

热处理对哈氏合金 X 焊接接头组织与性能的影响

孙宇博^{1,2}, 靳朋礼¹, 马锦晖¹, 和晶¹, 崔景豪¹, 周可人¹, 崔梦茜¹, 丁坤英^{1,2}

(1. 中国民航大学, 天津 300300)

(2. 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

摘要: 本实验研究不同热处理工艺对哈氏合金 X 焊接接头组织和力学性能的影响, 分析焊后热处理对哈氏合金 X 焊接接头性能的影响规律。结果表明: 焊缝中心区域组织主要以等轴晶为主, 熔合区以枝晶为主。经 1050 °C 热处理的焊缝未析出二次相, 经 1100 °C 处理的焊缝在晶界处与晶粒内析出大量二次相, 经 1150 °C 处理的焊缝析出物发生重溶。经 1150 °C 热处理工艺后接头抗拉强度最高达 773.49 MPa; 经 1100 °C 处理的焊接接头断裂形式为沿晶脆性断裂, 其他焊接接头的断裂形式为韧性断裂。

关键词: 哈氏合金 X; TIG 焊接; 热处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG444; 146.1¹⁵

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)09-3029-06

民航发动机燃烧室是用来保证各种飞行状态下将燃料化学能转化为热能的装置, 为发动机的重要部件之一^[1]。燃烧室工作时承受着燃烧过程中空气流、燃气流脉动产生的交变力和不均匀温度场产生的热应力, 导致其零部件易产生挠曲变形, 热裂纹及烧蚀等缺陷, 而燃烧室维修技术一直被国外封锁, 严重制约了我国民航发动机深度维修技术及业务的开展, 因此燃烧室维修技术研发亟待解决。

燃烧室主要由哈氏合金 X (Hastelloy-X) 制成, 哈氏合金 X 是镍基固溶强化高温合金, 具有良好的抗氧化和耐腐蚀性能, 冷、热加工成形性能和焊接性能良好, 在 900 °C 以下有中等的持久和蠕变强度, 短时工作温度可达到 1080 °C, 主要用于航空发动机的燃烧室部件及其他高温部件^[2,3], 其产生的热裂纹及烧蚀等损伤形式现在均采用焊接方法修补。目前哈氏合金 X 的焊接方法主要以电弧焊, 激光焊为主^[4]。F. Najafzadegan 等^[5]研究 Nd-YAG 激光焊接哈氏合金 X, 得到焊缝晶粒尺寸比母材大, 硬度高, 未出现热裂纹; Z. Li 等^[6]发现 CO₂ 激光焊接哈氏合金 X, 碳化物 M₆C 存在于焊缝中, 增强了焊缝的强度及硬度。国内研究哈氏合金 C276 型号较多, 而关于哈氏合金 X 的文献资料相对很少。

本实验针对焊后热处理对哈氏合金 X TIG 焊接接头的微观组织和力学性能影响开展研究, 对于哈氏合金 X 焊接接头焊后热处理工艺的优化、力学性能的提升

具有积极的参考作用, 为民航发动机燃烧室深度维修奠定基础。

1 实验

实验材料选用规格为 100 mm×50 mm×2 mm 的哈氏合金 X 板材, 其化学成分见表 1。焊丝材料与母材一致, 直径为 1.6 mm。实验焊接设备选用松下 YC-300WXN 型 TIG 焊机, 焊枪钨极选用钨钨极。采用对接形式, 板间预留间隙为 0.8 mm, 如图 1 所示。焊前使用细晶砂轮对哈氏合金试板对接面及附近区域进行打磨处理去除氧化物及杂物, 并采用丙酮对试板进行清洗。焊接工艺参数如表 2。焊后选取 3 种热处理温度对焊接接头进行热处理, 热处理温度分别为 1050, 1100, 1150 °C, 保温 30 min, 再以冷却速率 20 °C/min 随炉冷却至 500 °C, 然后空冷。

焊后采用精密切割的方式获取焊接接头试样, 对试样镶嵌磨抛后利用王水溶液(HCl:HNO₃=3:1)进行金相腐蚀, 腐蚀时间为 20 s, 并用乙醇与蒸馏水冲洗干净。采用 Olympus 4100 激光共聚焦显微镜、Quanta FEG 250 型扫描电镜(SEM)及能谱 (EDS)观察焊接接头的微观组织及分析元素含量。焊接接头的力学性能采用室温拉伸试验和硬度试验来表征。其中室温拉伸试验数据 GBT2651-2008 《焊接接头拉伸试验方法》在 INSTRON-8802 材料试验机上完成, 硬度试验在 Zwick 全自动硬度计上进行。

