

不同镍基合金等离子堆焊层的微观组织及性能

胡建军^{1,2}, 陈国清², 李闪², 周文龙²

(1.萍乡高等专科学校机电系, 江西萍乡 337055; 2.大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116085)

摘要:采用等离子弧堆焊技术在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面分别堆焊 Ni40A、Ni50A、Ni60A 镍基合金粉末, 研究不同镍基合金堆焊层的显微组织、硬度及磨损性能。结果表明, 堆焊层基体都是由 γ -Ni 组成, Ni40A 堆焊层中析出相主要是 Cr_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 、 Ni_3Si , 而 Ni50A 和 Ni60A 堆焊层中析出相由 CrB 、 $M_{23}(C,B)_6$ 、 Cr_7C_3 、 Cr_3B_3 、 Ni_3Si 组成。Ni60A 堆焊层的显微硬度最高, 达 780HV。耐磨性 $Ni60A > Ni50A > Ni40A$ 。Ni60A 堆焊层的摩擦系数最大, 而 Ni40A 和 Ni50A 差别不大。

关键词:等离子堆焊; 镍基合金; 电流; 显微组织; 磨损

中图分类号: TG455; TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2013)03-0151-05

Microstructure and Properties of Ni-based Alloy Hardfacing Prepared by Plasma Transferred Arc Welding

HU Jianjun¹, CHEN Guoqing², LI Shan², ZHOU Wenlong²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Pingxiang College, Pingxiang 337055, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

Abstract: Ni40A, Ni50A, Ni60A alloy powders were deposited on the surface of 1Cr18Ni9Ti stainless steel by plasma transferred arc welding. The microstructure, microhardness and wear properties of the hardfacing were characterized. The results show that the hardfacing of Ni40A mainly consists of γ -Ni, precipitating Cr_7C_3 、 $M_{23}C_6$ and Ni_3Si , the hardfacing of Ni50A and Ni60A mainly consists of γ -Ni, precipitating CrB 、 $M_{23}(C,B)_6$ 、 Cr_7C_3 、 Cr_3B_3 and Ni_3Si . The highest microhardness of Ni60A alloy hardfacing is 780 HV. The wear resistance of Ni60A hardfacing is more excellent than that of Ni50A, and the Ni40A alloy hardfacing has the worst wear resistance. The friction coefficient of Ni60A is highest, then the Ni40A and Ni50A has almost none difference.

Key words: plasma transferred arc welding; Ni-based alloy; current; microstructure; wear

等离子弧堆焊技术具有稀释率低、熔覆性高、粉末利用率高、可控性好、粉末适用范围广等优点, 在很多工业领域中得到广泛的应用^[1-4]。镍基合金熔点低, 流动性好, 具有良好的耐磨、耐蚀、耐热等综合性能, 故其堆焊涂层的应用越来越广泛^[2,5-6]。合金成分对镍基合金堆焊层的组织及性能有很大影响, 而国内在这方面的报道非常少见。本文采用等离子堆焊技术在不锈钢表面制备不同镍基合金粉末 Ni40A、Ni50A、Ni60A 的涂层, 并研究了这些不同成分的镍基合金堆焊层的显微组织、硬度及摩擦磨损性能。

1 试验材料与方法

收稿日期: 2012-09-15

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(2011ZBAB205038); 国家 973 计划项目(2009CB724305); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0278)

作者简介: 胡建军(1964-), 男, 江西萍乡人, 副教授, 主要研究方向: 材料特种制备; 电话: 13879959529; E-mail: hjj640803@sina.com

通讯作者: 陈国清(1977-), 男, 河南洛阳人, 副教授, 主要研究方向: 塑性加工; 电话: 0411-84707970; E-mail: gqchen@dlut.edu.cn

本研究中采用商业用镍基合金 Ni40A、Ni50A、Ni60A 为堆焊合金, 基体材料为 150 mm×100 mm×10 mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板和直径为 37.5 mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢棒, 材料的成分见表 1。

表 1 基体材料及镍基合金粉末元素含量(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of 1Cr18Ni9Ti and nickel-based alloy powders (wt.%)

