制造技术研究

K4169 铸造镍基高温合金电子束焊接裂纹特征分析

张丽娜 李京民 马 芳 刘景铎 张益坤 (首都航天机械公司,北京 100076)



摘要:对 K4169 和 GH4169 形成的对接接头进行了电子束焊接,利用金相分析和扫描 电镜对 K4169 铸造高温合金一侧电子束焊接热影响区微裂纹行为进行了分析。研究发现, K4169 一侧电子束焊接裂纹均发生于熔合线附近的热影响区,该区域化学组分不均匀,偏 析严重,低熔点共晶易在晶间聚集,轻微的形成胡须组织,较严重的表现为裂纹。通过改 善散热条件和优化工艺参数有助于减小热影响区微裂纹倾向。

关键词: K4169;电子束焊接;热影响区;微裂纹

Analysis on Micro-fissuring Behavior of Electron-beam Welded K4169 Cast Nickel-based Super-alloy

Zhang Lina Li Jingmin Ma Fang Liu Jingduo Zhang Yikun (Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract: Adopting electron-beam welding (EBW) welded K4169 and GH4169 butt joint, the micro-fissuring behaviors in the heat-affected zone (HAZ) of electron beam welded cast super-alloy K4169 have been studied by using analytical scanning electron microscopy. It was observed that the micro-cracks besides K4169 initiated in the regions of HAZ nearby the fusion line, in the region the chemical components were non-uniform, the element segregation was greater and the low-melting point eutectics were easier to aggregate intergranular, which were formed beard tissue slightly or cracks seriously. Controlling the heat input and optimizing the process parameters are helpful to decrease the tendency of micro-cracks.

Key words: K4169; EBW; HAZ; micro-fissuring

1 引言

K4169 作为一种沉淀强化镍基高温合金,具有良好的综合性能,在航空航天发动机中得到了广泛的应用。然而,基于 K4169 自身的冶金性能,在铸造加工过程中,容易形成组织偏析,使一些低熔点相弥散分布于枝晶间,形成富 Nb Laves 相^[1];K4169 的使用一般需热处理等方式获得致密和均匀的微观组织,消除疏松、减少偏析,使合金性能达到最佳^[1~3]。电子束焊接是一种高能量密度的焊接方法,通过电子枪产生的高速、高密度的电子束,轰击焊件的接头处,形成

焊缝。相较于常规熔焊,电子束焊接具有热输入量小, 热影响区窄,焊接变形小及焊接效率高等特点,然而, 同其他镍基合金类似,焊态 K4169 在热处理前,热影 响区显微组织呈现出一种复杂的微观结构,在极端服 役情况下起到不良影响^[4]。

本文重点对 K4169 的电子束焊接裂纹进行了实验研究,分析了裂纹的形成原因及预防措施,为生产 实践中产品质量的保证提供一定的指导意义。

2 实验方法

作者简介: 张丽娜(1976-),硕士,材料加工工程专业(焊接);研究方向:特种焊接工艺。 收稿日期: 2012-03-26

xxx+0/

试验对铸造 K4169 和锻造 GH4169 材料形成对接 接头进行电子束焊接,材料厚度 12mm,材料化学成 分见表 1 (K4169 的化学成分通过能谱分析测得);采 用进口真空电子束焊机,在真空度大于 2×10⁻²Pa 时 进行焊接。焊接参数如表 2 所示。

表 1	K4169	与	GH4169	化学成分	ì
•		-			e

					vv t /0		
	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	杂质
K4169	19.2	49.4	3.3	0.5	0.84	4.4	≤0.08
GH4169	17~21	50~55	2.8~3.3	0.2~0.6	0.65~1.15	-	≤0.1

