

# 高中频感应熔涂 Ni60 涂层组织分析

Analysis on Microstructure of Ni60 Coating by High and Medium Frequency Induction Cladding

张增志, 韩桂泉, 付跃文, 沈立山 (中国矿业大学, 北京 100083)  
ZHANG Zeng-zhi, HAN Gui-quan, FU Yao-wen, SHEN Li-shan  
(China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

摘要: 分析了高频、中频感应熔涂 Ni60 涂层的显微组织。结果表明, 高频感应熔涂 Ni60 涂层与基体形成了良好的冶金结合, 在涂层与基体之间存在明显的扩散转移层。高频感应熔涂涂层组织均匀细致, 有丰富的增强耐磨性的硬质相。相比之下, 中频感应熔涂涂层基本上均为针状组织, 形成贫铬区倾向较大。

关键词: 高频感应熔涂; 中频感应熔涂; Ni60 涂层; 组织  
中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2003) 04-0003-03

**Abstract:** The microstructure of Ni60 coating by high-frequency induction cladding and medium-frequency induction cladding was analyzed. The results show that the metallurgical combination is formed between Ni60 coating and base, while diffusion and transfer coat can be observed obviously. The microstructure of Ni60 by high-frequency induction cladding is even and detailed. There are a lot of hardness phases which can enhance abrasion-performance. By contrast, The Ni60 coating by medium-frequency induction cladding is mainly composed of the needle-shape microstructure and has a greater inclination to form the zone of lacking chromium.

**Key words:** high-frequency induction cladding; medium-frequency induction cladding; Ni60 coating; microstructure

感应熔涂技术是在工件基体上预先制备合金涂层, 然后利用感应线圈中的交变电磁场在工件当中产生涡流, 借助涡流的趋肤效应产生的热量来熔化涂层, 从而使涂层和基体形成冶金结合, 达到强化基体表面的工艺。目前国内外这一研究领域的报道较少。笔者经广泛查询后发现, 大多文献中均采用热喷涂方法预制涂层, 然后进行感应熔涂, 而且频率均集中在 10kHz 量级<sup>[1,2]</sup>。然而, 预涂方法采用直接将合金粉末冷涂于工件上, 然后采用中、高频率加热的感应熔涂技术, 目前国内外还未见有关研究资料发表。本试验对经冷粘结预制的涂层进行中、高频感应熔涂后的组织进行了研究和比较。

## 1 试验方法

试验所采用的主要设备是 GP100 型电子管式感应加热设备和自行设计的熔涂机床, 感应加热设备的振荡功率 100kW, 输出加热功率 85kW, 外接电源 3 相交流、380V、50Hz, 可调振荡率范围 90~300kHz, 感应器为  $\phi 10\text{mm}$  紫铜管, 截面形状为近似圆形, 管中通有冷却水, 感应器距工件的间隙为 2.5~3.5mm。试验用基体材料为 45 钢。感应熔涂涂层材料为 Ni60 合

金粉末, 粒度 140~320 目, 化学成分见表 1。涂层制备前试样表面先用碱液清洗, 后用棕刚玉喷砂, 涂层的制备笔者采用自配的粘结剂将粉末冷粘结在基体上, 经烘干后直接感应熔涂。试样尺寸为  $\phi 40\text{mm} \times 500\text{mm}$ , 制备试样两根, 涂层在试棒上长度为 300mm, 涂层厚度均为 0.6mm。

表 1 Ni60 合金粉末化学成分 (质量分数/%)  
Table 1 Chemical composition of Ni60 alloying powder (mass fraction/%)

Cr	B	Si	Fe	C	Ni
16	3.5	4.5	15	0.8	Bal

## 2 结果与分析

图 1 给出了 Ni60 合金粉末冷粘结预涂高频感应熔涂涂层全貌的显微组织照片。图 2 分别是涂层底部、中部和顶部的显微组织照片。

由图 1 和图 2 可以看出, 涂层从底部到顶部分布着一些针条状、块状组织, 涂层靠近基体的部位针条状组织稠密, 往涂层中部逐渐稀疏, 到顶部则针条状组织基本消失, 组织趋于均匀化。这是由于粘结涂层

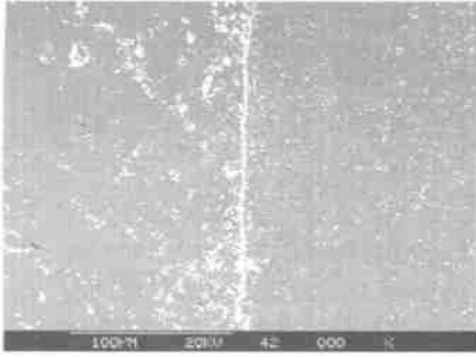


图1 Ni60 高频感应熔涂涂层 SEM 照片  
Fig. 1 SEM photograph of Ni60 coating  
by high-frequency induction cladding

