

镍基合金/不锈钢钨极惰性气体钎焊接头的特性

宋建岭, 林三宝, 杨春利, 范成磊

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 选用 CuSi3 焊丝对镍基合金/不锈钢进行钨极惰性气体(TIG)钎焊实验, 运用 OM、SEM 和 EDS 分析接头微观组织, 通过拉伸实验和硬度实验评定接头的力学性能。结果表明: TIG 钎焊接头具有熔焊和钎焊的双重性质, 不锈钢母材局部熔化, 生成 Fe 基熔合区; 在接头搭接区及镍基合金母材与焊缝金属之间存在界面反应层, 反应层可分为熔化未混合区、Ni 基树枝晶和晶间 Cu 基区; 焊缝区为 Cu 基体上分布着颗粒状 Fe 基固溶体; CuSi3 接头剪切强度达到 195 MPa, 接头断裂于焊缝与不锈钢界面处, 断口为微孔聚合机制引起的塑性断裂; 在界面处硬度值发生突变, Ni 基树枝晶硬度值达到 HV433.3, 不锈钢熔合区中的 Fe 基体硬度值达到 HV453.4, 近界面处焊缝区 Cu 基体硬度值为 HV150。

关键词: 钨极惰性气体钎焊; 界面反应层; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 457.1

文献标识码: A

Characteristics of tungsten inert gas brazing joints of nickel-based alloy and stainless steel

SONG Jian-ling, LIN San-bao, YANG Chun-li, FAN Cheng-lei

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The tungsten inert gas(TIG) brazing of nickel-based alloy and stainless steel using CuSi3 wire was carried out. The microstructures and mechanical properties of the joint were studied using OM, SEM, EDS, instron-testing machine and hardness measurement device. The results show that the joint has dual characteristic and is divided into a welding part on the stainless steel and a brazing part on the nickel-based alloy. The stainless steel fusion zone is made of Fe-based solid solution, the interface reaction layer is made of molten unmixed zone, Ni-based fir-tree crystal microstructure and Cu-based solid solution in the intergranular. The weld is made of α -copper matrix and Fe-based solid solution in the matrix. The shear strength reaches 195 MPa and the shear fracture occurs at the interface between brazing alloy and stainless steel. The microhardness in the Ni-based fir-tree crystal, the Fe-based solid solution of the fusion zone and Cu-based solid solution of the weld near the interface reach HV433.3, HV453.4 and HV150, respectively.

Key words: tungsten inert gas brazing; interface reaction layer; microstructure; mechanical properties

某型号发动机束式喷管延伸段由镍基合金方管拼焊制造而成, 在实际制作过程中需要焊接不锈钢加强环进行约束, 如何连接该镍基合金方管拼焊板和不锈钢加强环是生产过程中面临的一个难题。如果采用普通电弧熔焊的方法, 其热输入量高, 热影响区过热度

大, 焊后工件变形量大, 对于薄板容易产生焊穿现象, 焊接过程中易产生熔滴飞溅, 影响其焊缝表面成形^[1]。如果采用炉中钎焊或真空钎焊, 其要求整体加热, 且加热时间长; 焊后工件变形量大, 对间隙配合要求高, 且消耗大、成本高; 火焰钎焊加热区宽, 热量输入不

易控制,焊后也会导致大的残余变形,尤其是薄壁工件变形更大,且产生合金元素氧化烧蚀现象^[1-2]。

钨极惰性气体(TIG)钎焊是在氩气保护下,采用非熔化的钨合金作为电极,在钨极与工件间形成电弧,焊接过程中母材不熔或微熔,采用特制的钎焊丝连续送进并熔化形成填充金属,将母材连接起来的一种复合焊接工艺。TIG钎焊热输入量小,加热速度快,接头在高温停留时间短,热影响区过热度低,母材金属不易产生晶粒长大,不易产生热裂纹,具有焊缝成形美观,工件变形量小,接头强度高,可以实现焊接过程自动化等优点,在异种材料连接、薄壁器件连接等领域具有广阔的应用前景^[3-10]。PATON WI焊接工作者等对TIG钎焊工艺和特种焊丝方面做了大量的工作^[11-14],姜晓飞等^[3]和于治水等^[5]对镀锌钢板TIG钎焊工艺做了探索性的研究,但对于镍基合金与不锈钢异种材料的TIG钎焊连接的研究至今未见报道。本文作者采用CuSi3焊丝对Inconel 600/1Cr18Ni9Ti进行了TIG钎焊实验,研究了接头微观组织和力学性能。