表 2 K4169 与 GH4169 电子束焊接参数

焊接电压/kV	焊接束流/mA	焊接速度/m·min ⁻¹	聚焦
100	30~40	0.4	表面

K4169 是以体心四方 γ"相和面心立方 γ'相沉淀强 化的镍基高温合金^[1, 2],晶粒较为粗大;GH4169 属时 效强化镍基合金,母材组织晶粒细小。K4169 与 GH4169 母材组织金相图如图 1 所示。





a K4169 母材照片 b GH4169 母材照片 图 1 母材组织金相图

待焊试件尺寸均为 200mm×100mm×12mm,采用 对接接头形式。焊前待焊面进行去油处理,即用汽油 清洗,然后用丙酮冲洗并吹干后以备使用。焊后接头 通过光学显微镜和扫描电镜观察焊缝组织,并利用能 谱分析了 K4169 一侧裂纹附近区域成分。

3 结果分析

3.1 K4169 母材组织及裂纹区域能谱分析

图 2 为 K4169 母材能谱分析图,由图 2a 可见, 基材组织以 Fe、Cr、Ni 元素为主,由图 2b 化合相成 分能谱可知,C 含量明显增大,Nb 含量增多,形成 NbC 之类的 MC 相,由图 2c 中可以看出,Nb 元素发 生了的聚集,与 Ni 等元素形成了 γ"(Ni₃Nb)相, MC 和 γ"(Ni₃Nb)相有助于增强母材的高温强度, 但这些相在热的作用下聚集,易在焊缝及热影响区形 成裂纹^[1.5]。

二主	重量	原子
儿系	百分比	百分比
C K	2.32	10.43
Al K	0.53	1.06
Ti K	0.84	0.94
Cr K	19.19	19.92
Fe K	17.62	17.03
Ni K	49.40	45.41
Nb L	4.40	2.55
Mo L	3.31	1.86
Dy L	2.40	0.80
总量	100.00	



a K4169 基材能谱分析

元素	重量 百分比	原子 百分比
СК	11.64	40.14
Al K	0.46	0.71
Ti K	0.97	0.84
Cr K	14.31	11.40
Fe K	13.13	9.74
Ni K	41.00	28.93
Nb L	18.50	8.25
总量	100.00	



b K4169 化合相能谱分析

元素	重量 百分比	原子 百分比
Si K	0.68	1.54
Ti K	1.24	1.65
Cr K	13.89	17.05
Fe K	11.46	13.09
Ni K	41.74	45.38
Nb L	31.00	21.29
总量	100.00	



c K4169 相能谱分析 图 2 K4169 母材组织能谱分析图 图 3 为电子束焊接热影响区产生液化裂纹的能谱 分析图,该裂纹部分延伸至焊缝内部,液化裂纹沿枝 晶间低熔点共晶相分布(如图 3a 所示),这些化合物 成分主要含有 Nb 元素,约为 33%,远远高于正常基 体 Nb 元素约 5%的含量(如图 3b 所示)。由于 Nb 在 晶界的聚集,使晶界熔点降低,导致液态薄膜的产生。 在热和力的共同作用下,导致液化裂纹的产生。



重量百分比 原子百分比 元素 Al K 0.24 0.57 Si K 0.49 1.12 1.09 Ti K 1.46 Cr K 13.75 17.01 11.37 13.09 Fe K Ni K 40.07 43.90 Nb L 33.00 22.85 100.00 总量

a 裂纹微观形貌





3.2 K4169 一侧电子束焊接裂纹金相显微特征

电子束焊接作为一种能量密度集中的焊接方法, 焊接经过固溶处理的锻造 GH4169 合金产生裂纹的几 率较小,而铸造 K4169 高温合金则对微裂纹非常敏 感,GH4169 和 K4169 电子束焊接,发现微裂纹均产 生于 K4169 一侧,裂纹长度约 0.2~1mm。

