

理论与实验研究

5CrNiMoLaSr 模具钢的组织与性能

何润琴¹, 常秋香²

(1. 宁波财经学院 数字技术与工程学院, 浙江 宁波 315175;
2. 宁波大学科学技术学院 机械工程与自动化学院, 浙江 宁波 315212)

摘要: 5CrNiMoLaSr 改性模具钢是一种极具应用前景的新型模具钢, 研究了锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的显微组织、室温及高温 500 °C 下的力学性能和耐磨损性能, 并与商用 5CrNiMo 模具钢进行了对比分析并简要探讨了其微观机制。结果表明: 与商用 5CrNiMo 模具钢相比, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的组织更为细小、均匀; 室温下的抗拉强度增大 224 MPa、屈服强度增大 207 MPa, 500 °C 高温下的抗拉强度增大 314 MPa、屈服强度增大 285 MPa; 室温和 500 °C 高温下的伸长率均有较小幅度的增加; 室温磨损体积减小 $1.1 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 500 °C 高温下磨损体积减小 $5.3 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 。稀土 La 以及稀土夹杂物对晶界具有阻碍作用, 减少了杂质元素在晶界的偏聚, 并促进了合金元素 Sr 在晶内的弥散分布。

关键词: 5CrNiMoLaSr 改性模具钢; 锻造; 显微组织; 力学性能; 耐磨损性能; 高温性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.030

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 12-0243-07

Microstructure and properties of 5CrNiMoLaSr die steel

He Runqin¹, Chang Qiuxiang²

(1. College of Digital Technology and Engineering, Ningbo University of Finance and Economics, Ningbo 315175, China;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, College of Science and Technology Ningbo University, Ningbo 315212, China)

Abstract: 5CrNiMoLaSr modified die steel is a new type of die steel with great application prospects, and the microstructure, mechanical properties and wear resistance at room temperature and high temperature of 500 °C for forged 5CrNiMoLaSr modified die steel were studied, and a comparative analysis was conducted with commercial 5CrNiMo die steel. Then, the micro mechanism was briefly discussed. The results show that compared with the commercial 5CrNiMo die steel, the microstructure of forged 5CrNiMoLaSr modified die steel is finer and more uniform. At room temperature, the tensile strength is increased by 224 MPa and the yield strength is increased by 207 MPa, and the tensile strength at high temperature of 500 °C is increased by 314 MPa and the yield strength is increased by 285 MPa. At room temperature and high temperature of 500 °C, the elongation is increased slightly, and the wear volumes are decreased by 1.1×10^{-2} and $5.3 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, respectively. Rare earth La and rare earth inclusions have a hindering effect on the grain boundaries, reducing the segregation of impurity elements at grain boundaries and promoting the dispersed distribution of alloy element Sr within the grains.

Key words: 5CrNiMoLaSr modified die steel; forging; microstructure; mechanical properties; wear resistance performance; high temperature properties

模具钢是现代工业生产中不可或缺的一种钢材。随着工业化和科技化要求的进一步提高, 原有的模

具钢往往难以满足市场所需要的性能, 尤其是高温性能。锻造是广泛应用的一种金属材料改性方法, 其对金属坯料施加一定压力后, 促使金属坯料发生塑性变形, 进而实现金属材料的改性。在锻造态模具钢的组织研究方面, 目前主要集中在 H13、SDP1、5CrMnMo、55NiCrMoV7 等模具钢的锻造态组织分析以及工艺参数或合金元素对锻造态模具钢组织的影响等; 在锻造态模具钢的性能研究方面, 目前主要集中在上述模具钢的力学性能、耐磨损性

收稿日期: 2024-07-20; 修订日期: 2024-10-18

基金项目: 浙江省教育厅普通本科高校“十四五”教学改革项目 (jg20220628); 浙江省公益项目 (GG19E070003)

作者简介: 何润琴 (1974-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: keenhsy@126.com

通信作者: 常秋香 (1979-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 31568793@qq.com

