电子束焊接 K418 高温合金裂纹的影响及 组织与性能研究

谭观华,王善林,吴鸣,孙文君,陈玉华,柯黎明

(南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室,南昌 330036)

摘要:目的 探究工艺参数对 K418 高温合金焊接裂纹的影响,减少焊接过程中裂纹的产生。方法 采用 真空电子束对 2 mm 的薄板 K418 高温合金进行焊接试验,通过改变工艺参数来调控焊接裂纹,使用光 学显微镜对焊缝显微组织进行观察,使用显微硬度计对试样进行硬度测量,万能拉伸计对接头进行拉伸 试验,使用扫描电镜对断口进行观察。结果 在焊接束流为 24 mA,焊接速度为 600 mm/min 时,扫描波 形为 O 形,频率为 500 Hz 时,焊接接头表面未发现裂纹。通过拉伸试验发现断裂位置为母材,其断口 为典型脆性解离断裂。结论 采用合适的工艺参数可以减少或消除焊接接头表面裂纹的形成。 关键词:高温合金;电子束焊接;显微组织;裂纹 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.015 中图分类号:TG174.4; TG661 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2019)05-0103-06

Effect of Cracks in Electron Beam Welding of K418 Superalloy and Its Microstructure and Properties

TAN Guan-hua, WANG Shan-lin, WU Ming, SUN Wen-jun, CHEN Yu-hua, KE Li-ming

(Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the effect of process parameters on weld crack of K418 superalloy and reduce the formation of cracks during welding. The welding of 2 mm thin plate K418 superalloy was carried out by vacuum electron beam. The welding crack was controlled by changing the process parameters. The microstructure of the weld was observed with optical and scanning electron microscopy. The hardness of the sample was measured with microhardness tester. The tensile test was carried out on the joint with universal tensile tester. The fracture was observed with scanning electron microscope. The results showed that when the welding beam current was 24 mA and the welding speed was 600 mm/min, the scanning waveform was O-shaped. When the frequency was 500 Hz, no crack was found on the surface of the welding joint. Through the tensile test, the fracture position was found to be the base material, and the fracture was a typical brittle dissociation fracture. The formation of surface cracks in the welding joint can be reduced or eliminated under suitable process parameters.

KEY WORDS: superalloy; electron beam welding; microstructure; crack

通讯作者:王善林(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为铁基非晶材料开发及应用、特种连接技术。

收稿日期: 2019-07-20

基金项目:国家自然科学基金(51461031);轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室基金(gf201501005)

作者简介:谭观华(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为高温合金电子束与激光焊接。

K418 高温合金因其在 900 ℃下具有优异的高温 强度、良好的耐腐蚀性,被大量应用于航空发动机涡 轮叶片和整铸涡轮的制造中^[1-2],然而,K418 高温 合金焊接裂纹的存在严重影响了 K418 高温合金的性 能。大量研究表明,当高温合金中 Ti+A1 的质量分数 大于 4%时,在焊接过程中就容易产生裂纹^[3-6];而 K418 高温合金 Ti+A1 的质量分数大于 7%,被认为是 不可焊接的高温合金。K418 高温合金属于沉淀强化 高温合金,在焊接过程中会存在大量的析出相,使焊 接应力集中而产生裂纹^[7]。

