

光束反应合成碳化物增强的镍基合金堆焊层*

张 迪^{1,2}, 单际国¹, 任家烈¹, 刘景凤², 沈风刚²

(1.清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2.中冶集团建筑研究总院 焊接研究所, 北京 100088)

摘 要:以镍基合金粉 Ni35、铬粉和石墨为堆焊材料, 用光束反应合成的方法制备了碳化物增强的镍基合金堆焊层, 研究了堆焊材料组成对堆焊层显微组织及宏观硬度的影响规律。结果表明, 在镍基合金粉中加入铬粉和石墨, 堆焊层中析出了一次碳化物, 可显著提高堆焊层的宏观硬度; 随铬粉和石墨加入量的增加, 堆焊层中一次碳化物的析出量随之增加, 堆焊层的宏观硬度相应提高, 最高可达 62 HRC, 是镍基合金粉光束堆焊层的 2.8 倍; 但加入过多的铬粉和石墨将恶化堆焊层的成形。

关键词: 光束堆焊; 反应合成; 一次碳化物

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)03-0001-03

Carbide-reinforced Ni-based Alloy Surfacing Layer Synthesized by Light Beam Heating

ZHANG Di^{1,2}, SHAN Ji-guo¹, REN Jia-lie¹, LIU Jing-feng², SHEN Feng-gang²

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Welding Research Institute of Central Research Institute of Building & Construction. MCC, Beijing 100088)

Abstract: With the Ni-based alloy powder, Cr powder and graphite as surfacing materials, the carbide-reinforced Ni-based alloy surfacing layer was reaction synthesized by light beam heating. The influence of the composition of surfacing material on the microstructure and hardness of surfacing layer was investigated. The results showed that adding Cr powder and graphite to Ni-based alloy powder can yield primary carbide precipitate in the surfacing layer, which obviously increases its hardness. With the increase of Cr powder and graphite content, the precipitated carbides increase, and the hardness of surfacing layer raises. The hardness of Carbide-reinforced Ni-based alloy surfacing layer can reach to 62 HRC, about 2.8 times that of the plain Ni-based alloy surfacing layer. Excess Cr powder and graphite will result in the poor shape of surfacing layer.

Key words: light beam surfacing; reaction synthesis; primary carbide

0 引 言

碳化物增强的金属基堆焊层具有金属基体的高韧性和化合物相的高硬度, 在表面工程领域得到了广泛应用^[1]。堆焊层中的碳化物可以外加获得, 也可在涂层制备过程中反应合成。外加获得碳化物时, 碳化物与基底之间存在相容性问题, 界面处极易萌生裂纹^[2]。与外加碳化物相比, 反应合成的碳化物形成于金属基底中, 不存在与基底相容性的问题, 界面结合强度高。因此, 用反应合成法制备碳

化物增强的堆焊层受到了国内外的普遍关注。

传统的堆焊技术以电弧为热源, 受电弧吹力和弧斑漂移的影响, 堆焊过程碳化物的反应合成难以控制, 所以高能量密度、加热过程平静的热源是较为理想。氙灯光束的功率密度与电弧相当, 且加热过程平静, 对熔池无机械力作用^[3], 国外同行在光束堆焊领域做了开展了研究工作^[4,5], 但仅限于金属基堆焊层制备工艺及堆焊层宏观质量的研究, 有关反应合成的碳化物增强的光束堆焊层未见报道。文中采用清华大学研制开发的光束加热设备, 在 45# 钢表面反应合成了碳化物增强的镍基合金堆焊层, 并研究了堆焊材料对堆焊层微观组织和宏观硬度的影响规律。

收稿日期: 2006-04-17

基金项目: *国家自然科学基金项目(50275082)

作者简介: 张迪(1977-), 女(汉), 山东莱芜人, 高级工程师, 博士。

1 试验方法

堆焊材料为镍基自熔合金 Ni35、金属 Cr 粉和石墨的混合粉，其组成以 $NixCryCz$ 的形式，含义为 Ni35、金属 Cr 粉、石墨在堆焊材料中的质量分数分别为 $x\%$ 、 $y\%$ 和 $z\%$ (表 1)。Ni35 的化学成分为 (%) Cr10.0, Si3.0, B2.5, C0.4, Fe<10, Ni 余量。将堆焊材料预涂在尺寸为 12.5 mm×12.5 mm×50 mm 的 A3 钢表面，预涂层的厚度为 1.5 mm。堆焊试验采用清华大学研制的光束加热设备，光束功率为 5 kW，堆焊速度为 0.7 mm/s。堆焊试样的横截面经双氧水盐酸水溶液腐蚀后在 CSM950 扫描电镜和能谱仪下分析显微组织和析出相成分。析出相显微硬度和堆焊层宏观硬度用 Π MT-3 型显微硬度计和 AR-10 型洛氏硬度计测量，载荷分别为 20 g 和 150 kg。