能等方面的研究。张肖晓等^[1]采用数值模拟的方法研究了大截面 SDP1 塑料模具钢多向锻造过程中的微观组织演变。吴寿桥^[2]对激光锻造电弧复合焊接修复 H13 模具钢的组织及性能进行了探讨和分析。孙振亚^[3]分析了热处理与锻造工艺对 H13 热作模具钢组织与性能的影响规律。陈方明等^[4]探索了稀土元素对 5CrMnMo 锻造模具钢组织和性能的影响规律。禹兴胜等^[5]采用试验和数值模拟相结合的方法研究了 55NiCrMoV7 模具钢锻造过程中微观组织的演化情况。殷铭等^[6]探讨和研究了锻造工艺对含钒热作模具钢组织和性能的具体影响。乔宁宁和王佳琪^[7]分析和探讨了锻造对热锻模具钢高温性能的影响。马野等^[8]对铝挤压 H13 模具钢锻造大规格圆钢的组织 and 性能进行了研究。李娜等^[9]分析了锻造及热处理对 4Cr5MoSiV1 模具钢组织与性能的影响。王笑驰等^[10]采用数值模拟的方法研究了 SDP1 塑料模具钢锻造过程中的组织演变。5CrNiMo 模具钢是一种常用的热作模具钢,但是随着科技的进步,人们迫切需要提高 5CrNiMo 模具钢的力学性能和耐磨损性能,尤其是提高高温力学性能和耐高温磨损性能。

但目前关于 5CrNiMo 模具钢的改性研究还鲜有报道。本文在前期开发的 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的基础上,对 5CrNiMoLaSr 改性模具钢进行了锻造试验,研究了锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的显微组织、室温及 500 ℃ 高温下的力学性能和耐磨损性能,以期 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的商业化应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

锻坯为先电渣重熔再 900 ℃×10 h 均匀化处理,并去除表面氧化皮的 5CrNiMoLaSr 改性模具钢圆棒,圆棒尺寸为 Φ150 mm×120 mm。在 1000 t 液压机上以单向拔长方式进行 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的锻造试验,不再进行热处理,直接获得试验所需的锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样。表 1 为锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的化学成分。表 2 为锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的具体锻造工艺参数。其中,表 2 中的锻造比按式(1)进行计算。

表 1 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of forged 5CrNiMoLaSr modified die steel(%, mass fraction)

化学元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	La	Sr	S	P	Fe
要求成分	0.5~0.6	≤0.4	0.5~0.8	0.5~0.8	1.4~1.8	0.15~0.30	0.4~0.6	0.1~0.3	≤0.03	≤0.03	余量
实测成分	0.537	0.302	0.675	0.697	0.043	0.019	0.482	0.216	0.014	0.011	余量

表 2 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的锻造工艺参数

Table 2 Forging process parameters of 5CrNiMoLaSr modified die steel

参数	始锻	终锻	锻坯	锻造比	轴向送进速度/ (mm·min ⁻¹)	模具预热
	温度/ ℃	温度/ ℃	加热 温度/℃			温度/℃
数值	1075	825	1125	6	500	280

$$\eta = \frac{S_b}{S_a} \times 100\% \tag{1}$$

式中:η 为锻造比;S_b 为拔长前锻坯的横截面积;S_a 为拔长后锻件的横截面积。

1.2 试验方法

为了更好地研究锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的组织与性能,本试验以锻造态商用 5CrNiMo 模具钢作为对照试样。首先,将锻造态商用 5CrNiMo 模具钢和锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的金相试样用激光切割法切取试样中心位置;然后进行金相制样和腐蚀,并在 DMi8A 显微镜下完成金相观

察。两种试样的力学性能分别在室温和 500 ℃ 高温条件下进行测试,拉伸试样为圆棒状试样,平行段直径为 Φ10 mm、长度为 40 mm,试验机型号为 GRC-50KN,拉伸速度设置为 1 mm·min⁻¹,在 JSM6510 型扫描电镜下完成拉伸断口形貌观察。为了尽可能减小试验误差,每种模具钢试样均分别进行 5 组拉伸试验,以求取算术平均值的方法获得每种模具钢试样测试数据的力学性能。两种试样的耐磨损性能分别在室温和 500 ℃ 高温条件下进行测试,磨损试件为圆柱状试样,平行段直径为 Φ20 mm、长度为 40 mm,试验机型号为 MLD-10,对磨材料为调质后的处理 45 钢,摩擦磨损试验过程中的磨轮转速设置为 400 r·min⁻¹、磨损时间设置为 60 min,在 JSM6510 型扫描电镜下完成磨损试样表面形貌的观察。同样为了尽可能减小试验误差,每种模具钢试样均分别进行 5 组摩擦磨损试验,以求取算术平均值的方法获得每种模具钢试样的耐磨损性能测试数据。

