

● 特约稿件 ●

# TIG 弧堆焊铁基高温合金覆层微观组织 及抗高温性能研究

李爱农<sup>1</sup>, 胡建华<sup>1</sup>, 王华君<sup>1</sup>, 付莉丽<sup>1</sup>, 谭国伟<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 广东顺德亿港科技有限公司, 广东 佛山 528318)

**摘要:**采用 TIG 弧堆焊方法,在 Q235 基体上制备了以铁基高温合金 GH2135 为基础成分的堆焊覆层。分析了覆层的显微组织、回火抗力和高温抗氧化性能。结果表明,该覆层的显微组织主要由树枝晶  $\gamma$ -Fe(Cr、Ni 等)固溶体及晶间  $\alpha$ -Fe 组成,金属间化合物弥散析出,晶界有少量特殊碳化物,晶粒较细小;与 H13 钢不同,正交组覆层的硬度随回火温度的升高而增大,700 °C 高温回火后,正交组中 1A 覆层的硬度(346 HV0.1)最大。较基础配方覆层 10J、H13 钢,1A 涂层硬度分别提高约 50、82 HV0.1,而 11K 覆层硬度(349 HV0.1)又高于 1A 覆层,回火抗力最优;11K 覆层的抗高温氧化性能优异,其在 600、700 °C 氧化试验的单位面积氧化增重仅为 H13 钢的 1/8、1/3。

**关键词:**TIG 弧堆焊;铁基高温合金;显微组织;回火抗力;抗高温氧化性

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.08.001

中图分类号: TG113.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2016)08-0001-06

## Research on Microstructure and High Temperature Resistance of Iron-based Superalloy Coatings by TIG Overlaying

LI Ainong<sup>1</sup>, HU Jianhua<sup>1</sup>, WANG Huajun<sup>1</sup>, FU Lili<sup>1</sup>, TAN Guowei<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Guangdong Shunde Eakong Technology Corporation Limited, Foshan 528318, China)

**Abstract:** The overlaying coatings with the basic composition of iron-based superalloy GH2135 were prepared on Q235 steel substrate by TIG overlaying. The microstructure, tempering resistance and high temperature oxidation resistance of the coatings were studied. The results show that the microstructure of the coating is composed of dendrites  $\gamma$ -Fe (Cr, Ni, etc.) solid solution and intergranular  $\alpha$ -Fe. The intermetallic compound precipitates, and a few special carbides appear in grain boundaries. Unlike H13 steel, the hardness of the orthogonal group layer increases with the increase of tempering temperature. After 700 °C high temperature tempering, the hardness (346 HV0.1) of 1A coating is largest in the orthogonal group. Compared with the basic formula cladding 10 J and H13 steel, the 1A coating's hardness increases respectively about 50 and 82 HV0.1. 11K coating's hardness (349 HV0.1) is higher than that of 1A coating, then the tempering resistance is optimum. The 11 K coating shows the excellent high temperature oxidation resistance, and its oxidation mass per unit area is merely 1/8, 1/3 of H13 steel at 600 and 700 °C oxidation experiments, respectively.

**Key words:** TIG overlaying; iron-based superalloy; microstructure; tempering resistance; high temperature oxidation resistance

在机械产品生产中,热锻是不可缺少的成型工艺。由于工作环境恶劣,热锻模易产生磨损、热疲劳

和塑性变形失效<sup>[1]</sup>。采用 TIG 弧(即钨极氩弧,以下同)熔覆或堆焊技术修复模具,可使模具获得优异的表面硬度、耐磨性等,延长了模具寿命。

收稿日期:2016-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51475346);佛山市顺德区经济和科技促进局技术创新专项资金项目(2012CX040)

作者简介:李爱农(1958-),男,湖北人,副教授,博士,研究方向为模具表面改性,材料强韧化;电话:027-87651779;

