

锻造

锻造温度对新型机械模具钢高温性能的影响

尹 久¹, 程兴国²

(1. 湖北轻工职业技术学院 机电工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 贵州民族大学 机械电子工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 4Cr5MoSiV1NbSr 作为一种新型模具钢具有较佳的应用前景。为了研究锻造温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 模具钢高温性能的影响, 选择始锻温度为 1000~1250 °C 和终锻温度为 700~950 °C, 在 500 °C 高温环境下对锻后模具钢进行磨损试验和氧化试验。结果表明: 始锻温度从 1000 °C 增加至 1250 °C 时, 4Cr5MoSiV1NbSr 模具钢试样的高温耐磨损和抗高温氧化性能均呈先升高后降低的趋势; 终锻温度从 700 °C 增加至 950 °C 时, 4Cr5MoSiV1NbSr 模具钢试样的高温耐磨损和抗高温氧化性能均呈先升高后基本不变。与 1000 °C 始锻相比, 1150 °C 始锻的 Cr5MoSiV1NbSr 模具钢试样高温磨损体积减小 63.7%、高温氧化单位面积质量增重减小 57.3%。与 700 °C 终锻相比, 900 °C 终锻的 Cr5MoSiV1NbSr 模具钢试样高温磨损体积减小 74.5%、高温氧化单位面积质量增重减小 66.7%。

关键词: 始锻温度; 终锻温度; 4Cr5MoSiV1NbSr 模具钢; 高温耐磨损性能; 抗高温氧化性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.001

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 04-0001-07

Effect of forging temperature on high-temperature performance of new mechanical die steel

Yin Jiu¹, Cheng Xingguo²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hubei Light Industry Technology Institute, Wuhan 430070, China;
2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: As a new type of die steel, 4Cr5MoSiV1NbSr has excellent application prospects. In order to investigate the influence of forging temperature on the high-temperature properties of 4Cr5MoSiV1NbSr die steel, selecting the initial forging temperature of 1000–1250 °C and the final forging temperature of 700–950 °C, wear and oxidation tests were conducted on the die steel after forging at 500 °C. The results show that when the initial forging temperature increases from 1000 °C to 1250 °C, the high-temperature wear resistance and the high-temperature oxidation resistance of 4Cr5MoSiV1NbSr die steel sample both increase first and then decrease. When the final forging temperature increases from 700 °C to 950 °C, the high-temperature wear resistance and the high-temperature oxidation resistance of 4Cr5MoSiV1NbSr die steel sample both increase first and then remain basically unchanged. Compared with the initial forging at 1000 °C, the high-temperature wear volume of Cr5MoSiV1NbSr die steel sample forged at 1150 °C decreases by 63.7%, and the high-temperature oxidation unit area mass gain decreases by 57.3%. Compared with the final forging at 700 °C, the high-temperature wear volume of Cr5MoSiV1NbSr die steel sample forged at 900 °C decreases by 74.5%, and the high-temperature oxidation unit area mass gain decreases by 66.7%.

Key words: initial forging temperature; final forging temperature; 4Cr5MoSiV1NbSr die steel; high-temperature wear resistance; high-temperature oxidation resistance

模具钢是工业生产中非常重要的一类钢材。随着对模具钢性能要求的不断提升, 现有牌号的模具钢往往难以满足越发严格的性能要求, 尤其是高温性能迫切需要得到进一步的改善, 为此相关学者对

模具钢进行了一系列的研究和探索。郑立春等^[1]对含铈镁 H13 模具钢的电渣重熔渣系进行了研究。杨紫璠等^[2]采用试验方法对脉冲光纤维激光毛化 H13 模具钢进行了研究和分析。崔凯等^[3]制备了 Cr12MoV 模具钢化学镀 Ni-W-P/PTFE 复合镀层, 并对其耐磨性能进行了探索和研究。姜高强等^[4]采用激光熔覆等方法对 H13 热作模具钢进行了 Fe 基合金涂层强化处理。谢奕心等^[5]概述和分析了 H13 及 H13 改进型热作模具钢热处理过程中碳化物析出演化行为的