2 试验结果及讨论分析

2.1 显微组织

锻造态商用 5CrNiMo 模具钢和锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的显微组织如图 1 所示。从图 1 可知，与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比，锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的晶粒得到明显细化。5CrNiMoLaSr 改性模具钢经过锻造后，晶粒细小、均匀，无明显的粗大树枝状或者柱状晶粒存在于试样内部。图 2 为锻造态商用 5CrNiMo 模具钢和锻造态

5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的显微组织扫描电镜（Scanning Electron Microscope，SEM）照片。表 3 为两种模具钢试样微区成分能谱仪（Energy Dispersive Spectroscopy，EDS）分析测试结果。从图 2 和表 3 可以看出，与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比，锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样在晶界处生成了较多细条状的稀土夹杂物，如图 2b 中的细条状夹杂物 c 所示。这些细条状稀土夹杂物为含 La（镧）、O（氧）和 S（硫）的稀土夹杂物，其主要是由于 5CrNiMo 模具钢中添加的稀土元素 La 与钢中存在的 O、S 等杂质元素反应而形成的^[11]。在扩散机制作用

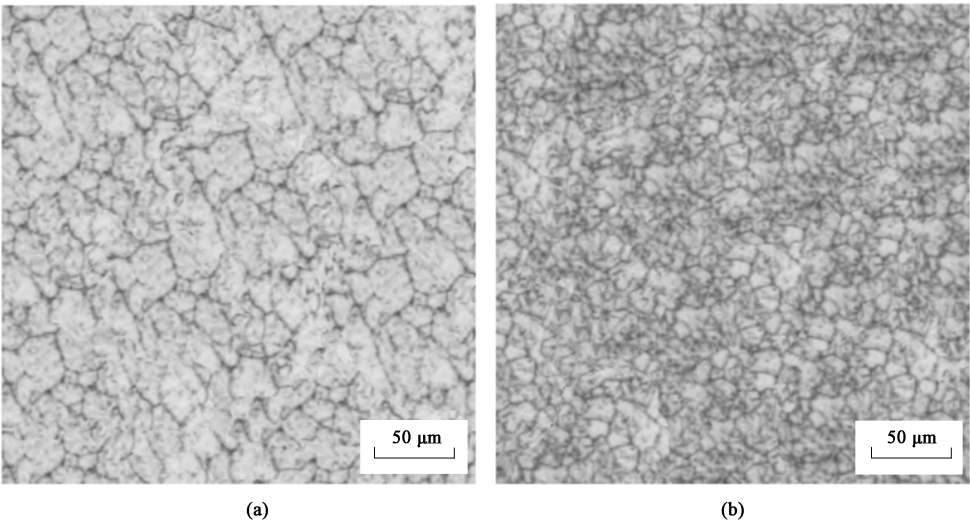


图 1 两种模具钢试样的显微组织
(a) 锻造态商用 5CrNiMo 模具钢 (b) 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢
Fig. 1 Microstructures of two die steel specimens
(a) Forged commercial 5CrNiMo die steel (b) Forged 5CrNiMoLaSr modified die steel

