

大型GH4698合金燃气机轮盘组织与力学性能研究

刘卫 朱鹏飞 赵腾宇 闫赞飞 刘亚妮

【摘要】 对我公司生产大型GH4698合金燃气机轮盘组织与力学性能进行分析研究，结果表明，由于变形条件不同，GH4698合金大型燃气机轮盘各部位组织及力学性能存在一定差异。晶粒尺寸对于GH4698合金大型燃气机轮盘抗拉强度、冲击韧度有一定影响。晶粒尺寸越小，GH4698合金大型燃气机轮盘抗拉强度、冲击韧度越高。

关键词： GH4698合金；燃气机轮盘；组织；力学性能

GH4698合金是一种以 γ' 相作为强化相的镍基沉淀硬化型高温合金，以Al、Ti、Nb元素进行时效强化，使用温度为750~800℃。此合金被广泛用于制造燃气机轮盘、涡轮盘、压气机盘、流片、承力环、紧固件等重要零件。我公司采用GH4698合金生产某大型燃气机轮盘，其直径达1200mm。本文对我公司生产燃气机轮盘的低倍组织、显微组织及力学性能进行系统研究。

1. 试验用料及工艺方法

大型燃气机轮盘用原材料选用直径为420mm GH4698合金棒材，化学成分如表1所示，原材料低倍相片如图1所示。从低倍组织可以看出，GH4698合金原材料无肉眼可见的空洞、裂纹、分层等冶金缺陷，符合相关标准要求。燃气机轮盘经我

公司400MN模锻液压机锻造，热处理在我公司 $\pm 5^\circ\text{C}$ 台车式热处理炉进行，热处理制度为 $1110^\circ\text{C} \times 8\text{h}$ ， $(Ac+1000^\circ\text{C}) \times 4\text{h}$ ， $(Ac+775^\circ\text{C}) \times 16\text{h}$ ， $(Ac+700^\circ\text{C}) \times 16\text{h}$ ， Ac 。

2. 锻造设备

GH4698合金燃气机轮盘燃气机轮盘在我公司400MN模锻液压机进行锻造（见图2）。400MN大型航空模锻液压机是我公司主要的锻造设备，该设备具有压力稳定、批量一致性好等特点，能够实现压制速度可控（0.01~60mm/s之间可任意选取）、压力可控。在生产大型盘类模锻件方面，可满足大压力、小变形量等工艺要求。

3. GH4698合金燃气机轮盘组织及力学性能分析

（1）表面低倍组织分析 图3为我公司生产两件燃气机轮盘表面低倍相片。从表面低倍组织可以看出，燃气机轮盘经表面腐蚀后，表面低倍未发现针孔、夹杂、裂纹、分层等冶金缺陷。



图1 GH4698合金原材料低倍相片

表1 GH4698合金原材料化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Cr	Ti	Al	Mo	Nb	Si	Mn
含量	0.03~0.07	13.0~16.0	2.35~2.75	1.45~1.80	2.80~3.20	1.90~2.20	<0.5	≤0.15

GH4698合金为粗晶合金，目视检查从表面低倍可看出表面晶粒大小。燃气机轮盘轮缘和幅板晶粒大小均符合技术要求，但同时从图3可以看出，幅板晶粒度明显大于轮缘处晶粒度，晶粒尺寸在一定大小范围内差异对燃气机轮盘力学性能不会产生明显影响。燃气机轮盘晶粒大小不均主要由于轮盘各部位受力不均、变形量不同导致，轮缘处变形量大于幅板处，使得轮缘处GH4698合金锻造时晶粒破碎程度大于腹板，晶粒尺寸相应变小。

(2) 试样环断口组织分析

图4为GH4698合金燃气机轮盘试样环断口组织相片。从图4可看出，燃气机轮盘内环和外环断口均为沿晶断口，但同时可以看出外环断口更加均匀，内环断口有一些韧窝和撕裂存在。韧窝和撕裂存在会加速断裂速度，导致韧性下降。