E-mail: anli@whut.edu.cn

通讯作者:王华君(1970-),男,湖北人,副教授,博士,研究方向为梯度结构热锻模具与寿命提升,精密塑性成形工艺及其优化设计;电话:027-87651779;E-mail: wanghuajun@whut.edu.cn

钨极氩弧堆焊材料主要为铁基和镍基粉末,为改善和提高覆层的性能,国内外对添加碳化物、原位生成碳化物增强覆层进行研究<sup>[2-4]</sup>。相比镍基和钴基合金粉末,铁基合金覆层材料具有价格便宜、与堆覆基体材料成分相近、能与基体形成良好的冶金结合等优点。采用铁基粉末进行氩弧熔覆,更易于应用推广。然而,对于热作模具铁基合金表面熔覆粘结相成

分研究的相对较少。鉴于此,本文利用 GH2135 铁基高温合金<sup>[5]</sup>具有良好的高温力学性能和屈服强度等特性,将其作为 TIG 弧熔覆的基础粉末配方,以 Cr、Mo、W 为因素变量设计 TIG 弧熔覆正交试验。通过降低镍含量控制成本,加入少量 V、Nb 以细化晶粒,研究 TIG 弧熔覆层的抗回火软化和抗高温氧化性能,为热作模具梯度覆层设计与制造提供理论和技术参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

参照 GH2135 铁基高温合金成分<sup>[6]</sup>配制了覆层的基础配方粉末 10J (成分见表 1)。选取 Cr、W 和 Mo 三个因素变量,在 10J 粉末成分基础上设计三因素三水平正交试验(见表 2),粉末中将 Ni 质量分数降至 30%,以降低成本,加入质量分数为 0.5%的 Nb、V 以细化覆层晶粒。

表 1 基础配方 10J 粉末化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of basic formula 10J powder(wt%)

C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	B	Fe
0.08	15	34.5	1.95	1.95	2.4	2.3	0.015	余量

表 2 TIG 熔覆正交试验方案和工艺参数

Tab.2 TIG cladding orthogonal test scheme and process parameters

No	优化的基础成分(wt%)	因素(水平)			备注
		Cr(wt%)	W(wt%)	Mo(wt%)	
1A	0.08C	15(1)	2(1)	2(1)	工艺参数: 焊接电流 $I=110\sim 120$ A, 焊接速度 $V=60\sim 80$ mm/min, 钨针伸出长度 $L=4\sim 5$ mm, 氩气流量 $Q=8\sim 10$ L/min, 电弧弧长 $L=2\sim 3$ mm, 搭接率 $P=40\%$ 。合金粉末成分配方: 基础成分加各因素-水平组合的合金含量, 就构成了 1A、2B、...、9I 正交试验的 9 组粉末成分配方; 10J 为表 1 列基础粉末配方成分; 11K 为 9 组正交配方覆层试验后推荐的优化配方。
2B	30.0Ni	15(1)	4(2)	3(2)	
3C	2.40Al	15(1)	6(3)	4(3)	
4D	2.30Ti	18(2)	2(1)	3(2)	
5E	0.015B	18(2)	4(2)	4(3)	
6F	0.50Nb	18(2)	6(3)	2(1)	
7G	0.50V	21(3)	2(1)	4(3)	
8H	Fe, 余量	21(3)	4(2)	2(1)	
9I		21(3)	6(3)	3(2)	
10J	基础粉末配方成分(参见表 1)				
11K	-	15	6	2	

试验基体材料为 Q235 钢, 尺寸为 120 mm×50 mm×8 mm, 表面用角磨机打平, 用丙酮、酒精去除表面油污, 以铺覆粉末。

### 1.2 制备工艺

配制的正交试验配方粉末经 QP-ISP 型行星球磨机球磨混粉(100 r/min, 2.5 h)。

试验前, 烘干配方粉末(80 °C×1h), 空气炉预热

(150 °C×1h)Q235 试板, 试板表面再铺干粉(厚度 1~1.5 mm), 压实后进行 TIG 弧堆焊, 考虑到稀释率对覆层性能的影响, 均采用三层堆焊。