1 实验

1.1 实验材料

实验母材为镍基合金 Inconel 600 和不锈钢 1Cr18Ni9Ti,镍基合金为 5 mm×4 mm 方管,壁厚为 0.33 mm,不锈钢为 2 mm 厚的板材,两种材料的化学成分列于表 1 中。实验用钎焊丝为 $d_{1.2}$ mm 的 CuSi3 焊丝,焊丝成分(质量分数,%)为: Si3.00, Mn1.00, Zn0.50, Cu 余量;焊丝熔化温度为 950~1 027 °C。

1.2 实验过程

将镍基合金方管 TIG 拼焊板切成 40 mm×40 mm 规格,不锈钢板切成 80 mm×40 mm×2 mm 规格,在镍基合金拼焊板上搭接不锈钢板,如图 1 所示。焊前用打磨机、砂纸除去试件表面氧化膜、油污等,然后用丙酮擦洗干净。焊接工艺参数为:焊接电流 35 A,电弧长度 3.0 mm,焊接速度 120 mm/min,送丝速度 300 mm/min,氩气流量 5.0 L/min。

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental materials (mass fraction, %)

Base metal	Ni	Cu	Fe	Cr	Mn	Si	C	S	P	Ti
Inconel600	76.00	0.25	8.00	15.50	0.50	0.25	0.08			
1Cr18Ni9Ti	8.00-11.00			17.00-19.00	2.00	1.00	0.12	0.03	0.04	0.10-0.80

焊后对接头进行垂直切割,将切割后的试样用树脂塑封,采用水磨砂纸按 500#、800#、1 000#顺序打磨,然后用粒度为 1 μ m 的金刚石抛光剂抛光,抛光后的样品采用 5 g FeCl₃ 粉末+15 mL 盐酸+85 mL 水的腐蚀剂腐蚀 5~8 s 制成试样。使用金相显微镜(OM) OLYMPUS GX71 分析接头宏观特征,用扫描电镜(SEM)S-3400N 和能谱仪(EDS)分析接头微观组织特征。制作剪切试件,在万能电子拉伸机 INSTRON5500R 上测试焊缝剪切强度,并对断口进行扫描分析,确定接头断裂状态,在韦氏硬度仪上测量接头不同部位的硬度值。



图 1 镍基合金拼焊板与不锈钢搭接装配图

Fig.1 Assembly diagram of nickel-based alloy and stainless steel

2 结果与分析

2.1 接头宏观特征

镍基合金/不锈钢 TIG 钎焊接头横截面如图 2 所示。接头具有熔焊与钎焊双重性质:在电弧热作用下,CuSi3 焊丝熔化铺展填充搭接焊缝,钎料与镍基合金和不锈钢两种母材均发生了界面反应,少量熔化母材与熔化焊丝混合后凝固形成焊缝。不锈钢边受电弧加热多,产生熔化现象,熔化的不锈钢在电弧力的作用下进入焊缝中与液态钎料混合,凝固形成焊缝组织。

2.2 接头微观组织特征

图 3 所示为接头的微观组织和 EDS 分析测试点位置。各点 EDS 测试元素的化学成分如表 2 所列。结合图 2 和 3 及 EDS 分析可知,不锈钢界面处形成较宽的熔合区,同时熔化母材在电弧力作用下沿不锈钢边流动在下部凝固成大块 Fe 基固溶体,由于钎焊温度低,冷却速度快,熔合区中只有少量的液态钎料元素扩散

