第15卷 第1期 焊 接 学 报 Vol.15 No.1
1994 年 3 月 HANJIE XUEBAO March 1994

涂层的感应重熔工艺

刘俊玲 郭治安

(太原 山西矿业学院)

摘 要 本文采用磁性测试,差热分析,扫描电镜,X射线衍射等现代化测试手段,对国产自熔合金粉末 Fe60 和 Ni60 喷涂层的感应重熔工艺性进行了大量试验研究,得出试验采用的自熔合金粉末是顺磁性材料,喷涂层的磁性质是影响感应重熔工艺性的关键因素的结论,提出涂层感应重熔工艺性取决于试件上温度场分布,而试件上温度场分布主要取决于涂层材料磁性质的观点。

关键词 涂层; 磁性; 感应重熔; 工艺

0 序 言

在一般钢基体上的自熔合金粉末涂层的感应重熔,属于异种材料感应加热,其温度场分布除了与异种材料的热物性值有关外,还直接受材料电磁性值的影响。传统物理学观点认为,铁和镍都是铁磁材料,而我们的试验结果表明,试验采用的铁基自熔合金粉末 Fe60 和镍基自熔合金粉末 Ni60 都是顺磁性材料。涂层材料与基体材料磁导率的巨差,导致温度的特殊分布,从而造成涂层感应重熔工艺过程的诸多特殊性。

本文侧重涂层感应重熔工艺性方面进行研究。在试验基础上,对不同粉末喷涂层的温度分布进行分析,论述了重熔温度场与重熔工艺性的关系,对涂层感应重熔工艺的实际应用具有重要的指导意义。

1 试验方法及材料

试验采用两种国产自熔合金粉末 Fe60 和 Ni60, 基体材料为 27SiMn。试件尺寸为 φ92mm×9mm×200mm 的中空圆柱体。以通常氧乙炔火焰喷涂方法,采用 QSH－4 型喷涂枪,在 C620 车床上制得喷涂涂层。喷涂层厚度约 0.8mm。在 DGF－C－208 型中频(8kHz)感应淬火设备上,进行喷涂层的感应加热重熔。感应圈为单匝,与试件间隙约 4mm。重熔后熔敷层经受弯曲、孔隙率、耐腐蚀性、加热骤冷等性能测试,以及磨削加工,结果表明,喷焊层各项性能满足使用要求。所用涂层材料的化学成分、硬度、熔点列于表 1。

表1 涂层材料

Table 1 Coating material

Name	Chemical composition (wt%)						Grain size (1/inch)	Melting point (℃)	Hardness HRC
	C	B	Si	Cr	Ni	Fe			
Fe60	0.9	3.5	3.0	16	11	Other	−160 +400	1030 ~ 1100	52 ~ 62
Ni60	0.8	3.5	4.0	16	other	<15	−150 +400	1027	55 ~ 60

粉末磁性试验按照物理学磁性测试原理[5]，采用自制试验装置进行；喷涂层取样的差热分析在LCT－2型差热分析仪上进行，在Nephot－2型光学显微镜下观察显微组织，在KYKY－1000B型扫描电镜下观察界面组织形貌，在D/max－γA型X射线衍射仪上进行涂层相成分分析。

2 试验结果

2.1 粉末导磁性测试

为了对比，除了对Fe60和Ni60粉末进行磁性测试以外，还对Cu150粉末同时进行了测试，图1是测试结果。数据表明，Fe60和Ni60粉末都属于顺磁性材料，相对磁导率在3.5 ~ 4.5范围，其中Fe60磁导率略大于Ni60。铜是抗磁材料，铜粉磁导率的绝对值偏低，且为常数，不随磁场强度而变化，这是符合物理学有关材料磁性概念的。