采用 TIG 弧焊机(YC-300WX3HGE)进行熔覆和堆焊, 工艺参数见表 2, 覆层试板制备后低温回火(180 °C×3h)。

### 1.3 性能测试

覆层试板经线切割加工取样尺寸(mm): 覆层金相试样(10×5×8)、回火试样(10×10×8)、高温抗氧化试样(10×10×8)、XRD 样品(10×10×5), 另制备 H13 钢、Q235 参比样品, 用于相应试验。金相试样经酚醛树脂镶嵌、金相砂纸磨制、抛光, 三氯化铁盐酸水溶液腐蚀, 冲洗、干燥备用; 回火样品覆层剖面、高温抗氧化试样表面均用金相砂纸磨平; XRD 样品覆层表面采用砂轮机磨平, 磨制、抛光同金相试样。

采用数显显微硬度计(HX-1000TM,  $F=0.98$  N,  $\tau=10$  s)测试覆层(包括高温回火试验样品)的显微硬度(5 点取平均值); 采用电子探针显微分析仪(JXA-8230/INCA-ACT 型)拍摄背散射电子像(BEI)及测试覆层微区能谱成分(EDS); 采用转靶 X 射线衍射仪(日本 RIGAKU 公司 D/MAX-RB 型)研究覆层的相组成。

在箱式节能电阻炉中对 1A~10J 样品进行 200、500、700 °C 回火试验; 后续对 1A、3C、10J 样品、正交试验的优化配方 11K、对比样 H13 样品分别进行了 600 °C×3h、700 °C×3h 高温回火, 炉冷。

在 XMT-5000 三相电炉中对 1A、3C、10J、11K、H13 钢、Q235 标样分别进行了 600、700 °C(6h, 空冷)高温氧化试验, 试验前后对试样称重和表面积测算。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 覆层组织形貌及相组成

图 1 为正交组 1A、10J(基础配方)样品的背散射电子像(BEI)。由图 1(a)可见, 1A 覆层的组织均匀, 多为较细小的等轴晶; 晶内为  $\gamma$ -Fe(灰色)、断续  $\alpha$ -Fe(深灰色)沿晶析出; 晶内与晶界都有细小颗粒(白色)弥散析出。图 1(b)为基础配方 10J 覆层组织, 其形态以柱状晶为主, 显微组织与 1A 相似, 不同的是有大小不等的近球状微孔(黑色)分布在基体之中, 此外白色的细小析出颗粒在基体中相对较少。

1A、10J 覆层样品表层电子探针能谱(EDS)成分测试位置和数据如图 1 和表 3 所示。结合表 1 和

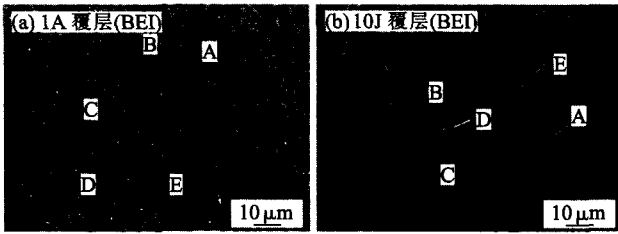


图1 1A、10J覆层样品背散射电子像及微区成分测试点  
Fig.1 BEI photos of 1A and 10J coatings and EDS micro area composition analysis point

表3 1A、10J覆层组织的不同区域的元素含量(质量分数,%)

Tab.3 The elements content of microstructure of 1A and 10J coatings in different zones (wt%)