的界面处涡流较大, 因而底层温度较高, 处于熔融态时段长, 相比之下, 顶部的温度低, 再加上与外部空气接触, 冷却速度快, 因而非晶组织多, 组织均匀化。

图3是对涂层黑色块状组织的X射线能谱成分分析, 说明该部位为Ni, Cr, Fe, Si的固溶体。图4是涂层的X射线衍射图。再结合以前研究者的结果<sup>[3-5]</sup>, 可以知道, 该灰黑色阴影团块为富含Cr的化合物。因富铬区为片状, 因此就整体而言, 产生周围贫铬的趋势较小。

结合X射线衍射图, 涂层中的硬质相主要是 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 和 $\text{CrB}$ 。

由以上X射线衍射分析、显微组织照片及能谱分析可知, 涂层的组织主要是在Ni的固溶体上分布着

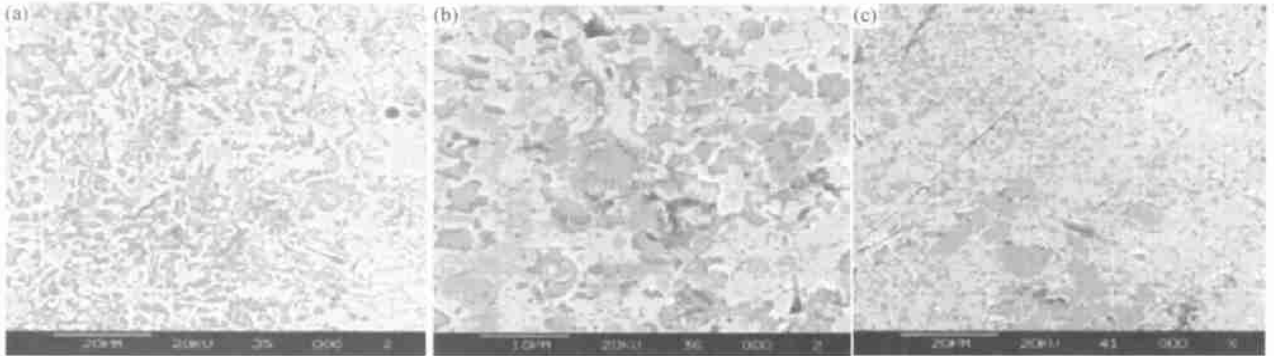


图2 涂层组织 (高频) (a) 涂层底部组织; (b) 涂层中部组织; (c) 涂层上部组织

Fig. 2 Microstructure of coating (HF)

(a) microstructure of the lower layer of coating; (b) microstructure of the middle layer of coating;  
(c) microstructure of the upper layer of coating

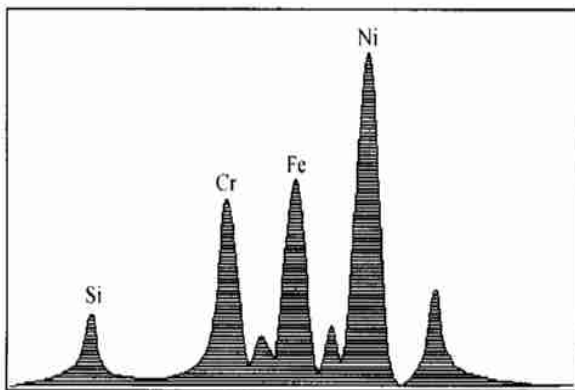


图3 涂层X射线能谱图 (高频)

Fig. 3 X ray energy distribution data for Ni60 coating (HF)

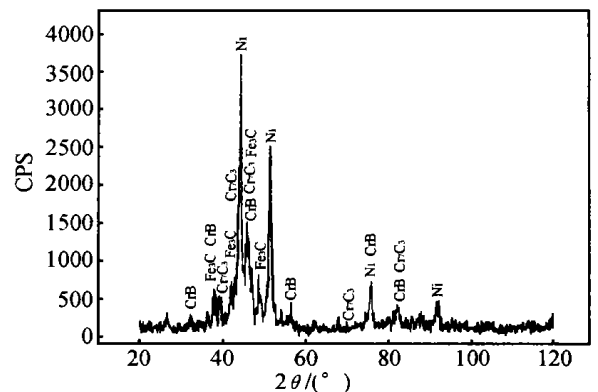


图4 Ni60 涂层X射线衍射谱 (高频)

Fig. 4 X ray diffraction pattern of Ni60 coating (HF)

块状组织、碳化物及硼化物硬质相。同时, Cr的主要形态为碳化物和硼化物, 这使涂层有丰富的耐磨相, 成为涂层具有良好耐磨性的基础。

从图1还可以看出, 高频感应熔涂涂层与基体的结合部是一条白亮带。这一白亮带是涂层和基体组织相互扩散的结果, 说明了涂层和基体的良好结合。出

现白亮带是感应熔涂的一个特征。

参考文献 [6] 中的铁基合金粉末感应熔涂中也出现了白亮带, 称之为扩散转移带 (DTB), 并且分析了 DTB 的形成。认为, DTB 是在超过 1000 的高温下涂层元素向基体奥氏体中扩散, 快速冷却时, 涂层元素留在基体中的结果。笔者曾对感应熔涂过程中的涡流分布做过研究, 知道由于涂层与基体的特性差异, 在涂层与基体的界面处涡流很大, 因而界面处温度较高, 这一原因应该是高频感应熔涂中形成明显白亮带的主要原因。