收稿日期: 2024-05-23; 修订日期: 2024-08-16

基金项目: 湖北省教育厅科研项目 (B2019421)

作者简介: 尹 久 (1973-), 女, 本科, 副教授

E-mail: yinjiu@163.com

研究进展。赵帆等^[6]探索和分析了稀土元素镧对 H13 模具钢回火稳定性和抗氧化性的影响规律。胡锋等^[7]研究了模具钢无碳化物贝氏体的相变行为,并分析了无碳化物贝氏体的相变行为对模具钢磨损性能的影响。迟宏宵等^[8]研究了 Cr12Mo1V1 模具钢如何进行碳化物分断细化的热处理技术。汪拥进等^[9]研究和分析了真空气淬工艺对 Cr12MoV 模具钢组织和性能的影响。锻造是模具钢性能改善和提升的有效途径,张颖等^[10]研究和探索了 Q460GJD 钢在多向锻造后热处理过程中的奥氏体晶粒长大行为。

本文主要研究了锻造温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢高温性能的影响,选择始锻温度为 1000~1250 ℃和终锻温度为 700~950 ℃,在 500 ℃高温环境下对锻造后的模具钢进行了磨损试验和氧化试验。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

锻坯采用电渣重熔精炼并均匀化处理的 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢棒料,尺寸为 $\Phi 180\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,冶炼采用电弧炉,均匀化处理温度为 880 ℃、保温时间为 12 h。锻造设备为 1000 t 液压

机,锻造方式为单向拔长。图 1 为 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢坯料与锻造模具的装配以及锻造示意图。4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的化学成分如表 1 所示。为研究锻造温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢高温耐磨损性能和抗高温氧化性能的影响,在锻造试验过程中固定锻造比为 6 和模具预热温度为 250 ℃,改变始锻温度和终锻温度。4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的锻造工艺参数如表 2 所示,对锻造后的 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样进行 880 ℃ \times 10 h/炉冷的退火热处理。

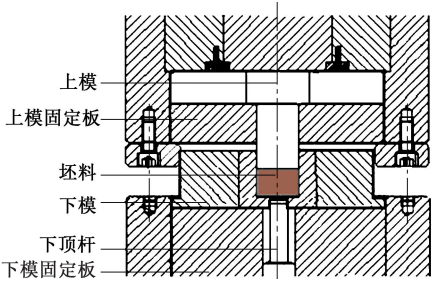


图 1 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢装配示意图
Fig. 1 Assembly schematic diagram of 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel

表 1 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel (%, mass fraction)

化学元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb	Sr	S	P	其他	Fe
设计成分	0.3~0.5	0.8~1.2	0.2~0.5	4.7~5.5	1.1~1.8	0.8~1.2	0.4~0.7	0.4~0.7	≤0.03	≤0.03	≤0.15	余量
实测成分	0.452	1.085	0.386	5.127	1.524	1.036	0.513	0.506	0.016	0.013	0.104	余量

表 2 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢的锻造工艺参数

Table 2 Forging process parameters of 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel

试样 编号	始锻温度/ ℃	终锻温度/ ℃	锻造比	模具预热 温度/℃	锻造次数/ 次
1	1000	900	6	280	5
2	1050	900	6	280	5
3	1100	900	6	280	5
4	1150	900	6	280	5
5	1200	900	6	280	5
6	1250	900	6	280	5
7	1150	700	6	280	5
8	1150	750	6	280	5
9	1150	800	6	280	5
10	1150	850	6	280	5
11	1150	950	6	280	5

1.2 试验方法

高温磨损试验:取不同始锻温度和终锻温度下锻造后的 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的中部位置制成圆柱磨损试件,尺寸为 $\Phi 25\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,在每种模具钢试样上切取 3 个磨损试件。高温磨损试验的温度为 500 ℃、试验转速为 350 r \cdot min⁻¹、试验时间为 20 min、磨损次数为 10 次,试验仪器为 MMU-10 型高温摩擦磨损试验机,用以记录 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的磨损体积。用 3 个磨损试件的磨损体积算术平均值来表征模具钢试样的高温耐磨损性能,并用 JSM6510 型扫描电子显微镜观察试件高温磨损试验后的表面形貌。