真空电子束焊因其具有焊接速度快、功率密度 高、焊缝和热影响区窄、真空环境下无污染等优点, 被应用于焊接高温合金^[8-12]。张子阳等^[13]对 2 mm 的 IC10和 GH3039 高温合金进行异种焊接,通过偏束焊 接得到成形良好的焊缝,试验结果表明,焊接接头未 见裂纹、气孔等缺陷,焊缝上下宽度相当,最宽处为 1.8 mm,中间熔宽为 0.8 mm,拉伸断口表明焊缝断 裂为脆性与韧性断裂都存在的混合断裂机制。Han Ke^[14]等研究了 K465 镍基高温合金的电子束焊接性 能,详细研究了 K465 高温合金接头熔合区和热影响 区的组织演变,分析了液化膜的来源以及凝固裂解和 液化裂纹的形成机理,讨论了热输入对裂纹敏感性的 影响。Chen G Q^[15]使用电子束焊接 GH4169, 获得成 形良好的焊接接头,焊缝主要为树枝晶结构,母材为 Ni, Cr 和 Fe 的固溶体, Ni3Nb 等强化相颗粒沿晶界 分散分布,拉伸试验的接头抗拉强度为743.7 MPa, 焊缝硬度达 HV300,由于低熔点的存在而导致裂纹的 产生。Peng H^[16]使用电子束堆焊 DZ4125 高温合金, 并将裂纹归类为液化裂纹 ,在堆焊后通过热等静压的 方式消除裂纹,然而在后续处理这种裂纹再现,表明 热等静压不是消除裂纹的有效方法。Peng H^[17]等研究 电子束焊接加速电压对焊缝形状的影响,使用 2.6 mm 厚的 Hastellov C-276 板进行焊接,研究加速电压对熔 池面积和二次枝晶臂间距的影响。随着加速电压的增 加,熔化区面积和二次枝晶臂间距增加。与铬、铁和 钨相比,钼从树枝状体到树枝间间距的更高偏析可能 导致在固体液体界面之前富含元素的液体过冷,进一

步增加了二次枝晶臂间距。

1 试验

试验材料为 60 mm×80 mm×2 mm 的 K418 高温 合金薄板,母材为铸态组织。采用 KS15-PN150KM 真空电子束进行对接,焊接电压为 60 kV,工作距离 为 300 mm,为了减小焊接过程中由于受热而产生对 接间隙,在焊接前先使用小电流将表面封焊,然后再 进行焊接。表面聚焦电流为 501 mA,扫描波形为 O, 频率为 500 Hz,其线能量为 q=(60×U×I_b)/v,其中 I_b 为电子束流,v为焊接速度,试验参数见表 1。焊接 前使用砂纸将试样打磨平整,后用丙酮清洗干净。焊 后,对焊道进行宏观观察,统计焊道表面裂纹数量、 位置,后切取金相试样进行镶嵌、磨制好抛光,然后 用 5 g CuCl₂+20 mL HCl+20 mL 无水乙醇侵蚀,采用 4XB-TV 倒置金相显微镜对焊接接头进行观察。将焊 缝树枝晶枝晶臂进行对比,探究工艺参数的影响。

试验显微硬度测量使用 401MVD 数字显微硬度 计,对接头顶部和底部焊缝、热影响区、母材的显微 硬度进行测量,测试顺序为母材-热影响区-焊缝-热影 响区-母材。载荷为2N,加载时间为5s,相邻点间 距为 0.2 mm。采用万能拉伸计对焊接接头进行拉伸 测试,测得焊接接头的屈服强度、抗拉强度。测试试 样使用紧凑小拉伸试样,拉伸试验在 INSTRON5540 型电子精密拉伸试验机上进行,拉伸速度为 1 mm/min。拉伸试样在室温进行,并使用扫描电子显 微镜对失效断裂试样的断口进行分析,获得断口特征 与材料显微组织和裂纹扩展之间的关系。拉伸试样尺 寸如图1所示。

2 结果与分析

图 2 为不同工艺参数下焊缝组织截面形貌,由图 2a—2d 可知,随焊接束流增加,焊缝宽度并无明显增加,其区别仅在于焊根宽度的位置,通过增加电子束流,可使焊缝形状从堆形向 I 形焊缝转变,增加电子

表 1	焊接工艺参数	
Tab.1 Weldin	g process parame	eters

编号	加速电压/V	聚焦电流/mA	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	电子束流/mA	线能量/(J·mm ⁻¹ ·s ⁻¹)
1#	60	501	600	15	90
2#	60	501	600	18	108
3#	60	501	600	21	124
4#	60	501	600	24	144
5#	60	501	900	24	96
6#	60	501	1200	24	72
7#	60	501	1500	24	57.6
8#	60	501	1800	24	48



