

4Cr5MoSiV 1, 8407 钢的热疲劳性能

Effect of the Tempering Temperature on Thermal Fatigue Behavior of 4Cr5MoSiV 1 and 8407 Steels

许珞萍, 吴晓春, 邵光杰, 闵永安 (上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

XU Luo-ping, WU Xiao-chun, SHAO Guang-jie, MIN Yong-an
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

摘要: 采用自约束热疲劳试验方法, 对比研究了相同热处理条件的 4Cr5MoSiV 1, 8407 钢的热疲劳特性, 观察分析了疲劳裂纹形貌和深度, 采用热疲劳损伤因子定量研究了二种钢的热疲劳过程, 结果表明: 两种钢的热疲劳裂纹萌生发生在 100~200 次之间, 8407 钢热疲劳裂纹的萌生较 4Cr5MoSiV 1 钢均匀, 细小; 在 1600 次冷热循环前, 二者的热疲劳损伤程度无明显差别, 在 1600 次冷热循环后, 前者的热疲劳损伤程度低于后者; 在较低的回火温度条件下, 8407 钢的热疲劳抗力稍优于 4Cr5MoSiV 1; 而在高温回火时, 8407 钢的热疲劳抗力高于 4Cr5MoSiV 1 钢。分析了这二种钢的热疲劳机制, 指出决定材料热疲劳裂纹抗力的是钢的热稳定性和钢的强度或硬度。

关键词: 4Cr5MoSiV 1 钢; 8407 钢; 回火温度; 热疲劳性能; 损伤因子

中图分类号: TQ 153 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 02-0003-05

Abstract: With the self-restricting test method, the thermal fatigue behavior of 4Cr5MoSiV 1 steel and 8407 steel was investigated under the same heat treatment condition. The crack morphology and fracture surface was also analyzed. The thermal fatigue process of these steels was quantitatively investigated with a thermal fatigue damage parameter. The results indicate that thermal fatigue cracks of both steels initiate at the time between 100 to 200 cycles. The initiating cracks of 8407 steel are smaller and more equable than that in 4Cr5MoSiV 1 steel. Before 1600 thermal cycles, there are not obvious difference on the thermal fatigue behavior of both steels, after 1600 thermal cycles, the degree of the thermal fatigue damage of 8407 steel is lower than that of 4Cr5MoSiV 1 steel. When the tempering temperature is below 640 ℃, the thermal fatigue behavior of 8407 steel is slightly better than that of 4Cr5MoSiV 1 steel, but when the tempering temperature exceeds 640 ℃, the behavior of the former seems superior. The mechanism analysis of thermal fatigue reveals that the main factor affecting thermal fatigue resistance is the thermal stability and strength or hardness of steels.

Key words: 4Cr5MoSiV 1 steel; 8407 steel; tempering temperature; thermal fatigue behavior; thermal fatigue damage parameter

热疲劳性能是热作模具钢应具有的重要性能之一, 特别是压铸过程中, 是限制模具使用寿命的主要因素, 它是一个综合性能指标, 影响因素复杂。

目前, 材料的强度和塑性对热疲劳抗力的影响众说纷纭, 不同的实验方法得到的结论不同。采用恒应力控制热疲劳试验的认为^[1~3]: 强度愈高, 寿命愈高; 而恒应变控制热疲劳试验的结论相反, 即强度愈高, 寿命愈低^[4]。一般的观点是高的屈服强度可减少每一循环的塑性应变幅, 较好的塑性则使局部应力集中松弛, 所以高的强度和好的塑性对热疲劳抗力均有贡献。但对同一种材料而言, 材料的强度和塑性很难兼顾, 随强度和塑性的不同, 其失效形式不同。也有研

究结果表明, 在某些情况下, 压铸模表面热疲劳裂纹的形成是由蠕变过程控制的^[5]。因此, 为提高压铸模对热裂的抗力, 优化模具材料的综合性能和采取合适的处理工艺, 弄清热裂机制是十分有意义的。

