

某燃气轮机高压压气机后轴颈电子束焊接

Electron Beam Welding of Back-Spindle-Neck of High Pressure Compressor for Gas Turbine Engine

驻 4 3 0 厂 海 军 代 表 室 杨 薇
西安航空动力股份有限公司研制中心 康文军

[摘要] 为了验证某燃气轮机后轴颈使用 YZGH4169 材料替代 GH698 材料的可行性, 特针对 YZGH4169 材料电子束焊接接头的室温拉伸、高温拉伸及高温持久性能进行试验, 并与 GH698 材料的相应性能结果进行分析和比较。结果表明: YZGH4169 焊接接头的室温、高温抗拉强度和屈服强度均高于 GH698, 延伸率和断面收缩率略低于 GH698, 但均满足标准要求, 且 27mm 厚度的 YZGH4169 焊缝成型良好, 满足一级焊缝的要求。此方案的确定为某燃气轮机后轴颈及类似结构、材料的零件国产化代料工作提供技术依据。

关键词: 电子束焊接 后轴颈 YZGH4169

[ABSTRACT] To validate the feasibility of the back-spindle-neck of gas turbine engine using YZGH4169 instead of GH698, the test of tensile in room temperature, tensile in high temperature and persistence in high temperature of YZGH4169 EBW joint are carried out and compared with the properties of GH698. The analysis result shows that the tensile strength in room temperature and high temperature and yield strength are both higher than that of GH698, but percentage elongation and section shrinkage are lower than that of GH698, but all meet the standard. The weld seam of 27mm YZGH4169 is formed well and meets the requirement of I level standard. The success of this testing can provide technical basis for internal-trial-manufacture of back-spindle-neck of gas turbine engine or similar structure and materials.

Keywords: EBW Back-spindle-neck YZGH4169

某燃气轮机高压压气机后轴颈为整体锻件, 拟采用国产 GH698 材料替代。由于国内锻造工艺不能满足该零件整体锻造的技术要求, 因此, 采用分体锻造、电子束拼焊接的工艺方案。由于 GH698 材料焊接性差, 经各方研究讨论, 采用 YZGH4169 材料代替 GH698 材料。本文通过高压后轴颈焊接结构的电子束焊工艺试验, 研究了用 YZGH4169 焊接结构件制造后轴颈的可行性、焊缝各项性能的适用性、焊接缺陷的产生及控制零件变形

的措施, 最终确定焊接技术工艺方案。此方案的确定将为某燃气轮机后轴颈及类似结构、材料的零件国产化代料工作提供技术依据。

1 高压压气机后轴颈工作原理及特点

1.1 零件结构

后轴颈为某燃气轮机的关键件, 该零件毛坯是大端 $\phi 590\text{mm}$ 的喇叭状、小端 $\phi 200\text{mm} \times 460\text{mm}$ 短轴的盘形件(见图 1)。

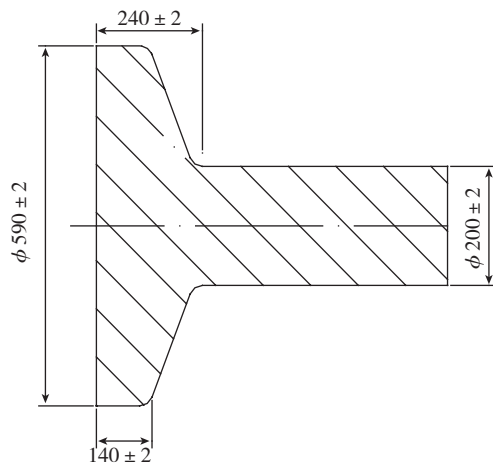


图1 后轴颈结构示意图

Fig.1 Back-spindle-neck structure

1.2 工作原理

某燃气轮机高压后轴颈位于高压压气机转子最后端, 其前端通过插入式结构过盈配合, 并安装径向销钉的方式与高压转子部分相连。在后部安装有径向滚柱轴承, 起到支承高压涡轮压气机转子的作用, 并通过花键连接将高压涡轮的功率传递给高压压气机转子。

