

# 火焰喷焊对碳钢疲劳寿命的影响

于维成副研究员 袁金才工程师 刘明庆助理工程师

(沈阳 中国科学院金属研究所)

## 摘要

对三种不同基材状态的45#钢经表面火焰喷焊Ni60后的疲劳性能及腐蚀疲劳性能变化的研究,表明强度高的调质态基材喷焊后的疲劳极限下降7%,而正火态和轧态基材喷焊后疲劳极限提高14%。当有3.5%NaCl腐蚀介质存在时,不管基材强度高或低,表面喷焊都使材料的腐蚀疲劳强度( $10^7$ 寿命)提高30%以上。文中通过断口金相分析阐明喷焊后基材表面组织结构变化及其对疲劳裂纹形成及扩展的影响,讨论了Ni60喷焊层在腐蚀疲劳过程中的行为,为喷焊工艺在工业中的应用提供了依据。

主题词 喷焊 疲劳 碳素钢

## 0 序 言

工业生产中,许多结构件工作在复杂的环境下,除了承受动载外,还经受磨损或冲刷、腐蚀或高温等因素的作用,因此要求这些构件具备耐磨、耐蚀和抗疲劳等优良的综合性能。实际生产中已广泛采用热喷涂方法修复易损件,提高构件的耐磨、耐蚀、耐热等性能,但是一般所采用的火焰喷涂、等离子及电弧喷涂都明显地降低材料的疲劳性能<sup>[1~5]</sup>,本文试图在火焰喷涂后采用二次重熔的喷焊工艺改善热喷涂钢的疲劳性能,并进一步研究其腐蚀疲劳行为。探索恰当的喷焊工艺,以稳定地提高热喷涂钢的抗疲劳及抗腐蚀疲劳的能力。

## 1 实验过程

### 1.1 火焰喷焊工艺

用氧和乙炔做为热源,喷粉是Ni60自熔合金粉末,其成分物理性能及喷焊条件

列于表1。

表1 火焰喷焊条件

喷粉 牌号	化学成分 (%)						硬度 (HRC)	熔点 (℃)	粒度 (mesh/in)	氧气 压力 (10 <sup>5</sup> Pa)	乙炔 压力 (10 <sup>5</sup> Pa)	喷枪 型号	预热 温度 (℃)
	C	Cr	B	Si	Fe	Ni							
Ni60	0.6	14	2.5	3.0			55	1010	-280				
	~	~	~	~	<15	余		~	~	3.5	0.55	SPH-2	120
	1.0	17	4.5	4.5			62	1090	+400				

## 1.2 疲劳试验

试验用料为45#钢φ15mm轧制棒材，加工成旋转弯曲疲劳试样，试样为三组基材状态。

I组：轧制状态

II组：正火状态(870℃/30min, AC)

III组：调质状态(850℃/30min WC+550℃/1h, AC)

喷焊试样制备过程如右方框图。

在旋转弯曲疲劳机上室温条件下进行试验，试验频率5000次/min，腐蚀介质为3.5% NaCl水溶液PH=7，腐蚀疲劳试验时，试样装在有机玻璃箱内，通过泵使溶液循环，并使溶液以滴淋方式浇到试样中间圆弧工作部分。

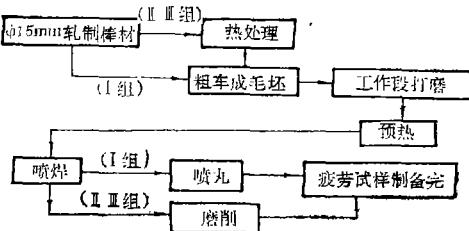
## 1.3 金相检查

试样断裂后，垂直于断口纵向剖开，将剖面制备成金相试样。为腐蚀出焊层、基材及过渡层组织，分三次蚀刻，首先用高氯酸甘油酒精电解蚀刻焊层，再在苦味酸钠溶液中热煮染色，最后用硝酸酒精腐蚀基材组织，并用金相显微镜观察组织，SEM观察断口。