本工作采取对比研究的方法, 研究国产与进口 H13 钢的热疲劳特性以及影响因素, 以提高压铸模具的使用寿命, 并探索热疲劳机理, 为国产品牌 H13 钢的生产提供理论依据。

1 试验材料与方法

4Cr5MoSiV 1 钢为电渣重熔的国产 H13 钢, 锻造

面收缩率约为 84.8%，经退火，切削后截面尺寸为 220mm × 520mm。8407S 是 Uddeholm 生产的优质 H13 钢，其锻造面收缩率约为 89.6%，经退火，切削，其截面尺寸为 178mm × 457mm，二种钢的化学成分如表 1 所示，力学性能如图 1 所示。

热疲劳试样取自钢材横截面中心沿轧制方向，其淬火温度为 1025℃，回火采用五种温度，每种温度回火二次，每次 2h，试样编号如表 2 所示，试样尺寸如文献 [2]。试样经一般机械磨削后，需经碾磨和抛光，使其观察平面达到镜面，以消除磨痕对热疲劳抗力的不利影响。试验结果取自二根试样的平均值。

采用自约束冷热疲劳试验方法，即瑞典 Uddeholm 热疲劳方法^[2]；热疲劳试验仪器是由美国因达公司 5kW 固态高频电源改制而成，具有自动控制加热、

冷却和记录循环次数的功能。热循环方式：室温 → 700℃，室温控制在 18℃；加热时间 3.6s，加热停 1s，冷却时间 8s，冷却停 1s；冷却介质：自来水；循环次数 100~3000 次。

在试样分别循环 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2500, 3000 次后，将试样放置在稀盐酸（10%）溶液中浸蚀约 10~15min 除去表面氧化皮，然后在连续变倍体视显微镜下对热疲劳裂纹形貌进行观察，并分别在 18× 和 36× 下拍照。

为定量评定热疲劳的损伤程度，采用先进的图象处理技术对热疲劳裂纹进行分析，通过测定裂纹面积（A）和主裂纹平均宽度（W），以损伤因子 $D = A \cdot W$ （单位： mm^2 ）来评定热疲劳的程度。损伤因子大表明热疲劳损伤严重。

表 1 试验用钢的化学成分 Table 1 Chemical composition of test steels

牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	W	Ti	V
4Cr5MoSiV1	0.42	0.98	0.30	0.018	0.005	0.07	4.93	0.06	1.40	0.02	0.01	0.87
8407S	0.40	1.02	0.41	0.009	0.0005		5.14		1.46			0.93