Element	Fe	Ni	Cr	Si	C	B	Ti	Mn
1Cr18Ni9Ti	Bal.	8.0~11.0	17.0~19.0	≤1.0	≤0.12	-	-0.02~0.8	≤2.0
Ni40A	1.6-3.2	Bal.	5-6.1	2-3.3	0.1-0.5	-	-	-
Ni50A	3.05	Bal.	10.47	3.87	0.48	2.35	-	-
Ni60A	12.13	Bal.	15.85	4.45	0.46	3.11	-	-

堆焊前, 对不锈钢基体表面进行打磨清理, 以消除表面杂质, 减少或消除堆焊层中的夹杂。然后, 将基体材料于 350℃保温预热 2h, 以降低基体与焊层金属的温差, 防止焊后裂纹的产生。在型号为 Lu-D500-F600/B800-CNC 型数控等离子堆焊机上进行堆焊实验, 工艺参数如表 2 所示。堆焊结束后, 材料迅速放入蛭石内缓冷。

将堆焊后的板材线切割成 15 mm×15 mm 试样块, 经打磨抛光后, 在饱和草酸溶液中进行电解腐

表2 等离子堆焊镍基合金粉末工艺参数
Tab.2 Experimental parameters used for plasma transferred arc welding

焊接电流 /A	送粉速度 / $(g \cdot \min^{-1})$	摆动频率 / $(\text{次数} \cdot \min^{-1})$	摆动幅度 /mm	设定弧压 /V	焊接速度 / $(\text{mm} \cdot \min^{-1})$
160	25	16	27	24-25	50

蚀,电解电压为6V。采用MEF-3型金相显微镜观察微观组织、XRD-6000型X射线衍射仪进行物相分析、SUPRA 55-32760扫描电镜进行组织形貌分析。使用MVC-1000B显微硬度测试仪测试显微硬度,加载1kg,加载时间15s。

摩擦磨损实验在环块式MMS-2A微机控制摩擦磨损试验机进行。磨损实验在室温下进行,载荷为100N,转速为90r/min,磨损时间90min。磨损接触表面采用200#、600#、800#、1200#砂纸打磨,之后浸泡在丙酮溶液中超声清洗20min,彻底烘干、冷却后称重。磨损实验结束后,再将摩擦副进行清洗、烘干、称重,称重使用精度为0.0001g的天平,型号MS204S。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

图1为Ni40A合金等离子堆焊层金相组织。可看出,在结合面处,没有任何缺陷存在,堆焊层与基体的结合很好。图1(a)为熔合线附近区域的组织,从图中可看出,有大的树枝晶沿着垂直于熔合线的方向生长,该组织为 γ -Ni基体,它是由Fe和Cr元素溶于Ni形成的固溶体,文献[3,7]也得到类似垂直于熔合线生长的树枝晶。树枝晶周围有共晶组织析出,该析出相为硼、碳的化合物以及Si的化合物,此化合物对提高Ni40A合金堆焊层硬度及耐磨性起到很重要的作用。图2(b)为堆焊层中部显微组织,由图可知,同样是由 γ -Ni树枝晶和晶间析出相组成。但是树枝晶的尺寸较熔合线附近小很多,且没有明显的方向性。这与凝固过程中的冷却速度和冷却的方向性有关。

Ni40A合金等离子堆焊层高倍数下的组织的形

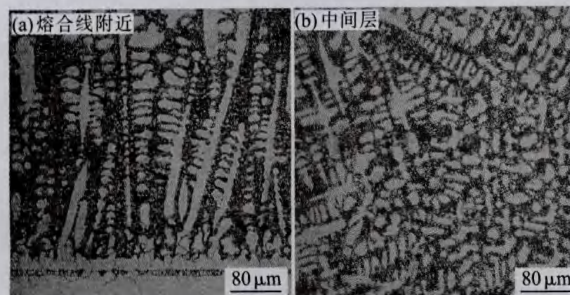


图1 Ni40A合金等离子堆焊层金相组织
Fig.1 Optical micrographs of Ni40A alloy coatings

态如图2所示。由图知,堆焊层存在几种典型的组织形态:树枝晶A、树枝晶周围的圆形组织B、共晶组织C;此外在图2(a)中还可看出在树枝晶周围有黑色的析出相“D”存在。对不同组织状态进行EDX分析,结果见表3,可知A和B都是富含Ni的组织,差别在于A中还有Si,而B中没有。其中A为 γ -Ni基体,B为另一种镍的固溶体。C的成分分析结果说明此组织富含镍和硅,该共晶组织应该为镍与镍硅化合物形成的共晶体^[8]。