(3) 试样环显微组织及力学性能分析 选取我公司一炉GH4698原材料生产的两件燃气机轮盘作为研究对象，编号分别为1[#]、2[#]。图5为两件燃气机轮盘内环和外环的显微组织图片，表2、表3分别为1[#]和2[#]燃气机轮盘内外环的力学性能结果。

从图5可以看出，标准热处理后GH4698合金燃气机轮盘显微组织主要由 γ 基体、 γ' 相和硼化物组成。参照标准YB/T5148，对图5 GH4698合金燃气机轮盘晶粒度进行评级，可得出1[#]燃气机轮盘内环的晶粒度2级，外环晶粒度2~3级，2[#]燃气机轮盘内环晶粒度为1~2级，外环晶粒度为3~4级。



图2 400MN模锻液压机

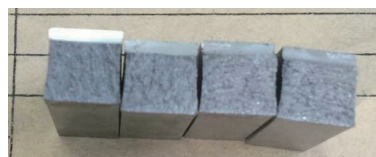


(a)



(b)

图3 燃气机轮盘表面低倍



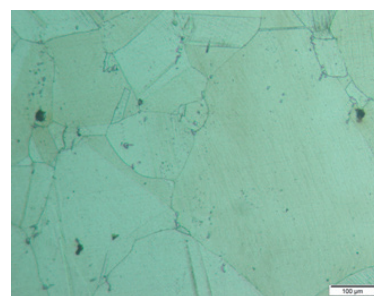
(a) 内环



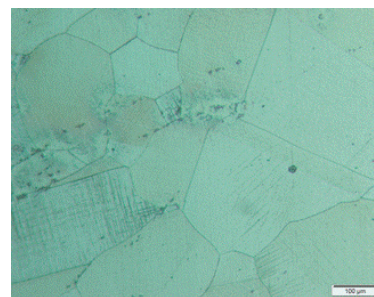
(b) 外环

图4 燃气机轮盘试样环断口组织相片

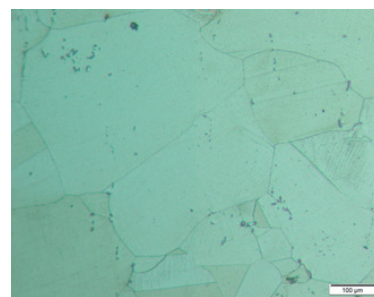
对比可以看出：①燃气机轮盘内环晶粒度明显大于外环晶粒度，这与表面低倍晶粒尺寸结果一致，是锻造变形量不同导致。②燃气机轮盘内、外环晶粒度均比较大，但内环显微组织中出现个别大晶粒。热处理后燃气机轮



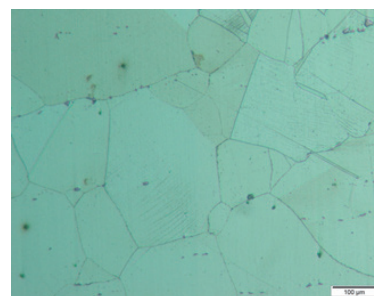
(a) 1[#]内环



(b) 1[#]外环



(c) 2[#]内环



(d) 2[#]外环

图5 燃气机轮盘显微组织

盘的晶粒度与变形量有关,即粗晶组织主要出现在变形量不足的区域。燃气机轮盘外环经过锻造充分变形后晶粒较大但很均匀,经热处理后晶粒进一步长大但无异常大晶粒出现,而内环由于变形量不足残留个别大晶粒,在热处理后,晶粒不均匀现象进一步严重。