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51501222); 民航局重大专项 (MHRD20160106); 大学生创新创业项目 (IECAUC2017038)

作者简介: 孙宇博, 男, 1983 年生, 助理研究员, 中国民航大学理学院天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300, E-mail: amy83767115@163.com

表 1 母材化学成分

Table 1 Chemical composition of base material (ω/%)

Element	C	Si max	Ni	Co	Cr	Al max	Ti max	B max	W	Fe max	Mo max	Cu max
Required value	0.05/0.15	1.0	Bal.	0.5/2.5	20.5/23	0.5	0.15	0.01	0.2/1.0	17/20	8/10	0.07
Measured value	0.083	0.44, 0.38	Bal.	0.75	21.26	0.29	0.06	0.001	0.4	18.57	8.22	0.09

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of welding process

Welding current/A	Welding voltage/V	Welding speed/mm·s ⁻¹	Flow of protective gas/L·min ⁻¹
25	9	1.2	10~15

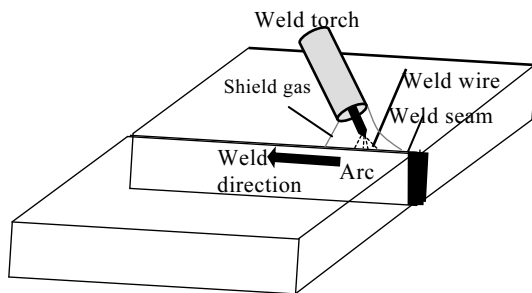


图 1 焊接示意图及夹具

Fig.1 Welding diagram and fixture

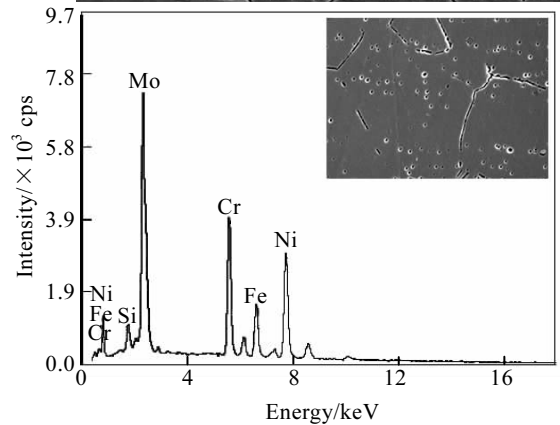
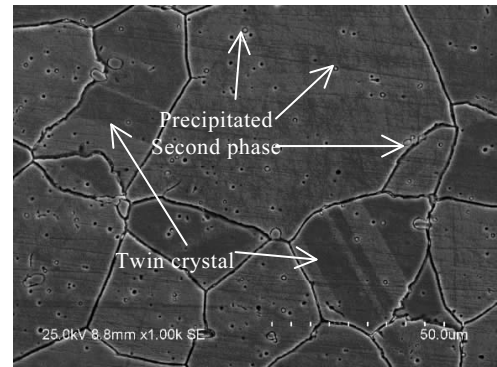


图 2 母材显微组织与母材析出物 EDS 能谱分析

Fig.2 Microstructure of the base material and EDS spectrum of the precipitates in the base material

2 结果与分析

2.1 焊缝成形及微观组织

2.1.1 哈氏合金 X 母材显微组织与焊缝形貌

采用 SEM 对哈氏合金 X 母材进行显微组织观察, 如图 2 所示, 母材组织主要以等轴晶为主, 在一些晶粒内部有少量孪晶组织, 这是由于母材经过固溶处理^[6-8]所致。并在晶粒内部与晶界处均匀分布着大量二次相析出物, 而碳化物 (M_6C , $M_{23}C_6$) 是镍基高温合金的主要强化相之一, 通常呈球状和带状分布^[9,10]。通过 EDS 分析, 确定析出物的主要化学成分(质量分数)为 19.05%Cr, 27.89%Ni, 40.23%Mo, 10.07%Fe, 2.76%Si。

