

我国独创和独具特色的几种高温合金的组织与性能

郭建亭, 周兰章, 袁 超, 侯介山, 秦学智

(中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 综述了中国科学院金属研究所高温合金和金属间化合物研究组 50 年来在高温合金材料方面的研究成果, 重点介绍了 9 种我国独创和独具特色的高温合金, 包括其成分和组织特点, 力学性能、化学性能和物理性能, 以及他们的冷、热加工性能和应用特点。

关键词: 高温合金; 涡轮盘用高温合金 GH2135; 涡轮环件用高温合金 GH2035A; 涡轮叶片用高温合金 DZ417G; 过热器管材用高温合金 GH2984; 抗热腐蚀高温合金; K444; K435; K452; K446; GH4413

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Microstructure and properties of several originally invented and unique superalloys in China

GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang, YUAN Chao, HOU Jie-shan, QIN Xue-zhi

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

Abstract: This review summarizes the research results of the studies on superalloys in the research group of superalloys and intermetallics in Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences in the past 50 years. The paper mainly introduces nine originally invented and unique superalloys in China, including their chemical composition and microstructural characteristics, mechanical properties, chemical and physical properties, hot and cold workabilities, and application characteristics.

Key words: superalloy; turbine disc superalloy GH2135; turbine ring part superalloy GH2035A; turbine blade superalloy DZ417G; superheater tube superalloy GH2984; hot corrosion resistant superalloy; K444; K435; K452; GH4413

高温合金具有良好的高温强度和抗氧化抗腐蚀性、优异的抗疲劳和抗蠕变性能、以及甚佳的断裂性能和组织稳定性, 是现代国防建设和国民经济发展不可替代的关键材料^[1]。高温合金的发展与航空发动机和各种工业燃气轮机的发展密切相关, 是航空发动机和工业燃气轮机发展的重要保证, 而航空发动机及工业燃气轮机的发展是高温合金发展的动力。先进高温合金材料和工艺的研制属高技术领域。高温合金的发展水平是一个国家工业水平高低的标志之一, 也是一个国家国防力量强弱的标志之一。世界各先进国家都非常重视高温合金的研究、生产和应用, 并投入了大

量的人力和物力。

我国从 1956 年开始研制和生产高温合金。50 多年来, 我国高温合金从无到有, 从仿制到创新, 已先后研制和生产了近 200 个牌号, 形成了具有中国特色的完整的高温合金体系, 保证了我国航空航天发动机及燃气轮机所需高温合金材料完全立足于国内。

中国科学院金属研究所高温合金和金属间化合物研究组从 1962 年开始研究高温合金, 至今已有 50 年历史, 先后研制成功或正在研究的有铁基变形高温合金 GH2135、GH2035A、GH2984、GH2328、GH2901、GH2761、GH2107; 镍基变形高温合金 GH4413; 无

缝管材合金 GH3044；大尺寸涡轮盘合金 GH4698 和 GH4742；镍基铸造合金 K4169、K435、K446、K452、K447、K445；钴基高温合金 K640S；BC 合金 K444；定向凝固高温合金 DZ417G、DZ483、DZ444G；单晶高温合金 DD444、DD417G、DD483；低膨胀高温合金 GH2903 等 20 多个牌号，其中约有一半是与兄弟组或其它单位共同完成的。下面重点介绍几种我国独创和独具特色的高温合金。

1 涡轮盘用铁基高温合金 GH2135

GH2135 合金是中国科学院金属研究所于 1958 年在师昌绪先生指导下研制的铁基变形合金，用以代替当时大量使用的镍基合金 GH4033。初期由于中心缩孔等冶金缺陷，在抚顺钢厂锻造时不能成材，而且由于追求持久强度，选择的固溶处理温度高达 1 220 °C，处理后的试棒表面由于氧化皮太厚而暂停研究。在终止研究几年后，1962 年本课题组重新开始研制，从合金的成分范围、最佳成分控制、热处理制度、组织结构到全面力学性能测试等，都进行了较为深入的研究。GH2135 合金的综合性能达到或超过了 GH4033 合金。1964 年开始到抚顺钢厂进行工业试生产，并与抚钢合作开展工程化研究，取得了大量数据。在国内外公开发表论文数十篇，并出版 GH2135 铁基高温合金汇编一本^[2]。自 1967 年 GH2135 合金正式列入“冶标”开始转入批量生产，至 1974 年，抚钢、上钢五厂、大冶钢厂，齐齐哈尔钢厂等冶金厂生产量达 1 000 多 t。GH2135 合金主要用作涡轮盘材料，也曾经用来制作涡轮叶片和燃气轮机的火焰筒等不同结构件。

1.1 合金的化学成分特点

GH2135 合金的化学成分，与 GH4033 合金相比，最大特点是节省大量的镍和少量的铬。从表 1 可以看出，GH2135 可节省 41% 的镍和 5.5% 的铬。这在当时中国缺乏镍和铬资源的情况下，特别是西方资本主义国家对我国进行经济封锁的形势下，不仅具有十分重要的经济意义，而且有着不可估量的政治意义。

与 GH4033 合金相比，GH2135 合金还利用了 4% 左右的难熔金属元素 W + Mo 进行固溶强化，而 GH4033 则没有采用难熔金属固溶强化。同时，GH2135 合金加入了约 5% 的 Al + Ti 进行沉淀强化，而 GH4033 合金仅加入了 3.4% 左右的 Al + Ti 形成 γ' 强化，前者 γ' 相的含量为 12%~16%^[3]，而后者 γ' 相的含量则只有 7.3%~9.1%^[4]。

1.2 合金的显微组织特点

GH2135 合金金相组织的最大特点是沿晶分布的链状碳化物不是 $M_{23}C_6$ ，而是二次 TiC。通常认为含有 2%W 和 2%Mo 的铁基或镍基高温合金，应该有 $M_{23}C_6$ 相沿晶界析出。但电解萃取相的 X 射线分析没有发现 $M_{23}C_6$ ，甚至将萃取相进行相分离，只保留碳化物和硼化物相，X 射线结构分析仍然只发现 TiC。GH2135 合金低温沿晶断口的萃取复型证明，晶界上的颗粒相主要是 830 °C 第一次时效处理时析出的二次 TiC，有时也发现有少量颗粒状 M_3B_2 相在晶界存在。

1.3 合金的力学性能特点

GH2135 合金的综合力学性能已达到 GH4033 合金水平。但与 GH4033 合金比较，GH2135 合金有如下两个重要的特点。

1.3.1 良好的低周疲劳性能

在同样的试验条件下，GH2135 合金的周期持久性能和有疲劳载荷下的持久时间都明显优于镍基合金 GH4033 的，相应数据要高出 1~10 倍。其他低周疲劳性能，如恒应力控制的缺口试样的低周疲劳也都显示出明显的优越性^[2]。

在 650 °C、600 MPa 条件下测试 GH2135 合金和 GH4033 合金的周期持久性能，结果见表 2^[2]。由表 2 可见，GH2135 合金的周期持久循环断裂次数为 GH4033 合金的 1.6~9.5 倍，持久时间约为 GH4033 合金的 2 倍。在疲劳负荷下 GH2135 合金和 GH4033 合金的持久断裂时间见表 3^[2]。由表 3 可见，在有交变应力作用的同样试验条件下，GH2135 合金的持久断裂时间为 GH4033 合金的 2~5 倍，纯持久断裂时间为 GH4033 合金的 2 倍。很显然，GH2135 合金的低周疲劳性能明显优于 GH4033 合金的。

表 1 GH2135 合金和 GH4033 合金的主要化学成分

Table 1 Chemical compositions of GH2135 and GH4033 alloys (mass fraction, %)

Alloy	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Fe	B	Ce
GH2135	≤0.08	15.0	34.5	1.95	1.95	2.4	2.3	Bal.	≤0.015	≤0.030
GH4033	0.03~0.08	20.5	Bal.	—	—	0.80	2.6	≤4.0	≤0.010	≤0.010

表 2 GH2135 和 GH4033 合金的周期持久性能^[2]

Table 2 Cyclic rupture properties of GH2135 and GH4033 alloys^[2]

Time/s	Cyclic rupture property	
	GH2135 ¹⁾	GH4033
40	2 788 cycle	1 725 cycle
200	3 668 cycle	388 cycle
∞ (rupture time)	430 h	202 h

1) Heat treatment is (1 140 °C, 4 h, air cooling)+(830 °C, 8 h, (air cooling))+(650 °C, 16 h, air cooling); fracture cycles are average testing results of 3–8 samples.

表 3 在不同疲劳负荷下两种合金的持久断裂时间^{1)[2]}

Table 3 Rupture time of two alloys under fatigue load^[2]

Cyclic stress/ MPa	Rupture time/h	
	GH2135	GH4033
0	375	121
±12.5	265	66
±17.5	106	56
±22.5	111	21

Rupture time is average value of two samples; heat treatment condition of GH2135 alloy is (1 140 °C, 4 h, air cooling)+(830 °C, 8 h, air cooling)+650 °C, 16 h, air cooling).

