DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.003

晶粒度对 GH4169 合金机匣力学性能及加工变形的影响

惠瑞拓,赵彦辉,何　俊,王　莹
(西安航空发动机有限公司 技术中心,陕西 西安 710021)

摘　要:通过对粗晶及细晶控制的两类 GH4169 合金高压涡轮外机匣的组织、力学性能、残余应力、加工变形等对比研究,探讨了晶粒度对零件力学性能、残余应力分布及加工变形的影响。结果表明,适当的粗晶控制,GH4169 合金可获得足够的强度及塑性,力学性能不会明显衰减;粗晶有利于降低机匣锻件残余应力,促进残余应力的均匀分布,改善零件的加工变形。

关键词:晶粒度;残余应力;加工变形
中图分类号:TG142; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)06-0518-04

Effects of Grain Size on Mechanical Properties and Machining Deformation of GH4169 Casing Parts

XI Ruituo, ZHAO Yanhui, HE Jun, WANG Ying
(Technology Center, AECC Xi'an Aero-Engine Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The microstructure, mechanical properties, residual stress and machining deformation of GH4169 alloy high-pressure turbine outer casing controlled by coarse and fine grains were comparative investigated, the effects of grain size on mechanical properties, residual stress distribution and machining deformation were discussed. The results show that with proper coarse grain control, the strength and plasticity of GH4169 alloy can be obtained, and the mechanical properties will not decrease obviously. The coarse grain is beneficial to reduce the residual stress of the forging parts, promote the uniform distribution of residual stress, and improve the machining deformation of parts.

Key words: grain size; residual stress; machining deformation

高压涡轮外机匣是一种结构复杂、薄壁、尺寸精度高、加工难度及余量大的航空发动机机匣零件,机匣加工后其内部存在不同程度的残余应力,致使机匣加工后端面和圆周有较大的变形。机匣变形会引起转静子碰磨、振动及性能损失等,不仅影响航空发动机的质量和使用安全,也严重制约新型航空发动机的研制和发展。

GH4169 合金高压涡轮外机匣锻件的显微组织是影响机匣应力分布及加工变形的重要因素,且机匣锻件晶粒度要求较为宽泛,因此研究晶粒度控制对合金力学性能、残余应力分布及其零件加工变形的影响意义重大,也为探索锻件毛坯残余应力控制对改善薄壁机匣加工变形的影响提供技术积累。本文主要针对粗、细晶控制的 GH4169 合金高压涡轮外机匣锻件,开展了不同晶粒度对合金力学性能、毛坯残余应力分布及其对后续机匣零件加工变形的影响研究。

1　试验材料及方法

1.1　试验材料

高压涡轮外机匣材料为 GH4169 合金,毛坯为异形轧环件,原材料采用真空感应+电渣重熔+真空自耗重熔,其主要化学成分 w(%)为:0.022 C、0.057 Mn、0.082 Si、18.05 Cr、53.56 Ni、<0.010 S、<0.010 P、0.030 Cu、2.96 Mo、0.21 Co、0.53 Al、0.88 Ti、0.005 B、5.41 Nb、0.002 Mg、<0.01 Ta。涡轮外机匣锻件毛坯采用镦粗、冲孔、预扩孔、异形终轧的主导工艺,经热处理并粗加工后的锻件轮廓及零件结构如图 1 所示。

1.2　试验方法

采用“预轧两火大变形+异形终轧两火小变形”、“预轧三火小变形+终轧一火大变形”两种工艺分别获得晶粒度约为 5 级(粗晶)和 7 级(细晶)的两类机匣锻件,经最终热处理和粗加工,锻件解剖后按图 2 要求进行上、中、下 3 处的理化性能检测,检测

收稿日期:2020-03-20
作者简介:惠瑞拓(1988-),陕西澄城人,硕士,工程师.主要从事高温合金方面的工作.电话:13772053412,
E-mail:huiruituo.325@qq.com