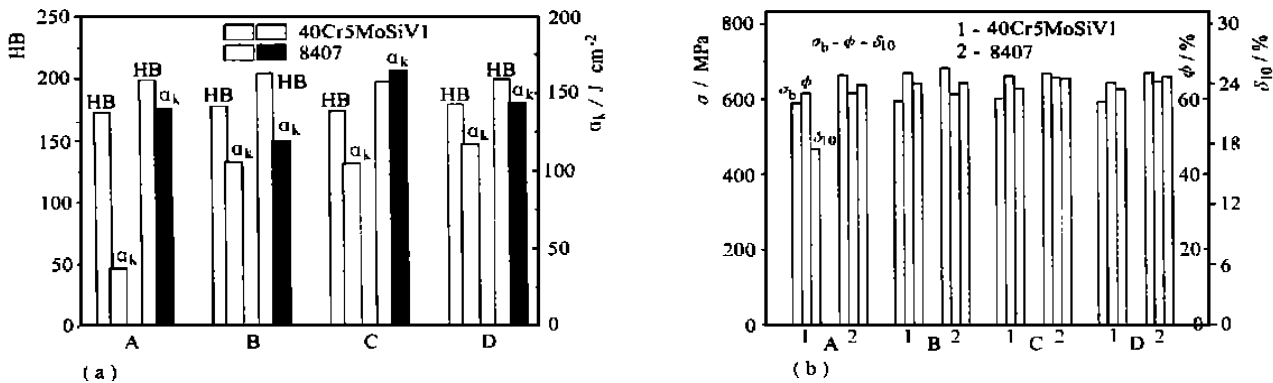


图 1 4Cr5MoSiV1, 8407 钢退火态的 U 型缺口冲击韧性、硬度 (a) 和拉伸性能 (b) (图中 A, B, C, D 表示取样部位: A, B 为模块心部, 表面沿截面短方向; C, D 为模块心部, 表面沿轧向方向)
Fig. 1 (a) Impact toughness of U-notched impact specimens and hardness HB of annealed 4Cr5MoSiV1, 8407 steels; (b) Tensile properties of annealed 4Cr5MoSiV1 and 8407 steels, where A, B, C and D express the position of the tested specimens in steel blocks, A and B for short transverse, C and D for longitudinal

表 2 热疲劳试样回火工艺

Table 2 Sign of samples after treated by different tempering processes

牌 回 火 温 度 号	550	580	610	640	700
4Cr5MoSiV1	01	02	03	04	05
8407S	11	12	13	14	15

测量不同回火温度下的热疲劳试样的原始硬度，如表 3 所示，以及热循环后表面硬度梯度的变化，比

较这二种材料的热疲劳抗力和热稳定性。裂纹深度的测量以均温区中部截面的裂纹深度为准，故用线切割垂直于试样轴线截取。

表 3 热疲劳试样的原始硬度

Table 3 Original hardness of thermal fatigue samples

牌 回 火 温 度 号	550	610	700
4Cr5MoSiV1	55.1	47.1	28.2
8407S	55.2	46.9	28.2

2 试验结果与分析

2.1 热疲劳性能的对比研究

图 2 是所试验的二种钢经 610 °C 回火后, 热疲劳损伤因子与冷热循环周次间的关系图; 从图可见, 在 400 周次的热疲劳循环以下, 热疲劳损伤因子在很低的水平; 此时, 36 倍下试样表面出现皱褶和微裂纹; 在 600 周次以后, 所有试样的裂纹均发育成熟, 裂纹萌生阶段结束, 开始进入稳定的粗化过程。随热循环的继续, 热疲劳损伤因子增加较快, 但在 1600 周次前, 二种钢的热疲劳损伤因子并无显著的差别。在 1200 周次后, 热疲劳的损伤因子迅速增加, 表明热疲劳裂纹进入迅速扩展阶段, 轴向裂纹开始进一步发展, 逐渐贯通, 形成主裂纹; 此后 4Cr5MoSiV 1 钢的热疲劳损伤因子增加速度高于 8407 钢。在 2500 次以后, 损伤因子的增加又进入缓慢增加阶段, 表明裂纹已进入相对稳定的阶段。