样号	区域	B	C	Al	Ti	V	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	W
1A	面扫描	0.00	0.00	1.11	1.58	0.46	12.32	58.01	22.69	0.16	1.56	2.13
	A区晶内灰色组织	0.00	0.00	1.03	1.23	0.46	12.41	58.00	22.94	0.24	1.60	2.11
	B区晶界深灰色组织	0.00	0.00	1.08	0.78	0.31	12.24	60.77	21.49	0.00	1.26	2.07
	C区晶间深灰色组织	0.00	0.00	1.11	1.08	0.35	12.16	59.98	21.61	0.00	1.46	2.25
	D区黑色微孔	0.00	2.19	0.82	1.55	0.45	12.19	57.96	21.66	0.25	1.41	1.54
	E区白色颗粒组织	0.00	2.69	1.42	5.87	0.45	9.94	45.17	23.02	4.63	2.91	3.91
10J	面扫描	0.00	0.00	1.31	1.77	-	11.60	55.36	24.97	-	1.68	1.95
	A区晶内灰色组织	0.00	0.00	1.24	1.39	-	11.95	56.22	25.46	-	1.78	1.96
	B区晶界深灰色组织	0.00	0.00	1.28	1.80	-	11.98	56.79	25.31	-	1.39	1.45
	C区晶间深灰色组织	0.00	0.00	1.31	1.58	-	11.96	56.78	25.43	-	1.41	1.53
	D区黑色微孔	0.00	2.56	0.92	1.85	-	9.70	56.43	25.26	-	1.59	1.68
	E区白色颗粒组织	0.00	2.81	1.41	5.52	-	9.85	47.23	27.91	-	2.37	2.90

图2为1A和10J覆层的XRD物相图谱。由图2(a)可见,1A覆层中主要是(Fe,Ni)固溶体,为基体相,还包括Fe<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>、FeNi、Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>等物相;10J覆层中也包括了相同的物相。由表3的EDS面扫描成分数据可知,除V、Nb元素外,1A、10J覆层的元素含量基本相同。

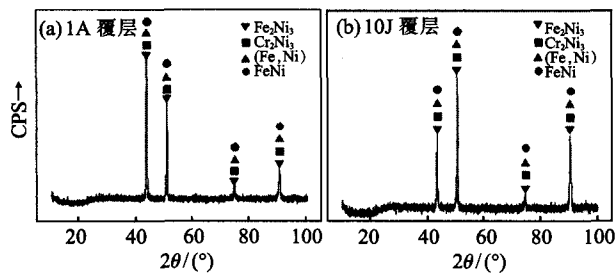


图2 1A及10J覆层的XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of 1A and 10J coatings

由表3可知,1A、10J晶内和晶界的元素含量差距不大,白色颗粒组织中,C、Ti、Ni、Al、W、Nb(特殊碳化物及金属间化合物形成元素)含量显著高于覆层成分平均值。在晶内区域白色颗粒中C、Ti、Nb等元素含量相对较多,而在晶界区域含量相对减小。故

表3的数据分析,与设计成分相比可知,10J表层Cr的收得率为78%、Ni的收得率为73.5%,说明多层堆焊是降低元素稀释率的可行方法,对改善和提高覆层性能有利。1A与10J样品元素分布规律基本相同,Cr、Ni、Mo、W主要分布在晶内,形成固溶强化作用;Ti、Al、Nb主要在白色颗粒相中,对基体和晶界起沉淀强化作用<sup>[6]</sup>;微量C主要在晶界与Ti、V、Nb等元素形成特殊碳化物,可细化晶粒。

认为晶内析出颗粒应为Fe-Al、Ni-Ti、Ni-Al等金属间化合物<sup>[6]</sup>,而晶界应为特殊碳化物和金属间化合物的析出共存。黑色微孔除C元素(可能受导电碳膜的影响)以外,其余元素与基体元素含量基本相同,且黑色微孔主要出现在晶内,也观测到部分白色颗粒处于黑色微孔中,故认为黑色微孔系金相制样导致部分细小的金属间化合物颗粒脱落所致。结合Fe-Cr-Ni三元合金相图<sup>[7]</sup>分析综合认为,1A、10J覆层样品的组织特点是晶内以奥氏体为基体相,晶间为断续网状铁素体,白色细小金属间化合物颗粒呈弥散分布,特殊碳化物沿晶界析出。

