

新型Fe-Mn堆焊合金的抗接触疲劳性能的研究

张 平博士生 徐滨士教授 韩文政副教授

(北京 装甲兵工程学院)

蔡其巩高级工程师

(北京 冶金部钢铁研究总院)

摘要

通过滚-滑式接触疲劳试验，对若干种堆焊合金的抗接触疲劳性能进行了对比，筛选出了一种新型的堆焊合金。该合金具有较为理想的接触疲劳抗力。当赫兹接触应力 $\sigma_c = 1560 \text{ MPa}$ 时，寿命可达 10^7 以上。同时，对该合金优良的接触疲劳抗力的来源进行了探讨。认为在变形过程中发生的 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 应变诱发马氏体相变和 M_3C 颗粒的析出有效地提高了材料的强度，阻止了持续的塑性变形。而应变诱发马氏体周围的奥氏体则具有很大的韧性储备，可以降低裂纹的扩展速率，从而提高了使用寿命。这一合金的特点在于，材料的强度来自使用初期的跑合过程，省去了堆焊后对表面的热处理工艺。

主题词 堆焊合金 接触疲劳 研究

0 序 言

在机械的使用过程中，磨损造成的浪费十分严重。接触疲劳磨损，是磨损中的一种很重要的形式，它使大量零件由于仅仅是局部的接触疲劳失效而整体报废。对这些零件进行修复，是人们早已思考的问题，但至今并没有取得突破性的进展。其原因是，在这类零件中有许多零件的工作条件比较苛刻，修复层往往没有足够的接触疲劳抗力，难以满足实际工作的使用要求。

在堆焊修理后，为了使堆焊层具有好的机械性能，目前一般都采取化学热处理及热

处理的工艺（渗碳、碳氮共渗、淬火加低温回火等），这造成了两方面的不利：①热处理所需的高温易使工件变形；②热处理需要较大型的设备，耗费较多的能源。如果能找到一种材料，具有易于加工硬化的特性，在堆焊后无需热处理，而所需的强度来自零件正式使用初期的跑合过程的预变形，就能避开热处理的弊端。这是许多材料工作者的愿望。

本文对四种堆焊合金的接触疲劳抗力进行了对比、筛选，并对Fe-Mn合金堆焊层的抗接触疲劳性能及其循环应变强化机制进行了探索。

1 试验设备、方法及结果

接触疲劳试验在滚-滑式接触疲劳试验机上进行，该机工作原理如图1所示。上试件D₁为标准试件，经渗碳-正火-淬火-低温回火处理，表面硬度HRC57；下试件是待测试件，制作方法是：在φ57mm的18Cr2Ni4WA钢棒柱面上，堆焊不同合金系的熔敷层，厚度大于2mm。然后加工成外径为φ60mm，台阶宽度5mm的圆盘。上下试件之间的载荷用弹簧L调节；轴S₁、S₂可以有不同的转速；润滑状态：20#机油，飞溅润滑。

试验中，上试件周向速度V₁=4.71m/s，下试件周向速度V₂=6.28m/s，相对滑动速度V₂-V₁=1.57m/s。先用赫兹接触应力σ₀=1560MPa对各种堆焊层进行筛选，然后加大载荷，对第一轮试验中性能较好的合金再进一步的研究。

