

# 轧辊堆焊金属的耐热疲劳性能\*

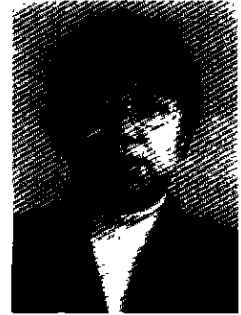
冯灵芝<sup>1</sup>, 李午申<sup>1</sup>, 宋炳章<sup>2</sup>, 宋庆义<sup>2</sup>

(1. 天津大学 材料学院, 天津 300072; 2. 邢台特种轧辊厂, 邢台 054000)

**摘 要:** 通过设计的热疲劳试验方法,对三种自制药芯焊丝和一种国产堆焊轧辊用实心焊丝的耐热疲劳性能及其影响因素进行了深入研究,同时对堆焊金属中热疲劳裂纹形成以及扩展机理做了进一步探讨。研究表明,堆焊金属中热疲劳裂纹的形成以及扩展是循环应力和氧化气氛共同作用的结果,堆焊金属的抗氧化性越高,抗启裂能力越强,在此基础上,得出了热疲劳裂纹形成以及扩展的机理模型图。另外,研究结果还表明,堆焊金属的组织以及组织中存在的夹杂物对耐热疲劳性能也有很大影响,均一的组织有利于提高其耐热疲劳性能,而夹杂物则促使热疲劳裂纹形成、扩展、分叉。

**关键词:** 堆焊金属; 热疲劳性能; 抗氧化性

**中图分类号:** TG423 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2001)02-19-04



冯灵芝

## 0 序 言

热轧辊、连铸辊是轧钢生产的关键部件,工作时与温度超过900℃的轧制件接触,使轧辊的表面温度骤然升高到600~700℃,随后又被喷水冷却,这样轧辊每旋转一周就经受一次急冷急热的作用,由于温度的急剧变化会导致巨大的热应力,工作一段时间后,就会产生网状裂纹,即产生疲劳破坏。为了提高轧辊抗疲劳破坏的能力,或使已报废的轧辊获得新生,目前常用堆焊的方法,在轧辊表面堆敷一层特殊合金,以提高轧辊寿命。为此,应对堆焊金属的耐热疲劳性能进行深入研究,并开发出相应的堆焊材料。

## 1 试验设计及试件制备

### 1.1 堆焊金属试件制备

堆焊金属试件制备是采用自制的药芯焊丝1(1Cr13Ni2MoV)、2(0Cr14NiMoV)、3(20Cr5MoWV)和国产堆焊轧辊用实心焊丝4(H25Cr3Mo2MnVA),配合HJ107焊剂,按表1中工艺参数在180mm×90mm×50mm的低合金钢试板上堆焊10层,堆焊层宽约为60mm,高为30mm。堆焊时,层温控制在200~250℃,焊前不预热,焊后立即进行300℃×2h去氢处理,并进行回火处理,得出四种堆焊金属试

件,堆焊金属的硬度及耐磨性见表2<sup>[1]</sup>。

表1 堆焊工艺参数

Table 1 Hardfacing technological parameters

Current I/A	Voltage U/V	Polarity	Hardfacing speed v/(cm·min <sup>-1</sup> )	Wire extension l/mm
380~400	30~33	DCRP	32	30~32

表2 堆焊金属的硬度及耐磨性

Table 2 Hardness value and wearability of hardfacing metal

Wires	Hardness value of deposited metal /HRC	Hardness value of tempered metal /HRC	Wearing volume V/mm <sup>3</sup>
1	45	36	9.53
2	42	34	13.74
3	45	47	9.50
4	36	37	14.69

### 1.2 堆焊金属热疲劳试验方法设计

影响热疲劳性能的因素主要有:①峰值温度;②冷热循环频率及高温停留时间;③环境气氛;④工件尺寸;⑤堆焊金属成分、组织及其性能。对轧辊来说,承受前四种因素的条件是一定的,提高堆焊金属耐热疲劳性能的能力仅在于获得合适的成分、组织与性能。虽然国内外对热疲劳试验方法做了大量研究,但到目前为止,还没有一个公认的标准方法。本文自行设计了一种自约束热疲劳试验方法。该方法是利用高频感应线圈加热制备好的试样,由于加热速度快,再加上高频感应加热的集肤效应,可在试件表层和内部之间迅速产生较大的温度梯度。然后向