此外，还应着重强调，GH2135 合金在涡轮盘工作的温度和应力情况下，蠕变-疲劳交互作用系数 $B=0$ ，而 GH4033 合金的则为 4。蠕变-疲劳交互作用通常可表示为

$$\sum \frac{N}{N_f} + B \left(\sum \frac{N}{N_f} \cdot \sum \frac{\Delta t}{t_r} \right) + \sum \frac{\Delta t}{t_r} = 1 \tag{1}$$

交互作用系数 $B=0$ ，说明蠕变损伤与疲劳损伤没有交互作用，而 $B=4$ ，说明两者之间有明显交互作用，使损伤更严重。尽管 GH2135 合金和 GH4033 合金处于同一条件，由于蠕变-低周疲劳交互作用而使 GH4033 合金的使用寿命显著下降，其总周期数和总寿命都只有 GH2135 合金的 40%^[5]。这更加显示了 GH2135 合金在低周疲劳方面的优越性。

1.3.2 屈服强度随温度的反常变化

高温合金的屈服强度一般随温度升高而不断明显降低，而 GH2135 合金的屈服强度随温度升高不但不降低，反而有所增加，直到 750 °C 才开始缓慢降低。这是 GH2135 合金力学性能的又一特点，结果如表 4 所列。因此，采用 GH2135 合金制作在 750 °C 温度以

下使用的涡轮盘、导流盘和其他高温零部件是非常有利的。此外，用 GH2135 合金制作热作模具优越性更大。因为热作模具，包括锻锤砧子等，在工作过程中温度愈来愈高，一般模具材料会因其屈服强度严重下降而出现凹陷；而 GH2135 合金与此相反，工作温度越高，屈服强度反常增加，不会出现一般模具材料所产生的严重变形现象。

表 4 GH2135 合金的屈服强度随温度的变化

Table 4 Change of yield strength with temperature for GH2135 alloy

$t/^\circ\text{C}$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$
RT	688
300	691
400	703
500	716
550	716
600	702
650	706
700	707
750	677

1.4 合金的应用特点

由于 GH2135 合金的综合性能良好，疲劳性能优异，特别适于制作航空发动机涡轮盘。20 世纪 70 年代，曾大量制作 WP-6 和 WP-6 甲发动机一、二级涡轮盘，装备 1 000 多架歼击机和强击机在外场正式投入使用，其中还有 300 多架飞机援外^[6]。在那个年代这是一种值得称赞的奇迹。

GH2135 合金是我国独创的第一个涡轮盘铁基高温合金，它是我国自行研制的铁基沉淀强化高温合金中使用最早、使用量最大、使用品种最多、研究工作最深入的一种合金，在我国高温合金的发展史上占有非常重要的一页。它对推动我国高温合金的发展，特别是铁基高温合金的发展起了不可磨灭的作用。它的研制成功为我国高温合金人材培养也起了非常重要的作用。GH2135 合金的研制于 1978 年获得全国科学大会重大科研成果奖。

2 环形件用铁基高温合金 GH2035A

WJ5 系列航空发动机的涡轮内、外环等 11 种零件原采用 GH1035 铁基合金，在合金生产过程中存在

表 5 GH2035A 和 GH1035 合金化学成分比较

Table 5 Chemical compositions of GH2035 and GH1035 alloys (mass fraction, %)

Alloy	C	Cr	Ni	W	Ti	Nb	B	Al	Mg	Ce	Fe
GH1035	0.06~0.12	20.0~23.0	35.0~40.0	2.50~3.50	0.70~1.20	1.20~1.70	—	≤0.50	—	≤0.05	Bal.
GH2035A	0.05~0.11	20.0~23.0	35.0~40.0	2.50~3.50	0.80~1.30	—	0.01 ¹⁾	0.2~0.7	0.01 ²⁾	0.05 ¹⁾	Bal.

Adding Ti or Nb respectively; 1) B and Ce are added by calculated quantity; 2) Adding Mg, but remnant is less than 0.01%.

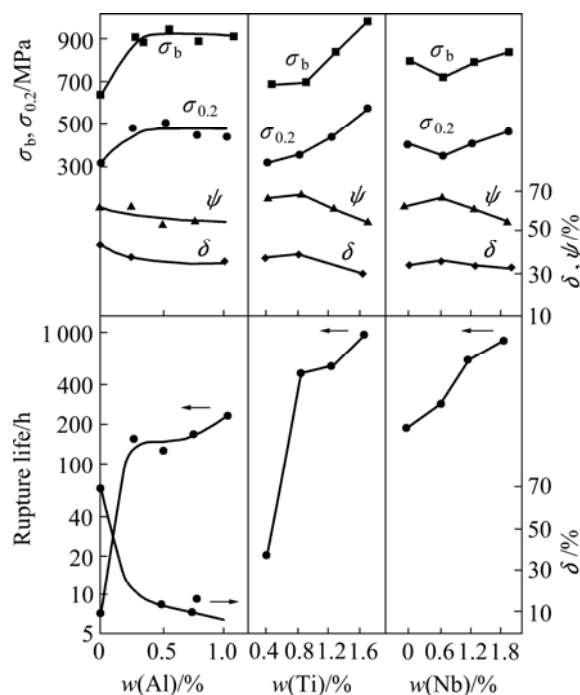
强度低、塑性差和锻造裂纹多这 3 大技术难题,使成品率极低,造成重大浪费。本研究组通过成分调整、热处理制度改进等研究工作,在 GH1035 合金成分基础上开发出一种具有自主知识产权的专利合金 GH2035A。该合金除保留原合金的优点外,其综合性能大幅度提高,长期性能更加稳定,同时,生产工艺稳定,热加工性能优异,成形性良好,可以生产锻材、棒材、板材和管材等^[7]。几年来,生产量已超过 100 t,成材率达 80%以上,性能合格率达 100%。

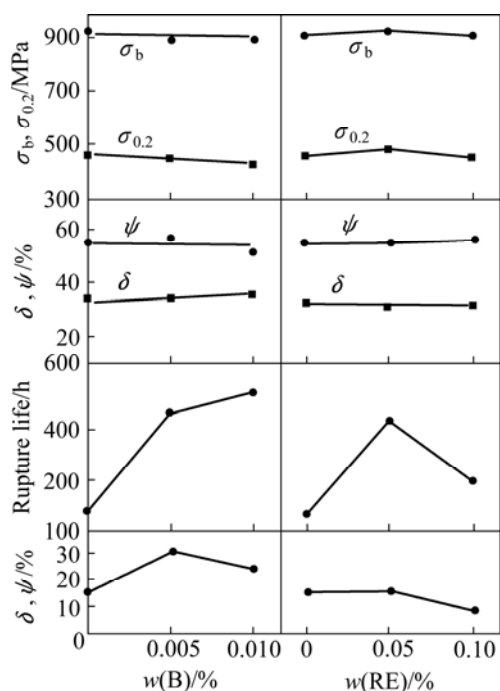
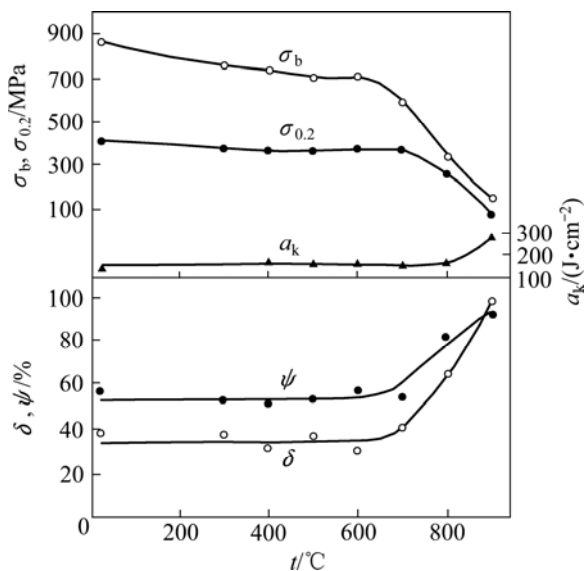
2.1 合金的化学成分特点

GH2035A 合金和 GH1035 合金的化学成分见表 5。由表 5 可见, GH2035A 合金的化学成分有以下特点: Al 和 Ce 在 GH1035 合金中是杂质元素,愈低愈好,一般都不有意加入,而在 GH2035A 合金中是作为合金元素必须加入的,而且 Al 还必须在成分范围内才合格; GH2035A 合金中加入了微量 B 元素,与 GH1035 合金不加 B 成为鲜明对照; GH2035A 合金中确定了只加 Ti 而不加 Nb,还允许加入微量 Mg 元素。本研究组的研究结果为 GH2035A 的成分确定提供了充分而可靠的依据。