由表2、表3数据可以看出,燃气机轮盘外环室温性能优于内环。通常情况下,合金组织越细小,相应抗拉强度越高。外环晶粒尺寸小于内环,所以内环抗拉强度比较高。燃气机轮盘内环和外环塑性差异不大,但冲击韧性最大差异将近 $20\text{J}/\text{cm}^2$ 。燃气机轮盘内环晶粒尺寸大,有利于对晶间裂纹的扩展和互相连通,从而使断裂过程加速。晶粒不均匀性对断裂过程有明显影响,这也是燃气机轮盘内环断口组织存在韧窝和撕裂现象的原因。燃气机轮盘外环晶粒尺寸小晶粒大小均匀,晶界面多,GH4698合金塑、韧性较好。相反,内环塑、韧性较低。

分别对比1[#]、2[#]燃气机轮盘

内外环力学性能,可以看出两个燃气机轮盘内环力学性能差异不大,结果与晶粒度结果一致。而两个轮盘外环力学性能中抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率均差异不大,2[#]燃气机轮盘冲击韧性明显高于1[#]燃气机轮盘,这主要与晶粒尺寸大小有关。1[#]燃气机轮盘外环晶粒尺寸大于2[#]燃气机轮盘外环晶粒尺寸,加速了断裂过程,使冲击韧性降低。

4. 讨论

由于燃气机轮盘尺寸很大,其各部位不同变形条件势必会对燃气机轮盘组织均匀性产生显著影响。本文燃气机轮盘各部位组织与力学性能存在不均现象,但力学性能合格能够满足使用要求。文中燃气机轮盘外环变形程度大于内环,使得燃气机轮盘外环表面低倍晶粒和显微组织晶粒度均小于燃气机轮盘内环,并且组织均匀性更好。燃气机轮盘力学性能与组织存在一定关系。燃气机轮盘外环晶粒度较小使得燃气机轮盘抗拉强度的得到提高,燃气机轮盘内环晶粒度较大影响了断裂的方式,导致燃气机轮盘

内环冲击韧性有了明显下降。对比两个燃气机轮盘力学性能,由于晶粒度存在差异同时也导致两个燃气机轮盘冲击韧性不同。GH4698合金作为粗晶合金,晶粒尺寸大小差异不是很大,但相同条件下,晶粒尺寸越小,晶粒均匀会使晶面增多,使晶间裂纹扩展速度减慢,GH4698合金的冲击韧性增加。

5. 结语

(1) 由于变形条件不同, GH4698合金大型燃气机轮盘各部位组织及力学性能存在一定差异。

(2) 晶粒尺寸对于GH4698合金大型燃气机轮盘抗拉强度、冲击韧性有一定影响。晶粒尺寸越小, GH4698合金大型燃气机轮盘抗拉强度、冲击韧性越高。

参考文献:

- [1] 左正, 等. 燃气轮机用GH4698合金 $\phi 1200\text{mm}$ 涡轮盘热处理研究[C]. 第十一届中国高温合金年会论文集, 2011: 221-223.
- [2] 梁永纯, 等. 长期时效对GH4698合金组织和性能的影响[C]. 第十一届中国高温合金年会论文集, 2007: 232-235.
- [3] 王卫红. GH4698合金特大型涡轮盘组织性能及热处理制度的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

作者简介: 刘卫、朱鹏飞、赵腾宇、闫赞飞, 西安三角防务股份有限公司; 刘亚妮, 西安石韵航空装配技术研发有限公司。

表2 1[#]燃气机轮盘试环力学性能

力学性能	抗拉强度 /MPa	断后伸 长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧性 /J·cm ⁻²	高温持久 (750℃, 720MPa)
外环	1258	21	26	68	≥50h
	1261	21	26	70	≥50h
内环	1226	20	23	65	≥50h
	1211	19	23	63	≥50h

表3 2[#]燃气机轮盘试环力学性能

力学性能	抗拉强度 /MPa	断后伸 长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧性 /J·cm ⁻²	高温持久 (750℃, 720MPa)
外环	1226	22	26	84	≥50h
	1240	22	23	80	≥50h
内环	1209	16	19	55	≥50h
	1208	18	19	63	≥50h

MW 20171027