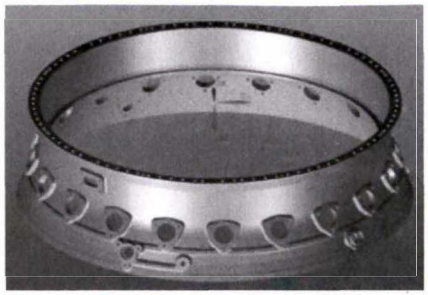



图 1 涡轮外机匣锻件及零件结构

Fig.1 Forging and final machined component of the turbine casing

项目主要包括高倍组织、硬度、室温及高温拉伸性能；采用 ϕ2 mm 盲孔法进行涡轮外机匣锻件的残余应力检测，检测位置为锻件小端端面及小端内径面，测点位置如图 2 所示，两处各周向均布 8 点测量；同批锻件经零件加工，以涡轮外机匣零件大端定位槽中心为角向 0 点，在消除应力前后、车铣加工前后分别对小端内壁均布 8 点进行检测，测量并计算监测位置圆度及平面度，机械加工变形情况监测方案见图 3。

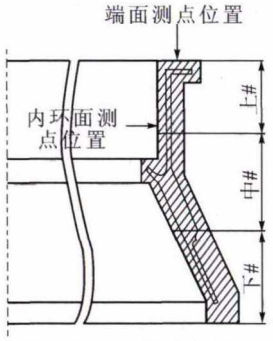


图 2 显微组织及性能均匀性验证方案

Fig.2 Verification scheme for the uniformity of microstructure and performance

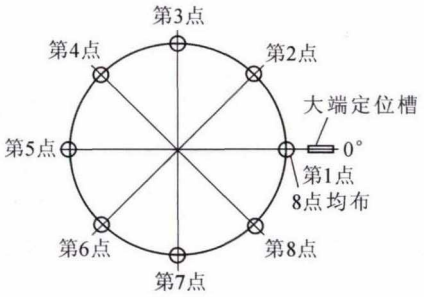


图 3 零件加工变形情况监测方案

Fig.3 Part processing deformation monitoring program

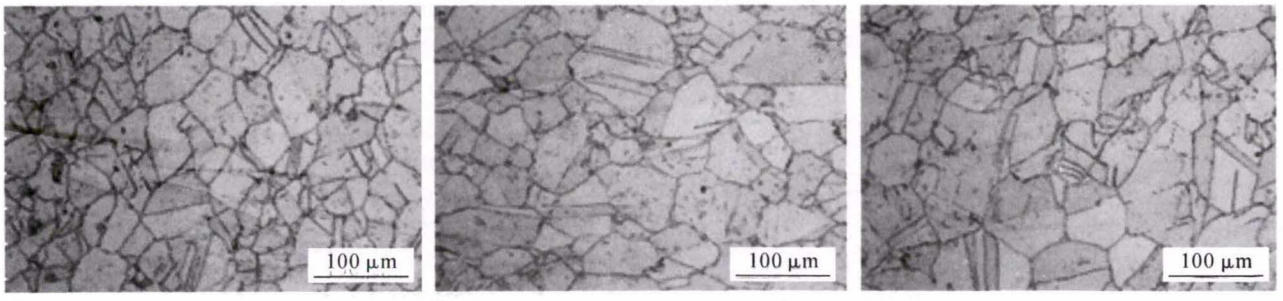
2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

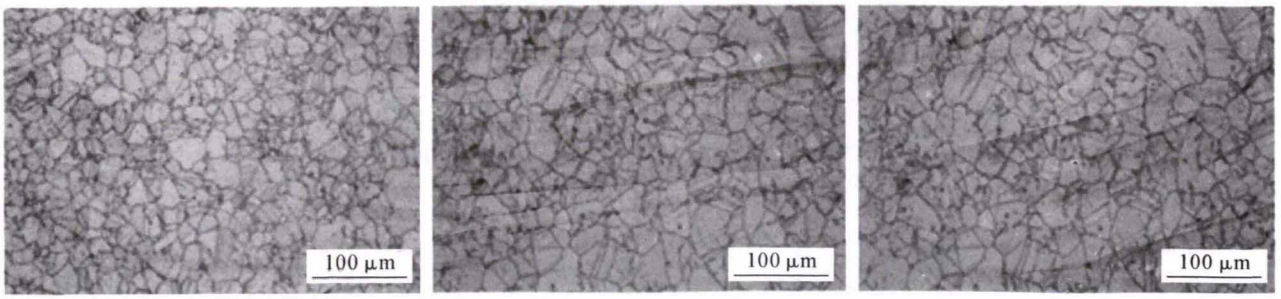
粗晶及细晶两类机匣显微组织检查结果如图 4 所示，图 4(a、b、c)分别为粗晶机匣上 #、中 #、下 # 3 处的显微组织，平均晶粒度 5 级；图 4(d、e、f)分别为细晶机匣上 #、中 #、下 # 3 处的显微组织，平均晶粒度 7 级。