选用 Fe-37Ni-22Cr-3W 为基础成分,用正交试验设计方法系统地研究了 Al、Ti、Nb、C、B 和 RE 等元素对 GH2035A 合金的性能和组织的影响,其中对室温拉伸性能和 700 °C、235 MPa 条件下持久性能的影响如图 1 和图 2 所示^[7]。有关分析结果表明^[8-9]: 1) Al 应作为合金元素加入。合金中加入 0.25%Al,抗张强度和屈服强度可分别增加 250 和 150 MPa,而达到 900 和 450 MPa 以上,伸长率和面缩率分别高于 30%和 50%,持久寿命由几小时延长至 150 h,远远超过技术指标要求,而不加 Al 或其含量低于 0.25%时,则合金性能达不到技术条件的要求;加 Al 不仅因为增加了 γ' 数量而显著提高合金的瞬时强度和持久强度,而且使 γ' 相的组成由 Ni_3Ti 转变为 $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$,大大提高了合金的稳定性; 2) 选用 Ti 而不用 Nb 作为强化元素。这是因为 Ti 的强化效果比 Nb 更显著,当 Nb 含量较低时强化不明显,要使强度达到技术条件要求, Nb 含量必须高于 1.2%,而 Ti 含量仅需 0.8%,同时 Nb 在合

金中的偏析程度高于 Ti 的,含 1.6%Nb 时,不仅形成大块 NbC,而且合金中还形成 μ 相; 3) 合金中加入微量 B。合金中含 0.005%B 时,持久寿命即由不含 B 的 130 h 提高到 500 h, B 含量增加到 0.01%时,寿命增加到 700 h;加 B 不仅使晶界 M_{23}C_6 相细块化,且生成颗粒状 M_3B_2 相,明显强化了晶界,持久断裂由典型的沿晶型转变为混合型,因此使合金的持久寿命和持久塑性大幅度提高; 4) 加入 0.05%稀土元素,可获得最佳拉伸性能和持久性能。采取上述 4 项改善措施后, GH2035A 合金的高温拉伸性能显著提高,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, GH2035A 合金与 GH1035 合金在 900 °C 的拉伸性能比较时,两者的抗拉强度和屈服强度相当,而前者的拉伸伸长率为 101%,后者的为 60%~65%。从图 3 还可看出,温度更高, GH2035A 合金的高温塑性更好。这说明 GH2035A 合金热加工性能更好,不易出现锻造裂纹。因此, GH2035A 合金的综合性能要明显优于 GH1035 合金的,全部解决了

图 1 Al、Ti 和 Nb 含量对 GH35A 合金拉伸及持久性能的影响^[7]Fig.1 Effect of content of Al, Ti and Nb on tensile and stress-rupture properties of alloy GH35A^[7]

图 2 B 和 RE 含量对 GH35A 合金拉伸及持久性能的影响^[7]Fig.2 Effect of content of B and RE on tensile and stress-rupture properties of alloy GH35A^[7]图 3 GH2035A 合金的瞬时性能^[7]Fig.3 Instantaneous tensile properties of alloy GH2035A^[7]

GH1035 合金存在的 3 大技术难题。1990 年 GH2035A 合金获得了中国发明专利证书(ZL90110284.9)^[10]。

2.2 在航空发动机上的应用

GH2035A 合金制作的 I 级涡轮内环、外环、止动环、支承环和 II 级分瓣涡轮外环等 6 种零件, 从 1987

年开始, 正式装用于 WJ5AI 发动机, 至 1991 年 4 月已出厂 208 台, 装于运七飞机, 在全国 15 个机场投入飞行。总飞行时间已超过 20×10^4 h, 单台最长飞行时间 3 099 h, 无任何故障。

此外, 该合金还用于制作 5 种 WJ5、WJ5A 发动机零件和 4 种 TB₂-117A 发动机零件投入使用。

GH2035A 合金不仅解决了 WJ5 系列发动机急需的重要高温材料, 使该系列发动机的正常生产及 WJ5AI 发动机的延寿工作得以进行, 而且它填补了我国高塑性锻材的空白, 具有优异的热加工性能和抗氧化性能, 在其它发动机和工业中也可推广应用。

“WJ5AI 发动机用 GH2035A 合金”在 1990 年获中国科学院科技进步奖一等奖, 1991 年获国家科技进步奖三等奖。

3 涡轮叶片用 DZ417G 合金

定向凝固镍基柱晶高温合金 DZ417G 是我国先进的第三代航空发动机的低压一、二级涡轮叶片材料, 从 1993 年项目论证, 1994 年国家计委正式立项, 至 2005 年年底通过技术鉴定, 前后 13 年, 本研究组进行了系统研究, 全面完成了研制任务。

DZ417G 合金是在 K417G 合金基础上研发成功的具有自主知识产权的专利合金^[11]。与 K417G 合金相比, DZ417G 合金具有独到特点, 主要创新点有以下方面。

3.1 化学成分中不加 Zr 而控制 P 含量

3.1.1 不加对热裂有害的 Zr 元素

表 6 所列为 DZ417G 合金和 K417G 合金的化学成分。从表 6 可见, DZ417G 合金的化学成分最大特点是去掉了约 0.7%Zr。本研究组的工作表明^[12], 去掉了 Zr 对 DZ417G 合金的室温和 900 °C 拉伸性能以及 760 °C 和 980 °C 持久性能没有明显影响。由于元素 Zr 强烈偏析于晶界, 使凝固温度区间增大, 促进晶界疏松形成, 有利于纵向热裂纹形成, 因此去掉 Zr 元素可显著抑制定向凝固过程中的热裂倾向, 相应地, 定向凝固工艺制备涡轮叶片的合格率大为提高。

3.1.2 利用 P 的有益作用

高温合金, 特别是铸造高温合金, 通常都把 P 看作是有害杂质, 希望 P 含量愈低愈好, 中科院金属研究所研制成功的低偏析高温合金就是一个典型的实例。本研究组研究了 P 含量对 DZ417G 合金力学性能

表 6 DZ417G 和 K417G 合金化学成分

Table 6 Chemical compositions of DZ417G and K417 alloys (mass fraction, %)

Alloy	C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	V	B
DZ417G	0.13–0.22	8.5–9.5	Bal.	9.0–11.0	2.5–3.5	4.8–5.7	4.10–4.70	0.6–0.9	0.012–0.024
K417G	0.13–0.22	8.5–9.5	Bal.	9.0–11.0	2.5–3.5	4.8–5.7	4.10–4.70	0.6–0.9	0.012–0.024

Alloy	Zr	Fe	Si	P	S	Pb	Bi	As	Sn	Sb
DZ417G	–	≤0.5	≤0.20	≤0.005	≤0.008	≤0.000 5	≤0.000 1	≤0.005	≤0.002	≤0.001
K417G	0.05–0.09	≤1.0	≤0.20	≤0.015	≤0.010	≤0.000 5	≤0.000 1	≤0.005	≤0.002	≤0.001

的影响。结果表明，P 含量对 DZ417G 合金持久性能影响最明显(见图 4^[1])。P 含量为 0.003%~0.015%时，DZ417G 合金持久时间达到峰值，相应持久塑性也很好。相关技术条件规定 P 含量≤0.005%，而根据几十炉 DZ417G 母合金的统计结果，工业生产的母合金的 P 含量都在 0.003%~0.005%范围，因此，没有必要把 P 含量降到 0.0005%以下，控制 P 含量在一个合适的低水平范围即可。

DZ417G 合金的 S 和 Fe 等有害元素都较 K417G 合金的低，有利于提高力学性能。

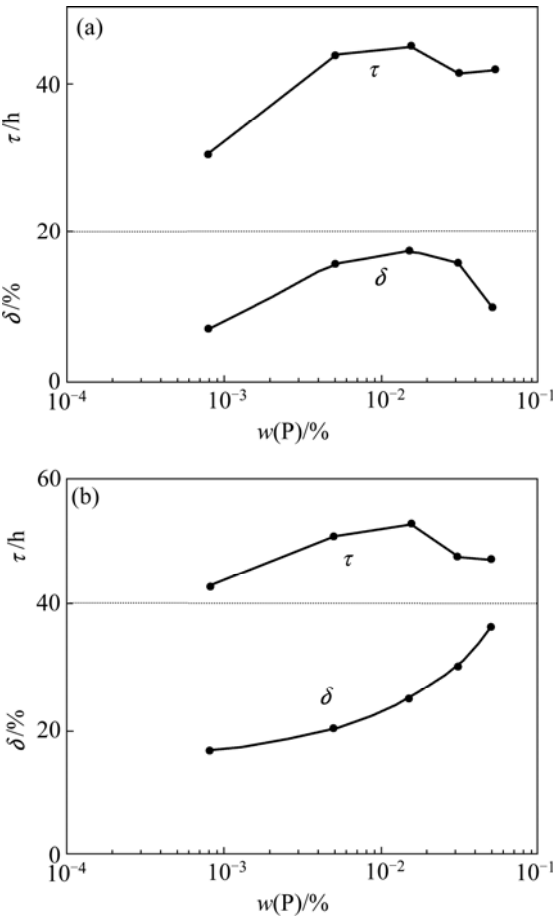


图 4 P 含量对合金持久性能的影响^[1]