图 3 所示为哈氏合金 X TIG 焊接接头横截面宏观金相组织。焊缝成形良好, 未出现气孔、裂纹等焊接缺陷。焊缝区的上表面宽约 3.91 mm, 下表面宽约 2.20 mm, 焊缝余高约 0.45 mm。焊缝主要分为枝晶区与等轴晶区, 大量联生枝晶^[11]由熔合线向焊缝中心生长。

2.1.2 焊缝微观组织与成分分析

图 4 为热处理前后的焊缝微观组织。热处理前的焊缝晶界清晰可见, 如图 4a。经 1050 °C 热处理后, 焊缝晶界处未出现明显的二次相析出物, 由于晶粒受热长大导致晶界狭窄; 图 4b 说明 1050 °C 热处理对焊缝组织特征和成分没有产生较大影响。图 4c (A, B, C) 显示, 经过 1100 °C 热处理后, 焊缝晶粒内部与晶界处析出大量二次相, 并且析出物粗大, 析出物的

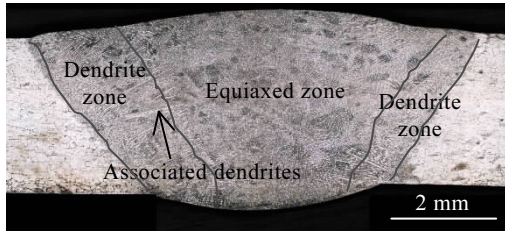


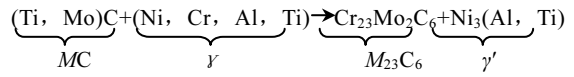
图 3 焊接接头横截面宏观金相照片

Fig.3 Cross section macroscopic metallograph of welded joint

尺寸 1~5 μm，在晶内为不规则的块状，在晶界处呈球状和带状分布。经 1150 °C 热处理的焊缝晶粒与晶界处的二次相数量减少，析出物的尺寸 1~3 μm，如图 4d (A, B)，说明在此热处理工艺下析出物发生了重溶，部分析出物溶解于母相中^[12,13]，剩余部分呈点状分布在晶界处与晶粒内部。

由能谱分析结果可知，如图 5 和表 3，热处理前后 Si、Cr 含量变化不大；而经 1100 °C 热处理后，Mo 元素含量显著升高，Fe 和 Ni 元素含量明显降低，说明二次相主要为 Mo 的碳化物，且主要分布在晶界处，使晶界硬度升高^[14]，同时也导致脆化严重。而经 1150 °C 热处理后，Mo 元素含量也有一定升高，但 Fe 和

Ni 元素含量基本不变，说明析出相发生部分重溶。由 Mo 元素含量变化推测，Mo 的碳化物在 1050~1100 °C 温度区间内孕育、析出，并在晶界处聚集。随温度继续升高，Cr 元素由 24.82% 降到 20.97%，说明 Cr 发生了扩散，导致二次相部分发生重溶。大多数 Ni 基合金中，高温的碳化物 MC 会与基体相 γ 发生反应，生成低温碳化物 M₂₃C₆，反应式如下：



硬块状 M₂₃C₆ 碳化物最初可能有利于晶界强化，最终都演变成疲劳断裂裂纹的萌生地^[15]。

2.2 不同热处理工艺对焊接接头性能的影响

图 6 和图 7 分别为热处理后焊接接头的硬度分布图及抗拉强度对比图。对比热处理前后焊接接头的测试结果可知，经 1050 °C 热处理后的焊缝组织硬度最大，约为 2650 MPa，较未热处理的焊缝硬度有所提升，可知在此温度条件下，二次相在母相中孕育，与母相形成共格，使晶粒内发生共格畸变程度最大，导致硬度明显升高，而塑性与韧性变差，致使其抗拉强度比未热处理焊接接头的抗拉强度稍微降低。而 1100 °C 热处理使得焊缝晶界与晶粒内析出大量 Mo 的碳化