试验包括4种堆焊层：Co50堆焊层、Fe-Mn合金堆焊层、Ni68堆焊层和Ni72堆焊层，结果列于下表。

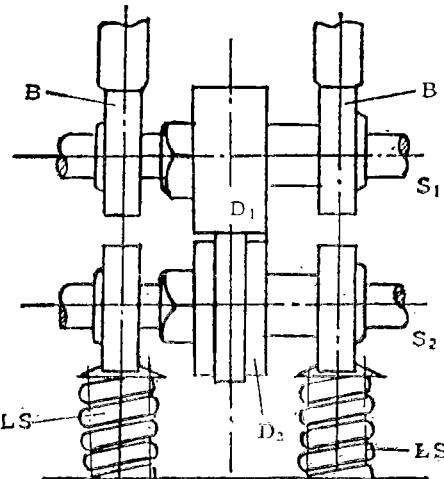


图1 滚-滑式接触疲劳试验机工作原理

D₁、D₂—试件 S₁、S₂—轴
L—加载弹簧 B—轴承

接触疲劳试验结果

编 号	堆焊层合金类型	σ ₀ (MPa)	滑差 (%)	循 环 周 次
7	Fe-Mn	1560	25	2.03×10^6
8	Fe-Mn	1560	25	1.0×10^7
40	Fe-Mn	1560	25	1.08×10^7
41	Fe-Mn	1890	25	1.46×10^6
50	Fe-Mn	1890	25	8.2×10^6
51	Fe-Mn	1890	25	2.3×10^6
4	Co50	1560	25	6.0×10^5
11	Co50	1560	25	1.0×10^6
46	Co50	1560	25	3.12×10^6
47	Co50	1560	25	7.28×10^6
60	Ni68	1560	25	1.0×10^4
61	Ni72	1560	25	1.0×10^5

2 讨 论

2.1 硬度与接触疲劳抗力

在试验的4种合金中，Ni68堆焊层的初始硬度最高，达HRC62，但抗接触疲劳的能力却很弱。在 $\sigma_s = 1560 \text{ MPa}$ 的条件下，只经过 10^4 就因表面剥落而失效。究其原因，关键在于该材料的塑性变形能力差，硬而脆。该材料是Ni基合金，在基体中分布着大量的大颗粒碳化物。在周期性应力应变场的作用下，裂纹首先在最薄弱处——基体与碳化物的结合面上形核，然后迅速扩展，形成剥落。这种硬度很高但接触疲劳寿命反而低的情况，以前的文献[1]也曾有过报道。尽管提高硬度可以增强材料抵抗塑性变形的能力，进而抑制裂纹的形核速率，但如果在获得硬度的同时，韧性下降的幅度过大，一旦裂纹形核，就会迅速扩展，造成失效。根据裂纹形核理论^[2~7]，象Ni68这类含有大量的大颗粒碳化物的合金，形成裂纹比较容易。从加载到裂纹形核，有时甚至在几个循环内便可完成这一过程。因此使材料具有富裕的韧性储备以阻止裂纹的扩展，往往比片面追求高硬度具有更大的重要性。

2.2 Co50 堆焊层

与Ni68、Ni72相比，Co50和Fe-Mn合金堆焊层具有较高的抗接触疲劳寿命。它们在堆焊后的初始硬度并不高，前者约HRC40，后者约HV300左右。经过滚-滑试验之后，亚表面的硬度最大值均上升到HV600以上。两者共同的特点是具有迅速加工硬化的能力。

Co基合金的层错能较低，具有多种形变强化机制^[8~10]。如：位错扩展宽度大，不利于交滑移；间隙原子排或空位排的“钉扎”作用；一次或高次的形变孪晶；扩展位错作为六方晶坏，促成了 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变等等。因此，Co基合金的形变强化效果非常明显。但是，Co基合金价格太贵，难以用于较大规模的修复性生产，经济性差，不易推广。

2.3 Fe-Mn 合金堆焊层的形变强化机制

与Co基合金相比，Fe-Mn合金同样具有出色的加工硬化性能，而且价格低廉。以Mn13钢为代表的Fe-Mn合金广泛应用于挖掘机铲斗、拖拉机履带等耐磨零件。就本文考虑的主要性能指标——接触疲劳循环周次来说，Fe-Mn合金堆焊层的寿命亦比Co50堆焊层的长。为了探索Fe-Mn合金堆焊层的循环应变强化机制，对疲劳试验前后的堆焊层进行了解剖和分析。

Fe-Mn堆焊层在滚-滑疲劳试验前的X射线衍射结果，为单一的奥氏体组织，在奥氏体基体上分布着密度不大的位错。在滚-滑试验之后，发生了 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 应变诱发马氏体相变(图2)，并伴有大量的形变孪晶(图3)、 M_7C 的析出(图4)及位错亚结构(图5)。