2.2 喷涂层取样差热分析

差热分析结果表明，在试验极限温度以内，基本存在三个吸热谷。在第一吸热谷(约960℃)以下，没有相变反应发生，这可间接表明喷涂层组织中的固溶体相是γ固溶体。

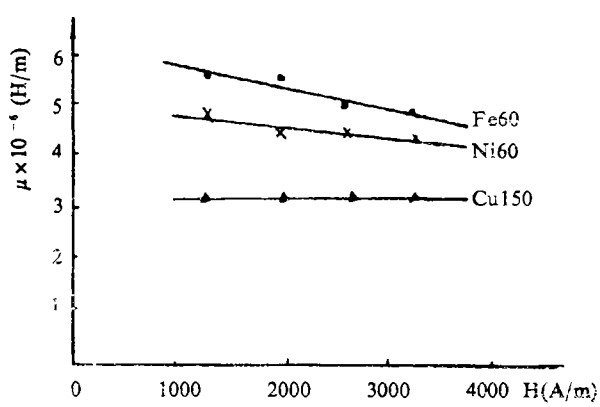


图1 磁导率测试结果

Fig.1 Result of magnetic conductivity test

2.3 显微观察

图2是一组系列金相照片，显示了Ni60自熔合金粉末喷涂层在感应重熔过程中，喷焊层形成的微观全过程。

刚开始加热时，图2a中仍保存喷涂层

材料导磁性越差，界面处涡流强度越高，则此处升温越快。

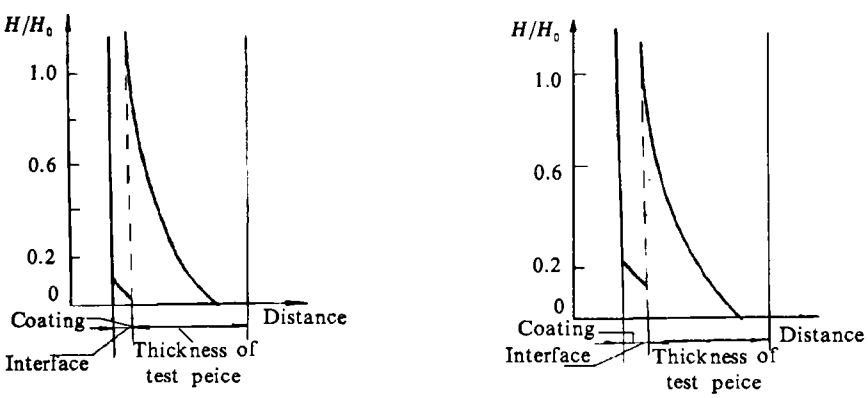
当界面处达到居里点温度时，涡流强度骤然下降，相对较强处向内层移去，但此处磁场强度已明显低于界面处，其衰减是呈指数规律的。此时进入均热阶段，但是，透入深度 δ 以内的高密度，高速度加热对试件上温度分布起到了决定性作用。

在感应加热条件下，喷涂层的顺磁性质决定了其加热熔化主要通过热传导方式进行。

3.2 Ni60 与 Fe60 涂层感应重熔时的温度分布

综合显微观察和磁导率测试结果认为，Ni60 和 Fe60 涂层感应重熔时温度分布有所不同。分析认为，其温度分布不同的原因是由试件上磁感强度分布决定的。在其它条件一定情况下，涂层与基材的磁性质决定了磁感强度的分布趋势；不同粉末喷涂层获得致密熔敷层所要求的不同比功（单位表面功率 kW/mm^2）决定了电源有效功率的大小，从而决定了磁感强度的大小。

图 4 是 Ni60 和 Fe60 涂层感应加热时，试件上磁感强度分布示意图。虽然喷涂层磁导率很低，但在其内部也会形成磁感强度符合集肤效应的小分布，只是其强度远远小于基材，二者的相对差别是与涂层和基材的磁性差别相对应的。当电源输出功率增大，磁场强度增加时，二者同时增大。



(a) On Ni60 coating test piece　　(b) On Fe60 coating test piece

图 4　磁感强度分布示意图

Fig.4 Distribution of magnetic induction density

H_0—Magnetic induction density on surface of base metal

H—Magnetic induction density in different depth

磁感强度分布与涡流密度一致，而涡流产生的电阻热是感应加热的直接热源。由于 Fe60 粉末磁导率略高于 Ni60 粉末，同时熔化 Fe60 涂层所要求的比功略大于 Ni60 涂层，这两个因素的共同作用使 Fe60 涂层上磁感强度大于 Ni60 涂层，从而导致二者在感

应加热时的不同温度分布。

3.3 感应重熔温度场与感应重熔工艺性

从前面的分析认识到，涂层的磁性质及熔化涂层所要求的比功决定了它的温度分布。温度分布的不同不仅影响涂层的熔化过程，同时影响涂层排气、脱渣、组织结构及涂层与基材过渡带的形成。就Ni60型和Fe60型温度分布而言，Ni60型温度场的重熔工艺性优于Fe60型，主要表现在以下几方面：