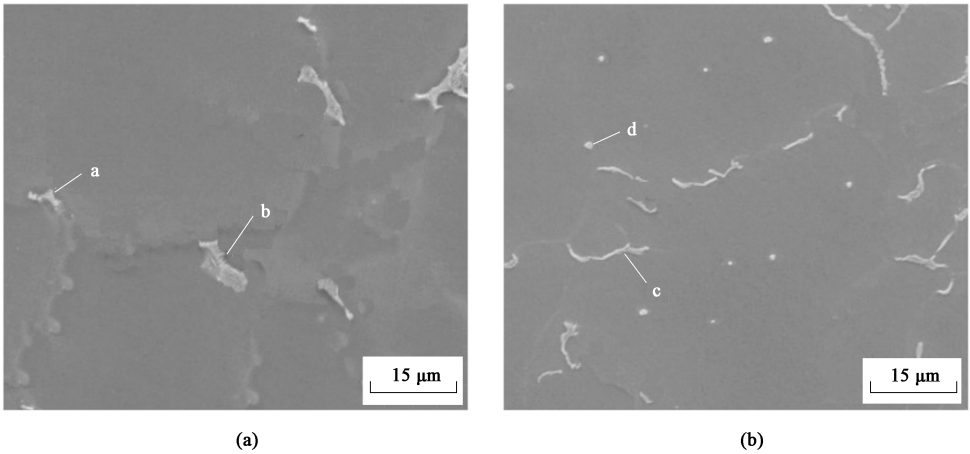


图 2 两种模具钢试样的 SEM 照片
(a) 锻造态商用 5CrNiMo 模具钢 (b) 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢
Fig. 2 SEM photos of two die steel specimens
(a) Forged commercial 5CrNiMo die steel (b) Forged 5CrNiMoLaSr modified die steel

下, 这些细条状稀土夹杂物聚集在晶界处, 一方面可以阻碍模具钢在结晶过程中的晶粒长大, 使得改性模具钢获得细小的晶粒组织; 另一方面可以减少 O、S 等杂质元素在晶界处的偏聚, 强化晶界^[12-13]。此外, 从图 2 和表 3 还可以看出, 钢中添加的合金元素 Sr (锶) 以颗粒状形态弥散分布在晶内, 如图 2b 中的颗粒物 d 所示。这主要是因为复合添加的稀土元素 La 及在晶界处形成的稀土夹杂物促使了碱土金属 Sr 从晶界处转移到晶内并呈弥散分布, 使得添加的碱土金属 Sr 未在晶界处偏聚, 也未形成明显的区域偏析。由此可以看出, 复合添加稀土金属 La 和碱土金属 Sr 后, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢内部组织细小, 稀土夹杂物呈细条状分布在晶界处, 金属 Sr 以颗粒状弥散分布在晶内。

表 3 两种模具钢试样的 EDS 分析测试结果 (%, 质量分数)

Table 3 EDS analysis and test results of two die steel specimens (% , mass fraction)				
元素	颗粒物			
	a	b	c	d
C	41. 86	40. 52	45. 64	47. 68
Si	3. 14	2. 98	3. 06	2. 71
Fe	20. 75	20. 59	28. 32	29. 39
Cr	4. 76	4. 51	3. 88	4. 99
Ni	5. 03	4. 97	3. 95	4. 91
Mo	4. 88	4. 92	4. 05	5. 06
O	11. 43	12. 04	2. 54	0
S	8. 15	9. 47	3. 78	0
La	0	0	4. 78	0
Sr	0	0	0	5. 26

2.2 力学性能

对锻造态商用 5CrNiMo 模具钢和锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样分别在室温和 500 ℃ 高温条件下进行力学性能测试, 如表 4 所示。从表 4 可以看出, 无论是室温还是 500 ℃ 高温测试条件下, 与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的抗拉强度和屈服强度均得到较大幅度的提高, 而且伸长率也得到一定幅度的增加。此外, 从表 4 还可以看出, 无论是室温还是 500 ℃ 高温测试条件下, 与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的抗拉强度、屈服强度和伸长率测试结果的均匀性均更好, 其中, 室温抗拉强度从 992 MPa

增大至 1216 MPa、500 ℃ 高温下的抗拉强度从 628 MPa 增大至 942 MPa, 室温抗拉强度增大了 224 MPa、500℃ 高温抗拉强度增大了 314 MPa; 室温屈服强度从 787 MPa 增大至 994 MPa、500 ℃ 高温屈服强度从 340 MPa 增大至 625 MPa, 室温屈服强度增大了 207 MPa、500 ℃ 高温屈服强度增大了 285 MPa; 室温伸长率和 500 ℃ 高温伸长率均有较小幅度的增加。由此可以看出, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢可以在获得较高伸长率的前提下, 使抗拉强度和屈服强度也达到较高水平, 具有较佳的室温力学性能和高温力学性能。