Fig.4 Effect of P content on rupture properties^[1]: (a) 760 °C, 725 MPa; (b) 980 °C, 216 MPa

3.2 采用最佳热处理制度提高细小 γ' 相数量

通过系统研究，采用的最佳热处理制度为(1 220 °C, 2 h, AC)+(980 °C, 16 h, AC)。对于 DZ417G 合金，固溶处理温度愈高，细小 γ' 相数量愈多，因而持久时间愈长，见图 5^[11]，但固溶处理温度高达 1 240 °C，明显降低拉伸塑性，所以选定固溶处理温度为 1 220 °C。时效处理温度选定为 980 °C，是因为该温度时效处理持久时间最长，见表 7^[11]，而 K417 合金则不需要热处理，在铸态下直接使用。

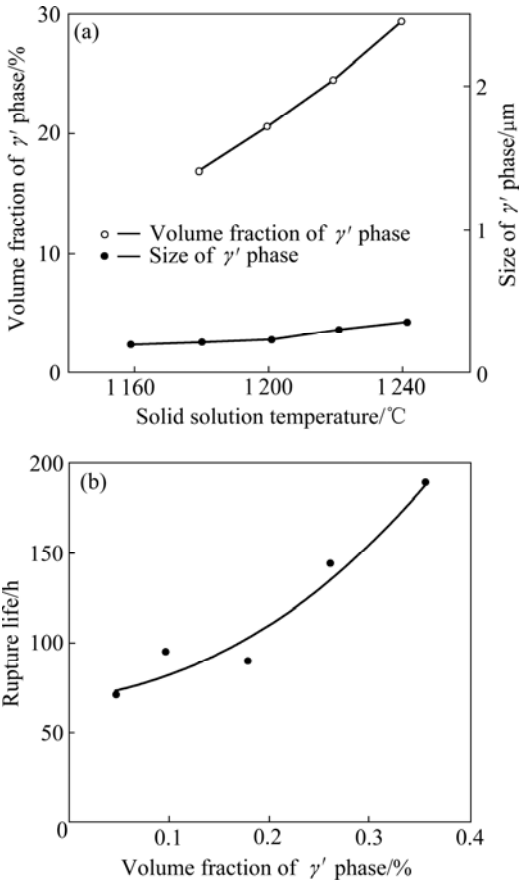


图 5 固溶处理温度对 γ' 相体积分数和尺寸的影响(a)以及 γ' 相体积分数对持久时间的影响(b)^[13]

Fig.5 Effect of solid solution temperature on volume fraction and size of γ' phase(a) and effect of γ' phase volume fraction on rupture properties(b)^[13]

表 7 时效温度对 DZ417G 合金在 760 °C 和 725 MPa 下持久性能的影响^[13]

Table 7 Effect of aging temperature on rupture properties of DZ417G at 760 °C and 725 MPa^[13]

Aging temperature/°C	τ_r/h	$\delta/\%$
As-cast	76.5	18
900	11	5
950	51.5	9
980	139.5	21
1 020	7	12

3.3 采用定向凝固工艺制成定向柱晶组织改善力学性能

定向凝固柱晶高温合金组织的最大特点是晶粒沿主应力方向呈柱状晶排列, 柱晶取向通常为 $\langle 001 \rangle$, 并且消除了横向晶界。工业生产中柱晶取向与主应力方向之间有一定偏差, 通常控制在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 以内。

等轴晶高温合金(包括变形和铸造高温合金)在高温应力状态, 晶界成为薄弱环节, 而那些与主应力轴垂直的横向晶界, 受到的正向拉应力最大, 因而成为裂纹的形核与扩展的有利位置。定向凝固柱晶高温合金消除了横向晶界, 对于合金力学性能的改善是十分有利的。DZ417G 合金制成定向柱晶合金后力学性能明显提高。

3.3.1 蠕变断裂性能的提高

DZ417G 定向凝固柱晶高温合金由于消除了薄弱的横向晶界, 只有平行于主应轴的纵向晶界, 因而推迟了蠕变裂纹的形核与扩展, 使蠕变断裂时间(持久时间)明显延长; 同时, 使第三阶段蠕变应变明显增加, 因而使蠕变断裂塑性(持久塑性)明显改善。例如在 900 °C, 300 MPa 条件下, 定向柱晶合金的持久时间比同一成分的等轴晶合金的高出 1 倍, 而其持久塑性则高出 2 倍, 如表 8 所列^[1]。

表 8 DZ417G 合金的持久性能与同成分等轴晶合金的比较^[1]
Table 8 Comparison of rupture properties of DZ417G with columnar crystalline and conventional cast alloy with same composition^[1]

Condition	$t/^\circ\text{C}$	σ/MPa	τ/h	$\delta/\%$	$\psi/\%$
Directional solidification	900	300	275	16.1	42.2
Conventional cast	900	300	124	5.1	12.3

3.3.2 抗冷热疲劳性能的改善

对于定向凝固 DZ417G 合金, $\langle 001 \rangle$ 取向的纵向

弹性模量 E 值为 134 GPa, 横向弹性模量 E 值为 155 GPa, 而同成分等轴晶合金为 201 GPa。在 1 000 °C 保温 100 s, 在 25 °C 水中冷却 35 s 条件下, 经 338 次循环后, DZ417G 合金横向试样(其缺口方向为 $\langle 001 \rangle$)和纵向试样(缺口方向为非 $\langle 001 \rangle$)的裂纹长度。结果表明, 横向试样裂纹长度为 1.0 mm, 而纵向试样裂纹长度达 3.3 mm。也就是说, 横向试样的热疲劳裂纹长度仅为纵向试样的三分之一, 具有最低弹性模量的 $\langle 001 \rangle$ 取向的横向试样的抗冷热疲劳性能最好^[14]。这是因为冷热疲劳性能的好坏取决于材料环境温度变化 ΔT 的大小。而环境温度的变化必然在材料内产生热应力 $\Delta \sigma$, $\Delta \sigma$ 可以由下式估算:

$$\Delta \sigma = E \alpha \Delta T \quad (2)$$

式中: α 为线膨胀系数, E 为弹性模量。可见在 α 和 ΔT 相同或相近的情况下, E 值越小, 其热应力的变化 $\Delta \sigma$ 也越小, 因而材料的冷热疲劳寿命越长, 抗冷热疲劳性能越好。

定向凝固柱晶高温合金, 晶粒的 $\langle 001 \rangle$ 取向平行于主应力方向。而 $\langle 001 \rangle$ 取向的弹性模量与其他方向比较是最低的, 而且比等轴晶材料要低 30%~35%, 也就是在同样热循环中所承受的 $\Delta \sigma$ 也比等轴晶材料所承受的 $\Delta \sigma$ 低 30%~35%, 这样就延长了热疲劳寿命。

3.4 DZ417G 合金的特点与应用

DZ417G 合金的特点如下。

1) DZ417G 合金成分简单, 不含稀缺贵金属元素, 因而该合金密度小、成本低。

2) DZ417G 合金从室温至高温瞬时拉伸性能良好, 无缺口敏感性, 横向性能优异, 其中最突出的优点是室温至高温的拉伸塑性优异, 且室温冲击韧性高。DZ417G 合金的拉伸性能明显优于 DZ404 和 DZ422 合金的^[15]。

3) DZ417G 合金的持久强度满足先进航空发动机的要求。DZ417G 合金的持久强度与国外第二代柱晶合金 DS CM247LC 和国内 DZ404 合金处于同一水平, 比强度与 DZ422 的相同, 且持久塑性明显高于 DZ404 合金的^[15]。

4) DZ417G 合金的室温与高温疲劳性能良好, 与 DZ422 和 DZ4125 合金处于同一水平, 但高于 DZ404 合金。DZ417G 合金的冷热疲劳性能优于 DZ404 合金的^[15]。

5) 高温长期时效后, DZ417G 合金的组织 and 力学性能稳定, 合金中 γ' 相质量分数保持在 60%, 力学性能满足要求^[15]。

6) DZ417G 合金的高温抗氧化性能满足要求, 抗热腐蚀性优于 DZ404 合金的。

7) DZ417G 合金综合性能优异, 已用作先进航空发动机低压一、二级涡轮叶片等零件, 投入批量生产^[14]。

DZ417G 合金及其它 3 种高温合金以“先进发动机高低压涡轮 6 种叶片用 4 种高温合金及工艺研究”项目于 2008 年获中华人民共和国工业和信息化部科学技术进步奖一等奖, 并被推荐评审为国家科技进步一等奖。

