

# 铁基合金中 $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ 对其激光熔覆层 组织结构和开裂敏感性的影响\*

宋武林 周 刚 曾大文 谢长生

(华中理工大学模具技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 通过调整 Fe-Cr-Ni 激光熔覆合金中  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ , 研究了  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  对熔覆层组织和开裂敏感性的影响。研究表明, 随合金中  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  的增加, 熔覆层组织将出现  $\delta$ -Fe, 并逐渐增加; 而  $\delta$ -Fe 含量与熔覆层的开裂敏感性有关。

**关键词:**  $\delta$ -Fe  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  组织 开裂敏感性

## Effect of $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ composition on structure and crack susceptibility of laser-clad Fe-base coating

Song Wulin, Zhou gang, Zeng Dawen, Xie Changsheng

(State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Die and Mould Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The crack of laser-clad alloy also is a trouble thing in laser welding technique. In our study, we use the crackle density to indicate the crack susceptibility. It is shown that the  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  composition has significant effect on the structure and the crack susceptibility of laser clad Fe-Cr-Ni coating. With the increasing of  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  composition, the  $\delta$ -Fe composition appears and becomes more and more, and the microstructure of the laser-clad alloy changes. The crack susceptibility of the alloy is the lowest when  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  composition is about 1.5 and  $\delta$ -Fe composition is in the range of 5% ~ 8%.

**Key words:**  $\delta$ -Fe  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  structure susceptibility

## 引 言

对激光熔覆层的开裂行为、影响因素及抑制措施的研究虽然已开展了许多工作<sup>[1, 2]</sup>, 但控制激光熔覆层的开裂依然是激光熔覆技术走向工业化的主要问题。控制激光熔覆层的开裂也就是要防止裂纹的产生和阻止裂纹的产生和扩展。激光熔覆技术虽然是一种近二十几年发展起来的高新技术, 但它与传统焊接技术(特别是堆焊)有许多相似的特点。工艺过程中, 它们同样是材料局部区域发生快速加热、熔化和凝固、冷却的过程, 它们在熔池温度场和质场的建立、模型和变化等方面有着相似之处。同时, 奥氏体不锈钢的化学成分、焊后的组织结构、合金的组织结构、合金元素的作用等与目前广泛应用的 Fe-Cr-Ni 铁基合金激光熔覆层极为相近。因此, 借鉴奥氏体不锈钢焊接时凝固裂纹的形成机理及防止手段, 来寻求控制激光熔覆层开裂的方法是一种有效的途径。文献[3], [4]的报道通过调整 18-8 奥氏体不锈钢的  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  使焊缝组织串出现 5% ~ 10%  $\delta$ -Fe 的  $\delta + \gamma$  双相组织进, 可有效降低焊缝的开裂倾向。我们则利用这

\* 湖北省自然科学基金资助(95J54)。

种思路来探讨  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  与  $\delta$ -Fe 含量对 Fe-Cr-Ni 合金激光熔覆层开裂敏感性的影响。

## 1 试验材料及方法

**试验材料** 选用较常用的 WF311 铁基自熔合金为基本熔覆材料, 其成分为 Fe66Cr20Ni10B2Si2, 在此成分的基础上添加不同的 Cr 含量以改变熔覆层的  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ , 用球磨的方法进行机械混匀。基材为调质后的 45# 钢。

**试验方法** 将配制好的各种合金粉预置在基材表面, 厚度为 1.2mm, 然后在连续 2kW CO<sub>2</sub> 激光器上进行多道搭接激光熔覆, 搭接率为 45%, 工艺参数为: 激光功率 2kW, 光斑直径 5mm, 扫描速度 4mm/s。用渗透法及低倍显微镜检测熔覆层开裂情况, 并用单位熔覆面积上的裂纹长度  $a$ , 即所谓裂纹密度来描述熔覆层的开裂敏感性。裂纹密度  $a$  值越大, 熔覆层开裂越敏感。用 X 射线衍射仪对熔覆层的物相进行分析, 同时, 用网格法在高倍金相显微镜上对熔覆层的  $\delta$ -Fe 进行定量分析。

## 2 试验结果

### 2.1 $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ 对熔覆层组织结构的影响

根据有关  $Cr_{eq}, Ni_{eq}$  的计算公式<sup>[5]</sup>

$$Cr_{eq} = \%Ni + 0.5\%Mn + 30X\%(C + N) \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = \%Cr + \%Mo + \%1.5X\%Si + 0.5X\%Nb \quad (2)$$