收稿日期:2000-09-25

\*河北省重大科技攻关项目资助(95-98-10)

试件均匀喷水冷却,完成一个温度循环和热应力循环,较好地模拟了热轧辊的工作条件,可用于研究材料的成分、组织及其性能对热疲劳性能的影响。以启裂的循环次数和在相同冷热循环次数下,试件表面和横截面上的裂纹情况作为评定耐热疲劳性能的指标。此外这种方法消耗材料少,试验费用低。

对四种焊丝所得的堆焊金属试件采用 GP100 - C3 型高频感应加热设备加热,其振荡功率为 100 kW,振荡频率为 200 ~ 250 kHz,输出加热功率 > 85 kW。采用单匝高频感应线圈上下快速移动,试件快速转动的方法,使试件表面均匀加热。试件为直径  $\phi 44$  mm,长 50 mm 的棒状试样。加热最高温度 700  $^{\circ}$ C,最低温度 80  $^{\circ}$ C,加热时间 14 s,喷水冷却时间 16 s。试验过程中,每循环 50 次,用着色探伤检查一次试样表面,观察是否有裂纹产生,记录刚刚出现裂纹的循环次数(即无裂纹循环次数),启裂后,继续试验直到循环 1 120 次。然后在 10 倍放大镜下,观察试件表面,记录裂纹数,测量每条裂纹长度。然后用线切割机在试件的堆焊金属上截取三个横断面,用工具显微镜放大 100 倍,测量记录裂纹数、每条裂纹的长度,并计算出横截面上的平均裂纹数及平均裂纹深度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果

采用本文设计的堆焊金属热疲劳试验方法,得出四种焊丝堆焊金属热疲劳性能试验结果见表 3。从表 3 中的数据可以看出,1 号焊丝堆焊金属的耐

热疲劳性最好,具有很好的抗启裂性和较高抗裂纹扩展能力;3 号焊丝堆焊金属的耐热疲劳性也较好,具有较高的抗启裂性和较高的抗裂纹扩展能力;2 号焊丝堆焊金属的耐热疲劳性较差,虽然具有较高的抗启裂性,但一旦裂纹产生,便在深度、长度方向扩展速度很快;4 号焊丝堆焊金属的耐热疲劳性最差,不仅裂纹容易产生,而且裂纹沿长度、深度方向扩展速度很快。

另外观察 1、2、3、4 号试件热疲劳过程发现,1 号试件,试验循环 600 次,试样表面仍光亮无明显氧化,以后逐渐出现柱状晶纹络,循环到 950 次出现裂纹;2 号试件,试验循环到 400 次,已明显出现柱状晶纹络,循环到 750 次出现裂纹;3 号试件,随着试验进行,表面不断被氧化,氧化层逐渐变厚,但无氧化皮脱落现象,循环到 750 次时出现裂纹;4 号试件,则氧化严重,局部氧化皮脱落,循环到 500 次时就出现裂纹。

表 3 热疲劳试验结果

Table 3 Results of thermal - fatigue test

Wires	1	2	3	4
Cycle index of crack initiation (index)	950	750	750	500
Number of surface crack	5	26	9	15
Average length of surface crack/mm	8.0	8.5	5.1	11.2
Maximum length of surface crack/mm	12	17	7	17
Average crack number in cross section	7	28.7	74.3	46.3
Average crack depth in cross section/mm	0.53	0.93	0.68	0.96
Maximum crack depth in cross section/mm	1.38	2.6	1.23	4.06

