

Cu58MnCo 钎焊 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体 不锈钢接头组织与性能

杨敏旋¹ 蔺晓超¹ 刘春风² 张 杰²

(1. 北京动力机械研究所, 北京, 100074; 2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨, 150001)

摘要:采用 Cu58MnCo 钎焊连接 1Cr11Ni2W2MoV, 研究了工作气氛、钎焊温度和保温时间对接头组织和性能的影响。结果表明:钎焊接头主要包括 $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相, $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相和 $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相;钎焊温度升高或保温时间延长, $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相和 $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相增多, $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相含量减少, 接头拉剪强度降低;工作气氛为 70 Pa 时所获接头性能优于真空度 1×10^{-2} 下所得的接头性能。

关键词: Cu58MnCo 钎料; 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)S2-0043-05

Microstructure and Properties of 1Cr11Ni2W2MoV Martensitic Stainless Joints Brazed with Cu58MnCo Filler Metal

YANG Minxuan¹, LIN Xiaochao¹, LIU Chunfeng², ZHANG Jie²

(1. Beijing Power Machinery Institute, Beijing, 100074, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: 1Cr11Ni2W2MoV martensitic stainless were joined using Cu58MnCo filler metal. Influence of brazing temperature, holding time and working atmosphere on microstructure and properties of joints were studied. It indicated that $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ phase, $\alpha(\text{Co}) + \delta$ phase and $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ phase were observed in the joints. When brazing temperature or holding time was over high or long, the counts of $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ phase and $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ phase increased, $\alpha(\text{Co}) + \delta$ phase decreased, and the mechanical properties decreased. The properties of brazing joint get in 70 Pa better than in 1×10^{-2} Pa.

Key words: Cu58MnCo filler metal; 1Cr11Ni2W2MoV martensitic stainless; microstructure; mechanical property

1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢具有良好的韧性和抗氧化性,其室温拉伸强度、持久强度极限及蠕变极限较高,在潮湿空气中具有较好的耐蚀性,且工艺塑性和焊接性好,可制造形状复杂的模锻件,广泛应用于航天、航空和船舶等领域^[1-7]。孟冬梅^[8]采用 82Au-Ni 钎料钎焊了 FV520B 马氏体不锈钢的叶轮;杨青松等^[9]采用 (86~88)Cu(9.5

~10.5)Mn(2.5~3.5)Co 钎料进行了 YG 硬质合金与 2Cr13 马氏体不锈钢真空钎焊及热处理一体化工艺研究;Venkateswaran 等^[10]研究了 Cu-Ag-Mn-Zn 钎料在马氏体不锈钢表面的润湿性,及所获接头的力学性能和微观组织。1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢广泛用于航空、航天发动机的燃烧室机匣和风扇静子等构件,但此材

收稿日期:2018-03-23;修订日期:2018-05-30

通信作者:杨敏旋,女,高工,E-mail:284620789@qq.com。

引用格式:杨敏旋,蔺晓超,刘春风,等. Cu58MnCo 钎焊 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢接头组织与性能[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(S2): 43-47. YANG Minxuan, LIN Xiaochao, LIU Chunfeng, et al. Microstructure and properties of 1Cr11Ni2W2MoV martensitic stainless joints brazed with Cu58MnCo filler metal[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S2): 43-47.

料钎焊工艺及工作气氛对钎缝的影响未见相关报道。故本文研究了 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢的钎焊工艺及其对接头性能的影响。

1 实验材料和方法

1Cr11Ni2W2MoV 标准热处理制度 1 000~1 020 °C 淬火+660~710 °C 或 540~600 °C 回火。应真空钎焊及热处理一体化技术要求,尽量选熔点在 1 000~1 020 °C 范围的钎料。Cu58MnCo, 82AuNi 和 54Ag21Cu25Pd 是在该范围用于马氏体不锈钢钎焊的常用钎料,所获接头工作温度分别为 538,649 和 427 °C^[3]。航天发动机机匣类构件的工作温度一般为 450 °C,Cu58MnCo 和 82Au-Ni 钎料可用,前者较后者经济性好,故本文用钎料选 Cu58MnCo。1Cr11Ni2W2MoV 和 Cu58MnCo 的具体成分分别如表 1 和表 2 所示(表中的成分含量为质量分数)。

表 1 1Cr11Ni2W2MoV 成分

Tab. 1 1Cr11Ni2W2MoV composition %					
元素	Mn	Si	Cr	Ni	W
含量	≤0.6	≤0.6	10.5~12	1.4~1.8	1.5~2
元素	Mo	V	C	Fe	杂质
含量	0.35~0.5	0.18~0.3	0.1~0.16	余量	≤0.05