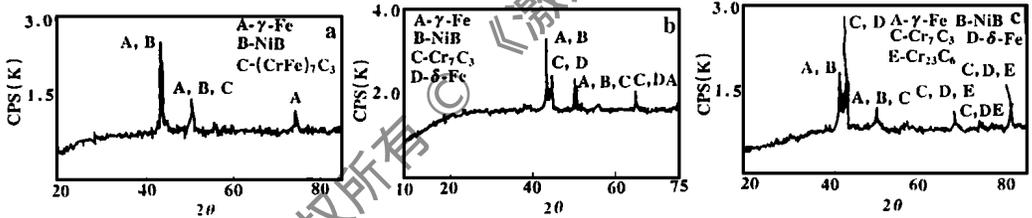


Fig. 1 Effect of  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  on phase structure a— $Cr_{eq}/Ni_{eq}=1.34$  b— $Cr_{eq}/Ni_{eq}=1.97$  c— $Cr_{eq}/Ni_{eq}=3.21$

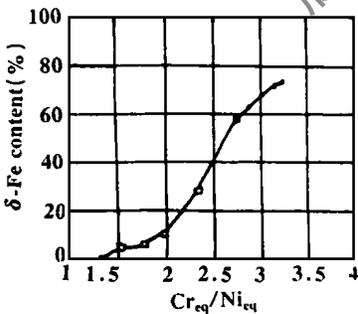


Fig. 2 Effect of  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  on content of  $\delta$  phase

分别计算出不同合金成分的  $Cr_{eq}, Ni_{eq}$  以及  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ , 并用定量金相和 X 射线法测定  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  对熔覆层组织结构的影响。结果表明熔覆层组织结构最大变化是随  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  的增加,  $\delta$ -Fe 相将从无到有并逐渐增加。具体结果如图 1, 图 2 所示。

### 2.2 $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ 对熔覆层硬度的影响

随熔覆合金中  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  的变化, 从图 2 可看出熔覆层的组织结构亦发生了变化。因而熔

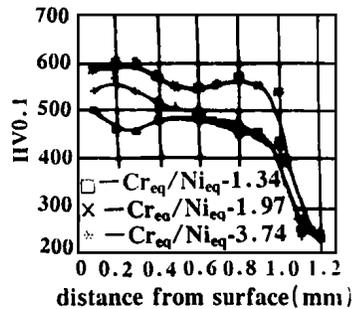


Fig. 3 Effect of  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  on hardness

覆层的硬度也发生了变化,其结果如图3所示。随熔覆合金中  $C_{req}/Ni_{eq}$  的增加,熔覆层硬度有上升的趋势。

### 2.3 $C_{req}/Ni_{eq}$ 对熔覆层开裂敏感性的影响

由于熔覆合金中  $C_{req}/Ni_{eq}$  及熔覆层组织的变化,熔覆层抗开裂的能力也发生了变化,结果如图4所示。从图可知,随熔覆合金中  $C_{req}/Ni_{eq}$  的增加,熔覆层的开裂敏感性出现先降后升的现象。当  $C_{req}/Ni_{eq}$  为 1.5,  $\delta$ -Fe 约为 5%~8% 左右时,出现一熔覆层开裂敏感性低谷,熔覆层抗裂能力最强。

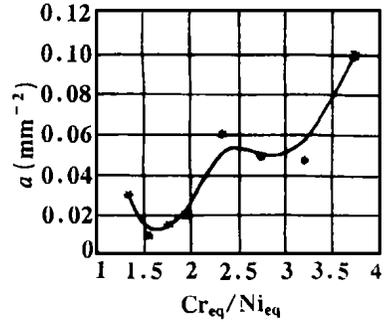


Fig. 4 Effect of  $C_{req}/Ni_{eq}$  on susceptibility

## 3 结果分析

随熔覆合金中  $C_{req}/Ni_{eq}$  的增加,熔覆层中  $\delta$ -Fe 相将从无到有并逐渐增加,当  $\delta$ -Fe 约为 5%~8% 左右时,熔覆层抗裂能力最强。即说明以  $\gamma$ -Fe 为主要相结构的 Fe-Cr-Ni 合金激光熔覆层中含有适量的  $\delta$ -Fe 时,可以使其开裂敏感性得到明显降低。这为解决激光熔覆层的开裂问题提供了一种有效的方法。产生这种现象的原因可以从冶金因素和力学因素两个方面加以分析。