### 2.2 试验结果分析

#### 2.2.1 热疲劳裂纹萌生与扩展机理

根据本文的热疲劳试验,将轧辊热疲劳裂纹的形成及扩展机理概括为图 1。

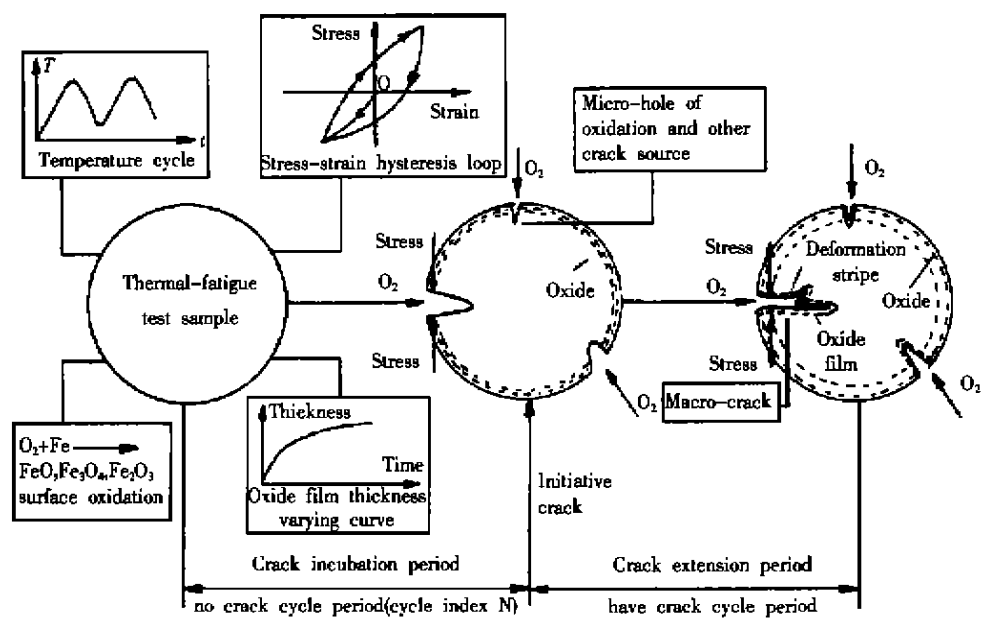


图 1 热疲劳机理图

Fig. 1 Thermal - fatigue mechanism model

在热疲劳试验过程中,试样的加热集中在表层 3 mm 之内。加热过程中因表层升温速度快,内部升温速度慢,所以试样表层膨胀受到内部的约束而产生压应力,当其值超过屈服强度时,表层金属产生塑性变形,之后,试样被喷水冷却,表层冷却快,内部冷却慢,表层受到拉伸应力,产生拉伸应变,在反复的加热、冷却过程中,表层金属受到反复的压应力、拉应力,产生压缩应变、拉伸应变。如图 1 中的应力-应变滞后回线图。

随着温度循环,试样的氧化越来越重,表面层的氧化膜越来越厚。由于试样表面的微观不均匀,如机械加工造成的表面微细凹凸不平、堆焊成分局部不均匀、组织的不均匀以及存在着夹杂物等,当温度循环到一定次数时,在试样表面出现一些微细的凹坑和一些其它的裂纹源。图 2 中最浅的裂纹是热疲劳裂纹的初生形态,此后,温度循环继续,循环应力一方面加速氧在基体中的扩散<sup>[2]</sup>,另一方面又不断造成新的氧化通道和扩散表面,从而加速了热疲劳裂纹的生成和扩展。因此,热疲劳裂纹的扩展是循环应力和高温氧化共同作用的结果。

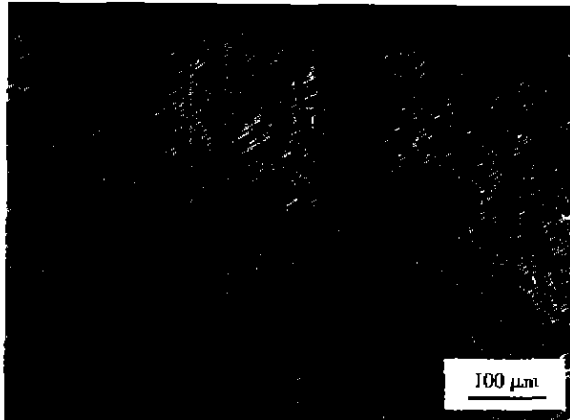
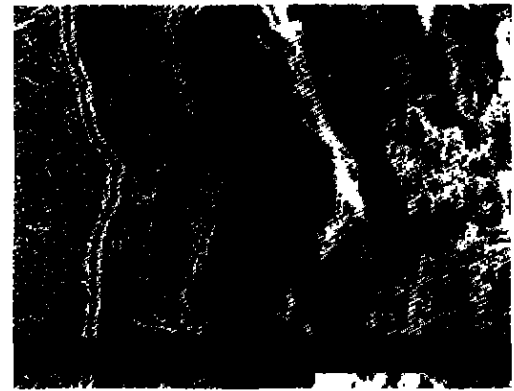