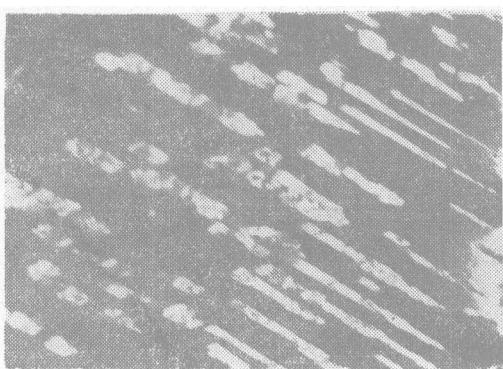


图2 试验后Fe-Mn合金堆焊层中的应变诱发马氏体 $\times 50k$

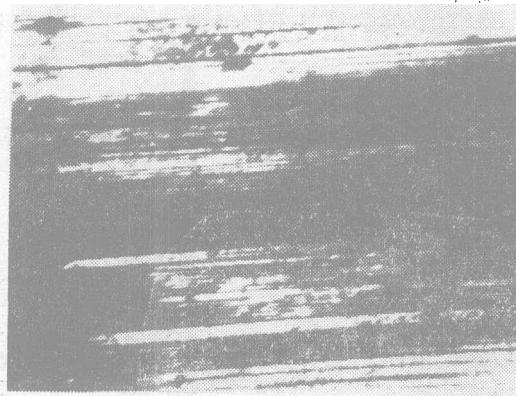


图3 试验后Fe-Mn合金堆焊层中的形变孪晶 $\times 30k$



图4 试验后Fe-Mn合金堆焊层中的碳化物析出 $\times 40k$



图5 试验后Fe-Mn合金堆焊层中的位错亚结构 $\times 80k$

$\gamma \rightarrow \alpha'$ 应变诱发马氏体相变，是高锰钢的最典型的形变强化机制^[11-12]。随着研究工作的深入，现已证明，高锰钢（Mn13钢）的奥氏体极其稳定，即使在-196℃下严重变形也不会发生这种转变^[13]。在本试验中，发现了较多的马氏体转变产物，是由于本试验所用堆焊层为介稳奥氏体。Mn13钢含10%~14% Mn, 1.0%~1.4% C，而所用堆焊层的Mn、C含量都大大低于Mn13钢。考虑到C、Mn都是强烈扩大奥氏体区、提高奥氏体稳定性的元素，C、Mn含量的降低使堆焊层的奥氏体呈介稳状态。在应力应变的作用下，发生了马氏体转变，使强度大大提高。

碳化物析出对强度也有很大影响。从图4看出，碳化物颗粒的排列具有明显的方向性，显然与形变过程中滑移带的运动有关。如果用奥罗万机制来估计碳化物析出的作用，取质点平均间距为 $0.1\mu\text{m}$ ，则析出区域的屈服应力 σ_s 将提高200MPa左右。另外，位错网络和形变孪晶对加工硬化也有影响。

尽管Fe-Mn合金堆焊层在 α' 马氏体、碳化物硬质点、位错亚结构和孪晶的综合作用

下，材料的硬度有了很大提高，但如图2所示，在马氏体周围的广大区域里仍是奥氏体，其良好的韧性具有降低疲劳裂纹扩展速率的能力，构成了出色的抗接触疲劳性能。

2.4 采用易于加工硬化材料作为抗接触疲劳材料的优点

图6是Fe-Mn合金堆焊层在滚-滑试验前后表面下硬度的分布与接触应力场中正交切应力的对比。从图中可以看出，正交切应力 τ 的变化趋势与滚后硬度分布相同，且两者最大的位置十分接近。这说明，在加载之后，亚表面的某些区域屈服，在多种形变强化机制的作用下，材料迅速硬化，达到一定的强度，形变强化后，表面以下的强度（硬度）分布比较合理，因为在应力最大处，试件工作初期的塑性变形量最大，硬化程度最高，强度提高幅度最大，在以后的工作循环中抵抗塑性变形的能力最强。因此，选择具有迅速加工硬化性能的合金作为修复接触疲劳磨损零件的堆焊材料，具有独特的优越性（可以省去修复后强化表面的热处理），有广阔的发展前途。