表 2 Cu58MnCo 钎料成分

Tab. 2 Cu58MnCo filler metal composition %				
元素	Mn	Co	Cu	杂质总和
含量	31.6	10.5	58.15	≤0.40

实验用马氏体不锈钢分别线切割成 10 mm×6 mm×1.5 mm 和 15 mm×60 mm×1.5 mm 的组织用样和力学性能用样;待钎焊面打磨后在丙酮中超声波清洗 10 min 吹干;预置 Cu58MnCo 钎料在待钎焊部位,然后放置到真空炉中钎焊。工艺实验的热循环曲线:以 8~10 °C/min 速度加热至 700 °C,保温 30 min;以 5~8 °C/min 速度加热至 900 °C,保温 30 min;最后以 3~5 °C/min 速度升至 990~1 050 °C,保温 5~30 min,随炉冷却至 400 °C 后,快冷至 100 °C 以下,出炉。出炉后的组织分析用试样沿钎缝垂直切开后制样,在 FEI Quanta200F 型扫描电镜下观察接头组织,并用其配备的 EDS 能谱仪进行钎缝组织成分分析。在 Instron5569 万能试验机上进行接头的拉剪强度测试,每个参数测试 3 个样品并取平均值。

2 实验结果

图 1 是采用 Cu58MnCo 钎料,钎焊温度为 1 010 °C,保温 10 min,工作气氛为 70 Pa 条件下所得 1Cr11Ni2W2MoV 接头组织。钎缝组织致密,与母材结合界面质量良好,主要由 A 相、B 相和 C 相组成,B 相和 C 相呈鹅卵石状分布于钎缝,其成分见表 3(表中成分含量为原子分数)。结合钎料元素(Cu 元素、Mn 元素和 Co 元素)与母材元素(Cr 元素、Fe 元素、Ni 元素、Mo 元素和 V 元素)之间的二元相图,A 相为 $\alpha'+[\gamma(\text{Fe}),\gamma(\text{Mn})]$ 固溶体,B 相为 $\alpha(\text{Co})+\delta$ 固溶体,C 相为 $[\text{Cu},\gamma(\text{Mn})]+\alpha(\text{Mn})$ 固溶体。固溶体构成的 Cu58MnCo 钎焊 1Cr11Ni2W2MoV 接头属理想接头。

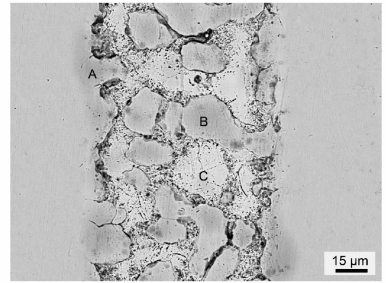


图 1 钎焊接头的显微组织

Fig. 1 Microstructure of brazing joint

表 3 钎缝中各相的 EDS 分析

Tab. 3 EDS results of different places in brazing seam %						
相区	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	可能相
A	7.01	16.27	45.09	26.71	4.92	$\alpha'+[\gamma(\text{Fe}),\gamma(\text{Mn})]$
B	1.72	37.58	7.30	32.76	20.64	$\alpha(\text{Co})+\delta$
C	0.39	28.06	2.61	9.16	59.78	$[\text{Cu},\gamma(\text{Mn})]+\alpha(\text{Mn})$

图 2 是采用 EDS 面扫描得出的钎焊温度 1 010 °C,保温时间 10 min,工作气氛 70 Pa 下的钎缝主要元素分布图。从图中可看出,钎缝中主要有 Cu 元素、Mn 元素和 Co 元素,另外,还有少量的 Fe 元素、Ni 元素和 Cr 元素,其中 Cu 元素、Mn 元素、Co 元素是钎料主元素,Fe 元素、Ni 元素和 Cr 元素是在钎焊过程中由母材扩散至钎缝的元素。各元素在钎缝中的分布:Cu 元素主要分布在钎缝中部,靠近母材界面处几乎没有;Mn 元素分布在钎缝中部;Co 元素主要分布在母材界面处,钎缝中部有少量分布;Fe 元素主要分布在 Co 元素分布区;Ni 元素和 Cr 元素均匀分布在钎缝中,Cr 元