(1) 冶金因素的影响 从金属学理论可知,  $\delta$ -Fe 的晶体结构为体心立方,其中的间隙要高于面心立方结构的  $\gamma$ -Fe。因而,以间隙固溶形式固溶其中的元素在  $\delta$ -Fe 中的溶解度将明显高于在  $\gamma$ -Fe 中的溶解度。如 P, S 两种元素在  $\delta$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe 两相中者是以间隙固溶形式存在,并且它们在  $\delta$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe 两相中溶解能力明显不同,特别是 P 在  $\delta$ -Fe 中的溶解度是在  $\gamma$ -Fe 相中的 10 倍左右,如表 1 所示。而 P, S 在激光熔覆层凝固时易在晶界偏析,是造成熔覆层开裂的主要原因之一。但适量  $\delta$ -Fe 相的引入将有效地减少这种偏析,从而达到降低激光开裂敏感性的目的。同时,适量  $\delta$ -Fe 相的存在将使随后结晶的  $\gamma$ -Fe 相枝晶的生长受到限制,从而起到一定细化组织和打乱枝晶方向性的作用,造成晶界面积增加,晶界处夹杂物的分布更加均匀,这些也无疑对减少激光熔覆层的开裂敏感性起到好的作用。

Table 1 Solubility of P and S<sup>[6]</sup>

element	solubility	
	$\delta$ phase	$\gamma$ phase
P	2.8	0.25
S	0.18	0.05

(2) 力学因素的影响 据文献[7]报道,  $\delta$ -Fe 相的高温塑性比  $\gamma$ -Fe 相的好。因此, Fe-Cr-Ni 合金激光熔覆层冷却凝固过程中,由于  $\delta$ -Fe 的存在将会有效地松弛高温冷却过程中产生的热应力,减少熔覆层开裂的可能性。另外,  $\delta$ -Fe 相的热膨胀系数比  $\gamma$ -Fe 相小。那么,激光熔覆层冷却过程中,由于  $\delta$ -Fe 的存在,使得熔覆层的体积变化减小,这也会使由此在冷却过程中熔覆层内产生的应力得以降低,减小熔覆层的开裂敏感性。

但是,众所周知,  $\delta$ -Fe 相在较低温度下塑性、韧性较差。当熔覆层中存在较多的  $\delta$ -Fe 相时,  $\delta$ -Fe 相不仅不能发挥以上的有益作用,相反将会增加 Fe-Cr-Ni 合金激光熔覆层的开裂敏感性。

## 4 结 论

随合金中  $C_{req}/Ni_{eq}$  的增加,熔覆层组织将出现  $\delta$ -Fe,并逐渐增加。当  $C_{req}/Ni_{eq}$  为 1.5,  $\delta$ -Fe 约为 5%~8% 时,熔覆层开裂敏感性最低,熔覆层抗裂能力最强。

# 应用于磁约束放电的磁开关脉冲电路的实验研究\*

李 军

(武汉工业大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉, 430070)

陈清明 陈永洲 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 对于放电电压相对较低(低于 1kV)的磁约束脉冲放电, 为实现快脉冲放电而同时保证电路的稳定工作, 在脉冲放电电路中应用了磁开关(磁脉冲压缩器)技术。介绍了所采用的磁开关的设计及其实验研究。

**关键词:** 磁约束放电 磁脉冲压缩器 电路

## A magnetic pulse compressor for magnetically confined discharges

Li Jun

(State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,  
Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070)

Chen Qingming, Chen Yongzhou, Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** A magnetic pulse compressor (MPC) was used to improve performance of a circuit for magnetic confined discharges. Experiments with the MPC was presented.

**Key words:** magnetically confined discharge magnetic pulse compressor circuit

## 引 言

近年来, 我们提出了应用磁约束放电方式于金属蒸气激光器的思想<sup>[1]</sup>。根据这

\* 国家自然科学基金资助。

## 参 考 文 献

- 1 Dekumbis R. Controlling residual stresses in laser clad coatings. Proc of the 6th Int. Conf. on Laser in Manufacturing, Birmingham, U K. 1989
- 2 Song W L. Surface and Coatings Technology, 1996; 18(2)
- 3 Smith J J. International Materials Reviews, 1993; 38(1)
- 4 Brooks J A. International Materials Reviews, 1991; 36(1)
- 5 崔 昆主编. 钢铁材料及有色金属材料. 北京: 机械工业出版社, 1981: 223
- 6 陈伯鑫主编. 焊接冶金原理. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 7 张文钺主编. 金属熔焊原理及工艺. 北京: 机械工业出版社, 1981

作者简介: 宋武林, 男, 1963 年 9 月出生。副教授。现从事材料加工方面的研究工作。