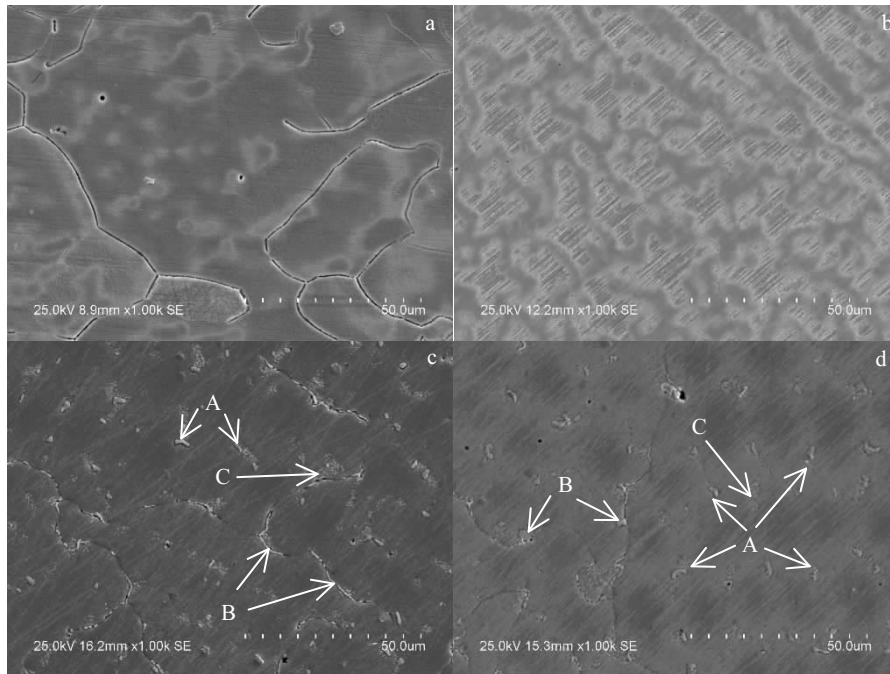


图 4 经不同热处理工艺的焊缝微观组织

Fig.4 Weld microstructures after different heat treatment processes: (a) without heat treatment; (b) heat treated at 1050 °C, (c) heat treated at 1100 °C, and (d) heat treated at 1150 °C (A: precipitates within grains MC; B: precipitates at grain boundaries M₂₃C₆; C: strengthening phase γ')

物，其硬度与未热处理的焊缝硬度基本一致，约为 2400 MPa，说明在此温度下二次相与母相保持半共格和局部脱溶的关系，减缓了共格畸变程度，造成硬度下降。析出物 $M_{23}C_6$ 主要分布在晶界处，且生长成为脆性的带状胞晶，如图 4c (B)，造成晶界脆化，合金的延展性和持久寿命就会降低^[15]，导致抗拉伸强度下降至 473.94 MPa。经 1150℃ 热处理后，焊缝的硬度进一步降低，说明二次相与母相完全脱溶析出，形成独立稳定的相，共格畸变消失，导致硬度下降，塑性与韧性得到提升。焊接接头的抗拉强度提升至 773.49