表 4 两种模具钢试样的力学性能测试结果
Table 4 Mechanical property test results of two die steel specimens

试样	参数	温度	测试值		平均值
			最小值	最大值	
锻造态商用 5CrNiMo 模具钢	抗拉强度/MPa	室温	981	1036	992
		500 ℃	603	647	628
	屈服强度/MPa	室温	759	802	787
		500 ℃	312	361	340
	伸长率/%	室温	7. 9	11. 3	9. 5
		500 ℃	12. 8	17. 4	15. 2
锻造态 5CrNi-MoLaSr 改性模具钢	抗拉强度/MPa	室温	1209	1222	1216
		500 ℃	937	949	942
	屈服强度/MPa	室温	989	998	994
		500 ℃	620	628	625
	伸长率/%	室温	11. 5	12. 9	12. 1
		500 ℃	18. 7	19. 9	19. 4

图 3 为锻造态商用 5CrNiMo 模具钢和锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样在 500 ℃ 高温条件下的拉伸断口 SEM 照片。从图 3 可知, 两种模具钢试样的拉伸断口中均含有较多的韧窝和撕裂棱, 均属于韧性断裂。但与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的拉伸断口中的韧窝更加细小、撕裂棱更多, 展现出比锻造态商用 5CrNiMo 模具钢更好的高温拉伸性能。

2.3 耐磨损性能

表 5 为锻造态商用 5CrNiMo 模具钢和锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样在室温和 500 ℃ 高温条件下测得的耐磨损性能。从表 5 可以看出, 无论是室温还是 500℃ 高温测试条件下, 与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模

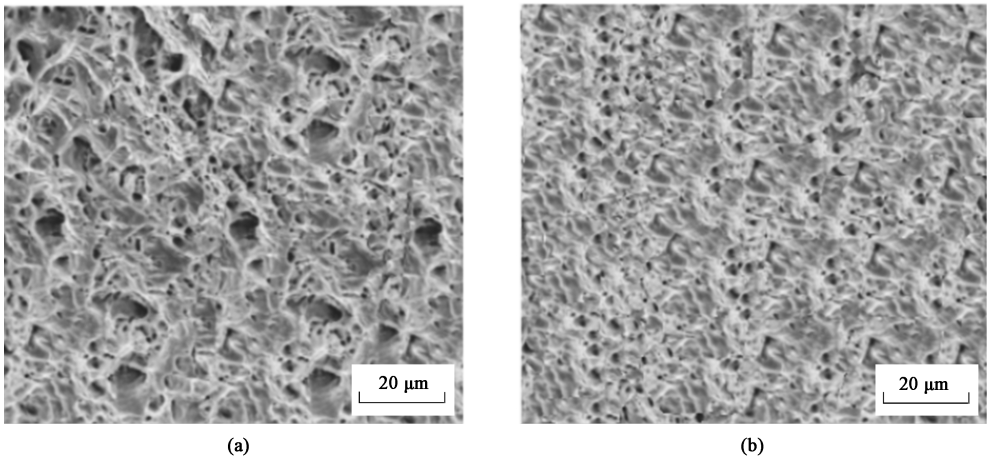


图 3 两种模具钢试样的拉伸断口表面 SEM 照片
(a) 锻造态商用 5CrNiMo 模具钢 (b) 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢

Fig. 3 SEM photos of tensile fracture surface for two die steel specimens
(a) Forged commercial 5CrNiMo die steel (b) Forged 5CrNiMoLaSr modified die steel

具钢试样的磨损体积均小得多，具有更好的室温和高温耐磨损性能。此外，从表 5 还可以看出，无论是室温还是 500 ℃ 高温测试条件下，与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比，锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的磨损体积测试结果的均匀性均更好。其中，室温磨损体积从 $2.9 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 减小至 $1.8 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ ，500 ℃ 高温磨损体积从 $9.4 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 减小至 $4.1 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ ，室温磨损体积减小了 $1.1 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 、500 ℃ 高温磨损体积减小了 $5.3 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 。由此可以看出，锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢无论是室温还是高温条件下均具有较佳的耐磨损性能，室温和高温耐磨损性能均优于锻造态商用 5CrNiMo 模具钢。