## 2 实验结果

### 2.1 疲劳试验结果

图1示出三种状态45#钢基材及经喷焊处理后的疲劳实验结果。1~6曲线为空气中的试验结果，从曲线1可以看到，调质基材的疲劳极限最高为410MPa。正火状态与轧态基材的结果落在同一曲线2、3上，疲劳极限为280MPa，位于这两条曲线间的曲线4和曲线5、6，为喷焊处理后在空气中的实验结果。可以看到，调质基材经喷焊处理后疲劳极限降低7%：喷焊后的疲劳数据极为分散。这是由于这两组试样在喷焊后经磨削加工时磨削不均匀（试样喷焊变形）所致，另外磨削后往往使内部缺陷暴露于表面，因而对轧制态试样喷焊后取消磨削加工改用玻璃喷丸去除表面氧化层，它不仅提高表面光洁度



且产生表面残余压应力，该组疲劳极限稳定地增加14%，但仍低于调质基材的性能。

当介质环境为3.5%NaCl溶液时，与空气介质相比调质态基材的疲劳强度大幅度下降（曲线7），并且疲劳极限消失；但经喷焊处理后，不管基材是调质还是轧制态，其腐蚀疲劳强度都比未处理试样增高，在 $10^7$ 寿命时的腐蚀疲劳强度约增加30%。从图1的曲线8、9可以看到，两种基材喷焊后在长寿命范围的腐蚀疲劳性能趋于一致。

## 2.2 喷焊表面层的金相组织

图2示出三种状态基材经喷焊处理后表面层的组织结构形貌。最外面的喷焊层厚约0.5~1.0mm，该层白色基体为Ni-Cr固溶体，基体上析出有白块状NiB<sub>2</sub>，黑块状CrB以及二次碳化物，喷焊层还有气孔、疏松及夹渣等缺陷，个别焊层有裂纹。这些缺陷若暴露在表面对疲劳寿命的危害极大。在喷焊层与基体之间有一过渡带状区。它是在重熔时，自熔合金与基材相互扩散，在交界面形成一层熔点低于基材的表面合金，在冷凝时以不同于喷焊合金的成分和组织重新结晶，实现冶金结合，牢固地使焊层与基材连结，该过渡层厚度约为10μm，一般它的厚度与喷熔时加热温度及持续时间有关。

三种基材经喷焊后的表层组织结构发生改变，由于受喷熔时的热影响，邻近扩散层界面的基材组织晶粒粗大，由原来的6~7级长到3~4级。为较细的珠光体组织并伴有少量铁素体。

## 2.3 断口观察结果

图3示出45#钢经喷焊后的典型宏观疲劳断口，它们都显示了平齐的涂层轮廓，无论在空气介质或腐蚀介质下，裂纹源从四周焊层开始，向中心扩展，

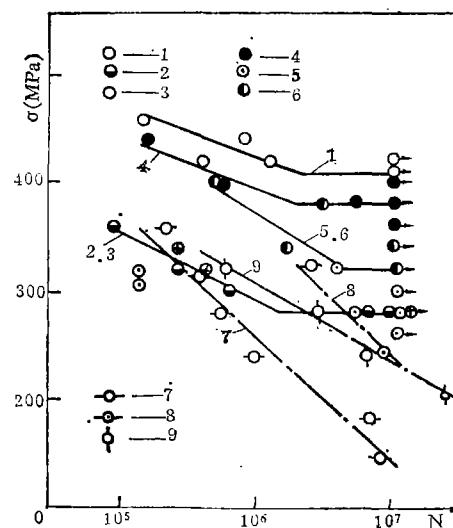


图1 表面喷焊对45#钢疲劳性能的影响

IN AIR

1. Qw + Tem.	4. Qw + Tem + SW* + Gr
2. Norm	5. NORM + SW + Gr
3. ROLLED	6. ROLLING + SW + PEENING
IN 3.5%NaCl	
7. Qw + Tem	
8. Qw + Tem + SW	
9. ROLLING + SW + PEENING	