MPa，高于未热处理焊接接头抗拉强度（566 MPa），这是因为二次相析出物发生重溶，使晶界脆化程度减缓，韧性增加，提高了抗拉强度。

实验表明，在 1150 °C 热处理工艺下可以达到最佳强化效果，焊接接头抗拉强度较未热处理的焊接接头抗拉强度提升了 34.4%。

2.3 焊接接头断口形貌

焊接接头拉伸试样均在焊缝处发生断裂且整体塑性变形均匀。如图 8a 所示，可观察到未热处理的焊接接头的断裂形式为韧性断裂，其断口表面有大量韧窝

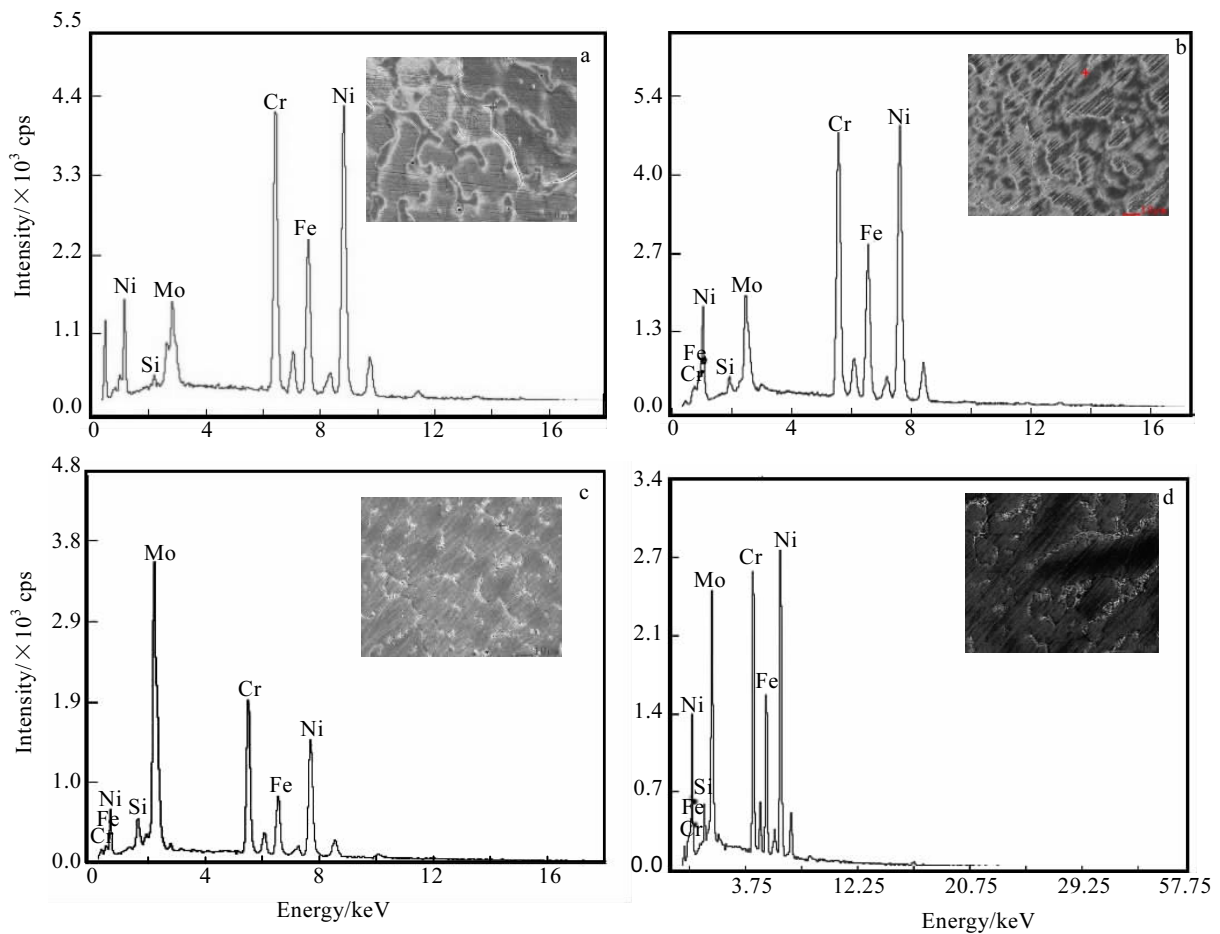


图 5 经不同热处理后的焊缝析出物能谱分析

Fig.5 Energy spectrum of the joints after different heat treatments: (a) without heat treatment, (b) heat treated at 1050 °C, (c) heat treated at 1100 °C, and (d) heat treated at 1150 °C

表 3 不同热处理后的焊缝析出物成分

Table 3 Composition of welds after different heat treatments ($\omega/\%$)

Element	Si	Mo	Cr	Fe	Ni
Without treatment	0.90	10.39	23.01	17.35	48.35
1050 °C	1.04	11.33	22.47	17.32	47.85
1100 °C	2.50	35.85	24.82	9.58	27.25
1150 °C	1.73	20.45	20.97	15.06	41.80