高温氧化试验:取不同始锻温度和终锻温度下锻造后的 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的中部位置制成圆柱高温氧化试件,尺寸为 $\Phi 20\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,在每种模具钢试样上切取 3 个磨损试样。高

温氧化试验的温度为 500 ℃、试验时间为 12 h, 采用 MF-8-16A 高温马弗炉进行试验, 试验前先将高温磨损试样在 120 ℃ 保温 30 min 以确保试样无水分, 记录 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的单位面积质量增重, 用 3 个高温氧化试件单位面积质量增重的算术平均值表征模具钢试样的抗高温氧化性能, 并用 JSM6510 型扫描电子显微镜观察试件高温氧化试验后的表面形貌。

2 试验结果及讨论分析

2.1 始锻温度对高温性能的影响

当锻造比为 6、模具预热温度为 250 ℃ 和终锻温度为 900 ℃ 时, 不同始锻温度下 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在 500 ℃ 测试环境下的磨损试验结果如图 2 所示。根据图 2 可知, 始锻温度是影响 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢高温耐磨损性能的重要工艺参数。当始锻温度为 1000 ℃ 时, 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢的高温磨损体积最大, 为 $2.78 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$; 当始锻温度为 1150 ℃ 时, 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢的高温磨损体积最小, 为 $1.01 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 较 1000 ℃ 始锻时减小了 63.7%, 其高温耐磨损性能得到显著提高; 当始锻温度继续提高至 1200 和 1250 ℃ 时, 较 1150 ℃ 始锻的 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢的高温磨损体

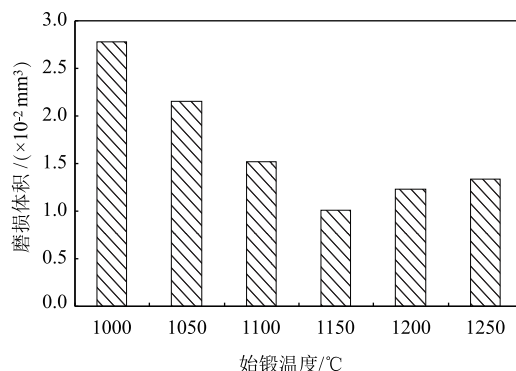


图2 始锻温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢高温耐磨损性能的影响

Fig. 2 Effect of initial forging temperature on high-temperature wear resistance performance for 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel

积有所增大, 高温耐磨损性能有所下降。

图 3 为不同始锻温度下 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的表面形貌。根据图 3a 可知, 当始锻温度为 1000 ℃ 时, 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样表面出现了较深的磨痕, 此外还出现了较多的薄片状起皮, 磨损情况较为严重, 试样抵抗高温磨损的能力较弱。由图 3b 可知, 当 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的始锻温度为 1150 ℃ 时, 其表面未发现薄片状起皮, 仅有磨痕和少量的颗粒状皮屑, 较 1000 ℃ 始锻温度下的试样磨损小, 抵抗高温磨损能力较强。

