et al.* A new surface oxygen complex on car-

bon: toward a unified mechanism for carbon gasification reactions [J]. **Ind Eng Chem Res**, 1993, **32**(11): 2835—2840.

[15] JACQUOT F. Kinetics of the oxidation of carbon black by NO₂ influence of the presence of water and oxygen [J]. **Carbon**, 2002 **40**: 335—343.

[16] 梁秀俊, 高正阳, 杜彦芬. 煤粉再燃过程煤焦与 NO 的反应机理分析 [J]. 华北电力技术, 2003(12): 5—6.

[17] 钟北京, 张怀山. 催化剂作用下贫煤焦对 NO 还原的实验研究 [A]. 中国工程热物理学会第十届年会燃烧学论文集 [C]. 北京: 中国工程热物理学会, 2001. 655—659.

[18] TERAOKA Y, KAGAWA S, SHANG-GUAN W F. Kinetics of soot-O₂, soot-NO and soot-O₂-NO reactions over spine-type CuFe₂O₄ catalyst [J]. **Appl Catal**, 1997, **12**(2—3): 237—247.

(渠源 编辑)

炭黑与 NO 还原反应的研究综述= **An Overview of the Research on Reduction Reactions Involving Soot and NO** [刊, 汉] / XU Bin, XIE Guang-lu, FAN Wei-dong, et al (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 1~4, 9

Over the last three decades reduction reactions involving soot and NO have attracted the attention of environmental research workers worldwide. The authors have given an overview of the recent research progress on the above-mentioned reduction reactions with an emphasis on the reduction reaction mechanism of pure NO and soot. The experimental instruments nowadays being often used are discussed. Various kinds of reaction instrumentation can be employed for different ranges of reaction-temperature and the various products thus obtained as a result of the NO-soot reaction are also quite different. At low temperatures (less than 300 °C) an adsorption reaction will mainly take place, while at high temperatures a reduction reaction occurs. Finally, a brief description is given of the impact of the different atmospheres and the presence of catalysts on reaction results. Different reaction atmospheres will have different impacts on NO-soot reactions. All substances, which promote the generation of an activated potential on a soot surface, can invariably be conducive to the progress of reactions. **Key words:** natural gas, soot, nitric oxide, desorption, surface base groups

氦气轮机装置的高温材料= **High-temperature Materials for Helium Gas Turbines** [刊, 汉] / JI Gui-ming, WANG Chong (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 5~9

Due to its operating features a helium gas turbine is constrained in its use of construction materials, which must cope with specific operating conditions, environmental and maintenance service factors. The key problems to be considered during material selection include: long creep life, high-temperature corrosion and radiation effects. Briefly described are the major candidate materials used for the parts and components, such as blades, discs, stators and shafting, of HTGR-GT (high-temperature gas cooled reactor - helium gas turbine) based power generation plants. It is noted that oriented crystallization and single crystal nickel-based alloys with protective coatings are the best candidate materials for turbine blades of currently prevalent operating parameters. As for the design scheme of a cooled disc, nickel-based super heat-resistant alloys are considered eligible materials. For use at temperatures below 600 °C alloy IN 718 can be selected with U720LI and MA 6000 being destined for still higher temperatures. **Key words:** helium gas turbine unit, high-temperature alloy, turbine, blade, disc

微型燃气轮机回热器燃气腔结构优化= **Configuration Optimization of the Recuperator Gas-cavity of a Micro Gas Turbine** [刊, 汉] / ZHANG Dong-jie, WANG Qiu-wang, LUO Lai-qin, et al (State Key Laboratory of Multiphase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 10~13

A numerical simulation was conducted for the gas-cavity flow field of the split-body type recuperator of a 100 kW micro gas turbine along with an analysis of the impact on the gas cavity by such factors as the use of different cone angles α at the gas inlet piping and different lengths L of protrusion into the cavity. The results of the simulation indicate that when $\alpha = 5^\circ$ and L = 370 mm, the resistance losses of the flow path as a whole and the uniformity of velocities at various gas outlets have been comprehensively evaluated as having achieved optimum values. **Key words:** distributed power generation, micro gas turbine, recuperator, configuration optimization

燃气轮机湿空气回注循环分析= **An Analysis of the Gas Turbine Humid-air Injected Cycle** [刊, 汉] / WEN Xue-you, LU Ben, LI Ming-jia (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 14~18

A gas turbine humid-air injected cycle is discussed with the assertion that there are two kinds of injected cycle, namely, internal and external humid air injection. On the basis of a partial regenerative steam injected gas turbine (PRSTIG) cy-