高压后轴颈所受的载荷很复杂, 主要承受扭转、轴向、弯曲、径向、剪切等载荷。扭转载荷是由气流切向动量矩变化产生的, 在轴上引起剪应力; 轴向载荷是由转子轴向力引起的, 在轴上引起正应力; 弯曲载荷是由转子本身的重力、转子不平衡力、惯性力、陀螺力矩等产生的, 在轴上引起弯曲应力; 径向载荷由轴本身的离心力、套齿载荷的径向分力及与轴连接的盘的离心力产生的,

在轴上引起周向应力及局部弯曲应力。除以上主要载荷外,轴上还承受径向剪切载荷、由温度梯度产生的载荷、轴与其他零件过盈配合产生的预紧载荷及振动载荷等。

2 焊接试验

2.1 试验材料

YZGH4169 材料焊前为固溶状态。为了保证后轴颈电子束焊焊缝的质量,在满足机械加工余量要求的前提下,尽量减小焊接深度,确保焊缝质量满足一级焊缝要求,焊后再对零件进行时效处理。试验采用轧制态的 YZGH4169 毛料,规格为 $\phi 135\text{mm} \times 800\text{mm}$ 的棒材。

2.2 试验过程

为了满足焊接条件,首先对 $\phi 135\text{mm} \times 800\text{mm}$ 的棒材进行固溶处理 $(950\sim 980) \pm 10^\circ\text{C} / \text{h}$; 然后机加工出焊接试件 2 套(见图 2),同尺寸整体件 1 套见图 3(用于和焊接件进行性能对比)。通过试板的焊接确定出合适的焊接参数,对 2 套焊接试件进行了电子束焊接。焊后进行目视、X 光和荧光检验,按企业标准中一类焊缝验收。合格后对所有试件进行时效处理 $(720^\circ\text{C} / 8\text{h} + 620^\circ\text{C} / 8\text{h})$, 然后按照要求,分别对同状态的焊接接头和母材沿轴向加工出室温拉伸、 650°C 高温拉伸、 $650^\circ\text{C} / 690\text{MPa}$ 光滑及缺口持久各 2 件试样进行性能试验,并对焊缝进行高、低倍金相检查。

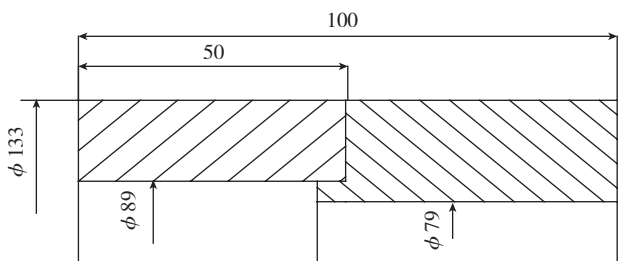


图2 焊接试件
Fig.2 Welding specimen

2.3 试验结果

试环电子束焊接后,焊缝经目视、X 光和荧光检验均符合一类焊缝要求。焊后外观形状如图 5 所示, YZGH4169 焊接接头及母材室温、高温性能如表 1 所示, YZGH4169 焊接接头及母材光滑、缺口持久性能如表 2 所示。

2.4 结果分析

从以上试验结果来看,焊接试样的性能指标与母材相当,只是塑性指标略低。这是由焊接热循环作用下,焊接接头的组织不均匀性造成的。焊缝和热影响区在时效后的组织性能要略差于基体。但电子束焊接的焊缝较窄,热影响区小,对性能的影响很小。这组数据说