\* SPRAY WELDING WITH Ni60



图2 45#钢经表面喷焊后基材表层组织结构 × 400

呈线疲劳源。有腐蚀介质时, 临近界面的基体有严重腐蚀坑, 有时还有沿晶裂纹(图4a、b), 但焊层保持原有光泽。图5a、b、c示出喷焊试样的局部断口形貌, 无论有无腐蚀介质, 疲劳裂纹都从焊层表面开始连续向内部扩展。特别在带状扩散区, 断口显示出界面的牢固结合(图5 b), 并在焊层看到类似疲劳裂纹的形貌(图5 c), 基体的表层由于受重熔加热的影响晶粒粗大, 可看到典型的第一阶段小平面断口(图5d)。

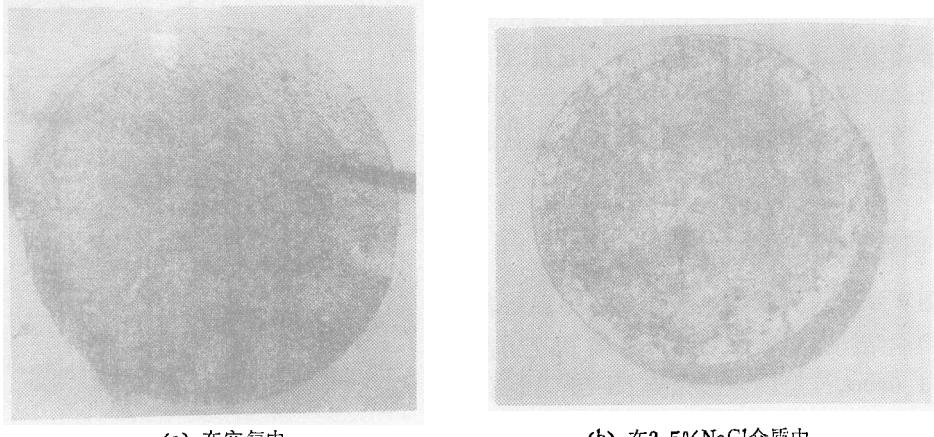


图3 喷焊试样宏观断口

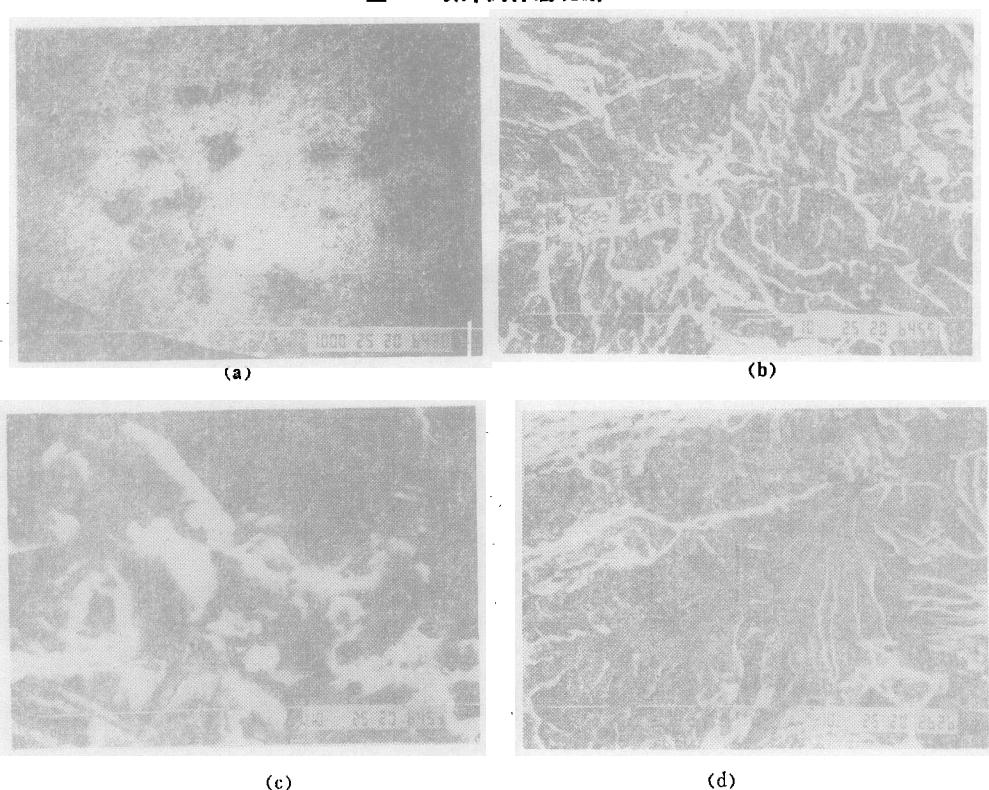


图5 喷焊层与基体界面区的断口形貌

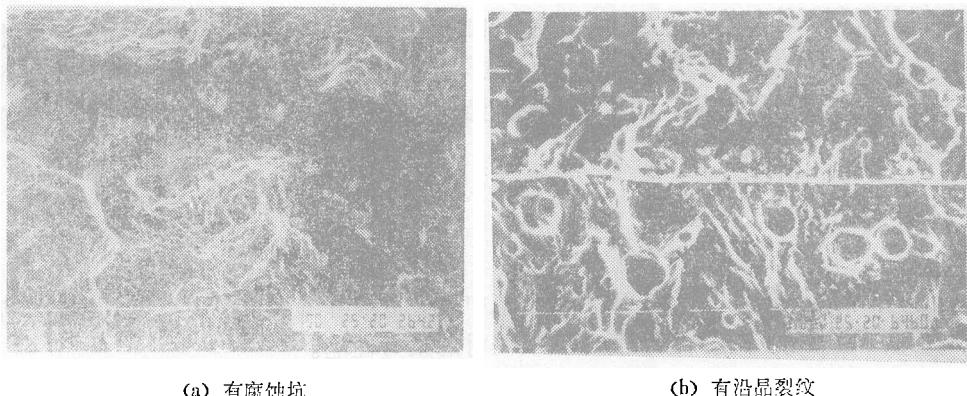


图4 喷焊热影响区腐蚀疲劳断口