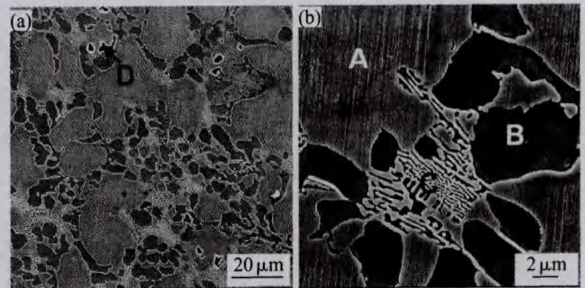


图2 Ni40A合金等离子堆焊层SEM显微组织
Fig.2 SEM Micrographs of the Ni40A alloy coating

表3 Ni40A合金等离子堆焊层不同组织EDX分析结果
(原子分数,%)

不同组织	Ni	Cr	Fe	Si	C
A	72.09	6.21	12.21	5.81	3.68
B	80.9	6.63	8.85	-	3.62
C	69.1	4.2	1.35	21.15	4.2

图3为Ni50A合金等离子堆焊层金相组织。图3(a)为熔合线附近区域的组织,涂层与基体结合很好,没有缺陷;并没有像图2中存在垂直于熔合线生长的树枝晶;组织形态比较多,有小花状组织,板条状组织,菱形组织,同时还存在不太明显的树枝晶。图3(b)为堆焊层中部显微组织,除了上面提到的组织形态以外,此处的树枝晶较明显,该组织为 γ -Ni基体。由电子探针分析可知,片状和半条状组织为硼铬化合物,结合文献[8,12-13]可以推断,该组织为CrB。

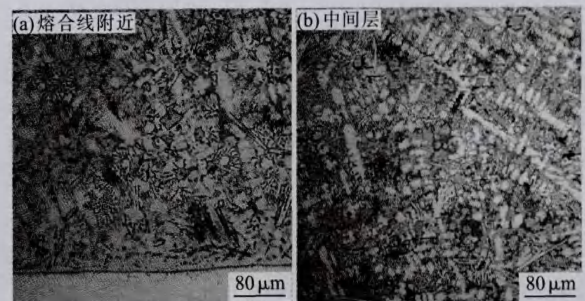


图3 Ni50A合金堆焊层金相显微组织
Fig.3 Optical micrographs of Ni50A alloy coatings

图4为Ni50A合金堆焊层局部区域高倍数下的扫描电镜图。图4(a)为小花状组织和菱形组织的形貌;图4(b)为4(a)图中较平坦区域的形貌。对菱形组织、小花状组织、板条状组织以及片状组织元素含量进行EDX能谱分析,结果表明这些组织均为富集Cr的化合物。图4(b)的形态特征和上面图2(b)的基本一致,即基体组织、圆形颗粒状组织以及共晶化合物。由EDX能谱分析结果可知,这几种组织和上面提到的A、B和C也是一致的,即: γ -Ni基体、富Ni析出相、富Ni析出相与 Ni_3Si 形成的共晶组织。

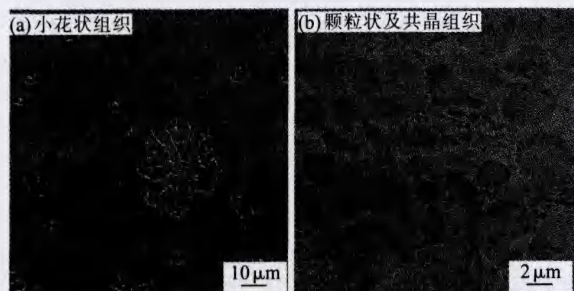


图4 Ni50A合金堆焊层不同形貌组织SEM图
Fig.4 SEM images of Ni50A alloy coatings

图5为Ni60A合金等离子堆焊层金相组织。图5(a)为熔合线附近区域组织,同样基体与涂层的结合良好,没有缺陷。不同的是,此堆焊层在熔合线附近存在大量的针状组织,该组织整体呈现与熔合线垂直的方向生长,此区域的范围在150 μm 左右。