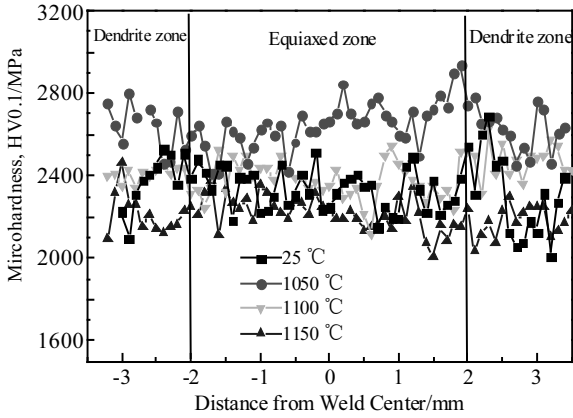


图 6 热处理工艺对焊接接头硬度的影响

Fig 6 Effect of heat treatment on hardness of welded joints

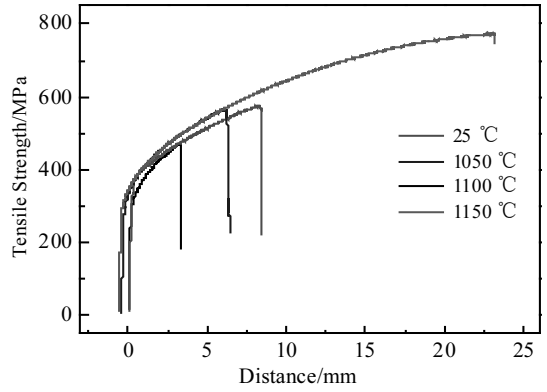


图 7 热处理工艺对焊接接头抗拉强度的影响

Fig.7 Effect of heat treatment process on tensile strength of welded joints

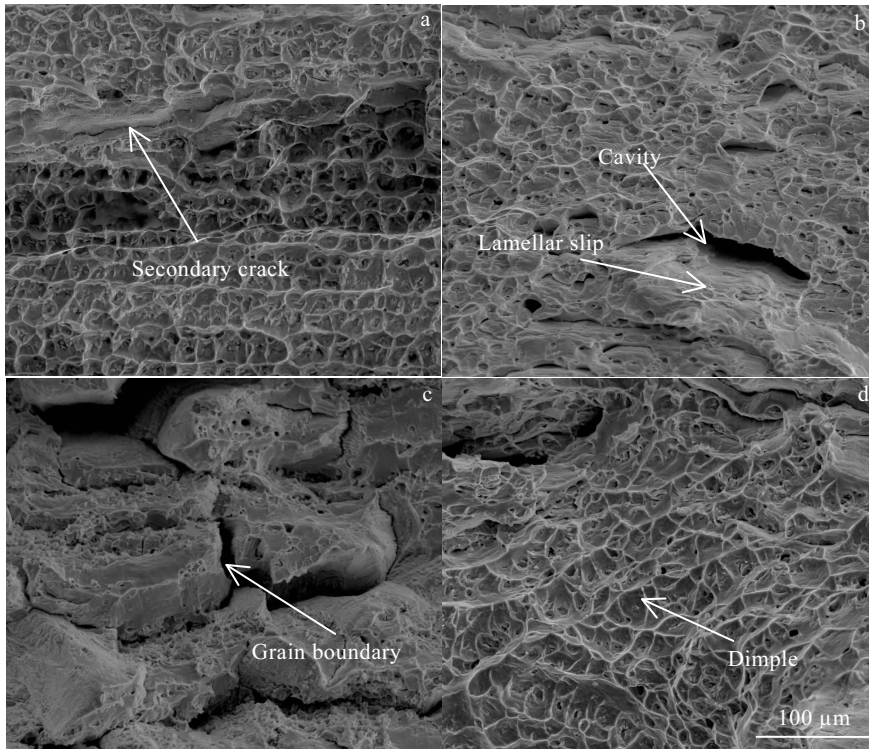


图 8 焊接接头断口形貌

Fig.8 Fracture morphology of welded joints: (a) without heat treatment, (b) heat treated at 1050 °C, (c) after heat treated at 1100 °C, and (d) heat treated at 1150 °C

及少量二次裂纹；经 1050 °C 热处理的焊接接头的断口表面部分区域内，有韧窝、层状滑移及空洞(图 8b)。经 1100 °C 热处理的焊接接头的断裂形式为以沿晶断裂为主的脆性混合断裂(图 8c)，其断口存在沿晶韧窝，表面呈冰糖状花样，并有韧窝和人字形的花纹^[16,17]。经 1150 °C 热处理的焊接接头断口表面存在大量韧窝，为韧性断裂。

3 结 论

- 1) 焊接接头经热处理后，由于二次相析出、重溶，造成微观组织局部成分发生偏析。
- 2) 在 1050 °C 条件下，二次相在焊缝晶粒内孕育，与母相发生共格畸变程度最大，使硬度最高，且没有二次相析出；在 1100 °C 条件下，晶界处和晶粒内部有大