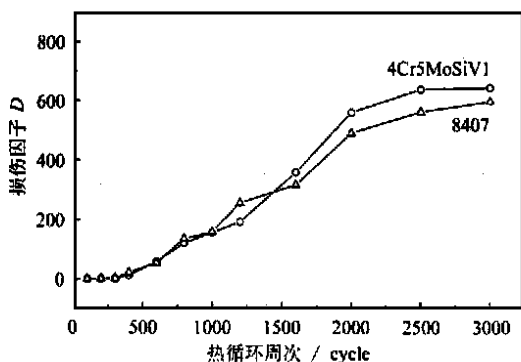


图 2 热疲劳损伤因子与循环周次间的关系

Fig. 2 Relation between thermal fatigue damage parameter and cycles

2.1.1 裂纹萌生阶段

热疲劳试样在经历 100 次的热疲劳后, 表面均出现不同程度的起皱现象, 均未出现裂纹。有的试样表面出现形状各异的几何图形和细的划线, 这就是随后热循环出现裂纹的地方。在 100 次热循环以后, 随热循环的进一步进行, 有的试样表面皱褶加深, 而有的试样开始出现裂纹。如经 200 次热循环后, 部分试样表面已出现明显的微裂纹; 对比两种材料可发现, 8407S 的裂纹萌生较均匀, 细小, 而 4Cr5MoSiV 1 钢的裂纹较粗且不均匀; 600 次循环后, 所有试样的裂纹均发育成熟, 裂纹萌生阶段结束, 即裂纹萌生阶段在 200~600 次之间。图 3 所示是 600 次循环后试样的表面裂纹形貌; 对比二种材料可发现, 4Cr5MoSiV 1 钢较 8407S 钢容易萌生疲劳裂纹。

2.1.2 裂纹扩展阶段

图 3 表明, 不同的试样经 600 次热循环后, 裂纹已发育成熟, 开始进入稳定的粗化过程, 并沿轴向、横向同时延伸, 从而形成完整的网络状裂纹形貌。试样经 1200 次热循环后, 轴向裂纹开始迅速发展, 逐渐贯通, 形成主裂纹; 从图 2 还可看 4Cr5MoSiV 1 钢的热疲劳损伤程度在 1600 次热循环后高于 8407S 钢。图 4 为试样经 3000 次循环后的疲劳裂纹形貌, 可见 4Cr5MoSiV 1 钢的热疲劳损伤程度高于 8407S 钢, 主要表现为多条纵向裂纹贯穿整个加热区域, 而 8407S 钢仍保持相对细小的均匀网状裂纹。

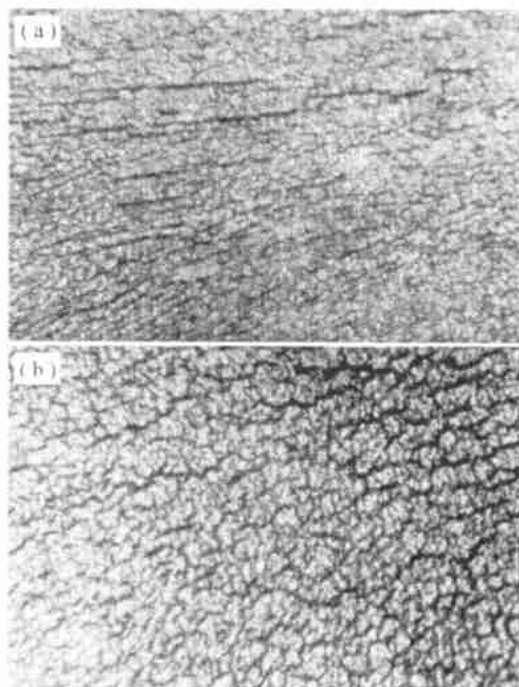


图 3 600 次循环后 03, 13 试样的表面裂纹形貌

Fig. 3 Surface crack morphology of sample

03, 13 after 600 cycle test

(a) sample 03; (b) sample 13

2.1.3 回火温度对二种钢热疲劳性能的影响

图 5 所示是不同回火温度试样经 3000 次热循环后的热疲劳损伤因子; 从图可看出, 经 610 °C 回火后的试样热疲劳损伤因子最低, 580 和 640 °C 回火后的次之, 最大的损伤因子是经 700 °C 回火后的试样。对比发现, 除 580 和 610 °C 回火 8407S 钢的热疲劳损伤因子低于 4Cr5MoSiV 1 钢外, 在 550 和 640 °C 回火二种钢的热疲劳损伤因子无明显不同, 但在 700 °C 回火后, 8407S 钢的热疲劳损伤因子明显低于 4Cr5MoSiV 1。表明在较低的回火温度条件下, 8407S 钢的热疲劳抗力稍优于 4Cr5MoSiV 1; 而在高温回火时, 8407S 钢的热疲劳抗力高于 4Cr5MoSiV 1 钢, 说