4 过热器管材用铁基高温合金 GH2984

本研究组^[16-17]于 20 世纪 60 年代末开始研制一种适合我国高参数舰船主锅炉过热器管长期使用的新铁基高温合金 GH2984。至 20 世纪 70 年代研制成功并生产用于新型主锅炉过热器管材, 装载舰船并经十年海上实际使用考核。全面检查表明, GH2984 合金管完好无损, 还可继续使用^[16]。GH2984 合金是过热器管的主要用材, 其主要性能与美国特殊金属公司 2003 年正式公布的镍基合金 Inconel 740 合金处于同

一水平, 而价格要便宜得多, 这也为我国高参数超临界机组早已作好了过热器和再热器材料的技术储备。GH2984 合金的主要特点有如下几方面^[16]。

4.1 GH2984 合金的化学成分特点

与国外类似高蒸汽参数过热器管材合金比较, GH2984 合金中不含 Co, 而 Inconel 740、Inconel 617 和 Nimonic 263 等合金都含有 12%~21%Co。而且 GH2984 合金含 Fe 达 32%~34%, 相应 Ni 含量减少, 其他合金中 Fe 均为杂质元素, 如表 9 所列。GH2984 合金的成分特点将带来十分可观的经济效益。

4.2 GH2984 合金优异的力学性能

GH2984 合金的室温至高温拉伸强度以及 650~750 °C持久强度非常良好, 其室温和 700 °C拉伸强度明显高于常用高性能管材合金 Inconel 625 和 Nimonic263 的, 如表 10 所列^[15]。其持久强度高于 Nimonic 263 合金的, 与 Inconel 625 合金的相近。其 3 万小时和 10 万小时的持久强度在 700 °C时与 Inconel 740 合金的处于同一水平, 而其在 650 和 750 °C时的持久强度也基本与 Inconel 625 和 Nimonic263 合金的处于同一水平, 如图 6 所示^[13]。

表 9 过热器管材用高温合金的化学成分^[16]

Table 9 Chemical compositions of superalloys used for superheater tube^[16] (mass fraction, %)

Alloy	C	Cr	Co	Mo	Nb	Ti	Al	Fe	Si	Mn	Ni
GH2984	0.04-0.08	18-20	-	1.8-2.2	0.9-1.2	0.9-1.2	0.2-0.5	32-34	≤0.5	≤0.5	Bal.
Inconel 740	0.06	24.97	19.80	0.58	2.01	1.69	0.87	0.71	0.47	0.30	Bal.
Inconel 617	0.09	21.65	12.0	8.72	-	0.31	1.16	≤2.50	0.58	0.54	Bal.
Nimonic 263	0.04-0.08	19-21	19-21	5.6-6.1	-	1.9-2.4	≤0.60	≤0.70	≤0.4	≤0.6	Bal.
Inconel 625	≤0.10	20-23	≤1.0	8.0/10.0	3.15-4.15	≤0.40	≤0.40	≤5.0	≤0.5	≤0.5	Bal.

表 10 几种过热器管材用高温合金的力学性能^[16]

Table 10 Mechanical properties of some superalloys used for boiler tube^[16]

Alloy	Tensile property at room temperature				Tensile property at 700 °C				Rupture strength/MPa	
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ %	φ %	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ %	φ %	700 °C, 3×10 ⁴ h	700 °C, 10 ⁵ h
GH2984	1107	686	26.6	46.6	745	539	34.4	52.3	149	130
Inconel740	1150	705	30.0	39.0	905	650	37.0	44.5	149	130
Inconel625	960	514	48.0	-	651	398	40.0	-	162	-
Nimonic263	960	580	43.0	46.0	740	490	26.0	34.0	120	100

Standard heat treatment of GH2984 alloy is (1 100 °C, 1 h, AC)+(700 °C, 8 h, 50 °C/h cooled to 650 °C, 16 h, AC)

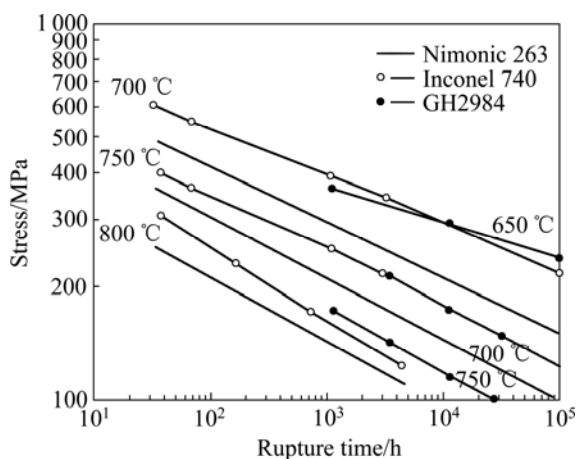


图 6 GH2984、Inconel 740 和 Nimonic 263 合金在不同温度下的持久强度^[16]

Fig.6 Stress rupture properties of GH2984, Inconel 740 and Nimonic 263 alloys at different temperatures^[16]

4.3 GH2984 合金良好的耐蚀性

由于合金的 Cr 含量达 18%~20%，可以形成致密而牢固的 Cr_2O_3 为主的氧化膜，所以抗氧化性和抗热腐蚀性良好。表 11 列出了 GH2984 合金经 700~900 °C 氧化 100 h 的氧化速率数据^[14]。由表 11 可知，700 °C 的平均氧化速率仅为 0.005 8 g/(m²·h)，远小于舰船对合金材料的氧化速率低于 0.009~0.15 g/(m²·h) 的要求，明显优于同类型铁基合金 GH2135 和 GH1140 的氧化速率。

表 11 3 种铁基高温合金在 700~900 °C 氧化 100 h 的平均氧化速率^[16]

Table 11 Average oxidation rates of three Fe base superalloys at 700~900 °C for 100 h^[16]

Alloy	Average oxidation rate/(g·m ⁻² ·h ⁻¹)		
	700 °C	800 °C	900 °C
GH2984	0.0058	0.020	0.0738
GH2135	0.019	0.042	0.095
GH1140	0.014	0.028	0.139

将 3 种合金置于 25%NaCl+75%Na₂SO₄ 熔盐强腐蚀介质中，经 650~820 °C 保温 3 h，测得热腐蚀质量损失。结果表明(见表 12)^[16]，GH2984 合金的腐蚀速率在 750 °C 以下，与对比试样 GH1140 和 GH2135 合金腐蚀速率基本相当，750 °C 以上 GH2984 合金的耐热腐蚀性能最好。单管燃气腐蚀用燃料为舰船燃气轮机使用的轻柴油，盐雾用配制的人造海水加入，为加

速实验进行，采用高盐浓度(10⁻⁴)，实验温度为 900 °C，时间为 25 h。实验结果(见表 12)表明，GH2984 合金的抗热腐蚀性能比 GH2135 合金的好，与 GH1140 合金的相当，远远优于镍基铸造高温合金 K403 的，如表 12 所列^[16]。

另外，GH2984 合金的抗晶间腐蚀性能优异，在各种不同热处理状态或焊接后都不发生晶界腐蚀。

表 12 几种合金的热腐蚀试验质量损失^[15]

Table 12 Heat-corrosion data (mass loss) of several alloys^[15]

Alloy	Mass loss/(g·cm ⁻² ·h ⁻¹)				
	In crucible			In gas tube	
	650 °C	700 °C	750 °C	820 °C	900 °C
GH2984	0.40	1.29	1.63	1.24	0.28
GH1140	0.63	0.85	3.50	152.0	0.19
GH2135	0.94	1.92	3.16	46.23	0.94
GH403 ^[7]	—	—	—	—	0.24

4.4 GH2984 合金稳定的显微组织

研究表明，GH2984 合金经 700 °C、(0.1~1.8)×10⁴ h 长期时效后的组织和力学性能比较稳定，满足大型舰船及超超临界电站锅炉长期使用的需要。

GH2984 合金经标准热处理后， γ 奥氏体基体的晶粒度为 4~6 级，晶界析出相较少， γ' 相呈球形，弥散均匀分布于 γ 基体， γ' 相直径约 23 nm，数量为 5.74%，是合金的主要强化相。此外，还有少量 MC 相，包括 NbC，Ti(N,C)，它们是凝固结晶过程中析出的，分布于晶内和晶界，尺寸大小为 1~10 μm ，在 GH2984 合金中的数量为 0.52%。

GH2984 合金经 700 °C 不同时间长期时效后， γ' 相颗粒半径随时效时间 $t^{1/3}$ 呈直线增加，遵循一般颗粒长大速率的扩散控制粗化动力学规律， γ' 相的数量缓慢增加，到 18×10^3 h 增加至 7.23%(见表 13)。 γ' 相数量的增加补偿了 γ' 相长大对合金强度的影响。 γ' 相成分的分析表明，长期时效过程中 γ' 相化学组成变化不大。