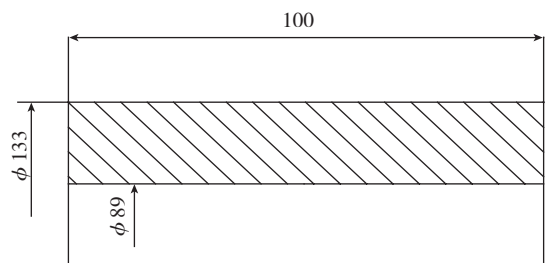


图3 母材试件示意图
Fig.3 Mother material specimen

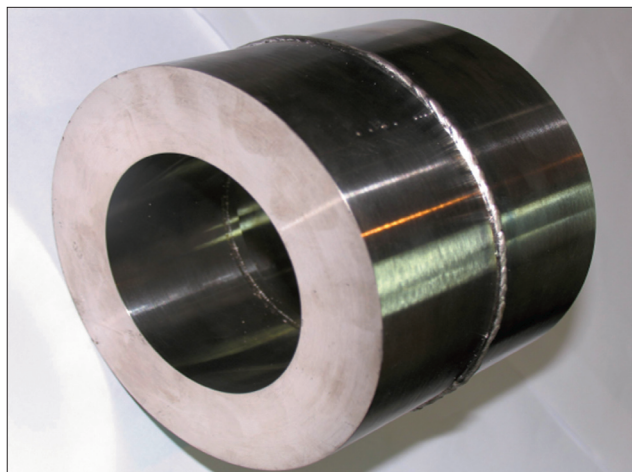


图4 试环焊后外观形状
Fig.4 Appearance of test wring after welding

表1 YZGH4169焊接接头及母材室温、高温性能

状态	试验条件	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 $\delta / \%$	断面收缩率 $\psi / \%$
固溶 + 时效(母材)	室温	1340	1070	17.5	25.0
		1340	1110	16.0	23.5
固溶态焊接 + 时效(焊缝)	室温	1350	1110	13.5	20.5
		1350	1140	11.0	22.5
固溶 + 时效(母材)	650°C 高温	1090	910	15.0	
		1080	950	13.0	
固溶态焊接 + 时效(焊缝)	650°C 高温	1120	920	18.0	19.5
		1100	910	17.5	20.5

明, YZGH4169 合金的焊接接头性能良好,焊缝与基体性能相当并完全符合锻件标准要求。

对比可发现, YZGH4169 材料电子束焊接接头的拉伸性能均高于标准的相关要求,且与母材性能差别不大,高温持久(光滑、缺口持久)。试验焊接接头比母材

表2 YZGH4169焊接接头及母材光滑、缺口持久性能

状态	试验条件	试验内容	断裂时间/h			
固溶态焊接 + 时效(焊缝)	650℃ 高温 690MPa	光滑	79:50	60:20		
		缺口持久 (R0.20)	72:40	32:30	73:30	78:00
光滑		86:50	54:30			
缺口持久 (R0.20)		259:05	254:35			
固溶 + 时效 (母材)						

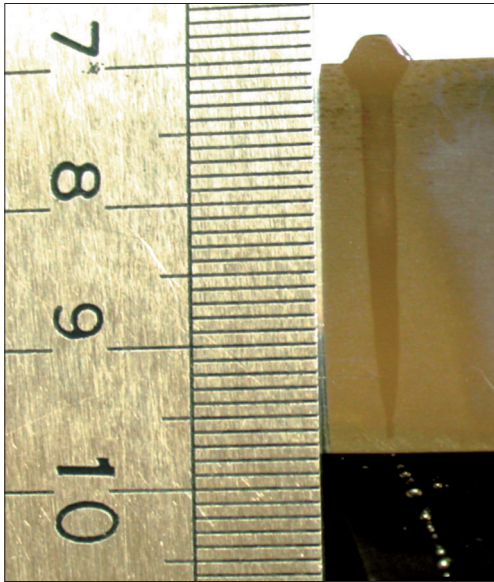


图5 焊接接头纵观形貌

Fig.5 Vertical section of welding joint

低,但均满足标准要求。另对焊接接头纵切形貌(见图5)及其组织进行了低高倍组织金相检测,未发现宏观、微观缺陷。焊缝宽度为1.5mm左右,热影响区窄,且晶粒无明显长大(见图6),焊缝为较细的树枝晶,垂直于熔合线向焊缝中心生长(见图7)。