(1)涂层熔化过程自界面开始，逐渐向涂层表面进行，涂层与基材之间有较充分的相互作用时间，有利于形成良好的冶金结合，获得较高的结合强度。

(2)具有良好的排渣气性能。伴随涂层熔化自内向外进行，渣气随之排出，易于获得致密熔敷层。

(3)由于温度分布仅一个峰值，且始终处于界面，涂层表层处于相对较低温度，因此减少了涂层表面氧化的机会。

(4)涂层熔化过程自里向外进行，可以避免重熔过程中金属流淌，使重熔过程易于控制。

Fe60型温度分布的显著缺点是排渣脱气性能差。为获得致密熔敷层，需要提供高于熔化涂层本身需要的比功，以确保足够的熔融状态停留时间，使渣气有机会排出，但是这对重熔工艺参数控制提出了严格的要求，提高了获得优质喷焊层的难度。

4 结 论

(1)试验采用的Ni60和Fe60自熔合金粉末都是顺磁性材料，其相对磁导率 $\mu_r=2.5\sim4.5$。

(2)顺磁性材料的喷涂层在感应重熔过程中，其熔化是从涂层－基材界面处开始的，涂层的熔化和涂层的排渣气过程同步进行，同时，还伴随着涂层－基材过渡带的形成过程。

(3)合金粉末的磁性质是涂层感应重熔过程中的关键因素。涂层感应重熔过程中各因素的相互关系如图5。

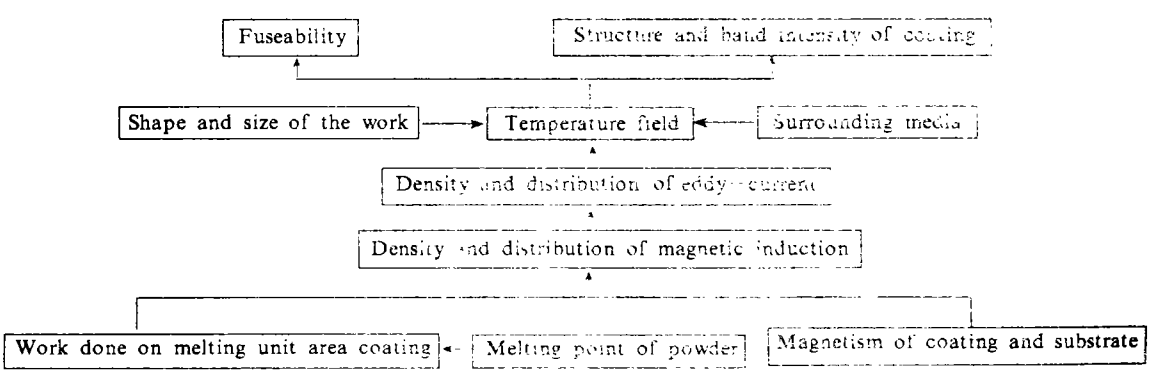


图5 各工艺因素关系图

Fig.5 Relations of factors

(4)Ni60 型温度场优于 Fe60 型,具体表现在:

有利于提高结合强度;具有良好的排渣气性;涂层金属氧化程度小;重熔过程易于控制。

(1993 年 10 月 21 日收到修改稿)

参 考 文 献

1 华中工学院等. 物理实验. 1980.

2 E. 罗格夏特著. 庄鸿寿译. 高温钎焊. 北京:国防工业出版社. 第一版. 1989.

3 石朱生等. 镍硼硅合金组织和性能的研究. 1985.

4 陈德和. 不锈钢的性能和组织. 北京:机械工业出版社, 第一版. 1977.

5 约翰. 戴维斯等著. 张淑芳等译. 感应加热手册. 北京:国防工业出版社. 第一版, 1985.

Induction－fuseability of coatings

Liu Junling, Guo Zhian

(Shanxi Mining College, Taiyuan)

Abstract The induction－fuseability of the coatings of domestic self－fusing alloy powder named Fe60 and Ni60 is studied with a series of modern methods of magnetic test, thermoelectrical effect analysis, scanning electron microscope and x－ray diffraction. The results show that both kinds of powder are paramagnetic materials, and magnetic properties of the powder are the vital factors which influence the induction－fuseability seriously. The viewpoint is put forword that the induction－fuseability of the coatings depends on the field of temperature on the test pieces which depends mainly on the magnetic property of coating materials.

Key words coatings; magnetic properties; induction fusing; technology