白亮带的形成说明了高频感应熔涂涂层和基体呈现良好的冶金结合。

图 5 是中频感应涂层显微组织。可以看出, 涂层

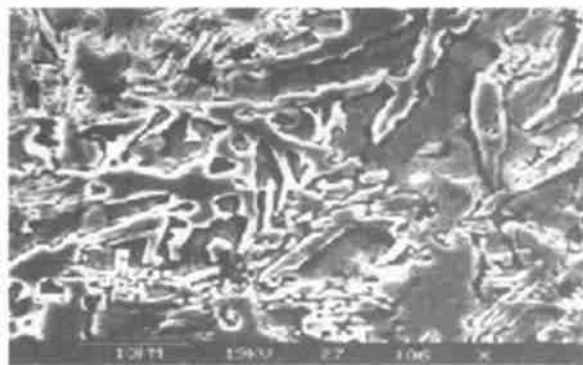


图 5 中频感应 Ni60 涂层显微组织

Fig. 5 Microstructure of coating by medium-frequency induction cladding

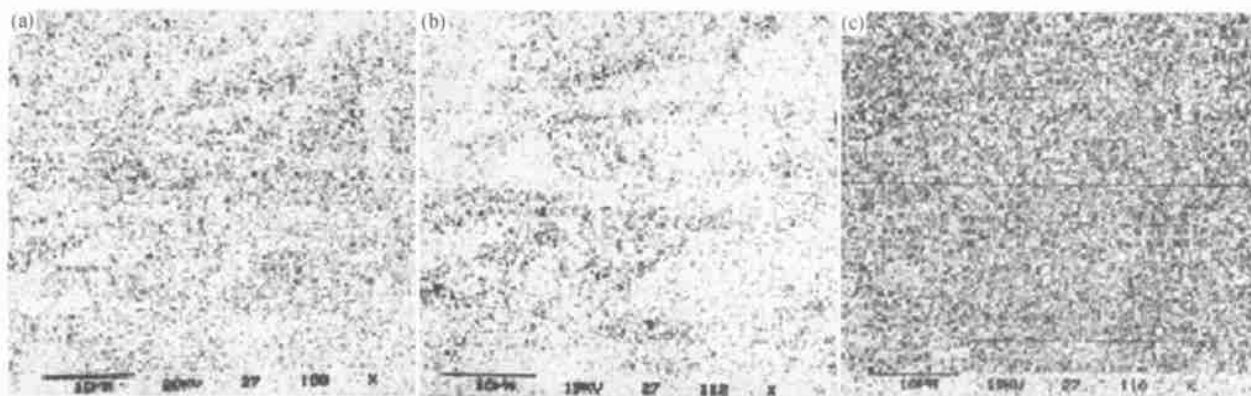


图 6 中频感应 Ni60 涂层 X 射线面扫描图 (a) 涂层中 Ni 分布; (b) 涂层中 Cr 分布; (c) 涂层中 Fe 分布

Fig. 6 X ray surface-scanning patterns of Ni60 coating by medium-frequency induction cladding  
(a) Ni distribution; (b) Cr distribution; (c) Fe distribution

内几乎全部为针条状组织。

图 6 是中频感应熔涂 Ni60 涂层 X 射线面扫描图。可以看出, 富铬区沿针状组织分布, 且密度大, 由于针状组织多, 所以整体造成的贫铬倾向大。

### 3 结论

(1) 高频感应熔涂 Ni60 涂层与基体形成了非常良好的冶金结合, 在涂层与基体之间形成了扩散转移层。

(2) 高频感应熔涂 Ni60 涂层组织均匀细致, 气孔率极小, 有丰富的增强耐磨性能的硬质相。

(3) 高频感应熔涂涂层形成贫铬区的倾向小, 而中频感应熔涂涂层形成贫铬区倾向大且涂层组织基本上均为针状组织。

#### 参考文献

[1] Takasaki N, sochi Y. Fusing of sprayed Ni-base coatings by induction heating [A]. In: Proceeding of the International Thermal

Spray Conference and Exposition [C]. 1992: 273- 278.

[2] Matshbara Y, Kumaguwa M. Application of self-Fused Alloy Coating by HF Induction Heating [A]. In: Proceedings of ITSC 95 [C]. 1995. 1001- 1004.

[3] 机械制造工艺材料技术手册编写组. 机械制造工艺材料技术手册 (下册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 553.

[4] 周玉, 武商群. 材料分析测试技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.

[5] 史密斯 W F 著. 工程合金的组织 and 性能 [M]. 张泉, 赵公告, 任崇信, 何培森译. 北京: 冶金工业出版社, 1984.

[6] Junling Lin, Huzai Hao, Zhian Guo. Interface Morphology of Iron-Base Selffusing Alloy Coating with Induction-refusing [A]. In: Proceeding of ITSC 95 [C]. 1995. 537- 541.

收稿日期: 2002-04-26; 修订日期: 2002-12-30

作者简介: 张增志 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要从事新材料与表面工程研究, 联系地址: 中国矿业大学北京校区机电工程系 (100083)。