### 3 讨 论

疲劳试验结果表明, 喷焊对改善空气中的疲劳性能并没有价值, 调质处理的未喷焊试样在空气中的疲劳强度比任何经喷焊试样都高。但在 $3.5\% \text{NaCl}$ 介质中的腐蚀疲劳结果突出地显示了喷焊处理的优越性。在高应力水平调质基材喷焊后的疲劳寿命提高近10倍。低应力水平, 轧态基材喷焊后也提高寿命10倍。这一结果对含盐的油井有重要意义。

表面喷焊后钢的耐腐蚀疲劳寿命明显增高的原因分析如下:

1. 喷焊层由镍铬固溶体及各种硼碳化物等硬质相组成, 与碳钢中的铁素体珠光体等相比, 有良好的抗蚀性, 例如在 $\sigma = 200 \text{ MPa}$ 应力下进行腐蚀疲劳试验, 当 $N = 3 \times 10^7$ 发生断裂时(总时间为90h)试样焊层表面仍光亮; 而未喷焊试样, 仅试验6h( $10^6$ )已产生严重腐蚀并发生断裂。

2. 喷焊层比一般涂层结构致密, 与基材的结合为冶金结合, 界面上扩散层的存在使焊层与基材的弹性模量及热物理性能差别缓和, 减少了界面上有害内应力。

3. 喷焊处理后表面存在残余应力, 最大达 $-493 \text{ MPa}$ , 喷焊后再喷丸表层残余压应力达 $-704 \text{ MPa}$ , 残余压应力对提高疲劳强度有重要作用。