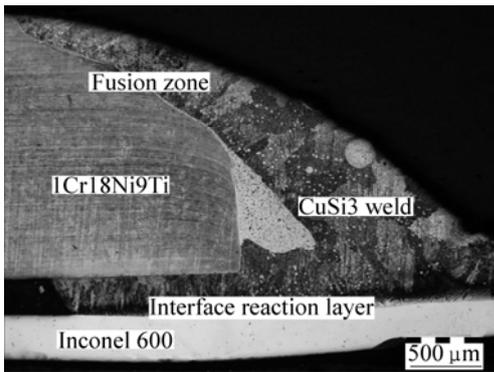


图 2 TIG 钎焊搭接接头横截面形貌
Fig.2 Morphology of cross section of TIG brazing lap joint

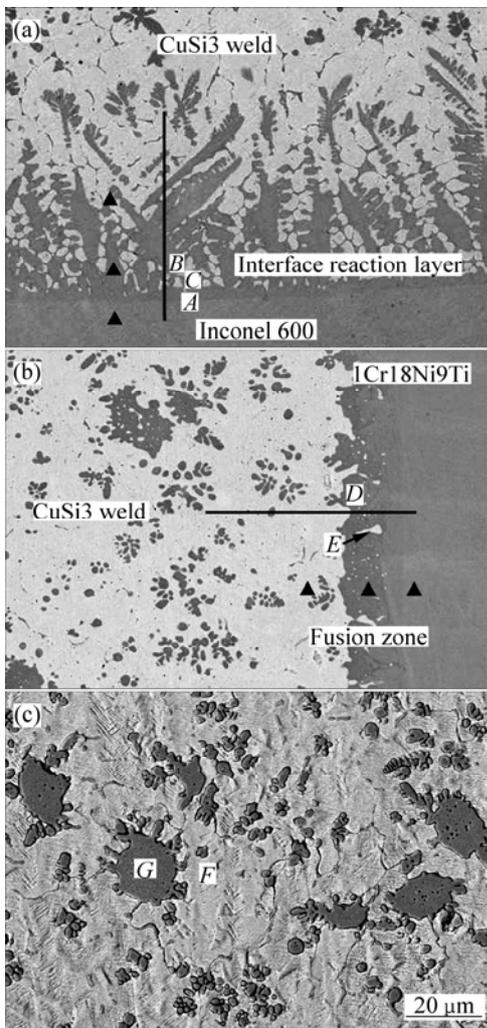


图 3 CuSi3 接头的微观组织
Fig.3 Microstructures of CuSi3 joint: (a) Interface reaction layer of nickel-based alloy; (b) Fusion zone of stainless steel; (c) CuSi3 weld

进来形成颗粒状 Cu 基固溶体。搭接处及镍基合金母材受电弧加热少, 焊缝金属与母材为钎焊结合, 镍基

合金表面与液态铜基钎料发生界面反应, 以树枝晶形式向焊缝区生长, 界面反应层的存在保证了钎料与镍基合金具有较高的结合强度。在电弧吹力不均匀的搅拌作用下, 焊缝中存在大量尺寸不等的高温 Fe 基颗粒, 分析认为在 TIG 钎焊过程中液态钎料凝固速度快, 过冷度大, Cu-Fe 系随过冷度的增大, 液态不可混性的热力学倾向增大, 引起液态分离, 产生 Fe 基球状颗粒。

由图 3 可看出, 镍基合金界面反应层分为 3 个不同区域: 熔化未混合区(A)、镍基树枝晶区(B)和晶界铜基区(C)。在 A 区, 母材表面在液态钎料的作用下出现了溶蚀现象, 由于热输入量小, 钎料凝固速度快, 液态钎料元素没有获得足够的热量向母材中扩散, 形成熔化未混合区; 在 B 区, 熔化母材中 Fe、Ni 和 Cr 等元素与液态钎料中 Cu 和 Si 等元素在高温下互溶, 以树枝晶形式向焊缝区生长, 由表 3 能谱定量分析及相关二元相图^[15]可知, Fe-Ni 和 Cu-Ni 元素间可以无限固溶, Fe-Cu 间虽为有限固溶, 但不形成化合物, Fe-Si 间的 Si 含量超过 10%时才有可能形成化合物, 因此生成成分复杂的 Ni 基固溶体组织, 组织中存在较多的 Si 元素, Si 原子尺寸较小, 可以形成间隙固溶体, 起到固溶强化的作用; 在枝晶间 C 区形成 Cu 基固溶体组织。不锈钢熔合区组织是以 Fe 基固溶体为基体, 在其上分布着颗粒状 Cu 基固溶体(见 D 区和 E 区)。焊缝区组织是以 Cu 基固溶体为基体, 在其上分布着尺寸大小不等的颗粒状 Fe 基固溶体(见 F 区和 G 区), 在 Cu 基体中固溶了少量的 Si 和 Mn 等元素提高了接头强度。同时, 在大块 Fe 基固溶体颗粒内部存在液态分离过程中形成的许多细小 Cu 基颗粒, 这在图 3(b)中更清楚, 在进行能谱分析过程中, 点有时打在 Cu 基颗粒边界上, 因此 G 区显示含有较高的 Cu 含量。