3 结 论

- 通过对若干种堆焊合金抗接触疲劳性能的对比，选出了一种新型的抗接触疲劳合金（Fe-Mn合金），该合金在 $\sigma_0 = 1560 \text{ MPa}$ 的条件下，寿命可达 10^7 以上。
- Fe-Mn合金的优异的抗接触疲劳性能，来自形变后的多种机制的强化和奥氏体基体的韧性。这些形变强化机制包括：应变诱发 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 马氏体相变、M,C硬质点的析出、位错网络及形变孪晶的形成等。
- 选择具有迅速加工硬化性能的合金作为修复乃至制造接触疲劳耐磨零件的材料，具有独特的优越性，可以省去强化表面的热处理工艺。新型的Fe-Mn堆焊合金为强化抗接触疲劳的工作表面开辟了新的途径。

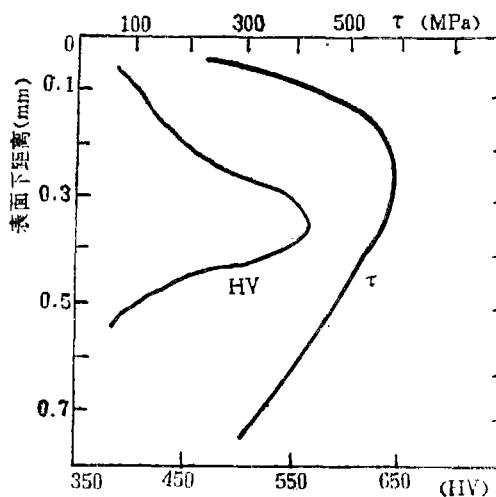


图6 Fe-Mn合金堆焊层在滚-滑试验后表面下硬度的分布与接触应力场中正交应力的对比

(1988年6月18日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 Suh N P. Wear. 1977, 44 : 1~16
- 2 Mogford I L. Metal Rev. 1967, 12 : 49
- 3 Argon A S, et al. Metal Trans. 1975, 6A : 825
- 4 Rosenfield A R. Metal Rev. 1968, 13 : 29
- 5 Gurland J, et al. Trans Am Soc Met. 1963, 56 : 442
- 6 Tanaka K, et al. Pnilos Mag. 1970, 21 : 267
- 7 Suh N P, et al. Wear. 1977, 44 : 17~38
- 8 Sarin V K, et al. Metal Science. 1975, 9: 472
- 9 Vaidya S, et al. Metal Trans. 1980, 11A: 1139
- 10 Krishna R, et al. J Mater Science. 1982, 17: 769
- 11 Rahn R W. The Encyllopedia of Ignorance. Pergaman Press. New York. 1977.
- 12 Collette G, et al. Rev Met. 1975, 54: 433
- 13 Raghauan K S, et al. Trans Met Soc AIME. 1969, 245: 1596

ON THE CONTACT FATIGUE RESISTANCE OF A NEW Fe-Mn OVERLAYING ALLOY

Postgraduate for Ph. D. Zhang Ping,

*Professor Xu Binshi, Associate Professor Han Wenzheng
(The Institute of Armoured Troops Technology, Beijing)*

Senior Engineer Cai Qigong

(Central Iron & Steel Research Institute, Beijing)

Abstract

The contact fatigue resistance of several overlaying alloys had been compared by rolling-sliding tests, and a new Fe-Mn alloy showed the best resistance among the different alloys. The service life of this alloy was found to be longer than 1×10^7 under the condition of $\sigma_s = 1560$ MPa. The mechanism of the good contact fatigue resistance of the alloy was investigated. It is considered that the strain-induced martensitic transformation from γ to α' and the precipitation of M_3C carbide particles increase the strength of the material effectively, and impede the continuous plastic deformation. As the huge reserve of toughness in the austenite surrounding the martensite can decrease the propagation rate of cracks, so the service life is increased. One of the advantages of this overlaying alloy is that the heat treatment for the overlaid surface can be saved because the strength needed can be obtained in the running-in process through effective work-hardening.

Key words Overlaying alloy Contact fatigue Study