图 1 拉伸试样尺寸 Fig.1 Tensile specimen size

束流可降低焊缝角变形。随着热输入的增加,熔合区、 热影响区低熔点共晶相大量熔化,并相互连通至焊缝 熔池,冷却过程中熔池金属向热影响区和熔合区补 充,使冷却过程中内应力降低,进而降低焊接裂纹的 形成。其次,焊接热输入的增加也降低了焊接温度梯 度,使冷却速度降低,这也降低了裂纹形成几率。

由图 2d—2h 可知,增加焊接速度,焊缝熔宽变 窄,熔深无太大影响,熔池形状也发生了变化,增加 速度使焊缝形状从 I 形向锥形转变。通过对比图 2d 和 2h,发现图 2h 由于热输入降低,熔宽变窄,温度 梯度增大,冷却速度加快,一次枝晶臂和二次枝晶臂 间隙减少,晶粒细化明显。由图 2e—2h 可知,增加 焊接速度,可以使晶粒细化,增加温度梯度,加速熔 池冷却。然而这种情况对于裂纹的形成是有利的, K418 高温合金由于导热系数较低,熔池温度较高, 使焊缝至母材温度梯度较大,这方面也增大了焊接内 应力,促进了裂纹的形成。

其次,对焊缝枝晶组织进行分析,发现在焊缝中, 树枝晶自熔合线沿温度梯度方向向焊缝中心生长,焊 缝中心位置由于温度梯度低,成分过冷小,焊缝中心 为等轴晶组织。

表 2 为不同工艺参数下裂纹统计数据,图 3 为通 过表 2 数据所得曲线。观察图 3a 曲线发现,电子束 流的增加可以降低焊接裂纹的产生,这是因为在焊接 过程中冷却速度直接影响裂纹的形成。电子束的增





g 7#试样

h 8#试样

400 µm

图 2 不同工艺参数下焊缝组织 Fig.2 Welding joint structure under different process parameters

400 µm

Tuble Cruck studietes under unterent parameters										
编号	焊缝(横向裂纹)	焊缝(纵向裂纹)	热影响区	弧坑	焊道(热影响区和焊缝之和)	总计				
1#	1	1	2	2	4	6				
2#	1	1	0	4	2	6				
3#	2	0	0	2	2	4				
4#	0	0	0	4	0	4				
5#	1	0	0	4	1	5				
6#	2	0	0	3	2	5				
7#	3	0	1	4	4	8				
8#	7	1	2	8	10	18				







图 3 工艺参数对裂纹的影响 Fig.3 Effect of process parameters on cracks

加,直接影响焊接热输入。通过增加热输入来降低焊 接接头温度梯度,间接降低了焊接裂纹的形成。当焊 接束流达到 24 mA 时,在焊道未观察到裂纹的形成, 仅在焊接收弧位置观察到裂纹,收弧段裂纹的产生主 要是由于弧坑的热源的消失,冷却速度增加,弧坑表 面提前凝固而使拉应力增大,其次在凝固的最后阶段 偏析也最严重,通过大量试验证明,弧坑处裂纹不可 避免,可以通过增加焊道长度,将弧引至不需要位置 然后切除来解决。

从图 3b 可以发现,随着焊接速度增加,裂纹显 著增加,而且呈现不断上升的趋势。试验表明,焊接 速度对焊接裂纹的影响较大,增加焊接速度会明显增 加裂纹的形成。这里可以解释为在焊接过程中,焊缝 存在横向和纵向应力,在试验统计中发现焊接过程 中,随着焊接速度的增加,横向裂纹数量显著增加, 而纵向裂纹并无明显变化。这表明在焊接过程中主要 是由焊接纵向应力的增加引起的,焊接速度增加,焊 道纵向应力显著增加,导致焊接过程中大量的横向裂 纹形成。在焊接过程中,由于凝固收缩存在较大内应 力,而且,单位时间内收缩的长度越大,内应力越大, 焊接速度增加,沿焊道熔池越长。当然,在凝固过程 中受的拉应力也就越大,形成裂纹的几率也就增加。