2.2 晶粒度对机匣力学性能的影响

粗晶及细晶控制的机匣力学性能对比曲线如图



(a)(b)(c)分别为粗晶机匣上#、中#、下#位置



(d)(e)(f)分别为细晶机匣上#、中#、下#位置

图 4 粗晶及细晶机匣不同部位显微组织

Fig.4 Microstructure of at different locations of the coarse-grain and fine-grain turbine casing forgings

5 所示，通过对比分析两类机匣不同位置室温及高温力学性能数据可知：粗晶机匣的室温拉伸抗拉强度平均略低 26 MPa，屈服强度平均高 35 MPa，伸长率平均略低 1.0%，端面收缩率平均略低 4.2%；粗晶机匣的 650 ℃高温拉伸抗拉强度平均略低 16 MPa，屈服强度平均高 39 MPa，伸长率平均略低 2.3%，端面收缩率平均略低 8.0%；粗晶机匣比细晶机匣硬度平均仅略低 4 HB；粗晶机匣不同位置力学性能的波动性较小。结果显示：适当提高合金晶粒度未对其室温及 650 ℃高温强度及塑性有明显削弱影响，粗晶工艺控制的机匣各部位力学性能均匀一致性较好。

GH4169 合金为时效强化型合金，组织由 γ 基体、δ 相、γ'[Ni3(Al、Ti)]、γ''(Ni3Nb)及碳氮化物等组成，通过锻造及热处理等热加工控制合金晶粒度大小及 δ 相、γ'、γ''的形貌、分布和含量是保障合金性能的关键措施。由图 4 可知，机匣粗晶工艺控制的合金 δ 相含量低于细晶工艺，δ 相为正交结构且为脆性相，对合金的强化作用很小[1]，γ'及 γ''均先于 δ 相析出，δ 相在 γ''相的层错上形核并最终取代 γ''相[2]，δ 相的析出减少了合金中 Nb 的含量，可降低 γ''相含量[3]。γ'相是合金的次强化相，溶解温度在 843~871 ℃范围内，具有较高的组织稳定性[4]。所以 δ 相含量少能有效保障基体中有足够的 γ''相进行共格应力强化，且 γ''相是合金的主要强化相[5]，是合金获得较高屈服强度的有效保证，这也是粗晶机匣屈服强度高于细晶机匣的主要原因。虽然晶粒越细小，细晶强化效果越明显，越有利于强度及塑性的提高，但对于以 γ'、γ''为主要强化相的时效强化型 GH4169 合金，控制了 δ 相含量及 γ'、γ''相的有效析出，在一定范围内适当提高锻件晶粒度，锻件力学性能不会明显衰减，且能够获得足够的强度及塑性。

2.3　晶粒度对残余应力的影响

粗晶及细晶机匣不同位置、不同方向的残余应力分布情况见图 6。通过对比分析机匣不同部位残余应力分布情况可知：粗晶控制机匣端面轴向及径向平均应力值相对低 225.0 MPa、159.9 MPa；粗晶控制机匣内环面轴向平均应力值相对低 84.6 MPa，锻件粗晶控制比细晶控制机匣内环面径向平均应力略高 7.7 MPa。各监测点数据形成的雷达圆圆度及 8 点对应角度对比可知：锻件粗晶控制 8 点残余应力值离散度更小，残余应力分布更加均匀。结果表明：机匣粗晶控制锻件其应力分布均匀一致性明显优于细晶控制，且粗晶控制有利于降低锻件内部残余应力。形变金属内部残余有由亚稳状态向稳定状态转变的储存能，变形量越大，晶粒越细，金属内部可储存能量越高；晶粒的长大和晶界的平直化可减少晶界的总面积，从而减低晶界的总能量[6]，因此粗晶控制可有效降低亚稳状态的锻件内部储存能，有利于降低机匣锻件残余应力，有利于改善机匣锻件残余应力的均匀分布。

