

新型挤压轮钢 4Cr3.75MoSiV 的析出相对热疲劳性能的影响

费 阳¹ 刘宏玉^{1,2} 汪圣锋¹ 万宝意¹ 林 冲¹ 王红军¹

(1 武汉科技大学理学院;2 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室,武汉 430065)

摘 要 开发的新型挤压轮用钢 4Cr3.75MoSiV (/%:0.39C、0.95Si、0.35Mn、3.75Cr、1.25Mo、0.99V、0.009 5 N) 和常用挤压轮钢 4Cr5MoSiV (/%:0.42C、1.20Si、0.38Mn、5.04Cr、1.14Mo、0.85V、0.035 0N) 由 10 kg 真空感应炉熔炼,并锻成 Φ18 mm 试验用棒材,然后经 880 ℃ 1 h + 720 ℃ 1 h 球化退火,1 080 ℃ 15 min 油淬,550 ℃ 2 h + 530 ℃ 2 h 两次回火处理。研究了两种钢主要析出碳化物形貌、尺寸,析出比例和分布以及对 500 次 600 ℃-室温连续热疲劳性能的影响。结果表明,含 5.04% Cr 的 4Cr5MoSiV 常用钢的析出物中 V₄C₃ + VC 占 12%,并有 26% Cr₂₃C₆ 析出,而开发的 4Cr3.75MoSiV 新型钢中有利于提高热疲劳性能的析出物 V₄C₃ + VC 占 31%,未发现 Cr₂₃C₆ 析出物;4Cr5MoSiV 钢热疲劳损伤因子 3.18 × 10⁻³,连续热疲劳试验表面裂纹比热疲劳损伤因子为 1.77 × 10⁻³ 的新型 4Cr3.75MoSiV 钢表面裂纹粗大。

关键词 新型挤压轮钢 4Cr3.75MoSiV 析出相 热疲劳性能

Effect of Precipitated Phases in New Steel 4Cr3.75MoSiV for Extrusion Wheel on Thermal Fatigue Behavior

Fei Yang¹, Liu Hongyu^{1,2}, Wang Shengfeng¹, Wan Baoyi¹, Lin Chong¹ and Wang Hongjun¹

(1 College of Science; 2 Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065)

Abstract The developed new steel 4Cr3.75MoSiV for extrusion wheel (/%:0.39C, 0.95Si, 0.35Mn, 3.75Cr, 1.25Mo, 0.99V, 0.009 5N) and common steel 4Cr5MoSiV for extrusion wheel (/%:0.42C, 1.20Si, 0.38Mn, 5.04Cr, 1.14Mo, 0.85V, 0.035 0N) are melted by a 10 kg vacuum induction furnace, and forged to Φ18 mm bar for test, then 880 ℃ 1 h + 720 ℃ 1 h spheroidal annealing, 1080 ℃ 15 min oil quenching, 550 ℃ 2 h + 530 ℃ 2 h double tempering. The morphology, size, precipitates ratio and distribution of main carbide precipitates in both steels as well as the effect of precipitates on 500 times 600 ℃-ambient continuous thermal fatigue behavior are studied. Results show that V₄C₃ + VC amount to 12% of total precipitates and there is 26% Cr₂₃C₆ precipitate in common steel 4Cr5MoSiV containing 5.04% Cr, while in developed new steel 4Cr3.75MoSiV the V₄C₃ + VC, which are favourable to increase thermal fatigue behavior, amount to 31% of total precipitates and the Cr₂₃C₆ precipitate has not been found in new steel; after continuous thermal fatigue test the surface crack of steel 4Cr5MoSiV with thermal fatigue factor 3.18 × 10⁻³ is coarser and larger than that of steel 4Cr3.75MoSiV with thermal fatigue factor 1.77 × 10⁻³.