通过能谱分析及显微组织观察,表明 K4169 为高 Nb 铸造高温合金,在凝固过程中,枝晶间 Nb 及 Mo、 Ti 元素向枝晶聚集,形成脆性 Laves 相^[1]。使用状态 的 K4169 合金一般要经过均匀化处理,消除组织偏析 和显微疏松,但经过均匀化处理的 K4169 仍存在一定 量的 Laves 相和碳化物相,这些低熔点相在热的作用 下发生聚集受力形成微裂纹^[1, 6, 7],微裂纹在熔合线 附近的粗晶晶界形核并扩展 1~2 个晶界距离。金相 可见 K4169 一侧铸造组织的化学组分不均匀,偏析严 重,低熔点共晶在晶间聚集,轻微的形成胡须组织(有 裂纹倾向,但具有填充物,未形成缝隙),较严重的 表现为裂纹(如图4所示)。

此外,从金相观察结果看,电子束焊接接头中 K4169一侧的裂纹多发生于焊缝热影响区,焊缝内部 裂纹很少,部分热影响区微裂纹穿过熔合线进入焊缝 内部,高倍金相下发现微裂纹中存在连续分布或间断 分布的填充物(如图5所示)。填充物为Nb元素含量 较高的组分相。进一步分析认为:焊接过程中,在热 的作用下,K4169母材中的化合相发生了聚集,一些 化合相与基体的结合力较弱,在热及应力的作用下发 生脱落形成裂纹。微裂纹一般在熔合线附近的近缝区 形核,并在热影响区内沿熔合线外法线方向扩展,在 稍远的热影响区扩展受阻止裂,即在无化合相聚集处 发生止裂。



a K4169 一侧裂纹



b K4169 一侧胡须状组织



c K4169一侧裂纹及胡须状组织
图 4 K4169一侧的裂纹与胡须状组织



图 5 裂纹中的填充物

从所焊试件金相剖检结果看,裂纹附近均可见有 化合相聚集分布,但未见裂纹后期扩展形貌。未出现 裂纹的试件均不同程度地存在胡须组织(化合相聚 集)。

尝试通过改善热输入,增强散热条件来减少 K4169一侧液化裂纹,如增加散热工装,采用焊接软 规范等来进一步降低焊接接头的热输入量,结果表 明,该措施在很大程度上起到了改善和减缓裂纹产生 的作用,如在铜座中焊接的试件,均匀剖切4瓣,仅 一个试样上有裂纹,且裂纹长仅 0.5mm 左右。

4 结束语

a. K4169 与 GH4169 电子束焊接接头中裂纹均发 生于焊缝热影响区 K4169 一侧,裂纹沿晶分布,属液 化裂纹。

b. 裂纹的产生与铸造合金中不均匀分布的化合 相有关,从所焊试件金相剖检结果看,K4169一侧铸 造组织的化学组分不均匀,偏析严重,低熔点共晶易 在晶间聚集,轻微的为胡须组织,较严重的表现为裂 纹,裂纹附近均可见有化合相聚集分布,但未见裂纹 后期扩展形貌。

参考文献

- Radavich J F. The physical metallurgy of cast and wrought alloy 718[J]. The minerals, metals & materials society, 1989, 229~240
- 2 Carlson R G, Radavich J F. Micro-structural characterization of cast 718 [A]. Super-alloy 718 Metallurgy and Applications
- 3 李爱兰,汤鑫,盖其东,等. 热处理工艺对 K4169 合金微观组织的影响[J]. 航空材料学报,2006(6): 311~312
- 4 Yaman Y M, Kushan MC. Hot cracking susceptibilities in heat-affected zone of electron beam-welded inconel 718[J]. Journal of Material Science Letters 1998(17): 1231~1234
- Lucas M J, Jackson C E. The welded heat-affected zone in nickel base alloy
 718[J]. Welding Journal, 1970, 49(2): 46~54
- 6 冯钟潮,于尔靖,朱鸿德,等.铸造镍基合金焊接液化裂纹[J].焊接学报,1983(6):79~85
- 7 张海泉,赵海燕,张彦华,等. 镍基高温合金电子束焊接热影响区微裂 纹特征分析[J]. 材料学报,2008(3): 22~25