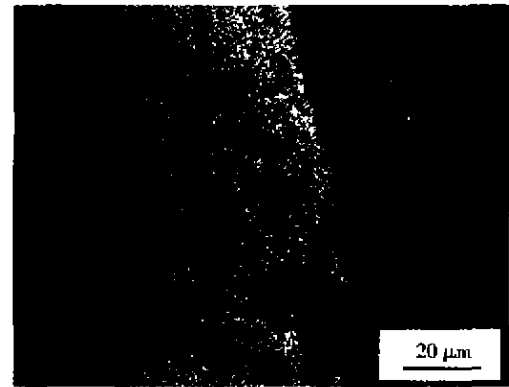
图 2 热疲劳裂纹形态

Fig. 2 Shape of thermal-fatigue crack

在裂纹的扩展过程中,裂纹两侧及尖端继续受到氧化侵蚀(图 3b),并且在反复的拉伸、压缩应力的作用下,产生塑性变形条纹(图 3a)。热疲劳裂纹长度与热循环次数之间开始时呈线性关系,待到裂纹扩展到某一尺寸后,扩展速度逐渐变慢,最后停止<sup>[3]</sup>。



(a) Oxide and deformation stripe in crack sides



(b) Face scanning of oxygen element distribution

图 3 裂纹两侧氧化物及其变形条纹和氧的面扫描分布图

Fig. 3 Oxide and deformation stripe in crack sides and face scanning of oxygen element distribution

### 2.2.2 影响耐热疲劳性能的因素

(1) 堆焊金属的抗氧化性对耐热疲劳性的影响

1、2、3、4 号焊丝堆焊金属的 650 °C 抗氧化性试验结果见表 4<sup>[1]</sup>。

对照表 3 中的热疲劳试验结果可发现:1 号试样抗氧化性最好,其抗启裂能力最强;2、3 号试样抗氧化性能相当,抗启裂能力也相当;4 号试样抗氧化性能最差,其抗启裂性能也最差。这是因为在温度的不断循环中,试样处于高温高湿环境下,抗氧化性强,则不易出现显微氧化坑,即裂纹源,所以抗启裂性好。一旦启裂,则会造成明显的局部应力集中,应力集中会诱使氧化快速深入,氧化加剧了裂纹的扩展,氧化与热裂纹形成了互为促进的恶性循环。

表 4 堆焊金属高温氧化试验结果

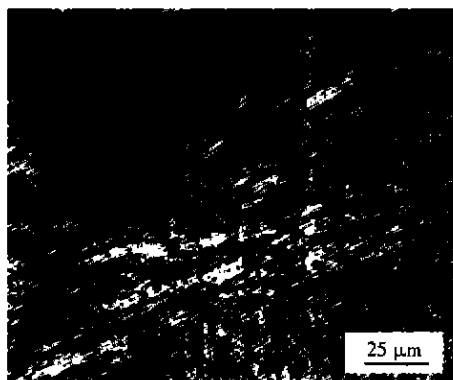
Table 4 Test results of high-temperature oxidation

Wires	Weight before oxidation /g	Weight after oxidation /g	Increasing weight for 24 h /g	Increasing weight for one year /g	Relative comparison of oxidation resistance
1(1Cr13Ni2MoV)	7.409 3	7.410 1	0.000 8	0.292	1*
2(0Cr14NiMoV)	7.406 9	7.410 0	0.003 1	1.131 5	0.26
3(20Cr5MoWV)	7.539 6	7.542 9	0.003 3	1.204 5	0.24
4(H25Cr3Mo2MnVA)	7.536 8	7.572 5	0.035 7	13.030 5	0.02

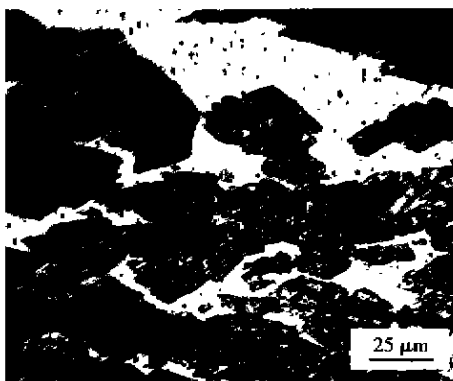
\* Providing oxidation resistance of hardfacing metal of wire No. 1 for one.