对界面区进行线扫描, 扫描位置如图 3 所示, 线扫描结果如图 4 所示。在镍基合金界面层 Ni 基树枝晶固溶体成分较为稳定, 而树枝间 Cu 基固溶体组织成分发生很大变化, 距离界面处越近, Cu 和 Si 元素含量逐渐减少, Cr 和 Fe 含量逐渐升高, 并在界面处发生突变, 镍基合金母材中没有发生钎料元素的扩散。在不锈钢熔合区附近的焊缝区, Cu 基体成分稳定, 在界面发生成分突变, 熔合区为 Fe 基固溶体, 含 Cu 量很少, 同时发生了 Si 元素的扩散, 距离母材越近, 界面反应区中的 Si 含量逐渐降低。

2.3 接头力学性能分析

由于 TIG 拼焊的镍基合金方管不能大力装卡, 镍基合金两边分别钎焊不锈钢板, 通过装卡不锈钢板进行剪切实验, 试件制作如图 5 所示。实验测得接头剪

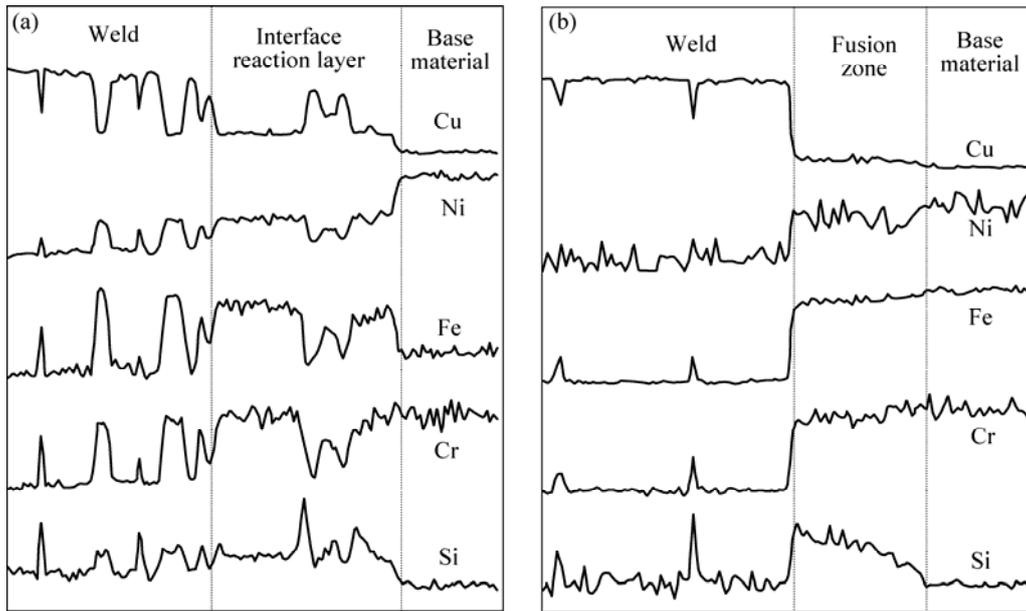


图 4 接头界面反应区的 EDS 线扫描结果

Fig.4 EDS line scanning results of interface reaction layer: (a) In interface reaction layer of nickel-based alloy; (b) In fusion zone of stainless steel

表 2 CuSi3 接头微观组织不同区域的 EDS 分析

Table 2 EDS analysis at different areas in CuSi3 joint (mass fraction, %)