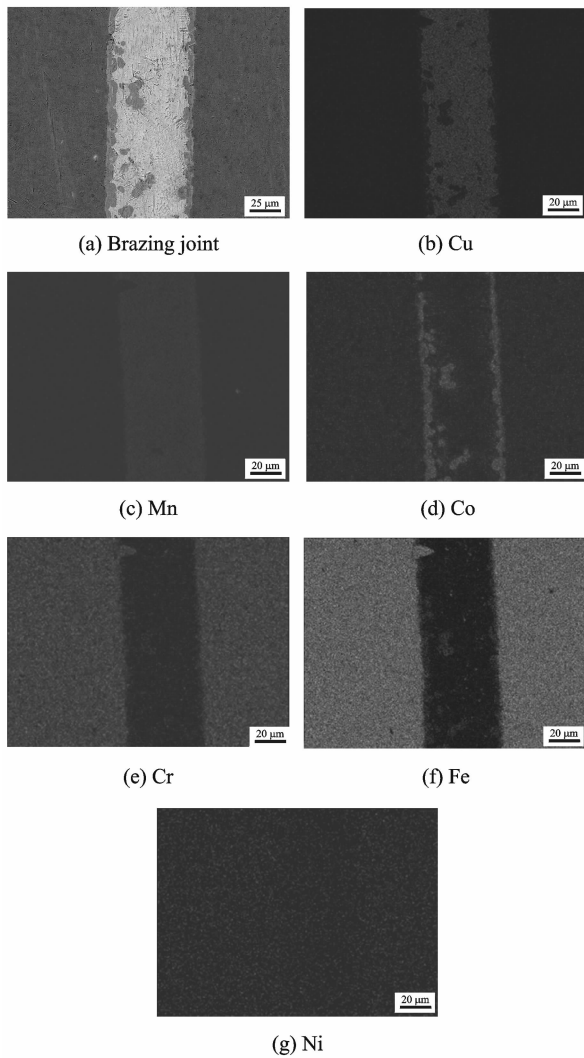


图 2 钎焊接头的元素

Fig. 2 Elements in brazing joint

素在 Fe 元素分布区含量稍高。这是因为 Co-Cr, Co-Ni, Cu-Ni, Fe-Co, Mn-Cr, Mn-Ni, Cu-Mn 均可形成固溶体。元素分布和元素彼此间固溶体的形成与表 3 的分析结果一致。

2.1 工作气氛对钎焊接头组织结构的影响

Cu58MnCo 钎料的 3 种主要元素饱和蒸汽压如表 4 所示。1 000 °C 时,真空炉工作真空度约 5×10^{-3} Pa。钎焊过程,加热到 700 °C 时,Mn 元素开始挥发;加热到 1 000 °C 时,Cu 元素开始挥发;加热到 1 200 °C 时,Co 元素开始挥发。为避免 Mn 元素的挥发,加热到 700 °C 时,工作真空度应低于 1×10^{-2} Pa。

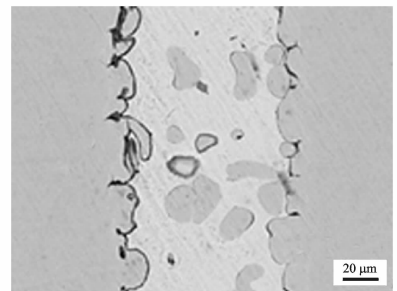
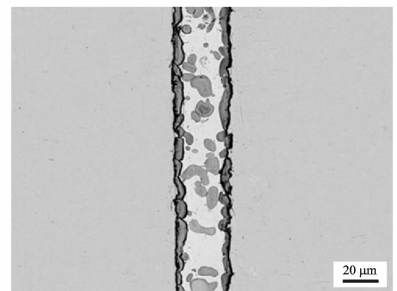
图 3 比较了工作真空度 5×10^{-3} Pa 和 700 °C 时分压 70 Pa 高纯氩气的工作气氛下,钎焊温度 1 010 °C,保温时间 10 min,所得钎焊接头的组织。从图中可看出,工作气氛对钎缝组织的影响较大:工作真空度 5×10^{-3} Pa 时,钎缝中的 Cu 元素和

Mn 元素挥发,母材与钎缝处几乎没有反应层。这主要是因为 Mn 元素的挥发,钎缝中的 Mn 含量降低,进而降低钎料在 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢表面的润湿,使其中的 Fe 元素和 Co 元素不易与钎料发生反应,从而使得钎缝中的 $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相减少。而在 700 °C 分压时,则避免了 Mn 元素的挥发,从而在钎缝与母材的界面处形成连续的反应层,钎缝中 $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相和 $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相的含量均有增加。

表 4 Cu58MnCo 钎料中各元素的饱和蒸汽压

Tab. 4 Vapor pressures of elements in Cu58MnCo filler metal

真空度/Pa	元素/°C		
	Cu	Mn	Co
10^{-5}	787	554	992
10^{-4}	852	611	1 067
10^{-3}	937	675	1 157
10^{-2}	1 027	747	1 257
10^{-1}	1 132	837	1 382
1	1 257	937	1 517
10	1 417	1 082	1 687
100	1 617	1 217	1 907