图 4 为焊接接头显微硬度,可知,焊接接头显微

硬度较高,即使最低的显微硬度也在 HV340 左右, 焊缝位置的显微硬度略微高于母材,实际并不明显, 通过对数据进行处理,发现接头显微硬度约为 HV420,而且在不同工艺参数下焊接接头显微硬度也 无太大差别,对焊缝顶部位置和底部位置显微硬度进 行比较,发现差距也在 5%以内,因此可以得出结论, 焊接接头显微硬度与母材显微硬度相当,且焊接接头 均匀,在焊缝顶部和底部无太大差别。熔焊显微组织 可认为是铸态快冷组织,与母材铸态组织相比,仅仅 是晶粒细化。

在工艺参数为焊接束流为 24 mA,焊接速度为 600 mm/min 时,扫描波形为 O 形,频率为 500 Hz 时, 焊接接头表面未发现裂纹,所以对试样进行拉伸试 验。图 5b 为试样拉伸失效后的宏观形貌,可知,由 于是常温拉伸,断裂位置为母材。通过计算可得 K418 高温合金母材抗拉强度为 931 MPa,低于焊缝强度。 其母材强度低于焊缝可能与焊缝晶粒细晶强化有 关,通过拉伸试验可知,焊缝强度较高,接头成形和 性能较好。观察拉伸曲线可知,K418 高温合金弹性 模量较低,在拉伸过程中存在较大弹性变形。图 6 为 拉伸试样断口形貌,可知断口存在大量台阶,其断口 平整,未观察到韧窝的存在,大量河流花样存在于断 口表面,为典型的脆性解离断裂。

SU1510 20.0kV 14.7mm x40

a $40 \times$



b 500× 图 6 K418 高温合金拉伸母材断口形貌 Fig.6 Fracture morphology of K418 superalloy tensile base metal

c $3000 \times$

3 结论

1)在电子束焊接高温合金时,通过调节工艺参数可以显著降低焊接裂纹的形成,试验表明,在焊接 束流为 24 mA,焊接速度为 600 mm/min 时,扫描波 形为 O 形,频率为 500 Hz 时,焊接接头表面未发现 裂纹,焊道成形良好。

2)对焊接接头进行力学测试,发现焊缝显微硬度与母材相当,焊缝略高于母材,对试样进行拉伸试验,发现断裂位置为母材,表明焊接接头强度较高,母材断口为典型脆性解离断裂。

参考文献:

 郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
 GUO Jian-ting. High Temperature Alloy Materials Sci-

ence[M]. Beijing: Science Press, 2010.

- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册(第几卷)[M].北京:中国标准出版社,2001.
 Editorial Board of China Aviation Materials Handbook.
 China Aviation Materials Handbook (Volumes)[M]. Beijing: China Standard Press, 2001.
- [3] 谢玉江, 王茂才, 王明生. 高 Al、Ti 含量镍基高温合 金激光、微弧火花表面熔焊处理研究进展及解决熔焊 裂纹的途径[J]. 中国表面工程, 2010, 23(5): 1—16. XIE Yu-jiang, WANG Mao-cai, WANG Ming-sheng. Research Progress of Laser and Micro-arc Spark Surface Welding Treatment of High Al and Ti Content Nickel-Based Superalloys and Ways to Solve the Problems of Welding Cracks[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(5): 1—16.
- [4] 张延生, 钟祖桂. 高温合金氩弧焊时冶金及工艺因素 对形成热裂纹的影响[J]. 焊接学报, 1982(2): 13—17.
 ZHANG Yan-sheng, ZHONG Zu-gui. Effect of Metallurgical and Technological Factors on the Formation of Hot Cracks in Argon Arc Welding of Superalloys[J]. Transactions of the China Welding Society, 1982(2): 13—17.
- [5] 张冬梅. 718 高温合金激光焊接及其液化裂纹形成机 理研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2015. ZHANG Dong-mei. Laser Welding of 718 Superalloy and Its Liquefaction Crack Formation Mechanism[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering and Technology, 2015.
- [6] CHAMANFAR A, JAHAZI M, BONAKDAR A, et al. Cracking in Fusion Zone and Heat Affected Zone of Electron Beam Welded Inconel-713LC Gas Turbine Blades[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 642: 230-240.
- [7] 于森. K418 高温合金涡轮裂纹产生原因分析[J]. 理化 检验(物理分册), 2011, 47(8): 511—513.
 YU Miao. Analysis of Causes of Turbine Cracks in