表 5 两种模具钢试样的磨损体积 ($\times 10^{-3} \text{ mm}^3$)

Table 5 Wear volumes of two die steel specimens
($\times 10^{-3} \text{ mm}^3$)

试样	温度	测试值		平均值
		最小值	最大值	
商用 5CrNiMo 模具钢	室温	18	37	29
	500 ℃	71	122	94
锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢	室温	17	20	18
	500 ℃	39	44	41

图 4 为锻造态商用 5CrNiMo 模具钢和锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样在 500 ℃ 高温条件下磨损试验后的表面形貌扫描电镜照片。从图 4 可知，锻造态商用 5CrNiMo 模具钢在 500 ℃ 高温磨损后表

面出现较多的片状或颗粒状磨屑（图 4a 中白色部分），模具钢的磨损现象比较严重；但锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样在 500 ℃ 高温条件下磨损后表面无明显的片状磨屑，仅有极少量的颗粒状磨屑，试样的磨损现象较商用 5CrNiMo 模具钢轻微很多，其具有更好的耐高温磨损性能。

2.4 讨论与分析

与锻造态商用 5CrNiMo 模具钢相比，锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢具有更佳的力学性能和耐磨损性能，主要是因为以下 4 个方面的原因。

(1) 在 5CrNiMo 模具钢中添加适量的稀土元素 La 后，锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的晶界处发现了较多细条状的含 La、O 和 S 的稀土夹杂物，这主要是通过稀土元素 La 与钢中的 S、O 等杂质元素反应形成稀土夹杂物，这些夹杂物在结晶过程中起到阻碍晶粒长大的作用，从而有效地细化了 5CrNiMo 模具钢的晶粒组织、减少晶界面积，从而提高模具钢在室温及高温环境下的力学性能和耐磨损性能^[11-13]。

(2) 在 5CrNiMo 模具钢中添加适量的稀土元素 La 后，在模具钢中固溶的稀土元素 La 通过扩散机制富集在晶界处，明显减少了 O 和 S 等杂质元素在晶界的偏聚，使得晶界得到有效强化，从而有效提高模具钢的力学性能和耐磨损性能，尤其是在高温环境下的力学性能和耐磨损性能^[11-13]。

(3) 在 5CrNiMo 模具钢中添加适量的稀土元素 La 后，可以降低模具钢中杂质元素 C、N 的活度，增加 C 和 N 在钢中的溶解度，减少 C 和 N 的脱溶量，

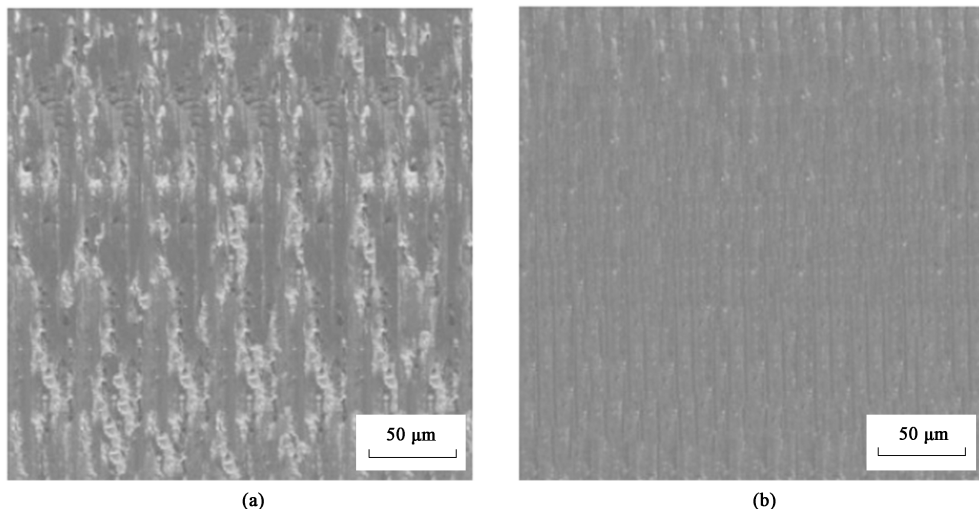


图 4 两种模具钢试样在 500 °C 下磨损试验后的表面形貌 SEM 照片

(a) 锻造态商用 5CrNiMo 模具钢 (b) 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢

Fig. 4 SEM photos of surface morphology for two die steel specimens after wear test at 500 °C