2.4　晶粒度对零件加工变形的影响

对粗晶及细晶工艺控制的锻件按相同的加工工艺进行零件加工，8 点不同位置圆度及平面度检测结果见表 1。由表 1 可知，粗晶工艺控制的涡轮

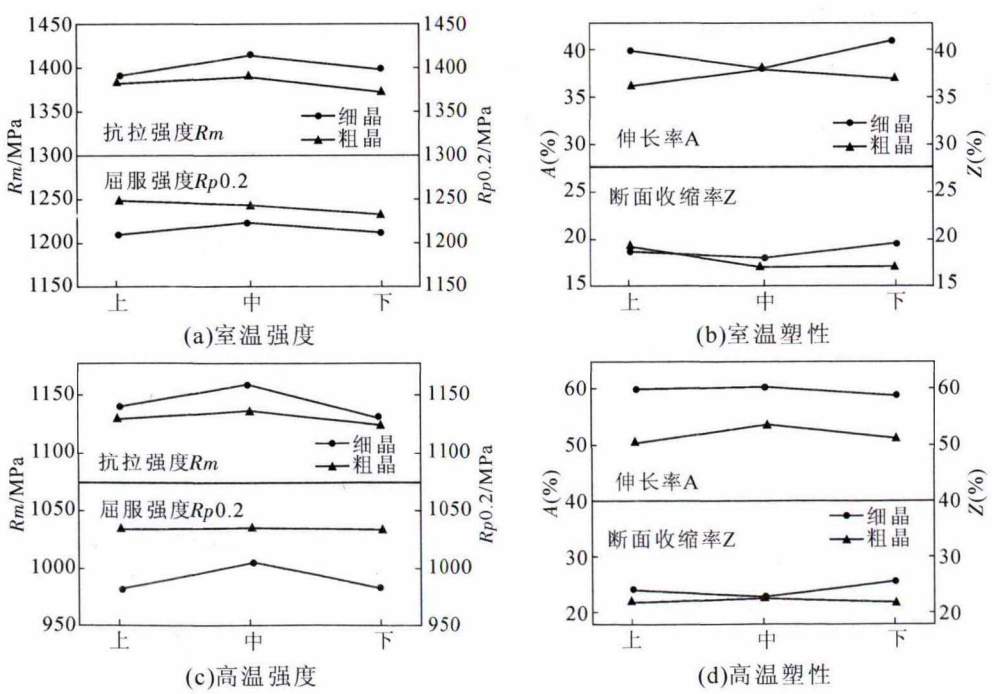
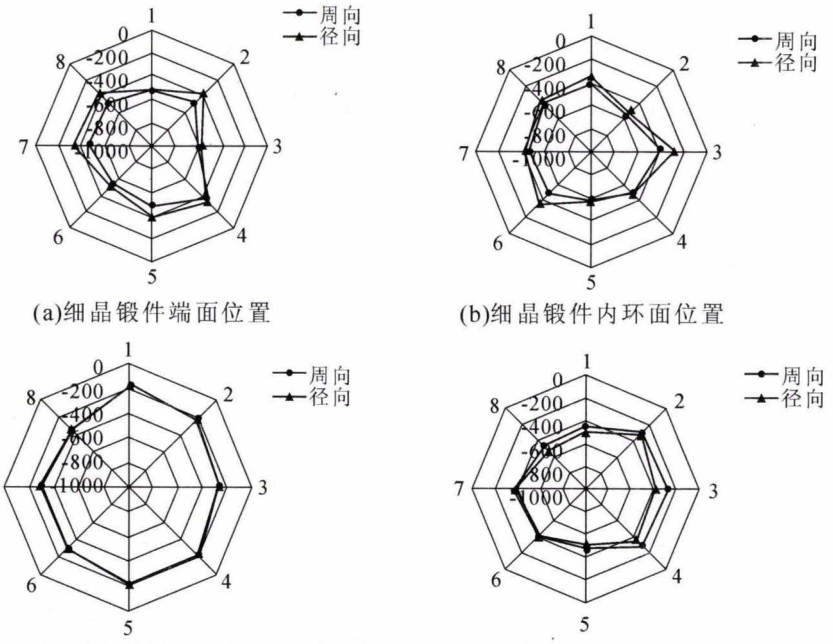