## 2.2 覆层显微硬度及回火抗力分析

图3(a)为TIG弧堆焊正交表(见表2)9个正交组覆层试样经180℃回火后表层及中间层的显微硬度。可以看出,各样品覆层的表层硬度均高于中间层;相比覆层的表层硬度,正交组覆层中,3C(270HV0.1)、6F(262HV0.1)、9I(262HV0.1)均高于10J基础配方覆层(260HV0.1),说明部分正交试验配方成分对覆层硬度有一定提高。各覆层试样的中间层

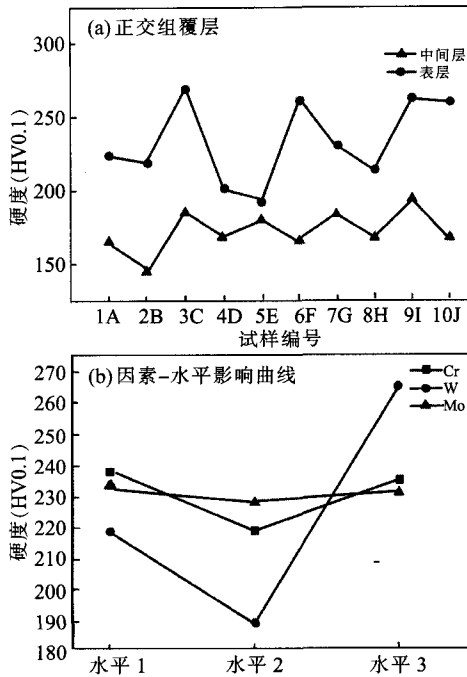


图3 正交组低温回火覆层硬度值及因素-水平影响曲线

Fig.3 Microhardness of orthogonal coatings at low temperature tempering and factor-level influence curves

硬度低于表层,主要是因为二次热输入的影响,使得中间层组织中的析出相部分回溶,组织发生重结晶以及形成了较多树枝晶所致。

图 3(b)为正交表中 9 个正交组覆层试样经 180℃回火后表层硬度的因素-水平影响曲线。可看出,随 Cr 含量增加,覆层硬度变化不大,分析主要是因为合金粉末中 C 含量很少,覆层在冷却后不会产生 C 的间隙固溶强化效果,加上由于覆层中的 Ti、V、Nb、Mo 等元素会优先与 C 结合,仅形成了数量很少的弥散分布的特殊碳化物,故覆层硬度未明显提高,但是 Cr 加入的主要作用体现在提高覆层的抗高温氧化性和耐腐蚀性能方面,对硬度影响小。随 W 含量的增加,覆层硬度先降后升,当 W 加入量为 3 水平(6%)时,固溶强化效果显著,硬度显著提高,说明 W 含量的进一步增加,对硬度提升效果显著。随 Mo 含量的增加,覆层硬度基本未变,表明 Mo 的加入(2%~4%)<sup>[9]</sup>对覆层组织产生的固溶强化效果不显著。