明 8407S 钢的热稳定性较 4Cr5MoSiV1 钢高。

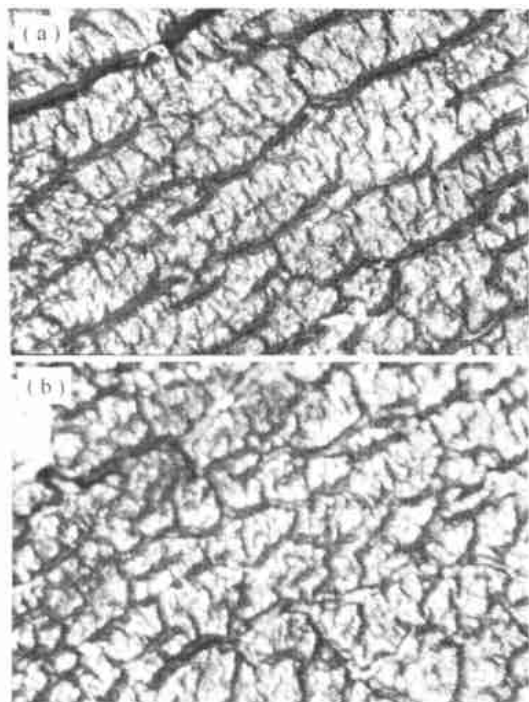


图 4 3000 次热循环后 03, 13 试样的热疲劳裂纹形貌

Fig. 4 Fatigue crack morphology of sample 03, 13 after 3000 cycle test (a) sample 03; (b) sample 13

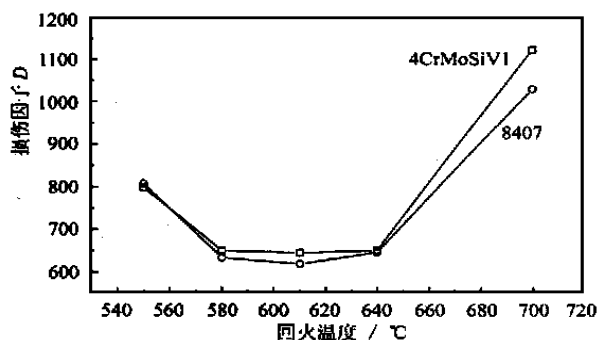


图 5 不同回火温度试样经 3000 次热循环后的热疲劳损伤因子

Fi. 5 Thermal fatigue damage parameter of test samples treated by different tempering temperature after 3000 cycles

2.2 讨论

试验发现, 8407S 钢的裂纹萌生较均匀, 细小, 而 4Cr5MoSiV1 钢的裂纹较粗且不均匀。金相分析知, 4Cr5MoSiV1 钢中的碳化物较 8407S 钢粗大, 且分布不均匀; 部分碳化物沿晶界析出并呈链状。由于碳化物与基体组织的物理性能 (如导热率、热膨胀系数等) 不同, 在冷热循环过程中行为不协调, 容易沿晶界面产生开裂; 另外, 从二种钢的化学成分的对比可

知, 4Cr5MoSiV1 钢的硫、磷含量分别比 8407S 钢的硫、磷含量低一个数量级和 1/2, 表明 4Cr5MoSiV1 钢的冶金质量低于 8407S 钢; 故 4Cr5MoSiV1 钢的热疲劳裂纹的出现不均匀, 而且粗大。

在裂纹萌生的早期, 试样表面出现皱褶; 随热循环的进行表面皱褶加深, 最终形成裂纹并进一步扩展; 这是由于, 在激冷激热过程中, 试样表面分别受到压应力和拉应力, 这种交变应力超过材料的屈服强度时, 表面出现塑性变形, 如皱褶的形成; 随热循环的继续进行, 将引起往复的塑性变形, 导致疲劳裂纹萌生和扩展。这种裂纹的萌生和扩展显然与材料的高温强度和塑性密切相关。在本试验中, 试样不受外部约束, 产生的热应变比较小, 高温强度对热疲劳性能有着重要的影响。