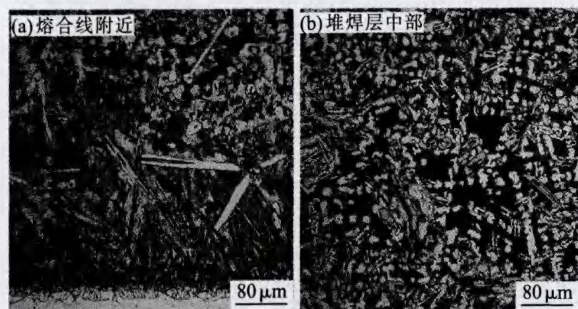


图5 Ni60A合金等离子堆焊层金相显微组织
Fig.5 Optical micrographs of Ni60A alloy coatings

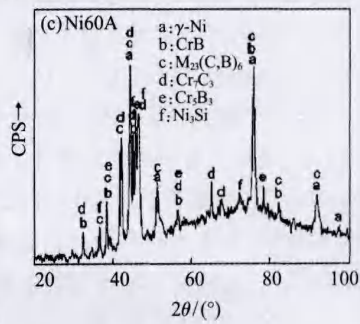
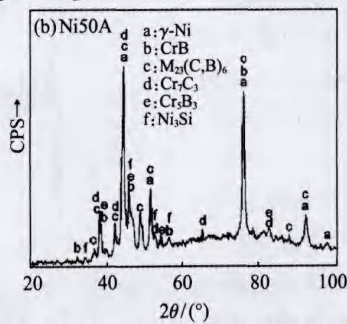
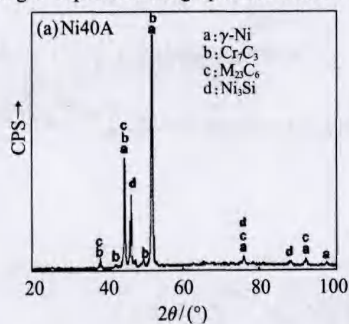


图7 不同镍基合金等离子堆焊 XRD 图
Fig.7 XRD patterns of Ni60A alloy coating

图5(b)为堆焊层中部的金相组织,由图可知,在堆焊层基体上有大量的析出相存在,且析出相的尺寸以及分布都比较均匀。Ni60A合金堆焊层析出相的组织形态主要呈现针状、板条状、菱形、片状,此外还有少量的小花状组织存在。结合元素含量EDX能谱分析可知,小花状组织为 γ -Ni和碳铬化合物形成的共晶体,根据文献[10-11]的描述,可以推断,小花状共晶组织为 γ -Ni+ Cr_7C_3 。

图6为Ni60A合金等离子堆焊层高倍数下的背散射电子图像。主要的析出相包括图6(a)中的针状组织A1、黑色颗粒析出相A2、灰色菱形或半菱形析出相A3,以及6(b)中的板条状组织B1和片状组织B2。对这些组织进行EDX能谱分析可知,这些析出相均为铬的化合物,可见元素铬在镍基合金堆焊层中,除了能起到固溶强化的作用,更主要的是作为生成强化相的元素存在^[9]。图中的A1、A2、B1及B2组织均为硼铬化合物。根据硼元素峰的高低,可知组织A1组织中硼含量相对较低,并且铁元素的含量相对较高,A2、B1及B2组织硼含量相对较高并且这三种组织含量相当。A3组织为碳铬化合物,由文献[10-11]可知,此组织为 Cr_7C_3 。周围其他区域浅灰色组织为 γ -Ni基体。