K418 Superalloy[J]. Physiological Investigation (Physical Volume), 2011, 47(8): 511-513.

[8] 冯吉才,王廷,张秉刚,等.异种材料真空电子束焊 接研究现状分析[J].焊接学报,2009,30(10):108— 112.

FENG Ji-cai, WANG Ting, ZHANG Bing-gang, et al. Analysis of Current Status of Vacuum Electron Beam Welding of Dissimilar Materials[J]. Transactions of the China Welding Society, 2009, 30(10): 108—112.

- [9] 闫晓锋.真空电子束焊在我国航空机载设备上的应用 及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2005(9): 90—91.
 YAN Xiao-feng. Application and Development Trend of Vacuum Electron Beam Welding on Airborne Equipment in China[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2005(9): 90—91.
- [10] 王喆,张慧,温银江. 真空电子束焊接及应用[J]. 东 方汽轮机, 2011(1): 52—58.
 WANG Zhe, ZHANG Hui, WEN Yin-jiang. Vacuum Electron Beam Welding and Application[J]. Dongfang Steam Turbine, 2011(1): 52—58.
- [11] 陈国庆,树西,柳峻鹏,等. 真空电子束焊接技术应用研究现状[J]. 精密成形工程, 2018, 10(1): 31—39.
 CHEN Guo-qing, SHU Xi, LIU Jun-peng, et al. Current Status of Application of Vacuum Electron Beam Welding Technology[J]. Precision Forming Engineering, 2018, 10(1): 31—39.
- [12] 谭观华,王善林,张子阳,等.电子束焦点位置对 TC4板材焊接接头显微组织的影响[J].精密成形工程, 2018,10(5):16—21.
 TAN Guan-hua, WANG Shan-lin, ZHANG Zi-yang, et al. Effect of Electron Beam Focus Position on Microstructure of TC4 Plate Welded Joints[J]. Precision Forming Engineering, 2018, 10(5): 16—21.
- [13] 张子阳,王善林,柯黎明.束流偏移量对 IC10/GH3039电子束焊接头成型及性能的影响[J].稀 有金属,2018(8): 826—831.
 ZHANG Zi-yang, WANG Shan-lin, KE Li-ming. Effect of Beam Offset on Forming and Properties of IC10/GH3039 Electron Beam Welded Joints[J]. Rare Metals, 2018(8): 826—831.
- [14] HAN Ke, WANG Hou-qin, LEI S, et al. Analysis of Cracks in the Electron Beam Welded Joint of K465 Nickel-base Superalloy[J]. Vacuum, 2018, 157: 21–30.
- [15] CHEN G Q, ZHANG B G, LU Tian-min, et al. Causes and Control of Welding Cracks in Electron-beamwelded Superalloy GH4169 Joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1971—1976.
- [16] PENG H, SHI Y, GONG S, et al. Microstructure, Mechanical Properties and Cracking Behaviour in a γ' -Precipitation Strengthened Nickel-base Superalloy Fabricated by Electron Beam Melting[J]. Materials & Design, 2018, 159: 155—169.