未经喷焊的碳钢在 $\text{NaCl}$ 溶液下处于化学不稳定态, 表面很快变粗糙出现蚀坑, 在疲劳载荷作用下, 蚀坑底部发生滑移变形, 然后进一步活化溶解形成裂纹并扩展; 而经喷焊后, 镍基合金的表面层在 $\text{NaCl}$ 溶液中呈钝化态, 仅在暴露于表面的相界和孔隙缺陷等不均匀的部位构成微区域的电化学反应, 但其腐蚀速率缓慢得多, 因此在同样疲劳应力条件下, 喷焊试样的腐蚀疲劳裂纹延迟萌生, 有效地提高腐蚀疲劳寿命。

喷焊层的性能、质量及厚度直接影响腐蚀疲劳性能的改善, 根据上述疲劳裂纹的形成机理, 应尽量减少焊层的孔隙缺陷及内应力, 使焊层的热膨胀系数与基材接近, 增加焊层自身的强度及延性, 控制喷焊厚度(在本文所实验的范围, 偏于厚些好), 以便进一步发挥喷焊处理的效益。另外, 在喷焊后进行磨削, 优点是保证表面光洁度及尺寸的

精度，但是磨削不均匀将使焊层厚度不均，内部缺陷露出，对疲劳性能不利。为此本文根据对Ⅰ、Ⅲ组试验结果的分散性的分析，对第Ⅰ组试样喷焊后采取表面喷丸，细小的( $\phi 0.25\text{mm}$ )玻璃丸喷射后，表面不仅被抛光，而且产生很高的压缩残余应力，使腐蚀疲劳性能及空气中的疲劳强度都提高。

#### 4 结 论

1. 45#钢调质基材喷焊Ni60后，空气中疲劳极限降低7%，而正火或轧制态基材喷焊后疲劳极限增加14%，但仍低于调质基材的疲劳性能。

2. 无论基材是调质还是轧制态，喷焊Ni60后的腐蚀疲劳性能（在3.5%盐水中）都有明显提高。

3. 三种基材状态的45#钢喷焊后表层组织由三部分组成：Ni-Cr固溶体涂层、界面扩散层（约 $10\mu\text{m}$ ）和基体热影响区（约0.3mm深的晶粒粗化区）。

4. 喷焊层优良的抗蚀性及高的结合强度以及喷焊表面压缩残余应力是改善碳钢腐蚀疲劳性能的主要原因。

5. 减少焊层孔隙缺陷，提高焊层自身强度及延性，控制喷焊厚度，并在喷焊后进行表面机械喷丸强化是进一步提高喷焊效果的有效措施。

（1988年6月14日收到修改稿）

#### 参 考 文 献

- 1 Horger O J and Buckwalter T V, Proc ASTM, 1940, 40: 733
- 2 Krasnichenko L V, Metal Industry, 1959, 94 (6) : 461
- 3 Birchon D, Metallurgia, 1958, 58 (12) : 273
- 4 Meringolo V, et al, 6th Int Met Spraying Conf. (Paris) September 1972.
- 5 Viglione J V, Jankowsky J E and Ketcham S J, Materials Protection and Performance, 1972, 11: 31~36

## EFFECT OF FLAME SPRAYING WELDING ON FATIGUE LIFE OF CARBON STEEL

*Associate Researcher Yu Weicheng,*

*Engineer Yuan Jincai,*

*Assistant Engineer Liu Mingqing*

*(Institute of Metal Research,*

*Academia Sinica, Shenyang)*

### **Abstract**

The effects of coating Ni60 on the surface of fatigue specimens of tempered, normalized or rolled C45 steel by flame spraying and remelting on the fatigue life in air and on the corrosion fatigue life in 3.5% NaCl solution have been studied. The results show that: Ni60 coating will reduce the fatigue limit in air about 7% for tempered matrix and increase about 14% for normalized and rolled matrixes, but increase the corrosion fatigue strength of  $10^7$  lifetimes over 30% for all matrixes. By fractographic analysis the process of fatigue fracture of thermally coated specimens and the corrosion fatigue behaviour of surface coating were studied. It is indicated that the microstructure and strength of the coating and bonding have their direct effects on the fatigue crack initiation and propagation.

**Key words** Spraying welding Fatigue Carbon steel