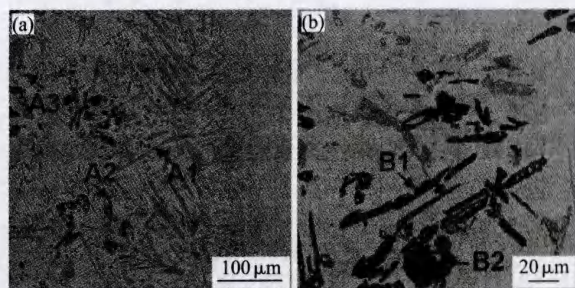


图6 Ni60A等离子堆焊层背散射电子形貌图
Fig.6 Back scattered electron micrographs of Ni60A alloy coating

2.2 堆焊层相结构

图7为三种镍基合金堆焊层XRD分析结果,

说明堆焊层的组织主要有 γ -Ni 基体加析出相组成, 而结合以上分析结果可以知道图 2(b) 中的 C 为 Ni+Ni₃Si 的共晶化合物。图 7 (a) 为 Ni40A 合金堆焊层的 XRD 衍射图, 析出相为 Cr₇C₃、M₂₃C₆、Ni₃Si。图 7(b)、(c) 分别为 Ni50A 及 Ni60A 等离子堆焊层 XRD 衍射图, 析出相包含 CrB、Cr₇C₃、M₂₃(C,B)₆₇、Cr₅B₃、Ni₃Si, 与 Ni40A 合金堆焊层相比析出相种类较多, 并且析出相衍射峰强度相对较高、基体衍射峰强度相对较低。Ni60A 堆焊层衍射图谱中的析出相的衍射峰强度与基体衍射峰强度比最高, 则说明相对 γ -Ni 基体而言, 析出相相对含量最高。这些析出相作为镍基合金堆焊层的强化相, 对其性能的提高起到很重要的作用。

2.3 显微硬度

图 8 为不同镍基合金等离子堆焊层横截面显微硬度分布。可看出, Ni40A 合金堆焊层硬度在 450 HV 附近, Ni50A 合金堆焊层硬度在 680 HV 以上, Ni60A 合金堆焊层硬度达 780 HV。材料的组织决定材料性能, 出现这种硬度差别的原因是由于组织的差别造成的。在相同堆焊工艺和堆焊参数条件下, 材料的成分决定材料的组织结构。

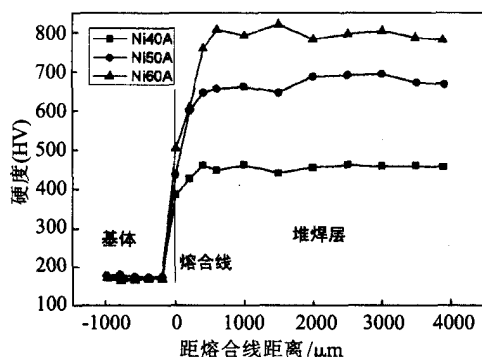


图 8 不同镍基合金粉末等离子堆焊层显微硬度分布
Fig.8 The microhardness of different nickel-based alloy coatings

这几种镍基合金堆焊层, Cr 元素起到固溶强化和形成硬质相的作用^[4-15], Cr 的含量 Ni60A>Ni50A>Ni40A, 铬元素含量高, 在涂层中起到的固溶强化作用就高, 并且形成的强化相的相对含量比较高。Fe 元素和 Si 元素的含量, Ni60A 最高, 而 Ni40A 和 Ni50A 的相差不多, 所以 Fe、Si 的固溶强化作用在 Ni60A 中最大, 在其他两个镍基合金中的作用基本上差不多。对于 C 元素和 B 元素, 很重要的一个作用就是形成强化相, 提高材料性能。从上面对各成分合金堆焊层显微组织分析的结果可知, 碳化物和硼化物的相对含量 Ni60A 合金涂层最多, 其次是 Ni50A, Ni40A 的组织主要是树枝晶加晶间析出相, 析出相的相对含量较低。这个

结果也同样可以从 XRD 分析结果可看出, 析出相的相对含量可以用峰强比来判断, 即析出相峰的强度与基体峰的强度之间的比值, 比值大则说明析出相含量相对较高, 反之亦然。因此, 析出相的相对含量 Ni60A>Ni50A>Ni40A, 所以这也是不同成分镍基合金堆焊层硬度分布情况产生的原因。