GH2984 合金在 700 °C 长期时效过程中，NbC 和 Ti(CN) 等碳化物的数量略有增加(见表 13)^[17]，由标准热处理状态的 0.52% 增加至 18×10^3 h 的 0.66%，且化学成分基本不变，只是在 18×10^3 h 时效后，碳化物中有少量 Cr 出现，显然是 M_{23}C_6 在晶界沉淀增多的结果。电镜观察表明，晶界上析出一些块状 M_{23}C_6 和 σ 相，前者可阻止晶界滑动，有利于持久强度的提高，后者由于数量少，且以块状或颗粒状占绝对优势，对力学性能影响很小。

表 13 GH2984 合金在长期时效过程中 γ' , MC 和 σ 相数量变化^[17]

Table 13 Amount changes of γ' , MC and σ phases of GH2984 alloy during long-time aging^[17] (mass fraction, %)

Phase	Standard heat treatment (ST)	ST+ (700 °C, 5 × 10 ³ h)	ST+ (700 °C, 9 × 10 ³ h)	ST+ (700 °C, 12 × 10 ³ h)	ST+ (700 °C, 18 × 10 ³ h)
γ'	5.74	6.48	—	6.85	7.23
Carbide	0.52	0.52	—	0.55	0.66
σ	—	0.19	0.62	1.01	1.79

4.5 GH2984 合金的成形工艺性能

GH2984 合金的冷热压力加工性能好,特别是管材成形性能优异。由 900~1 300 °C 的高温冲击、高温拉伸、高温墩粗和高温扭转及晶粒长大倾向性的系统试验表明, GH2984 合金高温塑性良好,变形抗力低,热加工温度范围宽,晶粒长大倾向性小^[18]。

GH2984 合金热穿管坯料的加热温度为 1 100 °C,穿管时温度升高达 1 160~1 180 °C,穿出的荒管质量较好,成品率较高。各种工艺参数控制得当时,穿管成品率可达 100%, GH2984 合金冷轧冷拔工艺性能与 1Cr18Ni9Ti 合金的相似,无论是采用单一的冷轧或冷拔工艺,还是采用冷轧与冷拔联合工艺,进行冷变形时均可获得表面质量和尺寸公差符合要求(YB804—20)的标准钢管。

GH2984 合金管的扩口性能良好,在不同热处理制度下均能很好地扩口,扩口率达 38%。同时,管子压扁性能也很好,管壁间距达壁厚的 3~4 倍,也无任何问题。弯管实验在弯管机上进行,弯管半径为 65 mm,弯管角度为 180°,弯管性能良好,表面光滑无裂纹。

GH2984 合金管的胀管性能极好,特别适于舰船用胀接式过热器的制作。胀管实验结果见表 14^[16],胀管后经 400、600、1 000 和 1 200 N/cm² 水压打压后,滴水不漏,表明胀管性能优异,在舰船上实际安装工

艺性能试验证明, GH2984 合金管与 15CrMo 合金管胀接时,胀管率在 1.4%~4.4%之间, GH2984 合金管没有发生起皮和裂纹等问题,满足冷态下的胀接与超压试压需要,完全符合锅炉冷态安装技术要求,也能满足超级超临界电站锅炉过热器制造需要。

4.6 GH2984 合金的应用

GH2984 合金力学性能和化学性能优异,工艺性能良好,长期组织和力学性能稳定,是一种成本低廉的过热器管材用铁基高温合金,适于制作舰船用锅炉过热器,也可制作超级超临界电站锅炉用过热器和再热器。1992 年“GH2984 舰船用锅炉过热器高温管材合金”获中国科学院科技进步奖一等奖。

5 舰用燃气轮机涡轮叶片和导向叶片用 5 种抗热腐蚀高温合金

2001 年,本研究组承担了一种先进舰用燃气轮机全部涡轮叶片和导向叶片用 5 种抗热腐蚀高温合金 K444、K435、K452、K446 和 GH4413 的研制。通过相计算和热腐蚀微观机制等基础研究,确定了合金的最佳成分控制范围,通过控制固溶处理冷却速率,调整主要强化相 γ' 相的尺寸和晶界碳化物的形态,解决了上述高 Cr、W、Mo 含量合金的室温和中温低塑性的技术难题。铸造镍基合金 K444 为 1~2 级涡轮叶片材料,属于 BC 合金。铸造镍基合金 K435 为 3~4 级涡轮叶片材料。变形镍基高温合金 GH4413 为 5~6 级涡轮叶片材料。铸造镍基高温合金 K452 为 1~6 级导向叶片材料。铸造镍基合金 K446 是燃气轮机整流支柱用材料。所有这 5 种合金均属抗热腐蚀高温合金,2005 年通过了技术鉴定。目前已批量提供母合金及热轧棒材,制备出全部 6 级涡轮叶片和导向叶片以及整流支柱零件,并已通过 850 h 长期试车考核。

2003 年, K444 合金还被选作 R0110 重型燃机 1~4 级涡轮叶片材料, K452 合金还被选作这种重型燃气轮

表 14 GH2984 合金胀管实验情况^[16]

Table 14 Expanding tube experiments of GH2984 alloy^[16]

Sample No.	Diameter/mm	Inner diameter/mm	Outer diameter/mm	Slit/mm	Inner diameter after expanding/mm	Expending amount/mm	Expending ratio	Water pressure/(N·cm ⁻²)
1	25.38	21.05	24.96	0.42	22.00	0.95	2.09	1 200
2	25.33	21.02	24.99	0.34	21.72	0.70	1.4	1 200
3	25.33	20.33	25.08	0.25	20.97	0.64	1.5	1 200
4	25.24	21.12	24.97	0.27	21.70	0.58	1.4	1 200

机 1~4 级导向叶片材料, K446 合金同样被选作这种重型燃气轮机的整流支柱材料。今年将生产两台 R0110 重型燃机正式用于发电生产。与航空发动机用高温合金一样, 抗热腐蚀高温合金要求具有良好的力学性能和化学性能, 此外, 还特别要求抗热腐蚀性能优异, 长期组织和力学性能的稳定性和特别好。本研究组研制的 5 种抗热腐蚀高温合金的主要化学成分见表 15^[19]。由表 15 可见, 本研究组研制的 5 种抗热腐蚀高温合金与西方国家同类合金比较, 不含 Ta 是最大的特点。因此, 这些合金的成本比含钽合金的要低得多。例如, 合金中如含 2%Ta, 那么成本将增加 12~20 万元/t, 显然不含 Ta 的抗热腐蚀合金所带来的经济效益是十分可观的。5 种抗热腐蚀高温合金杂质元素的含量控制到了国内所有高温合金的最低水平, 达到国际先进水平, 而有益微量元素的加入种类和数量有创新, 是化学成分中的最大特点。

5.1 合金的优异抗热腐蚀性能

抗热腐蚀高温合金性能的最大特点是抗热腐蚀性能优异。本研究组研制的镍基合金 K435、K452 和

K444 合金的抗热腐蚀性能都优于 K438 合金的(见表 16)。表 16^[19]表明: K435、K444 和 K452 合金的抗热腐蚀性能都明显优于 K438 合金的, 而 K438 合金即 IN738 合金是西方的王牌抗热腐蚀高温合金。K435、K444 与 K438 合金的 Cr 含量基本相同, 但前两合金 (W+Mo) 含量为 7.2%, W/Mo 比为 2.75, 较 K438 合金相应的 4.4%和 1.44 要高得多, 同时, 前两合金 (Al+Ti) 含量为 7.4%, γ' 相数量约为 50%, Ti/Al 为 1.64, 而 K438 合金的相应值为 6.8%, 47%~49%和 0.94。在 γ' 相数量相近的情况下, W/Mo 比和 Ti/Al 比高对抗热腐蚀性能有益。而 K452 合金与 K438 合金比较, 最突出的特点是 Cr 含量更高, 为 21%, 高于 K438 合金的 16%, 同时 W/Mo 比与 Ti/Al 比都比较高, K452 合金显示出更优异的抗热腐蚀性能^[19]。

抗热腐蚀镍基变形高温合金 GH4413 的 Cr 含量在 15%左右, 较航空发动机常用变形合金涡轮叶片材料 GH4049 的 Cr 含量(10%左右)提高约 5%, 而且 γ' 相含量仅为 29%, 较 GH4049 合金的 36%要低 7%, 同时, W/Mo 比也较高。所以, GH4413 合金的抗热腐蚀性能在 850 °C 时较 GH4049 合金的要好(见表 17)^[14]。前

表 15 5 种抗热腐蚀合金的化学成分^[19]

Table 15 Chemical composition of five kinds of hot corrosion resistance alloys (mass fraction, %)^[19]

Alloy	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	B	Zr	Ni	Others
GH4413	0.07	14.5	—	6.0	3.3	2.7	2.0	—	0.02	—	Bal.	V, 0.6; Ce, 0.020
K435	0.09	15.9	11.3	5.5	2.0	2.8	4.6	0.2	0.02	0.05	Bal.	Mg, 0.01; Ce, 0.015
K444	0.06	15.9	10.8	5.3	2.0	3.1	4.6	0.2	0.08	0.05	Bal.	Ce, 0.015; Hf, 0.3
K446	0.09	16.0	—	5.0	3.5	1.8	2.4	1.1	0.01	0.01	Bal.	Fe, 15; Ce, 0.01
K452	0.11	21.0	11.2	3.5	0.6	2.5	3.5	0.3	0.02	0.04	Bal.	