4Cr5MoSiV1 钢的热疲劳裂纹扩展驱动力主要受组织循环稳定性控制, 也受高温屈服强度控制^[6]。图 6 所示是试样表层硬度的变化, 可见经 3000 次热循环后, 试样表面均出现不同程度的软化现象; 这是因为, 热疲劳上限温度超过材料的回火温度时, 钢的碳化物聚集, 材料硬度、强度下降, 致使裂纹加速萌生、扩展, 最终导致软化区裂纹增加。因此, 提高钢在高温下的热稳定性, 降低组织软化速度, 减少软化层深度是提高钢种抗热疲劳性的途径。当热疲劳上限温度未超过钢的回火温度时, 如 700 回火时, 钢的硬度和高温屈服强度太低, 在交变应力的作用下, 钢中出现动态回复与再结晶^[7], 也会出现循环软化现象。

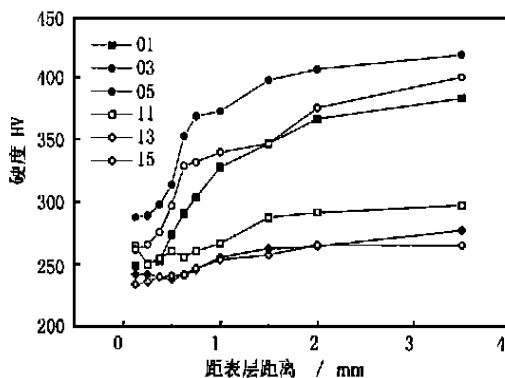


图 6 试样表层的硬度变化

Fig. 6 Hardness of samples at the surface

由于上述两种原因, 钢的高温屈服强度不断下降, 使压应力不断减小, 拉应力不断上升, 热疲劳裂纹扩展驱动不断增加。表明钢的强度较高时, 在热循环过程中将产生较小的热疲劳裂纹扩展驱动力。

表 4 所示两种钢在不同的回火温度条件下, 经 3000 次热循环后的热疲劳裂纹深度; 从钢的热疲劳裂纹深度可发现, 在较低的回火温度下, 国产

4Cr5MoSiV 1 钢的热疲劳裂纹深度较 8407S 钢的裂纹深度小, 这是因为国产 4Cr5MoSiV 1 钢表面较早出现多条纵向裂纹, 松弛了大量应力, 使加在每条裂纹上的热应力较 8407S 钢的低, 而 8407S 钢中往往只出现一条主要裂纹, 在同样的热循环条件下, 8407S 钢上这一条主裂纹承受更高的热应力, 因此, 8407S 钢的主裂纹深度较国产 4Cr5MoSiV 1 钢的主裂纹深度大。在高温回火的条件下, 尽管 4Cr5MoSiV 1 钢的主裂纹较 8407S 钢的主裂纹多, 但 4Cr5MoSiV 1 钢的主裂纹深度较 8407S 钢的主裂纹深度大。

表 4 回火温度对热疲劳裂纹深度的影响 (mm)

Table 4 Effect of tempering temperature on crack depth (mm)

牌 回 火 温 度 号	550	610	700
4Cr5MoSiV 1	0.935	0.629	1.935
8407S	1.258	0.903	1.581

对比图 6 中钢的次表层硬度 (深度为 0.5 ~ 1.0mm 的硬度) 可发现, 次表层硬度最高者其对应的裂纹深度最小, 即两种钢中均以 610 回火后的热疲劳抗力最高; 610 回火后的试样经 3000 次循环后, 表面硬度最高, 表明在该温度回火具有最好的热稳定性, 也说明 610 回火的热疲劳损伤或循环软化最小。尽管经 550 回火后, 硬度较高 (HRC> 55), 但热稳定性较差, 最终表面硬度低于 610 回火的钢, 表现出较差的热疲劳抗力。700 回火后的钢硬度较低 (HRC = 28.2), 经 3000 次热循环后, 其次表层硬度最低, 具有最差的热疲劳抗力。由此表明, 决定材料热疲劳抗力的是钢的热稳定性和钢的强度或硬度。