如以覆层 180℃回火硬度值考量,则正交组 9 组配方的 TIG 弧堆焊覆层性能的优化配方为:15%Cr(水平 1)-6%W(水平 3)-2%Mo(水平 1)。

图 4(a)为正交表中(见表 2)TIG 弧堆焊 9 个正交组样品分别经 200、500、700℃回火处理后的表层

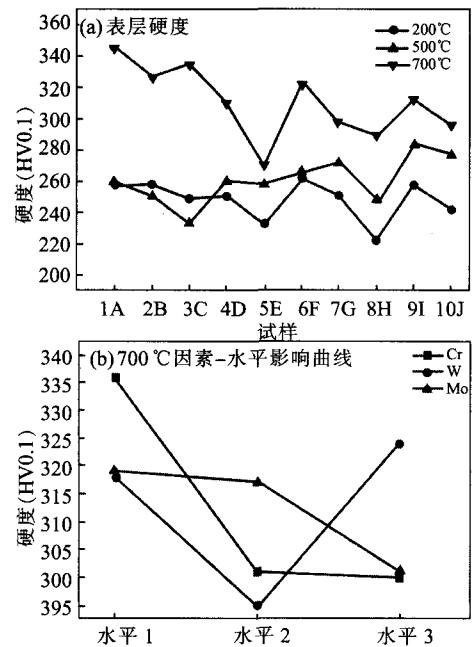


图 4 不同温度回火后正交组覆层的表面硬度值及其 700℃回火后覆层硬度值的因素-水平影响曲线  
Fig.4 Surface microhardness of the orthogonal group coating after different temperatures' tempering and their factor-level influence curves of hardness of the coating after 700℃ tempering

显微硬度,图 4(b)则为经 700℃回火后正交组覆层硬度的因素-水平影响曲线。由图 4(a)可知,随回火温度升高,正交组覆层的表层硬度也相应提高,特别是 700℃回火后的硬度提高显著,说明 TIG 弧堆焊覆层具有良好的抗高温回火软化的能力,因为 700℃回火温度正好处于热冲压模具的工作温度范围,表明该正交组覆层具有较好的实用价值。700℃回火后,以 1A 覆层的回火硬度(346HV0.1)最高,较基础覆层 10J 的硬度(296HV0.1)提高约 50HV0.1。由图 4(b)正交组覆层硬度的因素-水平影响曲线可见,700℃高温回火后,覆层硬度随 Cr 含量的增加呈下降趋势;而随 W 含量的增加,覆层硬度则呈先降后升,说明 W 含量的进一步增加,对回火抗力提升显著;随 Mo 含量的增加,覆层硬度亦呈下降趋势,程度略缓于 Cr。合金元素加入后对覆层硬度的影响规律与图 3(b)正交组覆层硬度的因素-水平影响曲线反映结果基本一致。

如以 700℃回火后正交组覆层的表层硬度值(即抗回火软化能力,或称回火抗力)考量,由图 4(b)因素-水平曲线分析,获得铁基高温合金 TIG 弧熔覆层性能的优化配方为:15%Cr(水平 1)-6%W(水平 3)-2%Mo(水平 1)。

对比分析正交组覆层样品分别经低温回火(180℃)、高温回火(700℃)后各自所得结果,可见合金元素Cr、W、Mo的加入对正交组覆层表层硬度的因素-水平影响趋势是一致的,故正交组覆层经180℃、700℃回火后覆层粉末成分的优化配方数据结果相同,同为15%Cr(水平1)-6%W(水平3)-2%Mo(水平1),即TIG弧熔覆铁基合金覆层正交试验的优化配方为(15%Cr-6%W-2%Mo),亦即为11K覆层粉末配方(见表2)。后续研究中,按照TIG弧熔覆工艺,同法制备出11K覆层试样。

### 2.3 正交试验的优化配方11K覆层回火抗力及高温抗氧化性能分析

图5为部分正交组覆层(1A、3C)、对照组10J覆层、优化配方11K覆层和H13钢经600、700℃高温回火后的显微硬度。可看出,600℃回火后,1A(302HV0.1)和11K(295HV0.1)的硬度高于10J(282HV0.1)及H13钢(277HV0.1),表明1A、11K覆层的回火抗力较优;而700℃回火后,H13钢(264HV0.1)样品的硬度有所下降(相比600℃时),对照组10J(286HV0.1)样品的硬度增幅不大(相比600℃时),而优化配方11K(349HV0.1)和正交组1A(346HV0.1)样品硬度显著提高,以11K覆层的硬度提高最多。经700℃回火后,最优配方11K覆层的硬度比H13钢、10J(对照组)分别提高85HV0.1、63HV0.1,表明700℃回火条件下,优化配方11K覆层的回火抗力最优。