(a) Forged commercial 5CrNiMo die steel (b) Forged 5CrNiMoLaSr modified die steel

使 C 和 N 不能脱溶进入内应力区和晶体缺陷中, 从而提高模具钢的力学性能和耐磨损性能^[11-13]。

(4) 在 5CrNiMo 模具钢中复合添加适量的稀土元素 La 和提高材料高温性能的碱土金属 Sr, 可以有效促使富集在晶界处的 Sr 转移到晶内并呈弥散分布, 减少 Sr 在晶界上的偏聚和区域偏析, 从而充分发挥 Sr 在提高高温性能方面的作用, 因而显著提高了模具钢在高温环境下的力学性能和耐磨损性能^[11-13]。

另外, 在对 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样进行锻造的过程中, 通过对试样施加压力使其发生塑性变形, 从而改善模具钢试样的内部组织和外在性能。在 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的制备过程中, 锻造可以有效地消除 5CrNiMoLaSr 改性模具钢锻坯中原本存在的内部缺陷和晶界变形, 提高其晶粒细化程度, 增加晶界密度, 从而在提高 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样室温和高温抗拉强度和屈服强度的同时, 使得试样的伸长率和塑性也得到一定程度的提高; 此外, 还有效增强了 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样在摩擦磨损试验中的抵抗磨损能力, 提高模具钢试样的室温和高温耐磨损性能^[11-13]。

在后续研究中, 还将深入探讨和分析始锻温度、终锻温度、锻坯加热温度、锻造比、轴向送进速度和模具预热温度等锻造工艺参数对 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的显微组织、力学性能、耐磨损性能、耐腐蚀性能和抗高温氧化性能等的影响, 找出 5CrNiMoLaSr 改性模具钢的最佳锻造工艺参数, 促进

5CrNiMoLaSr 改性模具钢的商业化应用。

3 结论

(1) 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢由于稀土元素及其形成的稀土夹杂物的阻碍作用, 形成了细小均匀的内部组织, 从而获得优异的室温和高温力学性能, 以及室温和高温耐磨损性能。

(2) 与商用 5CrNiMo 模具钢相比, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的组织更为细小、均匀, 其抗拉强度在室温下增大 224 MPa、500 °C 高温下增大 314 MPa; 屈服强度在室温下增大 207 MPa、500 °C 高温下增大 285 MPa; 伸长率在室温和 500 °C 高温下均有较小幅度的提高。锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的室温和高温力学性能均得到明显提高。

(3) 与商用 5CrNiMo 模具钢相比, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的磨损体积在室温下减小 $1.1 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 、500 °C 高温下减小 $5.3 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 锻造态 5CrNiMoLaSr 改性模具钢试样的室温和高温耐磨损性能均得到明显提高。

参考文献:

- [1] 张肖晓, 陈旋, 李晓成, 等. 大截面 SDP1 塑料模具钢多向锻造过程中微观组织演变的数值研究 [J]. 上海金属, 2020, 42 (2): 57-62.
Zhang X X, Chen X, Li X C, et al. Numerical study on micro-

structure evolution during multi-directional forging process of large section SDP1 plastic mold steel [J]. Shanghai Metals, 2020, 42 (2): 57-62.

[2] 吴寿桥. 激光锻造电弧复合焊接修复 H13 模具钢的组织及性能研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2022.

Wu S Q. Study on the Microstructure and Properties of H13 Mold Steel Repaired by Laser Forging Arc Composite Welding [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.

[3] 孙振亚. 热处理与锻造工艺对 H13 热作模具钢组织与性能的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2019.

Sun Z Y. Influence of Heat Treatment and Forging Process on the Microstructure and Properties of H13 Hot Work Die Steel [D]. Jinan: Shandong University, 2019.