YZGH4169焊接接头的室温、高温拉伸抗拉强度和屈服强度均高于GH698(性能标准要求见表3),其延伸率和断面收缩率略低于GH698。

YZGH4169材料被广泛应用于发动机压气机转子、燃烧室机匣及高压涡轮机匣等焊接结构件。

3 后轴颈焊接缺陷及变形的控制

以上研究是基于焊接接头中无焊接缺陷的前提条件。当焊接接头中有缺陷产生时,接头的强度受到很大的影响。因此后轴颈焊接时,控制焊接接头中的缺陷非常必要。

3.1 焊接缺陷的控制

后轴颈材料为YZGH4169的焊接性尚可,在选用合适的焊接参数和工艺的情况下,不易产生气孔和裂纹缺



图6 焊接接头宏观形貌

Fig.6 Macrostructure of welding joint



图7 焊缝及热影响

Fig.7 Weld seam and heat affected zone

表3 GH698材料性能标准要求

温度 /℃	拉伸性能				持久性能		
	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{\sqrt{}}/MPa$	$\delta 5/\%$	$\psi/\%$	σ/MPa	温度 /℃	时间 /h
20	705	1130	17.0	19.0	412	750	≥ 50
650	673	1067	25.6	27.2			

陷。在某燃气轮机上,其焊接接头厚度达27mm,焊接过程中熔池产生的气体溢出较困难。零件厚度大,焊接传热较快,液态金属凝固快,熔池的流动性差,焊接时易在焊缝中形成气孔、气穴缺陷。焊接时采用较低的焊接速度以增加熔池停留时间,并采取开排气槽及时排气等措施避免气孔的产生。

由于后轴颈焊接接头刚性很大,焊后会产生较大的焊接应力,为防止焊接裂纹的产生,焊接工艺只采用电子束正式焊接。尽量降低焊接热输入,减少熔化金属量,

(下转第70页)

化, α - Al_2O_3 变厚,同时原先的 γ, θ - Al_2O_3 层消失; α - Al_2O_3 层的形成既是 Al 与 O 直接反应生成的结果,也是 γ, θ 相向 α 相转换的结果。

资料显示,当温度低于 950°C ,形成非稳态的 γ, θ - Al_2O_3 ,随着温度升高、热处理时间的增加,非稳态相逐渐向稳态 α 相转变,本次试验氧化第一阶段,未形成连续的 α - Al_2O_3 ,TGO 靠近陶瓷层界面的主要成分为 $(\text{Cr,Al})_2\text{O}_3$,靠近粘结层的主要成分为 α - Al_2O_3 。氧化的第二个阶段连续的 α - Al_2O_3 快速生成,由于 Al 大量消耗,但是 Al 的扩散速度远远小于 Al 化学反应消耗的速度,此阶段反应速度受 Al 的扩散速度影响,主要为 Al 的选择氧化,一些尖晶石类氧化物如 $\text{Ni}(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ 也开始形成。第三个阶段,Al 贫化使粘结层中其他元素如 Ni、Cr、Si、Y 等扩散加剧,尖晶石、NiO 等混合氧化物继续生成,最终导致涂层失效。