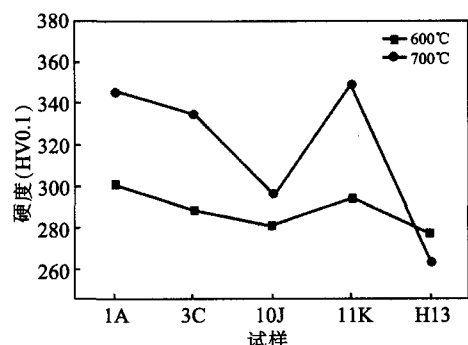


图5 优化配方11K覆层与部分覆层600、700℃高温回火后的显微硬度

Fig.5 Microhardness of the optimized formula 11K and relevant coatings after 600℃ and 700℃ high temperature tempering

分析认为,W、Mo的原子半径均大于Fe原子,溶入到铁基合金中引起基体相晶格畸变,产生固溶强化效果,另外Ti、W、Mo、V、Nb均属于强碳化物

形成元素,一部分溶入基体,另一部分在高温回火过程中,可与覆层中有限的碳原子作用,形成细小的特殊碳化物颗粒以及与覆层中的Fe、Ni、Al等元素形成细小的金属间化合物,造成弥散强化<sup>[5-9]</sup>。正交组因素-水平曲线分析(参见图3(b)、图4(b))结果显示,W含量的进一步增加,对回火抗力提升显著,所以700℃高温回火后,含有Cr-W-Mo的铁基合金覆层中,因W质量分数增加,覆层硬度提高。

图6为经600、700℃高温氧化试验后,1A、3C、10J、11K、H13钢、Q235标样的高温氧化增重数据。可见,600℃氧化试验后,优化配方11K覆层、正交组(1A、3C)覆层及对照组10J覆层的单位面积氧化增重都很小且基本相同,表现出较低的氧化速率,其平均氧化增重约为H13钢的1/8,表现出优异的抗高温氧化能力;而700℃氧化试验后,优化配方11K覆层、正交组(1A、3C)覆层、对照组10J覆层的氧化速率有明显增加(数值基本相同),但仍优于H13钢和Q235基板材料,其平均氧化增重约为H13钢的1/3,表现出良好的抗高温氧化能力。

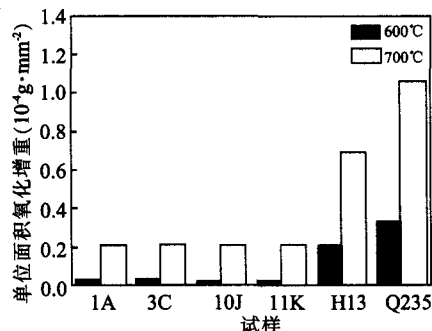


图6 优化配方11K及部分覆层在600、700℃高温抗氧化性比较

Fig.6 High temperature oxidation resistance comparison between the optimized formula 11K coating and relevant coatings after 600℃ and 700℃ oxidation tests

分析可见,在相同温度的高温氧化试验中,1A、3C、10J、11K覆层的氧化速率基本相同,在空气中高温加热时,覆层材料中的Cr原子会与空气中的氧结合,在覆层表面形成较致密的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜,Cr含量的提高对材料的抗氧化性能十分有利。文献[9]指出,当钢中Cr≥12wt%时,材料具有良好的耐蚀性,而上述覆层中Cr含量均大于13wt%(同为15wt%)。因此本研究制备的TIG弧堆焊铁基高温合金覆层具有良好的抗高温抗氧化性能,此外铁基高温合金覆层材料中还含有少量的Al、Ti、Mo等元素,对抗

高温氧化性也有利。因为上述覆层材料 Cr 以及 Al、Ti、Mo 等元素的含量基本相同,故优化配方 11K 覆层与对照组 10J 覆层等正交组覆层样品的抗高温氧化性能基本相同。与 H13 钢相比,优化配方 11K 覆层样品的 Cr 含量高得多,故其抗高温氧化性能显著优于 H13 钢。