2.4 耐磨性能

图 9 为不同镍基合金堆焊层在一定磨损工艺参数下的磨损量。可看出, Ni40A 合金堆焊层的磨损量远远高于 Ni50A 和 Ni60A 的, 而 Ni60A 合金堆焊层的磨损量最小。这说明 Ni60A 合金堆焊层的耐磨性最好, 其次是 Ni50A 合金, Ni40A 合金堆焊层的耐磨性最差。在一定程度上材料的耐磨性和硬度是成正比的, 对三种不同镍基合金粉末等离子堆焊层硬度不同的分析可以说明耐磨性差异的原因。

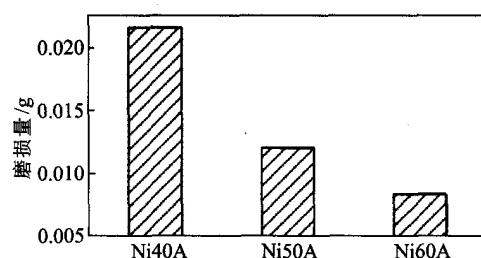


图 9 不同镍基合金堆焊层的磨损量
Fig.9 Mass loss of different Ni-based alloy coatings

图 10 为三种镍基合金等离子堆焊层摩擦系数随时间的变化。可看出, 磨损开始阶段, 摩擦系数上升, 随后, 系数下降。Ni40A 和 Ni50A 合金堆焊层的摩擦系数, 在 1000s 的时候, 下降到某一特定值, 并且围绕这个值上下波动, 但波动幅度较小。磨损后期, 摩擦系数略有升高, 并且波动幅度增加, 这个阶段即是磨损失稳阶段。而 Ni60A 合金堆焊层的摩擦系数在逐渐下降到 1000s 左右时突然升高, 在 0.225 附近波动, 当在 2500s 的时候, 摩擦系数波动幅度增

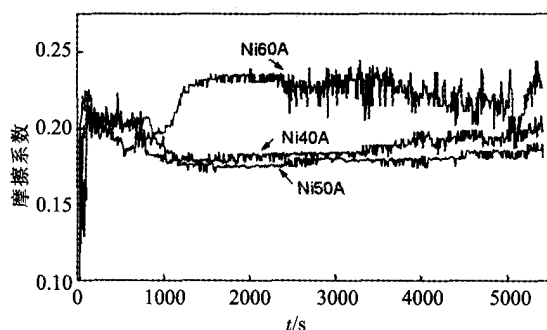


图 10 不同镍基合金堆焊层摩擦系数随时间的变化
Fig.10 Variation of friction coefficient of different Ni-based alloy coating with time

加。Ni60A合金堆焊层的硬度很高,在磨损的过程中,磨损抗力较其他两种堆焊层的要大。在同一种磨损工艺条件下,使其摩擦副发生磨损的难度大。当摩擦副微凸体接触并相互作用时,Ni40A和Ni50A堆焊层微凸体发生断裂或塑性变形,而Ni60A由于硬度较高,较难发生断裂和塑性变形。当断裂出现,在应力的作用下,摩擦副循环作用,裂纹扩展,微凸体剥落。从Ni60A堆焊层表面剥落的碎片硬度也较高,对摩擦副的刮伤比较严重,摩擦系数较高。

3 结论

(1) Ni40A堆焊层显微组织主要是由树枝晶加晶间析出相组成;Ni50A组织的析出相形态多样,有小花状、板条状、菱形、板条状;而Ni60A堆焊层的析出相主要是由板条状、针状及菱形组成。

(2) 不同镍基合金堆焊层的基体均为 γ -Ni固溶体,Ni40A的析出相有 Cr_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 、 Ni_3Si ,Ni50A和Ni60A堆焊层中析出相有 CrB 、 $M_{23}(C,B)_6$ 、 Cr_7C_3 、 Cr_3B_3 、 Ni_3Si 。

(3) 堆焊层硬度较基体显著提高,熔合线附近堆焊层硬度过渡明显;Ni40A合金堆焊层的显微硬度为450HV左右,Ni50A为680HV以上,Ni60A的硬度最高,达780HV。