3 结论

- (1) 4Cr5MoSiV 1 和 8407S 钢经 610 回火, 在 1600 次冷热循环前, 二者的热疲劳损伤程度无明显差别, 在 1600 次冷热循环后, 前者的热疲劳损伤程度高于后者, 2500 次循环后, 热疲劳损伤程度增加缓慢。
- (2) 热疲劳裂纹的萌生发生在约 100 ~ 200 次之间, 8407S 钢热疲劳裂纹的萌生较 4Cr5MoSiV 1 钢均匀, 细小。600 次热循环后, 热疲劳裂纹发育成熟, 4Cr5MoSiV 1 钢的纵向裂纹多于 8407S 钢。
- (3) 在较低的回火温度条件下, 8407S 钢的热疲劳抗力稍优于 4Cr5MoSiV 1; 而在高温回火时, 8407S 钢的热疲劳抗力高于 4Cr5MoSiV 1 钢。
- (4) 决定材料热疲劳裂纹抗力的是钢的热稳定性和钢的强度或硬度。

参考文献

[1] Malm S, Norstrom L A. Material related model for thermal fatigue applied to tool steels in hot-work applications[J]. Met Sci 1979, 9: 544-550.

[2] Norstrom L A, et al. Thermal-Fatigue behaviour of hot-work tool steels [J], Met Technology. 1981, 8 (10): 376-381.

[3] Norstro L A. A New Generation of Steel for die casting dies [J]. Die Casting Engineer. 1982, (9 ~ 10): 24-27.

[4] 平修二, 郭迁廷, 李安定译. 热应力与热疲劳 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 115-121.

[5] Li X, et al. The comparison of thermal fatigue property on some die steels [J]. J Anhui Inst Technol. 1988; 7 (2): 10-20.

[6] Liu J, Feng X. The effect of heat treatment on propagation drive forge of thermal fatigue crack in 4Cr5MoSiV 1 steel [J]. J Anhui Inst Technol. 1988, 7 (2): 58-62.

[7] Li X, Shi Z, Zhou F, Xiao Z. A changes in grain size and softening mechanism of die steel during thermal fatigue [J]. J Anhui Inst Technol. 1988, 7 (2): 78-85.

基金项目: 航空基金资助项目

收稿日期: 2000-11-22

作者简介: 许珞萍, 女, 1960年毕业于北京钢铁学院金相专业, 上海大学教授, 博士生导师。联系地址: 上海市延长路 149 号上海大学 (200072)

本文编辑: 全宏声

(上接第 48 页)

差异会对硅溶胶产生不同影响, 因此在批量生产前应配小样寻找影响硅溶胶稳定性的因素, 如镁质填料要注意碱度对硅溶胶相互作用, 配制的涂料贮存稳定程度。为改善涂料涂覆性, 加入非离子或阴离子表面活性剂对硅溶胶影响不大, 而使用带阳离子的试剂要严格控制。已稳定投产的配比和工艺, 不可轻易改变或更换原材料, 防止杂质混入和因硅溶胶品类不同对涂料产生的不利影响。

硅溶胶分类生产很有必要, 应改进工艺和性能测试手段, 向国际商品硅溶胶靠拢。正确选用和使用硅溶胶的品种, 发展新的制壳工艺, 将为节约贵重金属、制造出合格率高的精铸零件作出贡献。在熔模铸造领域中发展控制粒径及其形态的高纯硅溶胶及单晶铸件选用超薄壁无余量硅溶胶型壳是今后的主要发展方向。

收稿日期: 1999-11-10

作者简介: 肖克 (1962-), 男 (维吾尔族), 工程师, 主要从事精密铸造工作。联系地址: 北京 81 信箱 1 分箱 (100095)

本文编辑: 杨 雪