### (2) 组织的影响

1号试样的组织为回火马氏体+细小的碳化物+少量均匀细小的铁素体;2号试样为回火马氏体+细小的碳化物+大块的铁素体(图4),2号试样中大块状分布的铁素体比回火马氏体软得多,成为“薄弱地带”,特别是大块铁素体的棱角相当于尖锐的缺口,在循环热应力的作用下,极易成为裂纹源,并迅速扩展成疲劳裂纹。为了提高试件的耐热疲劳性,应尽量减少组织的不均匀性,尤其是大块尖角状的铁素体组织;3号、4号试样的低倍组织形态相差不大,均为回火马氏体+碳化物,但3号含有较多的Cr和一定量的W,可形成较多的碳化物,因此抗回火软化能力强,具有较高的屈服强度,抵抗塑性变形的能力强,而且较高的Cr含量使其抗氧化性大大提高,所以3号试样热疲劳强度提高。



(a) Microstructure of No.1 hardfacing metal



(b) Microstructure of No.2 hardfacing metal

图4 1号和2号试样的堆焊金属组织

Fig.4 Microstructure of No.1,2 hardfacing metal

### (3) 夹杂物的影响

夹杂物对热疲劳性能有很大的危害。一方面在夹杂物周围形成应力集中;另一方面试样表面的夹杂物周围极易被氧化,并且在循环应力的作用下,很容易与基体脱开,形成裂纹源。在裂纹扩展过程中,裂纹周围及其前端的夹杂物,很容易被氧化,夹杂物与氧化腐蚀互相促进导致形成裂纹或孔洞,它与主裂纹同时生长、连接,使主裂纹变宽、变长、分叉,图

5显示孔洞虽已形成,但尚未与主裂纹连接,并且夹杂物导致基体塑性、韧性下降,加快了裂纹扩展。此外,从表2中的数据看出,1号、3号焊丝磨损体积小,具有良好的耐磨性,2号、4号焊丝磨损体积大,耐磨性差,综合耐热疲劳性能、抗氧化性能以及硬度。可得出:1号焊丝适合堆焊连铸辊,3号焊丝适合堆焊热轧辊。



图5 夹杂物对热疲劳裂纹的影响

Fig.5 Effect of inclusion on thermal - fatigue crack

## 3 结 论

(1) 通过对四种焊丝堆焊金属中热疲劳裂纹的分析,得出了相应的热疲劳裂纹形成及扩展的模型图。它对进一步探求热轧辊中热疲劳裂纹形成及扩展机理,提高热轧辊寿命具有重要意义。

(2) 堆焊金属的抗氧化性是影响其热疲劳裂纹形成及扩展的重要因素,抗氧化性越好,抗启裂能力越强。

(3) 为提高堆焊金属耐热疲劳的能力,应尽量避免使其组织均一化,避免出现大块尖角状的铁素体。

(4) 堆焊金属中的夹杂物与高温氧化过程交互作用,导致热疲劳裂纹形成、变宽、变长、分叉。

(5) 1号焊丝耐热疲劳性最好,兼具有良好的抗氧化性、耐磨损性,适合堆焊连铸辊;3号焊丝耐热疲劳性、抗氧化性均较好,兼具有良好的耐磨损性和较高的硬度,适合堆焊热轧辊。

### 参考文献:

- [1] 冯灵芝. 热轧辊埋弧堆焊药芯焊丝的研究[D]. 天津:天津大学,1999.
- [2] 杨庆祥,王爱荣,任学军,等. 稀土元素对60CrMuMo热轧辊用钢抗氧化性能的影响[J]. 中国稀土学报,1996,14(1):38~42.
- [3] 徐 颢. 疲劳强度[M]. 北京:高等教育出版社,1988. 325~340.

作者简介: 冯灵芝,女,1968年10月出生,硕士学位,工程师。主要从事焊接冶金以及焊接材料的研究,已发表论文6篇。

(编辑:闫秀荣)