Area	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
A	0	0.45	17.31	0	8.68	73.56	0
B	5.56	0.66	15.70	0	13.99	43.40	20.69
C	6.68	0.76	6.96	1.45	7.45	28.79	47.91
D	3.93	0.39	17.97	0.17	62.66	6.51	8.37
E	2.82	0.64	3.72	1.76	9.77	1.04	80.23
F	2.08	1.46	1.67	3.37	4.76	4.74	81.92
G	6.91	0.54	8.36	1.55	57.12	16.04	9.48

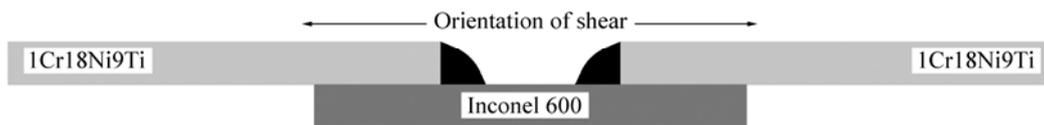


图 5 剪切试件示意图

Fig.5 Sketch diagram of shear sample

切强度达到 195 MPa, 接头断裂于焊缝与不锈钢界面上(见图 6)。对界面反应区进行硬度分析, 测试点如图 3 中“▲”所示, 实验测得镍基合金母材硬度为 HV183.0, 界面反应层由于 Si 和 Ti 等合金元素的固溶

强化作用^[16-17], 使硬度发生突变, Ni 基树枝晶硬度达到 HV433.3; 不锈钢母材硬度为 HV187.2, 熔合区 Fe 基体由于 Si 元素的固溶强化作用, 硬度发生突变, 硬度值达到 HV453.4; 近界面处焊缝区, Cu 基体硬度值

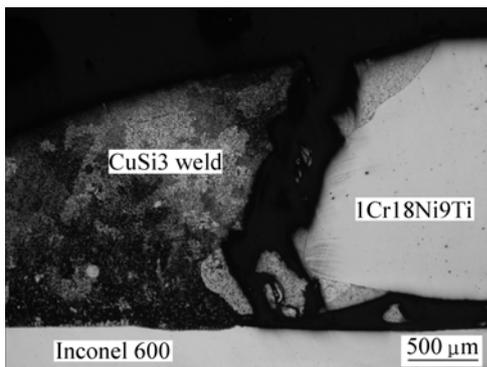


图6 CuSi3接头断裂位置的形貌

Fig.6 Morphology of fracture position of CuSi3 joint

为 HV150。

图7所示为CuSi3接头断口形貌。由图7可看出，断口存在许多的韧窝，具有较明显的撕裂棱，韧窝尺寸比较小，断口存在许多微裂纹。分析认为，断口是由微孔聚合机制引起的塑性断裂，在剪切应力作用下，焊缝内部产生微裂纹，在外力的持续作用下，微裂纹逐渐长大，最终微裂纹间相互联系产生断裂。

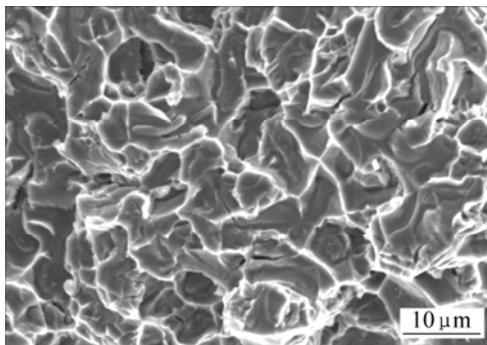


图7 CuSi3接头断口形貌

Fig.7 Shear fractograph of CuSi3 joint

3 结论

1) TIG钎焊具有熔焊和钎焊的双重性质，不锈钢边受电弧加热多，产生熔化现象，在界面处形成较宽的熔合区；搭接处及镍基合金母材受电弧加热少，焊缝金属与母材为钎焊结合，镍基合金表面与液态铜基钎料发生界面反应，以树枝晶形式向焊缝区生长，界面反应层的存在保证了钎料与镍基合金具有较高的结合强度。

2) 镍基合金界面反应层分为3个不同区域：熔化未混合区、Ni基树枝晶区和晶界Cu基区。不锈钢熔

合区组织是以Fe基固溶体为基体，在其上分布着颗粒状Cu基固溶体；焊缝区组织是以Cu基固溶体为基体，在其上分布着尺寸大小不等的颗粒状Fe基固溶体。在界面区存在Si元素的扩散，距离母材越近，Si含量逐渐减少。