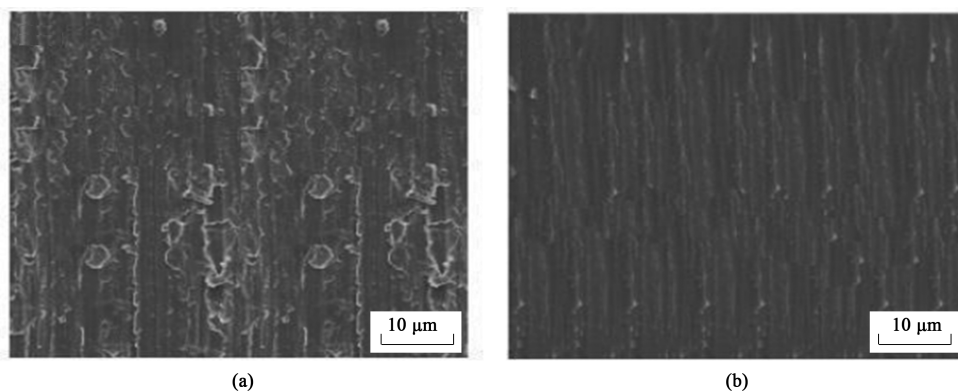


图3 不同始锻温度下 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢的表面形貌
(a) 1000 ℃ (b) 1150 ℃

Fig. 3 Surface morphologies of 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel at different initial forging temperatures

图 4 为不同始锻温度下 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在 500 ℃ 测试环境下的氧化试验结果。由图 4 可知, 始锻温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢在 500 ℃ 下的高温抗氧化性能有着至关重要的作用。在始锻温度达到 1000 ℃ 时, 试样的

单位面积质量增加量达到了最高, 为 $63.4 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$; 随着始锻温度继续升至 1150 ℃ 时, 试样高温氧化过程中的单位面积质量增重最小, 为 $27.1 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$, 较 1000 ℃ 始锻时减小了 57.3%, 表明 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样具有更好的抵抗高温氧化能力;

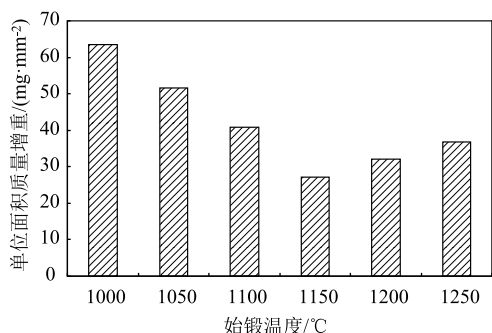


图 4 始锻温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢抗高温氧化性能的影响

Fig. 4 Effect of initial forging temperature on high-temperature oxidation resistance performance for 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel

当继续提升始锻温度至 1200 和 1250 ℃ 时, 模具钢试样的单位面积质量增重较 1150 ℃ 始锻温度时有所增大, 抗高温氧化性能有所下降。

2.2 终锻温度对高温性能的影响

当锻造比为 6、模具预热温度为 250 ℃ 和始锻温度为 1150 ℃ 时, 不同终锻温度下 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在 500 ℃ 测试环境下的磨损试验结果如图 5 所示。由图 5 可知, 终锻温度是影响 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢高温耐磨损性能的重要工艺参数。当终锻温度为 700 ℃ 时, 试样的高温磨损体积最大, 为 $3.96 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$; 当终锻温度提高至 900 ℃ 时, 试样的高温磨损体积最小, 为 $1.01 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 较 700 ℃ 终锻时减小了 74.5%, 试样的高温耐磨损性能得到显著提高; 当终锻温度继续提高至 950 ℃ 时, 试样的高温磨损体积较 900 ℃ 终锻时无明显变化, 试样的高温耐磨损性能与 900 ℃ 终锻时相当。

图 6 为不同终锻温度下 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在 500 ℃ 测试环境下的氧化试验结果。由图 6 可知, 在 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样锻造过程中, 终锻温度对其在 500 ℃ 高温条件下的抗氧化能力具有显著作用。具体来看, 当试样经过 700 ℃ 终锻处理后, 其单位面积质量的增加量达到了最高值, 为 $81.2 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。而随着终锻温度的进一步提升至 900 ℃, 试样的单位面积质量增重最小, 为 $27.1 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$, 较 700 ℃ 终锻时减小了 66.7%, 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样具有更好的抵抗高温氧化的能力; 当终锻温度继续提高至 950 ℃ 时, 试样的单位面积质量增重与 900 ℃ 终锻时无明显变化, 试样的抗高温氧化性能与 900 ℃ 终锻时相当。