[4] 陈方明, 金泽洪, 郑志强, 等. 稀土元素对锻造模具钢 5CrMnMo 组织和性能的影响 [J]. 特殊钢, 2000, 21 (6): 11-13.

Chen F M, Jin Z H, Zheng Z Q, et al. The effect of rare earth elements on the microstructure and properties of forging die steel 5CrMnMo [J]. Special Steel, 2000, 21 (6): 11-13.

[5] 禹兴胜, 武川, 石如星, 等. 55NiCrMoV7 模具钢锻造过程微观组织演化实验与模拟仿真 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 174-184.

Yu X S, Wu C, Shi R X, et al. Experimental and simulation of microstructure evolution during forging process of 55NiCrMoV7 mold steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 174-184.

[6] 殷铭, 李强伟. 锻造工艺对含钒热作模具钢组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (5): 94-97, 100.

Yin M, Li Q W. Influence of forging process on the microstructure and properties of vanadium containing hot work die steel [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (5): 94-97, 100.

[7] 乔宁宁, 王佳琪. 锻造对热锻模具钢高温性能的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 19-24.

Qiao N N, Wang J Q. Influence of forging on high temperature properties for hot forging die steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 19-24.

[8] 马野, 周健, 孙秀华, 等. 铝挤压模具钢 H13 锻造大规格圆钢组织和性能研究 [J]. 模具制造, 2020, 20 (10): 79-82.

Ma Y, Zhou J, Sun X H, et al. Research on the structure and properties of H13 forged large specification round steel for aluminum extrusion mold [J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20 (10): 79-82.

[9] 李娜, 白政民, 葛新峰. 锻造及热处理对 4Cr5MoSiV1 模具钢组织与性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (15): 87-89.

Li N, Bai Z M, Ge X F. The effect of forging and heat treatment on the microstructure and properties of 4Cr5MoSiV1 mold steel [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (15): 87-89.

[10] 王笑驰, 左鹏鹏, 吴晓春. SDP1 塑料模具钢锻造过程组织演变的数值模拟 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (2): 16-28.

Wang X C, Zuo P P, Wu X C. Numerical simulation of microstructure evolution during the forging process of SDP1 plastic mold steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 16-28.

[11] 王奕, 李长荣, 熊星强, 等. 稀土钬对 SWRS82B 钢中氧化铝夹杂物的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (9): 1199-1206.

Wang Y, Li C R, Xiong X Q, et al. Alumina inclusions in SWRS82B steel with rare earth lanthanum [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (9): 1199-1206.

[12] 王龙妹, 杜挺, 卢先利, 等. 微量稀土元素在钢中的作用机理及应用研究 [J]. 稀土, 2001, 22 (4): 37-40.

Wang L M, Du T, Lu X L, et al. Research on the mechanism and application of trace rare earth elements in steel [J]. Chinese Rare Earths, 2001, 22 (4): 37-40.

[13] 富晓阳, 杨吉春, 赵莉萍, 等. 稀土元素在钢中作用机理与研究现状 [J]. 湖南有色金属, 2015, 31 (1): 55-57, 63.

Fu X Y, Yang J C, Zhao L P, et al. The mechanism and research status of rare earth elements in steel [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2015, 31 (1): 55-57, 63.

+++++

欢迎订阅由中国机械工程学会和中国机械总院集团北京机电研究所有限公司主办的
专业核心期刊 (2025 年)

刊名	刊期	页码	邮发代号	单价/元	全年/元	联系人	联系电话
《材料热处理学报》	月刊	200	82-591	60.00	720.00	付海峰	010-62914115, 82415080
《塑性工程学报》	月刊	200	80-353	40.00	480.00	薛红燕	010-62912592, 82415079
《金属热处理》	月刊	300	2-827	25.00	300.00	韩永珍	010-62935465, 82415083
《锻压技术》	月刊	264	2-322	25.00	300.00	林玉彤	010-62920652, 82415085

需要者可到当地邮局订阅, 如果因故漏订, 也可通过邮局汇款订阅, 汇款地址: 北京市海淀区学清路 18 号, 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司相应编辑部的联系人收, 邮编: 100083。