3) CuSi3接头剪切强度达到195 MPa，接头断裂于焊缝与不锈钢界面上，断口为微孔聚合机制引起的塑性断裂；在界面处硬度值发生突变，Ni基树枝晶硬度达到HV433.3；不锈钢熔合区的Fe基体硬度值达到HV453.4，近界面处焊缝区的Cu基体硬度值为HV150。

REFERENCES

- [1] 李亚江. 特殊及难焊材料的焊接[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
LI Ya-jiang. Welding & joining of special and difficult welded materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [2] 赵越. 钎焊技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
ZHAO Yue. Technology and application of brazing & soldering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 姜晓飞, 何鹏, 冯吉才, 石常亮. CMT法30CrMnSi钢板表面熔敷CuSi3接头组织结构特征[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 47-50.
JIANG Xiao-fei, HE Peng, FENG Ji-cai, SHI Chang-liang. Microstructure characteristics of CuSi3 cladding on 30CrMnSi steel with cold metal transfer technology[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2007, 28(2): 47-50.
- [4] MURAKAMI T, NAKATA K, TONG Hong-jun. Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux cored wire[J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1596-1602.
- [5] 于治水, 周方明, 祁凯, 吴铭方. Cu基钎料MIG钎焊接头断裂行为分析[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 29-32.
YU Zhi-shui, ZHOU Fang-ming, QI Kai, WU Ming-fang. Fracture behavior analysis of MIG-brazed joint with Cu-based filler metals[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2001, 22(6): 29-32.
- [6] GAWRYSIUK W. Technology of the arc-braze welding process[J]. Welding International, 2006, 20(1): 10-16.
- [7] CHOVELT C, GUIHEUX S. Possibilities offered MIG and TIG brazing of galvanized ultra high strength steels for automotive applications[J]. La Metallurgia Italiana, 2006, 98(7/8): 47-54.
- [8] BOUAIFI B, OUAISSA B, HELMICH A. Plasma arc brazing in sheet metal construction[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, 7(5): 326-330.
- [9] KAZUYOSHI S, KAZUTOSHI N. Recent trends and future development of interfacial joining processes[J]. Journal of Japan

- Weld Society, 2003, 72(1): 31-39.
- [10] NAKAHASHI M, SUENAGA S, SHIROKANE M, TAKEDA H. Transient liquid phase bonding for Ni-base superalloys, Mar-M247 and IN939[J]. Materials Transactions, JIM, 1992, 33(1): 60-65.
- [11] FRINGS A, STOCKEL S. Fully mechanized inert-gas metal-arc brazing of aluminized thin steel sheet[J]. Schweien und Schneiden, 1989, 41(11): 577-583.
- [12] HACKL H. MIG brazing of galvanized light-gauge sheets[J]. Welding Review International, 1996, 15(6): 122-123.
- [13] PREGELJ A, BRECEIL F. TIG-plasma brazed vacuum joints [J]. Vacuum, 1990, 40(1): 65-66.
- [14] KEMGF B, JUNG J, BREME J. New brazing solders for the joining of chrome-nickel steels[J]. Schweissen und Schneiden, 2001, 53(1): 26-31.
- [15] 黄德彬. 有色金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 18-35.
- HUANG De-bin. Handbook of nonferrous materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 18-35.
- [16] 倪加明, 李俐群, 陈彦宾, 封小松. 铝/钛异种合金激光熔钎焊接头特性[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 617-622.
- NI Jia-ming, LI Li-qun, CHEN Yan-bin, FENG Xiao-song. Characteristics of laser welding-brazing joint of Al/Ti dissimilar alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 617-622.
- [17] 潘志勇, 汪明朴, 李周, 邓楚平, 肖柱, 陈畅. 超高强度 Cu-5.2Ni-1.2Si 合金的形变热处理[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(11): 1821-1826.
- PAN Zhi-yong, WANG Ming-pu, LI Zhou, DENG Chu-ping, XIAO Zhu, CHEN Chang. Thermomechanical treatment of super high strength Cu-5.2Ni-1.2Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(11): 1821-1826.

(编辑 李艳红)