图 5 粗晶及细晶控制的机匣力学性能对比曲线

Fig.5 Mechanical properties of the coarse-grain and fine-grain turbine casing forgings



(a)细晶锻件端面位置　(b)细晶锻件内环面位置

(c)粗晶锻件端面位置　(d)粗晶锻件内环面位置

图 6 粗晶及细晶控制锻件不同位置不同方向的残余应力(MPa)分布雷达图

Fig.6 Radar chart of residual stress distribution in different locations and directions of the coarse-grain and fine-grain turbine casing forgings

外机匣机械加工工序间小端周向圆度在 0.041 6~0.089 5 mm 范围内，小端面平面度在 0.028 6~0.102 3 mm 范围内，细晶工艺控制的涡轮外机匣机械加工工序间小端周向圆度在 0.076 0~0.208 mm 范围内，小端面平面度在 0.040 6~0.187 6 mm 范围内。在锻件完成所有热加工后，随着冷加工零件尺寸的逐件减小，当外加应力与残余应力之和大于材料的强度极限时，即发生塑性变形。机械加工造成的残余应力大部分位于零件表面[7]，通过适当的退火热处理可有效降低，而锻件内部的残余应力只能通过合理的热加工工艺来保证。涡轮外机匣锻件为异形环结构，异形环件轧制成形金属流动复杂，环件与轧辊之间接触情况复杂，并且异形环轧制困难，需要的轧制力较大，容易造成不均匀的塑性变形，致使残余应力的产生。锻件粗晶控制需要通过多火次小变形工艺来实现，小变形的变形抗力较小，金属流动均匀受控，可实现基本均匀的塑性变形，且多火次加热可起到高温去应力的作用，均有利于降低锻件内部残余应力，起到改善零件的加工变形的作用。

表 1 粗晶和细晶控制锻件的零件加工变形情况

Tab.1 The machining deformation of coarse and fine grains of forging parts

工序名称	工艺	细晶控制	粗晶控制
消除应力前	圆度 /mm	0.201 4	0.089 5
	平面度 /mm	0.102 7	0.075 8
消除应力后	圆度 /mm	0.208 5	0.090 6
	平面度 /mm	0.187 6	0.102 3
精车小端及内形后	圆度 /mm	0.120 1	0.057 7
	平面度 /mm	0.126 0	0.078 7
精铣外形及端面后	圆度 /mm	0.111 0	0.081 1
	平面度 /mm	0.058 1	0.075 7
精车大端内型后	圆度 /mm	0.076 0	0.041 6
	平面度 /mm	0.040 6	0.028 6

3 结论

(1)适当提高涡轮外机匣锻件晶粒度，控制 δ 相含量及 γ'、γ''相的有效析出，锻件力学性能不会明显衰减，可获得足够的综合力学性能。

(2)粗晶控制有利于降低机匣锻件的残余应力，并有利于改善残余应力的均匀分布。

(3)粗晶控制的低应力锻件毛坯有利于改善机匣零件的加工变形。

参考文献：

[1] 庄景云，杜金辉，邓群，等. 变形高温合金 GH4169[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.

[2] Burachy V, Cahoon JR, A theroy for solute impurity diffusion [J]. Met and Mat Trans A, 1997, 28A(3): 563-585.

[3] 刘文昌，陈宗霖，姚枚，等. 冷轧变形对 Inconel718 合金 δ 相 γ'' 相析出行为的影响[J]. 航空学报，1999, 20(3): 279-282.

[4] 王春光，王东哲，万红，等. 锻造及热处理工艺对 GH4169 合金组织与性能的影响[J]. 锻压技术，2014，39(12): 14-17.

[5] 王建国，刘东，杨艳慧. GH4169 合金非均匀组织在加热过程中的演化机理[J]. 金属学报，2016, 52: 707-716.

[6] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京：机械工业出版社，1994.

[7] 张勇，李佩桓，王涛，等. 降低变形高温合金 GH4169 盘件残余应力试验研究 // 第十三届中国高温合金年会论文集 [C]. 2015, 347-350.