Material Index New Steel 4Cr3.75MoSiV for Extrusion Wheel, Precipitated Phases, Thermal Fatigue Behavior

连续挤压包覆机挤压轮一般在室温 ~ 590 ℃ 循环温度下工作,轮槽表面产生热疲劳裂纹是其主要的失效形式^[1],直接影响挤压轮的工作寿命。常用挤压轮钢 H13 是中温(≤600 ℃)热作模具钢,淬火回火后析出合金碳化物及渗碳体,对钢的热疲劳性能有重要影响。含 Cr 析出相对力学性能的影响表明^[2]:适当降低 Cr 在钢中的含量,同时调整 V 和 N 的含量可以保证钢的综合性能,满足实际应用需要。为进一步提高挤压轮寿命,在前期成分优化设计和热处理工艺实验的基础上^[2-3],研究了新钢种和 H13 钢析出相对热疲劳性能的影响。

1 钢的化学成分和实验方法

实验钢(表 1)在 10 kg 真空感应熔炼炉内冶炼,浇铸成钢锭后锻成 Φ18 mm 棒材,然后进行 880 ℃ 1 h + 720 ℃ 1 h 球化退火、1 080 ℃ 15 min 油淬、550 ℃ 2 h 一次回火 + 530 ℃ 2 h 二次回火处理。

表 1 实验钢的化学成分 / %
Table 1 Analysis of test steels / %

实验钢	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	N
4Cr3.75MoSiV	0.39	0.95	0.35	3.75	1.25	0.99	0.009 5
4Cr5MoSiV	0.42	1.20	0.38	5.04	1.14	0.85	0.035 0

对实验钢进行硬度及拉伸实验;利用扫描电镜(SEM)观察显微组织;通过透射电镜(TEM)和能谱(EDS)分析钢中碳化物的析出分布情况;采用 Ud-deholm 热疲劳方法^[4],在热疲劳试验装置上进行室温~600℃间500次连续热疲劳实验。用光学显微镜(OM)观察试样表面及深度裂纹形貌,并计算热疲劳损伤因子。

2 实验结果

每种实验钢取3个试样经热处理后作力学性能测试,结果(平均值)见表2。

4Cr3.75MoSiV 钢表面没有形成主裂纹,深度较浅(图1a₁和b₁);对比钢4Cr5MoSiV 表面裂纹(图1a₂和b₂)比4Cr3.75MoSiV 钢粗大。

利用图像分析软件计算的热疲劳损伤因子如表3所示。新型4Cr3.75MoSiV 钢的热疲劳损伤因子比对比常用钢4Cr5MoSiV 小。

图2(a)(b)分别是新型4Cr3.75MoSiV 钢和对比常用钢4Cr5MoSiV 回火后析出相的形貌、选区衍射花样及EDS分析结果。

新型4Cr3.75MoSiV 钢和对比常用钢4Cr5MoSiV 回火后碳化物析出分布情况列于表4。

3 讨论

3.1 V 的析出相

假设V的析出相为VC_xN_(1-x),则按照文献[5]的热力学算法,利用文献[6-7]的数据,可计算出550~530℃回火时,新型4Cr3.75MoSiV 钢和对比常用钢4Cr5MoSiV 中的X=0.9,这与表4中的V的析出相为VC或V₄C₃基本一致(X≈0.88)。

N在钢中不仅固溶于基体,起固溶强化的作用,同时存在于析出碳化物中起稳定碳化物的作用^[8]。这些V(C,N)细小弥散且稳定,提高了钢的热疲劳性能。实验钢中的析出物主要是含N的V碳化物和渗碳体Fe₃C。V的碳化物大多呈细小弥散分布,在新型4Cr3.75MoSiV 钢中发现有极少量的V₄C₃型较大碳化物(200~310nm)。

3.2 Cr 的析出相

从表4可知,在Cr含量为5.04%的对比常用钢中存在较大尺寸的M₂₃C₆型面心立方结构球状析出物,EDS证明是Cr₂₃C₆。而新型4Cr3.75MoSiV 钢中没有发现该类型碳化物。研究表明,Cr₂₃C₆不稳定^[9],

表2 实验钢的力学性能
Table 2 Mechanical properties of test steels

实验钢	伸长率/%	断面收缩率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	硬度(HRC)
4Cr3.75MoSiV	5.3	35.5	1 660	1 850	49
4Cr5MoSiV	6.3	30.6	1 705	1 860	49

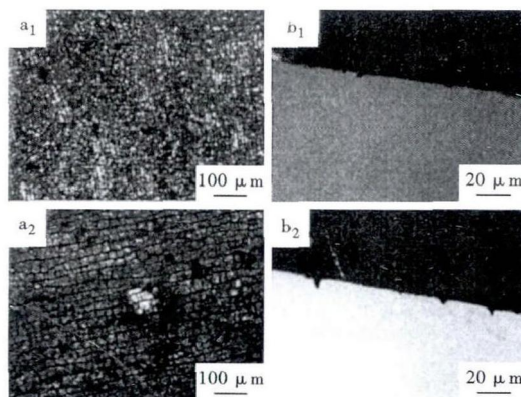


图1 热疲劳试验后,新型钢4Cr3.75MoSiV(a₁)(b₁)和常用钢4Cr5MoSiV(a₂)(b₂)的表面裂纹形貌(a₁)(a₂)和裂纹深度(b₁)(b₂)对比