图 7 为不同终锻温度下 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机

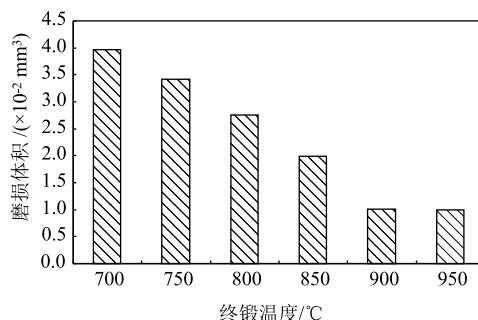


图 5 终锻温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢高温耐磨损性能的影响

Fig. 5 Effect of final forging temperature on high-temperature wear resistance performance for 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel

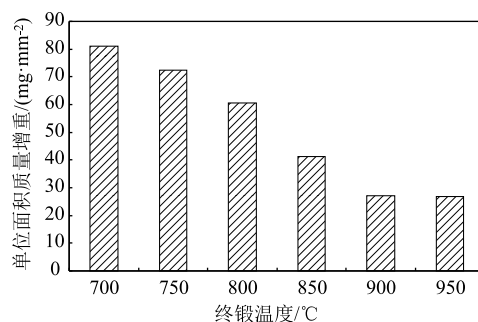


图 6 终锻温度对 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢抗高温氧化性能的影响

Fig. 6 Effect of final forging temperature on high-temperature oxidation resistance for 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel

械模具钢试样在 500 ℃ 测试环境下的表面形貌。从图 7a 可以看出, 当 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的终锻温度为 700 ℃ 时, 试样表面的多孔状氧化皮较多, 试样高温氧化情况比较严重, 试样抵抗高温氧化的能力较弱。从图 7b 可以看出, 当 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的终锻温度为 900 ℃ 时, 试样表面仅有颗粒状氧化皮, 试样的高温氧化情况较 700 ℃ 终锻时轻微, 试样抵抗高温氧化的能力较强。

2.3 讨论与分析

4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的高温磨损过程涉及了热疲劳、腐蚀磨损和微观磨损机制在内的多机制联合作用。如果试样内部存在明显的裂纹或者不均匀组织成分, 则在高温磨损试验过程中, 这些裂纹或不均匀组织所在区域将率先在热疲劳作用下出现模具钢试样表面的软化、形变、腐蚀等情况, 导致模具钢试样表面出现明显的磨损状况, 在试样表面出现起皮、腐蚀坑、点状腐蚀等现象, 引起模具钢试样高温耐磨损性能的进一步恶化。

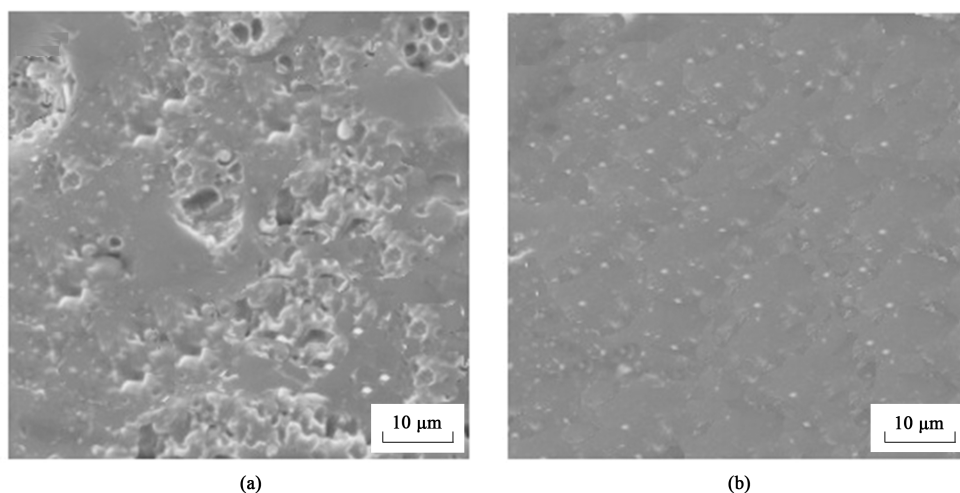


图7 不同终锻温度下4Cr5MoSiV1NbSr新型机械模具钢的表面形貌
(a) 700 °C (b) 900 °C

Fig. 7 Surface morphologies of 4Cr5MoSiV1NbSr new mechanical die steel at different final forging temperatures