(4) 磨损量 $Ni60A < Ni50A < Ni40A$,Ni60A合金堆焊层的耐磨性最高,Ni60A堆焊层摩擦系数最大,而Ni40A和Ni50A差别不大。


参考文献:

- [1] 赵晖,何世海,董晓强,等. 16Mn钢板堆焊CuNi合金的渗透裂纹形成分析[J]. 材料热处理学报, 2005, (1):40-43.
- [2] 傅卫,王惜宝,陈国喜. 镍基WC等离子弧熔敷层的组织和高温磨损性能[J]. 焊接学报, 2009, (5):65-68.

(上接第150页) 数热处理后材料的拉伸试验测试结果,得到了该种活塞杆的焊后调质处理的最佳工艺参数为:淬火温度 $870^{\circ}C$,淬火保温时间0min,回火温度为 $520^{\circ}C$,回火保温时间为140min;同时结果表明,采用“零保温”淬火的调质热处理能够细化晶粒,有效改善45钢的抗拉强度,并具有较好的延塑性。

参考文献:

- [1] 朱宏强,刘金合,徐韦锋. 厚板高强铝合金搅拌摩擦焊接研究现状[J]. 热加工工艺, 2011,40(5):162-165.
- [2] 段立宇,高大路,雷永平. G105高强度钻杆摩擦焊接头强韧性控制[J]. 西北工业大学学报, 1993,11(增刊):88-93.

- [3] Kesavan D, Kamaraj M. The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204: 4034-4043.
- [4] 侯清宇,何宜柱,高甲生. Cr_3C_2 /镍基合金等离子堆焊层的组织及耐磨性能[J]. 机械工程材料, 2007, (2):53-56.
- [5] Liyanage T, Fisher G, Gerlich A P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW)[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205: 759-765.
- [6] 宇文利,刘秀丽,李伟华. 等离子堆焊Ni基合金粉末熔覆层性能研究[J]. 金属热处理, 2006, (10):41-43.
- [7] Doliveira A S C M, Paredes R S C, Santos R L C. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(2):167-174.
- [8] Xu G, Kutsuna M, Liu Z, et al. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes[J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 417: 63-72.
- [9] 刘政军,李晋,苏允海. 铝青铜粉末等离子堆焊层硬度与组织研究[J]. 热加工工艺, 2011,40(7):149-150.
- [10] Li Q, Zhang D, Lei T, et al. Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures [J]. Surface & Coatings Technology, 2001, 137:122-135.
- [11] Chao M, Liang E. Effect of TiO_2 -doping on the microstructure and the wear properties of laser-clad nickel-based coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 179:265-271.
- [12] Navas C, Colaco R, de Damborenea J, et al. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200: 6854-6862.
- [13] Liyanage T, Fisher G, Gerlich A P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW)[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205:759-765.
- [14] 李潇一,罗震,步贤政,等. Al_2O_3 陶瓷与金属镍的活性钎焊研究[J]. 材料工程, 2008, (9):32-35.
- [15] 付坤,郑振太,步贤政,等. Inconel 601 Ni基合金的焊接工艺性分析[J]. 焊接技术, 2010, (1):23-25. 

- [3] 刘智儒. 金属感应加热 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.414-417.
- [4] 大和久重雄. 加热时间与保温时间 [J]. 铸锻造和热处理 (日), 1984, (7):44-47.
- [5] 杨明鄂,刘龙飞,曾朝晖,等. 活塞杆连续驱动摩擦焊接工艺参数的设计[J]. 热加工工艺, 2012, 41(3):129-130.
- [6] 孟繁盛,杨月君,崔岩,等. 60Si2Mn钢“零保温”淬火工艺的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1994, 13(4): 64-68.
- [7] 陈玉华. 重新认识亚共析钢淬火加热温度与保温时间 [J]. 安庆师范学院学报, 2000, (5):84-85.
- [8] 李安铭,张红伟,杨红保. 原始组织对25MnV钢“零保温”淬火后组织性能的影响 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2006, (1):1-5. 