Fig.1 Comparison of surface crack morphology (a₁)(a₂) and crack depth (b₁)(b₂) between thermal fatigue tested new steel 4Cr3.75MoSiV (a₁)(b₁) and common steel 4Cr5MoSiV (a₂)(b₂)

表3 实验钢的热疲劳损伤因子

Table 3 Thermal fatigue damage factor of test steels

实验钢	损伤因子
4Cr3.75MoSiV	1.77 × 10 ⁻³
4Cr5MoSiV	3.18 × 10 ⁻³

在热循环过程中易聚集长大,降低钢的抗回火软化性能。材料中的大块碳化物是热疲劳裂纹萌生的起源地。碳化物尺寸越大,其与基体间的微裂纹越大,热疲劳性能越差。因此,大尺寸(280~340nm)的Cr₂₃C₆在热循环过程中易聚集长大,降低了钢的热

表4 实验钢回火后碳化物形貌、尺寸和分布

Table 4 Morphology, size and distribution of tempered test steels

实验钢	类型	形貌	尺寸/nm	比例/%	分布
4Cr3.75MoSiV	V ₄ C ₃	球状	200~310	6	马氏体板条界处离散析出
	VC	球状	40~160	25	马氏体板条内弥散析出
	Fe ₃ C	长条状和不规则球状	长160~520,宽13~30; 不规则球状30~60	69	马氏体板条界处聚集
4Cr5MoSiV	Cr ₂₃ C ₆	球状	280~340	26	马氏体板条界处离散析出
	VC或V ₄ C ₃	球状	60~150	12	马氏体板条内弥散析出
	Fe ₃ C	长条状和不规则球状	长290~500,宽13~40; 不规则球状25~50	52	马氏体板条界处聚集

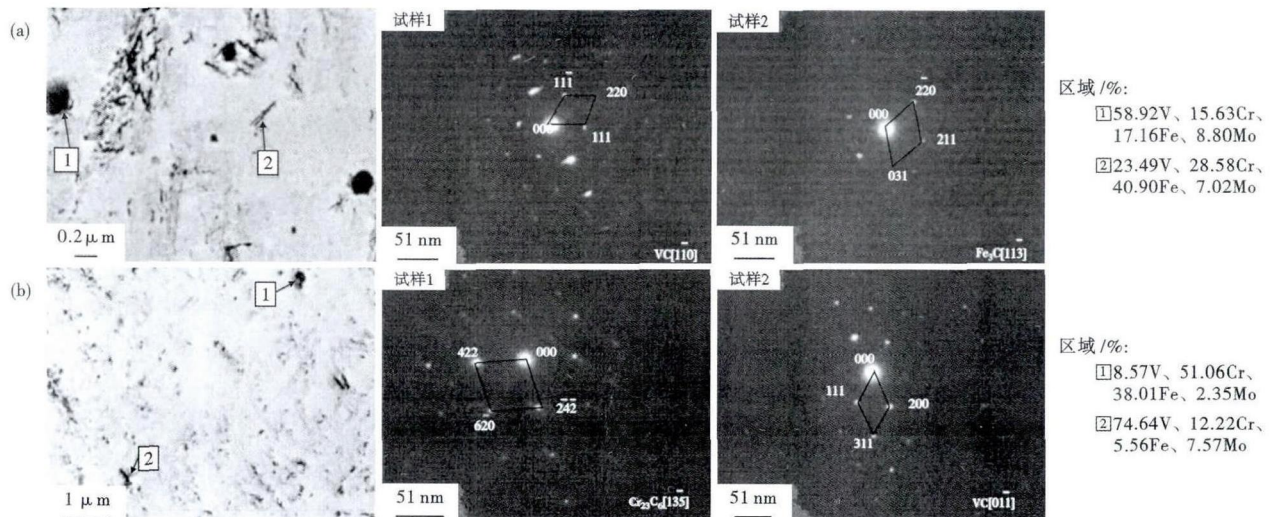


图2 回火后新型钢 4Cr3.75MoSiV (a) 和常用钢 4Cr5MoSiV (b) 析出相形貌, 选区衍射花样的能谱分析 (EDS)