### 3 结论


(1) 通过 TIG 弧堆焊制备出以 GH2135 铁基高温合金成分为基的多层熔覆样品,其表层成分与设计成分接近,合金元素收得率较高(对照组 10J 覆层的 Cr、Ni 收得率分别为 78%、73.5%);铁基高温合金覆层的典型组织为奥氏体(晶内)和断续网状铁素体(晶间),细小金属间化合物呈弥散分布,晶间还有少量点状特殊碳化物,添加 Cr、W、Mo 等合金元素后,金属间化合物弥散析出量增多。

(2) 添加适量 Cr、W、Mo 合金元素,正交组覆层硬度明显提高,而随回火温度的提高,回火抗力有增强趋势;以正交组覆层 180℃及 700℃回火的硬度值考量进行因素-水平曲线分析表明,当 W 质量分数进一步增加时,回火抗力提升显著,由此得到正交试验的优化配方 11K(15%Cr-6%W-2%Mo)。

(3) 优化配方 11K 覆层 700℃回火后的硬度(349HV0.1)高于正交组中硬度最高的 1A 覆层(346HV0.1),比 H13 钢、对照组 10J 覆层分别提高约 85、63HV0.1,回火抗力最优。

(4) 优化配方 11K 覆层在 600℃时氧化速率较小、700℃时有一定程度增加,其单位面积氧化增重仅分别为 H13 钢的 1/8、1/3,显著优于 H13 钢。

### 参考文献:

- [1] Kang J H, Park I W, Jae J, et al. A study on die wear model of warm and hot forging[J]. Met.Mater.,1998,4(3):477-483.
- [2] 宋思利. 钨极氩弧原位合成 TiC 增强铁基熔敷层的研究[D]. 山东:山东大学,2007.
- [3] Soner Buytoz, Mustafa, M, Mustafa Y. Dry sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings [J]. Applied Surface Science,2005,252(5):1313-1323.
- [4] 王旭,温家伶,高芹. 氩弧熔覆 Ni-SiC 熔覆层组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2009,38(8):85-86.
- [5] 郭建亭,周兰章,袁超,等. 我国独创和独具特色的几种高温合金的组织性能[J]. 中国有色金属学报,2011,21(2):237-250.
- [6] 郭建亭. 高温合金材料学(下册)[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [7] 边书,张玉妥,王承志. Fe-Cr-Ni 系相图计算[J]. 沈阳理工大学学报,2011,30(6):17-21.
- [8] Qing Y H. Influence of molybdenum on the microstructure and properties of a FeCrBSi alloy coating deposited by plasma transferred arc hardfacing[J]. Surface & Coatings Technology, 2013,225:11-20.
- [9] 严彪. 不锈钢手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009. 

### 作者介绍

李爱农,男,1958年10月生,湖北省鹤峰县人,工学博士、副教授。1982年武汉水运工程学院本科毕业,2003年武汉理工大学博士研究生毕业。2007年美国 IowaStateUniversity 访问学者;2008年11月-2009年10月,教育部科技部广东省企业科技特派员(驻广东亿龙电器公司)。从事的研究有:①热锻模梯度结构覆层的制备与环境服役行为(国家自然科学基金面上项目,No.51475346、在研、参加);②废旧模具绿色再制造及快速修复工艺技术开发项目(佛山市经济科技促进局,No.2012CX040、在研、主持);③3500m<sup>3</sup>/h再制造耐磨泥泵泵壳的研究(事业委托项目,在研、参加)。

## 通告

### 关于本刊网址和邮箱的通告

近期有作者反映,有网站冒用本刊网名:热加工工艺,致使其投稿失误,但其很快发觉不对,便迅速与本刊电话沟通,证实那个网站盗用本刊网名,但网址不同。

为了大家能把稿件一次性准确地投向本刊,本刊特此通告:本刊网名:热加工工艺;本刊网址:www.rjggy.com及www.rjggy.net。凡与此不一致者,不是本刊网页。

另外,本刊邮箱为:rjggy@vip.163.com。凡与此不一致者,不是本刊邮箱。

如您在网络上发现与本刊网页、邮箱有关的疑问,欢迎您与本刊积极联系,以维护各方权益。