表 16 K435、K444、K452 与 K438 合金的抗热腐蚀性能^[19]

Table 16 Hot corrosion resistance of K435, K444 and K438 alloys^[19]

Alloy	Test condition	Average corrosion rate/ (mg·cm ⁻² ·h ⁻¹)	Alloy	Test condition	Average corrosion rate/ (mg·cm ⁻² ·h ⁻¹)
K435	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3,	0.28	K435	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3,	0.934
K438	900 °C, 20 h	5.41	K438	700 °C, 100 h	1.994
K444	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3,	0.12	K444	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3,	1.20
K438	900 °C, 100 h	1.90	K438	700 °C, 200 h	1.64
K452	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:9,	0.148	K452	—	—
K438	900 °C, 300 h	Serious corrosion, cannot be measured	K438	—	—

Data from contrast test result in the same condition.

者用作舰用燃气轮机的 5~6 级涡轮叶片, 而后者大多用作航空发动机 1 级涡轮叶片。

5.2 合金的稳定力学性能

抗热腐蚀高温合金性能的另一特点是高温长期暴露力学性能稳定。抗热腐蚀高温合金由于在高温长期时效或长期使用过程中组织稳定, 通常仅有 γ' 相的缓慢长大和数量增加以及碳化物少量变化, 没有 TCP 相的大量析出, 因而力学性能不出现急剧降低的情况。图 7^[20-21]所示为 K435、K452、K444 和 GH4413 合金在其使用温度进行长达 10 000 h 的持久试验结果。由

图 7 可知, 除 K444 合金外, 其它 3 个合金持久曲线没有拐点, 证明持久性能稳定。K444 合金金属电子空穴数临界值边缘合金, 由于在持久试验过程组织中形成 σ 相, 900 °C 曲线出现拐点, 但在化学成分范围内严格控制元素含量, 可以避免 σ 相析出。图 8^[22]表明, 导向叶片用抗热腐蚀铸造镍基高温合金 K452 经 800~900 °C 时效 10 000 h 后, 900 °C 抗拉强度、屈服强度和塑性变化不大。

5.3 抗热腐蚀高温合金的应用

采用本研究组研制的 5 种抗热腐蚀高温合金制造

表 17 GH4413 与 GH4049 抗热腐蚀性比较^[14]

Table 17 Hot corrosion resistance of GH4413 and GH4049 alloys^[14]

Alloy	Test condition	Average corrosion rate/ (mg·cm ⁻² ·h ⁻¹)	Experiment condition	Average corrosion rate/ (mg·cm ⁻² ·h ⁻¹)
GH4413	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3, 850 °C, 20 h	9.29	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3, 700 °C, 20 h	2.81
GH4049	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3, 850 °C, 20 h	32.99	Mass ratio of NaCl to Na ₂ SO ₄ =1:3, 700 °C, 20 h	1.09

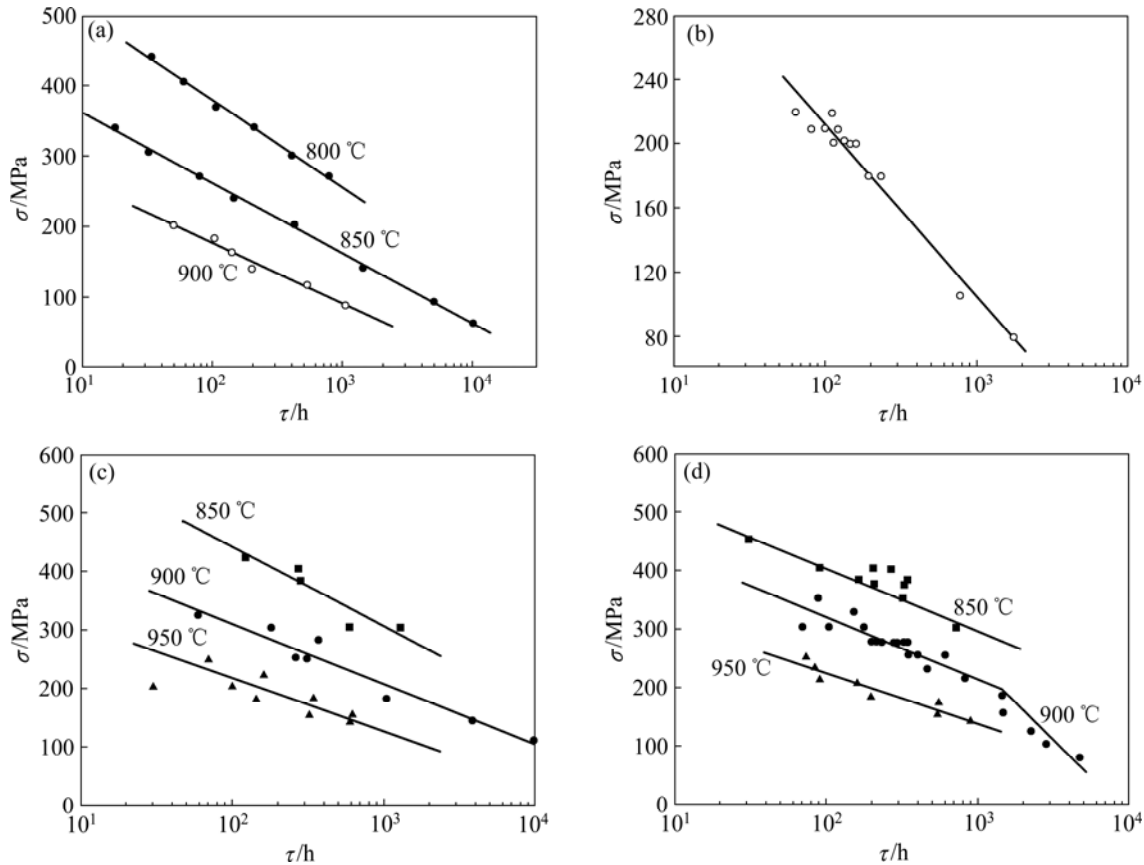


图 7 GH4413、K452、K435 和 K444 合金在不同温度工作长达 10 000 h 后的持久试验结果^[20-21]
Fig.7 High-temperature rupture stress up-to rupture time of 10 000 h at different temperatures for GH4413(a), K452(b), K435(c) and K444(d) alloys^[20-21]

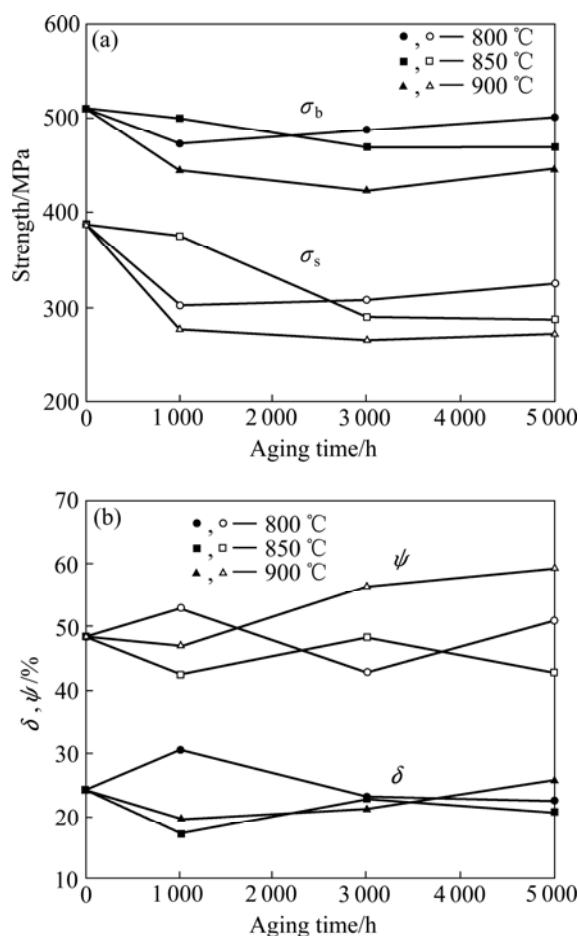


图8 高温长期时效对 K452 合金 900 °C 高温拉伸性能的影响^[22]

Fig.8 Effect of long-term aging on tensile properties of K452 alloy at 900 °C^[22]

的零部件已装备在一种先进舰用燃气轮机上,并通过了 850 h 长期试车考核和技术评审,可进行批量生产。这种发动机还可用作天然气输送管线的加压系统,或用于民用发电。采用 K444 和 K452 合金制成的 R0110 燃气轮机涡轮叶片和导向叶片也已通过试车考核,即将用于民用发电。