Fig. 2 Morphology of precipitates in tempered new steel 4Cr3.75MoSiV (a) and common steel 4Cr5MoSiV (b), selected area diffraction and energy dispersive spectrum analysis

疲劳性能, 导致常用钢 4Cr5MoSiV 的热疲劳性能比新型 4Cr3.75MoSiV 钢差。

3.3 Mo 的析出相

由 Mo 的碳化物固溶度公式^[10], 可分别计算出新型 4Cr3.75MoSiV 钢和对比常用钢 4Cr5MoSiV 中 Mo 碳化物的固溶温度分别为 760、759 K。这说明在 550 °C 回火时 Mo 主要固溶于基体中, 起固溶强化作用, 提高钢的热强性和热稳定性。

3.4 渗碳体

两种钢回火均出现渗碳体 Fe_3C 。统计 V 的碳化物发现, 新型 4Cr3.75MoSiV 钢中 V 的碳化物占析出相的体积分数在 31% 左右, 这些 V 的碳化物稳定、不易粗化, 能提高钢的抗回火软化和热疲劳性能^[11]; 对比常用钢 4Cr5MoSiV 尽管有较低比例的渗

碳体析出, 但由于析出了较多的 $Cr_{23}C_6$ 而使其热疲劳性能显著降低。

4 结论

(1) 在成分 $Cr = 5.04\%$ 的钢中发现有 $Cr_{23}C_6$ 析出, $Cr \leq 3.75\%$ 钢中则没有发现。 $Cr_{23}C_6$ 降低钢的热疲劳性能。

(2) 在 $Cr \leq 3.75\%$ 钢中析出 V_4C_3 、VC 和 Fe_3C 。V 的碳化物中含有 N 元素, 细小弥散且稳定, 提高钢的热疲劳性能。

(3) Mo 在本实验钢中大都固溶于基体, 提高热疲劳性能。

湖北省教育厅高校产学研合作资助项目 (C2010021)

参考文献

- [1] 王 颖, 樊志新, 宋宝韞. TLJ400 型连续压机机挤压轮温度场测定与模拟[J]. 有色金属加工, 2007, 36(4): 42-45.
- [2] 汪圣锋, 刘宏玉, 周 鹏, 等. 挤压轮用热作模具钢的研究[J]. 金属热处理, 2012, 37(7): 98-102.
- [3] 汪圣锋, 刘宏玉. 连续挤压包覆机挤压轮用钢的研究进展[J]. 特殊钢, 2011, 32(1): 23-26.
- [4] Norstrom L A, Svsson M, Ohrberg N. Thermal Fatigue Behavior of Hot Work Tool Steels [J]. Metals Technology, 1981, 8(10): 376-381.
- [5] 宛 农. Mod. 9Cr-1Mo 耐热钢中微量元素的作用及控制研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 1999: 76-79.
- [6] Orr J, Burton D. Sensitivity of Microstructure and Mechanical Properties of Steel 91 to Initial Heat Treatments [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1993, 20(6): 415-416.
- [7] Robson J D, Bhadeshia H K D H. Modelling Precipitation Sequences in Power Plant Steels, Part I-Kinetic Theory [J]. Materials Science and Technology, 1997, 13(8): 631-639.
- [8] 孙向明, 吕松强, 张增光. 铌、氮、钼对耐热钢性能的影响[J]. 特殊钢, 2002, 23(3): 16-18.
- [9] Tsujii N, Abe G, Fukura K, et al. Effect of Testing Atmosphere on Low Cycle Fatigue of Hot Work Tool Steel at Elevated Temperature [J]. ISIJ International, 1995, 35(7): 920-926.
- [10] 曹建春. 铌钼复合微合金钢中碳氮化物沉淀析出研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006: 102-107.
- [11] 李 健, 束德林, 郭新成. 钨系热作模具钢热疲劳特性的研究 [J]. 机械工程材料, 1988, 7(2): 21-31.

费 阳 (1986-), 男, 硕士研究生, 高性能新金属钢开发及强韧性. E-mail: 362298780@qq.com

收稿日期: 2013-05-27