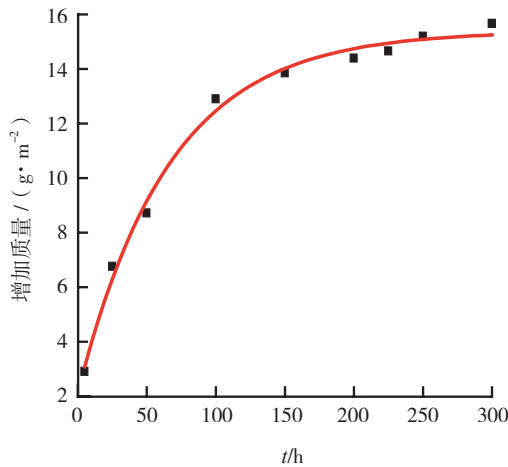


图5 1100°C涂层的增重曲线
Fig.5 Curve of weight gain for TBCs at 1100°C

4 结论

(1) 高温氧化过程中,先形成的非稳态的 Al_2O_3 逐渐向稳态相转变;随着氧化时间的增加, $\text{NiO}、(\text{Cr,Al})_2\text{O}_3$ 生成逐渐增加;最后 $\text{Ni}(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4、\text{NiO}、\text{Al}_2\text{O}_3$ 等混合氧化物的形成加速了涂层的失效。

(2) TGO 的生长过程可分为 3 个阶段:初级增长斜率最大,主要为 α - Al_2O_3 的快速生成过程;第二个阶段增长略微放缓,由于 Al 的消耗导致;第三个阶段增长最缓慢,为混合氧化物的生长过程。

参考文献

[1] Richer P. Oxidation of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF, cold gas dynamic spraying. *Suf Coat Technol*, 2010, 204: 3962-3974.

[2] Chen W R, Wu X, Marple B R. Pre-oxidation and TGO growth behavior of air-plasma-sprayed thermal barrier coating. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202: 3787-3796.

[3] Mercedes T, Anette K M. On TGO creep and the initiation of a class of fatigue cracks in thermal barrier coatings. *Surface & Coating Technology*, 2009, 203: 3549-3558.

[4] Selcuk A, Atkinson A. The evolution of residual stress in the thermally grown oxide on Pt diffusion bond coats in TBCs. *Acta Mater*, 2003, 51: 535-549.

[5] Chen W R, Wu X, Marple B R. The growth and influence of thermally grown oxide in a thermal barrier coating. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201: 1074-1079.

[6] Hou P Y. Segregation phenomena at thermally grown Al_2O_3 /alloy interfaces. *Annu Rev Mater Res*, 2008, 38: 275-298.

(责编 良辰)

(上接第 66 页)

降低焊接应力。YZGH4169 应在固溶态焊接焊后进行时效处理,以发挥焊接接头和基体的组织性能优势,焊接时应避免接头的多次焊接,防止造成材料的过热及热影响区晶粒粗大,零件焊后应及时进行热处理消除应力。

3.2 焊接变形的控制

后轴颈采用焊接结构,控制焊接变形也是非常重要的。后轴颈焊接接头为对接结构,焊接变形主要表现为零件的轴向收缩,焊前预留一定的焊接收缩量可很好的解决零件的变形问题。后轴颈宜在半精加工状态焊接,厚度应尽可能小。其原因有 2 点:(1) 该状态组件的焊接厚度较小,对防止焊接缺陷的产生有利;(2) 零件尚有一定的尺寸余量,易于消除焊接变形的影响,该控制焊接变形方案在试环的焊接中得到了验证,认为是合理可行的。经过正式件的焊接发现此方法可以满足零件的尺寸要求。

4 结论

通过以上试验研究,分析试验结果,得出以下结论:

(1) 采用合理的电子束焊接参数及工艺方法,可以保证 27mm 厚 YZGH4169 焊接接头的质量,满足标准中一级焊缝的要求。

(2) YZGH4169 焊接接头的性能指标与母材相当,只是塑性指标略低。焊接接头高温持久(光滑、缺口持久)性能比母材低,但均满足标准要求。

(3) YZGH4169 焊接接头的室温、高温抗拉强度和屈服强度均高于 GH698,其延伸率和断面收缩率略低于 GH698。

(4) 采用 YZGH4169 材料代替 GH698 材料进行某燃气轮机后轴颈制造的工艺方案可行,可应用到实际零件的加工制造中去。

(责编 三丰)