6 结论

1) GH2135 合金具有良好的低周疲劳性能以及屈服强度随温度的反常行为,特别适于制造航空发动机涡轮盘,是我国独创的第一个涡轮盘铁基高温合金。

2) GH2035A 合金具有良好的拉伸和持久性能,特别是高温塑性和热加工性能优异,适于制造航空发动机涡轮环形件,是一种具有自主知识产权的专利合金。

3) DZ417G 合金具有强度高、塑性好、组织稳定、密度低等特点,特别适于制作先进航空发动机的涡轮叶片和导向叶片,也是一种具有自主知识产权的专利合金。

4) GH2984 合金具有长达 100 000 h 的良好持久性能和耐蚀性能,以及优异的冷、热加工性能,而且成本低廉,适于制作舰船和高参数超临界锅炉用过热器和再热器管材,是我国具有自主知识产权的铁-镍基高温合金。

5) K444、K435、K452、K446 和 GH4413 等 5 种抗热腐蚀高温合金的最大特点是抗热腐蚀性能优异,长期组织和力学性能稳定性良好,适于制作舰船和工业燃气轮机用涡轮叶片、导向叶片和整流支柱等高温结构件。这 5 种合金在微量元素的种类和数量控制上有创新,具有自主知识产权。

REFERENCES

- [1] 郭建亭. 高温合金材料学(上册) [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
GUO Jian-ting. Materials science and engineering for superalloys (1) [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] 师昌绪, 肖跃天, 郭建亭, 张顺南. GH2135 铁基高温合金汇编[M]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1974.
SHI Chang-xu, XIAO Yao-tian, GUO Jian-ting, ZHANG Shun-nan. Iron-base superalloy GH2135 [M]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 1974.
- [3] 郭建亭, 师昌绪. 铝和钛对一种 35 镍 15 铬型铁基高温合金组织结构和力学性能的影响[J]. 金属学报, 1978, 14(3): 227-238.
GUO Jian-ting, SHI Chang-xu. The effect of aluminium and titanium on the microstructure and properties of a iron-base alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1978, 14(3): 227-238.
- [4] 《中国航空材料手册》编委会编. 中国航空材料手册(第 2 卷)[M]. 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Chinese Handbook of Aeronautical Materials (Volume 2) [M]. 2nd ed. Beijing: Chinese Specification Press, 2002.
- [5] 中国科学院金属研究所强度组. 涡轮盘合金的蠕变-低周疲劳复合试验及寿命估算[J]. 机械工程材料, 1979(2): 1-8.
Strength Group, Institute of Metal Research, CAS. Interaction of creep-low cycle fatigue and prediction of life of disc alloys [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1979(2): 1-8.
- [6] 郭建亭. GH2135 合金涡轮盘在航空发动机上大量使用[J]. 金属学报, 1995, 31(增刊): S126-S129.
GUO Jian-ting. Large scale employment of GH2135 alloy turbine discs in aeroengines [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(Supple): S126-S129.
- [7] 郭守仁, 卢德忠, 郭建亭, 徐岩, 吴晰, 马明喜. GH35A 变形高温合金的研制[J]. 金属学报, 1995, 31(增刊):

- S130-S136.
GUO Shou-ren, LU De-zhong, GUO Jian-ting, XU Yan, WU Xi, MA Ming-xi. Wrought superalloy GH35A[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(Supple): S130-S136.
- [8] 郭守仁, 卢德忠, 郭建亭, 吴 晰. 微量元素对 GH35 合金力学性能的影响[C]//徐志超, 马培立. 高温合金中微量元素的控制与作用. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 431-437.
GUO Shou-ren, LU De-zhong, GUO Jian-ting, WU Xi. The effect of minor elements on the mechanical properties of superalloy GH35[C]//XU Zhi-chao, MA Pei-li. The Effects and Controls of Minor Elements in Superalloys. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987: 431-437.
- [9] 卢德忠, 郭守仁, 郭建亭, 吴 晰. 铝、钛和铌对 GH35A 合金力学性能和组织结构的影响[J]. 材料工程, 1992(7/9): 127-128.
LU De-zhong, GUO Shou-ren, GUO Jian-ting, WU Xi. The effect of Al, Ti and Nb on the Microstructures and mechanical properties of GH35A alloy[J]. Journal of Material Engineering, 1992(7/9): 127-128.
- [10] 郭守仁, 芦德思, 吴 晰, 郭建亭. 一种铁镍铬基变形高温合金: 中国专利 ZL90110284.9[P]. 1993-10-10.
GUO Shou-ren, LU De-zhong, WU Xin, GUO Jian-ting. An iron-nickel-base wrought superalloy: CN ZL90110284.9[P]. 1993-10-10.
- [11] 郭建亭, 王淑荷, 李英敖, 张志亚, 李 辉, 殷为民. 一种定向凝固优质铸造镍基高温合金: 中国专利 ZL95110023.8[P]. 2000-04-28.
GUO Jian-ting, WANG Shu-he, LI Ying-ao, ZHANG Zhi-ya, LI Hui, YIN Wei-min. A directionally solidified cast nickel-base superalloy: CN ZL95110023.8[P]. 2000-04-28.
- [12] 郭建亭. 先进发动机低压一、二级涡轮叶片用 DZ417G 镍基合金和工艺的研究[R]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2000.
GUO Jian-ting. The investigation of nickel-base alloy DZ417G and its technology used as low pressure 1, 2 grades turbine blades in an advanced engine[R]. Shenyang: Institute of Metal Research, CAS, 2000.
- [13] 殷为民, 郭建亭, 王淑荷. 固溶处理温度对定向凝固高温合金 DZ417G 的组织性能的影响[J]. 金属学报, 1995, 31(增刊): S312-S315.
YIN Wei-min, GUO Jian-ting, WANG Shu-he. Effect of solid solution treatment temperature on microstructure and mechanical properties in directionally solidified DZ417G[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(Supple): S312-S315.
- [14] 郭建亭. 高温合金材料科学(下册) [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
GUO Jian-ting. Materials science and engineering for superalloys (III) [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [15] 郭建亭. 一种性能优异的低成本定向凝固高温合金 DZ417G[J]. 金属学报, 2002, 11(11): 1163-1174.
GUO Jian-ting. A directionally solidified nickel-base superalloy DZ417G with excellent properties and low cost[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 11(11): 1163-1174.
- [16] 郭建亭, 杜秀魁. 一种性能优异的过热器管材用高温合金 GH2984[J]. 金属学报, 2005, 14(11): 1221-1227.
GUO Jian-ting, DU Xiu-kui. A superheater tube superalloy GH2984 with excellent properties[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 14(11): 1221-1227.
- [17] 王淑荷, 杜秀魁, 许惠珍, 于长生, 郭建亭, 胡秋文. GH2984 高温合金管材合金的组织与性能[J]. 金属学报, 1995, 31(增刊): S137-S140.
WANG Shu-he, DU Xiu-kui, XU Hui-zhen, YU Chang-sheng, GUO Jian-ting, HU Qiu-wen. Mechanical properties and microstructure of a tube superalloy GH2984[J]. Acta Metallurgica, 1995, 31(Supple): S137-S140.
- [18] 中国科学院金属研究所, 冶金工业部上海第五钢铁厂, 造船总公司七院 703 所. GH2984 合金研制总结[R]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1991.
Institute of Metal Research, CAS, Shanghai No.5 Steel Plant, Harbin 703 Institute. The investigation of GH2984 superalloy[R]. Shenyang: Institute of Metal Research, CAS, 1991.
- [19] 郭建亭. 抗热腐蚀高温合金的研究与发展[C]//王静康. 现代化工、冶金与材料技术前沿, 中国工程院化工、冶金与材料工程学部第七届学术会议论文集. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1458-1465.
GUO Jian-ting. Investigation and development of hot corrosion resistance superalloys[C]//WANG Jing-kang. Frontiers of Modern Chemical Engineering, Metallurgy, and Material Technologies. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 1458-1465.
- [20] 袁 超, 李谷松, 郭建亭. 船用燃气轮机用 K452 合金研究报告[R]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2004.
YUAN Chao, LI Gu-song, GUO Jian-ting. Investigation of K452 alloy used in gas turbines for ships[R]. Shenyang: Institute of Metal Research, CAS, 2004.
- [21] 郭建亭, 周兰章, 袁 超. 八种高温合金的全面性能数据[R]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2010.
GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang, YUAN Chao. Comprehensive property data of eight superalloys[R]. Shenyang: Institute of Metal Research, CAS, 2010.
- [22] QIN X Z, GUO J T, YUAN C, CHEN C L, YE H Q. Effect of long-term thermal exposure on the microstructure and properties of case Ni-base superalloy[J]. Metall Mater Trans A, 2007, 38: 3014-3022.

(编辑 龙怀中)