(a) 1×10^{-2} Pa

(b) 70 Pa

图 3 不同工作气氛下的钎焊接头的显微组织

Fig. 3 Microstructure of brazing joints at different atmosphere

2.2 钎焊温度对钎焊接头组织和力学性能的影响

1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢淬火温度为

990~1 020 °C,故钎焊温度应在此区间。图4是钎焊温度990,1 010和1 050 °C,保温时间10 min下,工作气氛为70 Pa条件下的钎焊接头的组织。

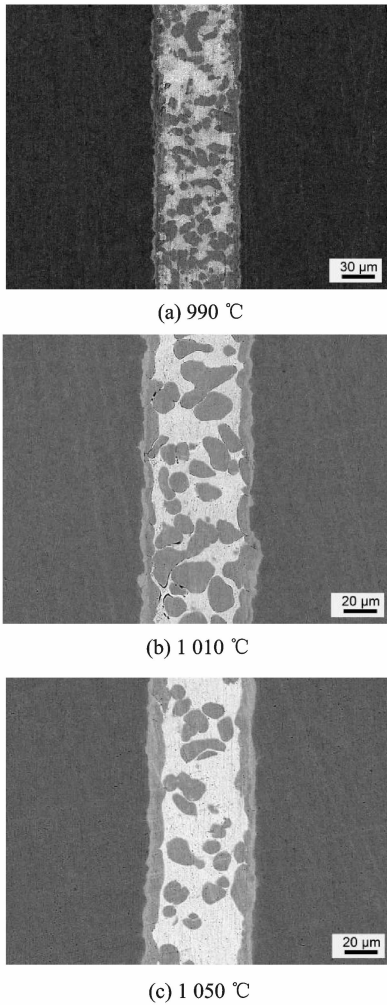


图4 不同钎焊温度下的接头界面组织
Fig. 4 Microstructure of joints brazed at different temperature

随钎焊温度的升高,加剧了母材中的Fe元素、Cr元素和Ni元素向钎料溶解,及其与钎料元素(Cu, Mn, Co)之间的相互扩散。更多的Co元素和Mn元素聚集在母材一侧,与母材中的Fe和Cr等元素反应,使得钎缝与母材界面反应层变厚,界面区形成更多的 $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相,而钎缝中的 $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相含量减少, $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相的比例增加。

2.3 保温时间对钎焊接头组织结构的影响

图5是钎焊温度1 010 °C,保温时间5,10和30 min,工作气氛为70 Pa条件下的钎焊接头组织。随保温时间的延长,母材向钎料的溶解,及其与钎料元素间的相互扩散更加充分。

钎缝组织的演变趋势与钎焊温度升高所引起的钎缝组织变化一致,均是 $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$

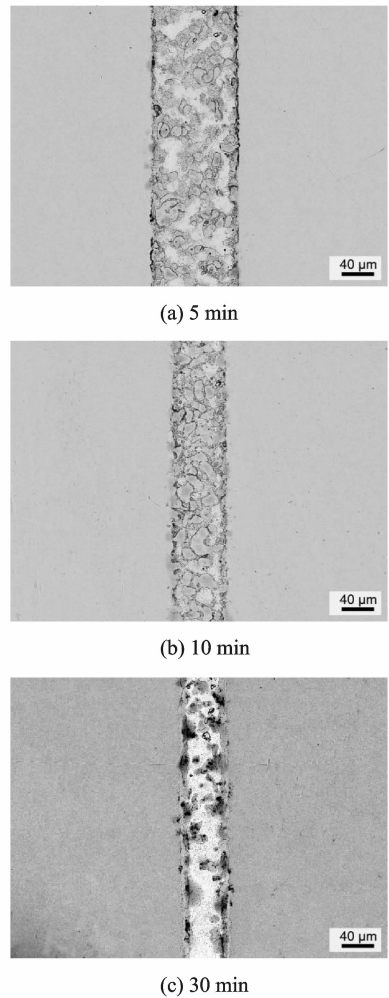


图5 不同保温时间的接头界面组织
Fig. 5 Microstructure of joints brazed at different time

相,而钎缝中的 $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相含量减少, $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相的比例增加。