2 试验结果和讨论

Ni35 是光束堆焊工艺性能良好的堆焊材料^[6]，在光束堆焊条件下可以制备成形优良的镍基合金堆焊层。堆焊层的显微组织 (图 1a) 为少量共晶基底上分布着大量初生的 γ -Ni 枝晶组成，基底的绝大部分由 $M_{23}(C,B)_6 + \gamma$ -Ni 网状共晶组成^[7]。Ni35 堆焊层中 γ -Ni 的过饱和固溶及共晶碳化物的析出是其得以强化的主要原因^[7]。由于 Ni35 堆焊层中碳化物的析出量少且以共晶形式存在，导致其宏观硬度较低 (表 1)。即使通过优化堆焊工艺参数，堆焊层的宏观硬度也都在 40 HRC 以下^[6]，在试验条件下，Ni35 光束堆焊层的硬度仅为 22.3 HRC (表 1)。为了获得成形优良且宏观硬度高的光束堆焊层，文中利用 Ni35 良好的光束堆焊工艺性能，以其为基底金属，并在其中加入铬粉和石墨，在保证堆焊层成形质量的前提下，原位反应合成一次碳化物，制备碳化物增强的镍基合金堆焊层，从而提高堆焊层的宏观硬度。

以 Ni35 合金粉末、铬粉和石墨为堆焊材料制备碳化物增强的镍基合金堆焊层，首先要考察铬粉和石墨的加入是否影响堆焊层的成形质量，这是保证堆焊层具有工程应用价值的前提。试验结果表明，其他条件不变时，在 Ni35 合金粉末中加入少量铬粉和石墨后，对堆焊层的成形质量无显著影响。只有当铬粉和石墨的加入量超过一定值后 (试验条件下为 70%)，才会降低堆焊层的成形质量，

堆焊层表面出现较多孔隙，其横截面由圆弧形变为凹形。这是由于高熔点 Cr、C 元素的大量引入使堆焊材料的熔点显著升高，在相同热输入条件下，只有处于光斑中心的堆焊材料可以充分熔化，而位于光斑外围的堆焊材料不能完全熔化，从而导致堆焊层成形质量下降。

表 1 堆焊材料对光束堆焊层硬度及其主要化学成分的影响(质量分数/%)

Table 1 Influences of welding materials on light beam heated welding layer's hardness and chemical composition

试样号	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	
堆焊材料	Ni100	Ni78Cr20C2	Ni47Cr50C3	Ni30Cr66C4	
硬度/HRC	22.3	31.6	40.8	62.2	
主要成分 %	Fe	49.83	14.90	10.76	10.49
	Ni	43.07	56.11	34.26	23.35
	C	0.48	0.55	0.61	0.84
	Cr	5.38	27.21	53.27	64.91

在保证堆焊层成形质量的前提下，Ni35 合金粉中加入铬粉和石墨后，堆焊层的化学成分和显微组织将发生明显变化 (表 1, 图 1b, c, d)。就堆焊层的化学成分 (表 1) 而言，其铬、碳含量显著增加，利于合成一次碳化物；而堆焊层的铁含量降低，即堆焊层稀释率下降，利于保证堆焊层的设计性能。就堆焊层显微组织而言，最大的变化则是堆焊层中析出了新的物相，即块状和条状相 (图 1b, c, d)，但两者的化学成分 (约含 90%Cr 和 2.5%C，余为其他元素) 和显微硬度 (2 200~2 300 Hm) 无明显差别。考虑到析出相的三维特征，可以推断块状或条状相实际上为同一种相，其空间上为棒状，块状和条状相仅仅反映了棒状相在不同截面的特征。根据棒状相的化学成分、显微硬度及其形态可以推断，棒状相即为初生的一次碳化物，即碳化铬 (图 1b, c, d)，堆焊层中的 Cr 元素主要分布在该相中。堆焊层的基底组织则是由 γ -Ni 固溶体和 γ -Ni+碳化物的共晶组成。可见在 Ni35 合金粉中加入铬粉和石墨后，可以合成一次碳化物增强的镍基合金堆焊层。一次碳化物的存在提高了堆焊层的宏观硬度 (表 1)，是堆焊层得以强化的主要原因。

铬粉、石墨加入量的改变也会改变堆焊层中一次碳化物的特征及堆焊层的宏观硬度。当铬粉、石