4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的高温氧化过程本质上是高温试验条件下模具钢试样与空气中的氧气发生化学反应, 生成了会导致模具钢试样表面出现脆裂或者坑洞的铁与氧的化合物。如果试样存在微小裂纹或者组织成分分布不均匀, 则在高温氧化试验过程中, 这些裂纹或不均匀组织所在区域将率先被空气中的氧气击破, 与铁生成铁氧化物, 导致在模具钢试样表面出现明显的高温氧化现象, 在模具钢试样表面出现多孔状氧化皮、坑洞等现象, 造成模具钢试样抵抗高温氧化的能力弱。

以单向拔长方式进行的4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样锻造过程中, 在锻造时保持锻造比为6、模具预热温度为250 °C和终锻温度为900 °C的情况下, 始锻温度是极其重要的一个锻造工艺参数, 会显著影响4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在500 °C测试环境下的抵抗磨损和抵抗氧化的能力。如果把模具钢试样的始锻温度设置过低, 一方面4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在锻造过程中会产生过大的变形抗力, 很容易在锻造试样内部产生微小的裂纹甚至导致开裂, 使得模具钢试样在高温磨损和高温氧化过程中, 很难具备较高的抵抗高温磨损和高温氧化能力; 另一方面4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在锻造过程中难以进行充分的动态再结晶, 无法获得晶粒细小、尺寸均匀的内部组织, 使得模具钢试样在高温磨损和高温氧化过程中很难拥有优异的抵抗磨损和氧化能力, 故而4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样难以获得理想

的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能^[9-10]。当始锻温度较高时, 一方面4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在锻造过程中可以进行较为充分的动态再结晶, 细化并均匀模具钢试样的内部晶粒; 另一方面可以有效降低4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在锻造过程中的变形抗力, 降低内部存在微裂纹的风险, 从而促使4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢获得理想的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能^[10]。但是, 始锻温度并非越高越好, 如果把始锻温度设置得过高, 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在锻造过程中容易产生过烧或过热, 试样内部晶粒组织粗化, 降低试样在高温磨损和高温氧化过程中的抵抗能力, 从而降低高温耐磨损性能和抗高温氧化性能。所以, 在4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样锻造过程中, 在保持锻造比为6、模具预热温度为250 °C和终锻温度为900 °C的条件下, 当始锻温度从1000 °C增加至1250 °C, 试样的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能先升后降。

以单向拔长方式进行的4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样锻造过程中, 在保持锻造比为6、模具预热温度为250 °C和始锻温度为1150 °C的条件下, 终锻温度也是极其重要的一个锻造工艺参数, 明显影响了4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能。如果把试样的终锻温度设置过低, 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在锻造过程中的塑性会显著降低、很难产生有效变形, 很容易在锻造试样内部产生微小的裂纹, 使得模具钢试样在高温磨损和高温氧化过程中, 很

难具备较高的抵抗高温磨损和高温氧化能力,导致 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样难以获得理想的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能^[9-10]。当把终锻温度设置得过高时,4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在锻造过程中的塑性提高,试样容易变形,避免了内部微小裂纹的产生,从而促使 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢获得理想的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能^[11-12]。所以,在 4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样锻造过程中,保持锻造比为 6、模具预热温度为 250 ℃ 和始锻温度为 1150 ℃ 的条件下,当终锻温度从 700 ℃ 增加至 950 ℃,试样在 500 ℃ 测试环境下抵抗磨损性能和抵抗氧化的能力先升高后基本不变。