2.4 钎焊工艺参数对接头力学性能的影响

表5是不同钎焊工艺参数所得接头的抗拉剪强度,表中2#试样的强度最高,1#试样的强度最低。在实验的参数范围内,试样强度的变化规律为:工作气氛70 Pa条件下所得接头的强度高于真空工作气氛下所得接头的强度;随钎焊温度升高,接头强度下降;随保温时间延长,接头强度下降。此规律与钎焊接头的组织密切相关。钎焊过程的持续高真空,使钎料中的Mn元素挥发,降低了母材与钎料的相互作用,母材与钎缝结合界面处无法形成连续的界面反应层,钎焊接头强度降低。钎焊温度升高和保温时间的延长则使得母材与钎料的相互作用加剧,母材与钎缝结合界面处形成的界面反应层增厚, $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相含量增加, $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相含量减少, $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相比比例增加。

表 5 不同钎焊工艺参数下接头拉剪强度

Tab. 5 Tension-shear strength of joints brazed at different processing parameters

试样编号	钎焊温度 $T/^\circ\text{C}$	保温时间 t/min	工作气氛 p/Pa	拉剪强度 σ/MPa
1#	1 010	10	5×10^{-2}	242
2#	990	10	70	495
3#	1 010	10	70	413
4#	1 050	10	70	317
5#	1 010	5	70	446
6#	1 010	30	70	337

一方面, $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相的硬度高于钎缝中心形成的 $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相的硬度^[9], 界面反应层增厚使界面处残余应力不易释放, 导致接头强度降低; 另一方面, $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相作为硬相在具有良好塑性的 $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相中分布, 有利于接头强度的提高, 故 $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相的减少也会导致接头强度的降低。最后, 高的钎焊温度和长的保温时间在冷却过程中, 接头自身也会产生较大的残余应力。

3 结 论

(1) 采用 Cu58MnCo 钎焊 1Cr11Ni2W2MoV 的接头界面良好, 钎缝与母材界面处可形成连续反应层, 接头组织包括: $\alpha' + [\gamma(\text{Fe}), \gamma(\text{Mn})]$ 相, $\alpha(\text{Co}) + \delta$ 相和 $[\text{Cu}, \gamma(\text{Mn})] + \alpha(\text{Mn})$ 相。

(2) 采用 Cu58MnCo 钎料钎焊时, 工作气氛应低于 Mn 元素的饱和蒸汽压, 可通高纯氩气降低工作真空度。

(3) 采用 Cu58MnCo 这类不含低熔点元素的钎料钎焊时, 在保证钎料熔化与母材发生反应的前提下, 钎焊温度和保温时间的参数应尽可能小。

参考文献:

[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册——结构钢不锈钢[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.

- [2] MARCELIN S, PEBERE N, REGNIER S. Electrochemical characterisation of a martensitic stainless steel in a neutral chloride solution[J]. Electrochim. Acta, 2013, 87: 32-40.
- [3] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 胡凯, 武明雨, 李运刚. 马氏体不锈钢的研究进展[J]. 铸造技术, 2015, 36(10): 2394-2400. HU Kai, WU Mingyu, LI Yungang. Research progress of martensitic stainless steel[J]. Foundry Technology, 2015, 36(10): 2394-2400.
- [5] LI Huiyan, DONG Chaofang, XIAO Kui, et al. Relationship between microstructure and corrosion behavior of Cr12Ni3Co12Mo4W ultra-high-strength martensitic stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2016, 29(1): 1064-1072.
- [6] LI H, LI M Q, ZHANG X Y, et al. Characterization of the forgeability of 1Cr11Ni2W2MoV steel using processing map[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 6505-6510.
- [7] CHOUDHARY R K, LAIK A, MISHRA P. Microstructure evolution during stainless steel-copper vacuum brazing with a Ag/Cu/Pd filler alloy: Effect of nickel plating[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26: 1085-1100.
- [8] 孟冬梅. 带曲率叶片窄流道叶轮真空钎焊制造工艺技术的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [9] 杨青松, 王海龙, 邹坤, 等. YG8 硬质合金与 2Cr13 马氏体不锈钢真空钎焊及热处理一体化工艺研究[J]. 金属铸锻焊技术, 2010, 39(5): 148-154. YANG Qingsong, WANG Hailong, ZOU Kun, et al. Integrative process of vacuum brazing and heat-treating for YG8 cemented carbide and 2Cr13 martensitic stainless[J]. Hot Working Technology Steel, 2010, 39(5): 148-154.
- [10] VENKATESWARAN T, VINCENT X, SIVAKUMAR D, et al. Brazing of stainless steels using Cu-Ag-Mn-Zn braze filler: Studies on wettability, mechanical properties, and microstructural aspects[J]. Materials and Design, 2017, 121: 213-228.

(编辑: 胥橙庭)