量的二次相析出, 二次相与母相半共格或局部脱溶, 共格畸变减弱, 使硬度下降; 1150 °C 条件下, 二次相与母相完全脱溶, 形成独立稳定的二次相, 共格畸变消失, 硬度进一步下降; 并发生重溶, 使二次相含量降低。

3) 经 1100 °C 热处理后的焊缝抗拉伸强度最差为 473.94 MPa; 经 1150 °C 热处理工艺的接头抗拉强度最高达 773.49 MPa, 且焊缝韧性较好。

4) 经过 1100 °C 热处理的焊接接头断裂方式为韧脆混合的沿晶断裂, 断口表面存在大量沿晶韧窝。其余焊接接头均为韧性断裂。

参考文献 References

- [1] Sun Jianzhong(孙见忠), Zuo Hongfu(左洪福), Liang Kun(梁坤). *Journal of Mechanical Engineering*[J], 2015, 51(23): 53
- [2] Aerial Material Manual of China Editorial Board. *Aerial Material Manual of China Volume 2- Wrought Superalloy and Cast Superalloy*[S]. Beijing: China Standard Press, 2001
- [3] Kim W G, Yin S N, Kim Y W *et al. Engineering Fracture Mechanics*[J], 2008, 75(17): 4985
- [4] Graneix J, Beguin J D, Alexis J *et al. Advanced Materials Research*[J], 2015, 1099: 61
- [5] Najafzadegan F, Mansouri H, Shamanian M. *Journal of Advanced Materials and Processing*[J], 2013, 1(04): 49
- [6] Li Z, Gobbi S L, Richter K H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1997, 70(1-3): 285
- [7] Sihotang R, Sungsang P, Eungryl B. *Material Research Innovations*[J], 2015, 18(S2): 1074
- [8] Wang X, Dallemagne A, Hou Y *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 669: 95
- [9] Ma Guangyi(马广义). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013
- [10] Dong R, Li J, Zhang T *et al. Materials Characterization*[J], 2016, 122: 189
- [11] Zhang Wenyue(张文钺). *Welding Metallurgy*(焊接冶金学)[M]. Beijing: China Machine Press, 2007
- [12] Wang Zijun(王子君), Zheng Wenjie(郑文杰), Song Zhigang(宋志刚) *et al. Special Steel*(特殊钢)[J], 2011, 32(4): 67
- [13] Han Yinben(韩寅奔), Xue Xiangyi(薛祥义), Zhang Tiebang(张铁邦) *et al. Rare Metal Materials & Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(12): 3043
- [14] Wang Lu(王鲁), Yang Gang(杨钢), Liu Zhengdong(刘正东) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2016, 37(9): 62
- [15] SindoKou. Translated by Yan Jiuchun(闫久春), Yang Jiangguo(杨建国), Zhang Guangjun(张广军). *Welding Metallurgy*(焊接冶金学)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012
- [16] Hou Huipeng(侯慧鹏), Liang Yongchao(梁永朝), He Yanli(何艳丽) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2017, 44(02): 0 202 007
- [17] Zhong Qunpeng(钟群鹏), Zhao Zihua(赵子华). *Fractography*(断口学)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Hastelloy X Welded Joints

Sun Yubo^{1,2}, Jin Pengli¹, Ma Jinhui¹, He Jing¹, Cui Jinghao¹, Zhou Keren¹, Cui Mengxi¹, Ding Kunying^{1,2}

(1. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(2. Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Tianjin 300300, China)

Abstract: Effect of different heat treatment processes on the microstructure and mechanical properties of TIG welded Hastelloy X welded joints was studied by SEM and EDS. The results show that the central area of the weld is mainly composed of fine equiaxed grains, and the fusion zone is dominated by dendrites. The secondary phase is not precipitated in the weld joints heat treated at 1050 °C, while a large number of secondary phases are precipitated in the grains at the grain boundary at 1100 °C. The secondary phase at 1150 °C are partly redissolved. The tensile strength of the joint reaches up to 773.49 MPa after heat treatment at 1150 °C. The joint treated at 1100 °C shows intergranular fracture, while the rest exhibit ductile fracture.

Key words: Hastelloy X; TIG welding; heat treatment; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Sun Yubo, Assistant Researcher, Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China, E-mail: amy83767115@163.com