3 结论

(1) 在保持锻造比为 6、模具预热温度为 250 ℃ 和终锻温度为 900 ℃ 的条件下,当始锻温度从 1000 ℃ 增加至 1250 ℃,4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在 500 ℃ 测试环境下抵抗磨损性能和抵抗氧化的能力先升后降;当始锻温度为 1150 ℃ 时,Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能均最佳。

(2) 在保持锻造比为 6、模具预热温度为 250 ℃ 和始锻温度为 1150 ℃ 的条件下,当终锻温度从 700 ℃ 增加至 950 ℃,4Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样在 500 ℃ 测试环境下抵抗磨损性能和抵抗氧化的能力先升高后基本不变;将终锻温度设置为不低于 900 ℃ 时,Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样的高温耐磨损性能和抗高温氧化性能最理想。

(3) 在保持锻造比为 6、模具预热温度为 250 ℃ 和始锻温度为 1150 ℃ 的条件下,与 1000 ℃ 始锻相比,1150 ℃ 始锻的 Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样 500 ℃ 高温磨损体积减小了 63.7%、500 ℃ 高温氧化单位面积质量增重减小了 57.3%。

(4) 在保持锻造比为 6、模具预热温度为 250 ℃ 和始锻温度为 1150 ℃ 的条件下,与 700 ℃ 终锻相比,900 ℃ 终锻的 Cr5MoSiV1NbSr 新型机械模具钢试样 500 ℃ 高温磨损体积减小了 74.5%、500 ℃ 高温氧化单位面积质量增重减小了 66.7%。

参考文献:

[1] 郑立春,彭博,姜健,等. 含铈镁 H13 模具钢电渣重熔渣系

的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(8): 1111-1118.

Zheng L C, Peng B, Lou J, et al. Study on the electroslag remelting slag for H13 die steel containing Ce and Mg [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(8): 1111-1118.

[2] 杨紫璠,王涛,李道齐,等. 脉冲光纤激光毛化 H13 模具钢的实验研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(3): 339-345.

Yang Z F, Wang T, Li D Q, et al. Experimental study of pulsed fiber laser grossing of H13 die steel [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(3): 339-345.

[3] 崔凯,任伟和. Cr12MoV 模具钢化学镀 Ni-W-P/PTFE 复合镀层及耐磨性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(10): 32-39.

Cui K, Ren W H. Electroless plating of Ni-W-P/PTFE composite coatings on Cr12MoV die steel and their wear resistance [J]. Plating & Finishing, 2023, 45(10): 32-39.

[4] 姜高强,崔承云,魏礼桢,等. 激光熔覆 Fe 基金属涂层强化 H13 热作模具钢[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(2): 35-42.

Jiang G Q, Cui C Y, Wei L Z, et al. Laser cladding Fe-based alloy coating for strengthening H13 hot work die steel [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(2): 35-42.

[5] 谢奕心,程晓农,鞠玉琳,等. H13 及 H13 改进型热作模具钢热处理过程中碳化物析出演化行为研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 173-180.

Xie Y X, Cheng X N, Ju Y L, et al. Research progress on carbide precipitation and evolution for H13 and H13-modified hot working die steels during different heat treatment schedules [J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 173-180.

[6] 赵帆,周文健,张志豪. 稀土钨对 H13 模具钢回火稳定性和抗氧化性的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 124-129.

Zhao F, Zhou W J, Zhang Z H. Effect of lanthanum on tempering resistance and oxidation resistance of the H13 die steel [J]. Materials Reports, 2023, 37(2): 124-129.

[7] 胡锋,向源,梁灿棉,等. 模具钢无碳化物贝氏体的相变行为及其对磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(3): 95-105.

Hu F, Xiang Y, Liang C M, et al. Carbide-free bainite transformation behavior and its effect on abrasion properties of mould steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(3): 95-105.

[8] 迟宏霄,刘继浩,殷军伟,等. Cr12Mo1V1 模具钢碳化物分断细化热处理技术[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(1): 87-94.

Chi H X, Liu J H, Yin J W, et al. Heat treatment technology of carbide breaking and refining of Cr12Mo1V1 die steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(1): 87-94.

(下转第 24 页)