

钒微合金化对 5CrNiMo 模具钢组织与性能的影响分析

张玉平¹, 韦光珍¹, 王梦涵²

(1. 重庆工业职业技术学院, 重庆 401120; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 在 5CrNiMoV 模具钢试样中添加了不同含量的合金元素钒, 制备了不同钒含量的 5CrNiMoV_x ($x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) 模具钢试样, 并采用金相和扫描电镜对试样显微组织进行分析, 测试了试样的抗热裂性能和耐高温磨损性能。结果表明, 添加合金元素钒有助于细化 5CrNiMoV 模具钢试样的显微组织, 提高其抗热裂性能和耐高温磨损性能。随钒含量逐渐增加, 模具钢试样的显微组织先细化后粗化, 抗热裂性能和耐高温磨损性能先提高后下降。与不添加钒($x=0$)相比, 当钒含量 $x=0.3\%$ 时, 5CrNiMoV_x 模具钢试样的裂纹长度减小 3.4 mm、磨损体积减小 $16 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 模具钢试样的抗热裂性能和耐高温磨损性能显著提高。5CrNiMoV_x ($x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) 模具钢试样的钒含量优选为 $x=0.3\%$ 。

关键词: 5CrNiMoV 模具钢; 钒微合金化; 抗热裂性; 耐高温磨损性能

中图分类号: TF76, TG375

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0146-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.023

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Influence of vanadium-microalloying on microstructure and property of 5CrNiMo die steel

Zhang Yuping¹, Wei Guangzhen¹, Wang Menghan²

(1. Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China; 2. College of Materials Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: 5CrNiMoV_x ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) with different vanadium contents were prepared by adding different amounts of alloying element vanadium into the 5CrNiMoV die steel. The microstructure of the sample was analyzed by optical and scanning electron microscopes, and the hot cracking resistance and high temperature wear resistance of the sample were tested. The results show that the addition of vanadium helps refine the microstructure of 5CrNiMo die steel and improves its hot cracking resistance and high temperature wear resistance. With the increase of vanadium content, the microstructure of die steel samples is refined first and then coarsened, and the hot cracking resistance and high temperature wear resistance are improved first and then decreased. When the vanadium content is 0.3%, the crack length and wear volume of 5CrNiMoV_x die steel are reduced by 3.4 mm and $16 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, respectively. The optimum vanadium content of 5CrNiMoV_x ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) die steel sample is $x = 0.3\%$.

Key words: 5CrNiMoV die steel, vanadium-microalloying, hot cracking resistance, high temperature wear resistance

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (编号: KJQN202103205, KJZD-K201903201)。

作者简介: 张玉平 (1980—), 女, 硕士研究生, 副教授, 吉林人, 主要研究领域: 模具 CAD/CAE/CAM, E-mail: 58104345@qq.com。

0 引言

模具钢在工业生产中应用广泛,同时也具有重要地位。模具不仅关系到产品成型,也关系到企业生产成本和生产效率。张艳等^[1]分析了淬火温度对 40Cr13 塑料模具钢耐腐蚀性能的影响规律。黄标彩等^[2]研究和探讨了热处理工艺对 P20 模具钢组织和性能产生的影响。王志国等^[3]研究了模具钢表面激光沉积 316 L 不锈钢的组织转变及差异性。邱宇等^[4]研究了 4Cr5MoSiV1 热作模具钢的热变形行为与热加工图。孙瑞宝^[5]分析了预热温度对 3Cr2W8VSr 新型压铸模具钢性能产生的具体影响。孙晓明等^[6]研究了 DEFORM-3D 在整体辗钢车轮预锻模具型腔分析中的应用。张永强等^[7]采用数值模拟方法预测了 H13 热作模具钢热-机械疲劳损伤和使用寿命。袁昌望等^[8]分析了模具及温度对 1 500 MPa 级热成形钢组织性能产生的影响。丁向琴和冀世军^[9]研究了新型含钛机械模具钢的性能。5CrNiMo 是一种重要的模具钢,但随着市场对模具钢性能要求的提高,现有的 5CrNiMo 钢性能难以满足市场要求,尤其是抗热裂性、耐高温磨损性能的不理想,严重阻碍了 5CrNiMo 钢的商业化应用。我们都知道,钒是钢中一种有效的合金化元素,有助于

改善钢材性能。于淑静和李纪明^[10]分析了钒添加量对 40Cr 模具钢性能的影响。但是,目前关于 5CrNiMo 模具钢中添加钒的研究还鲜有报道。为此,笔者尝试在 5CrNiMo 钢中添加不同含量的合金元素钒,研究钒微合金对 5CrNiMo 模具钢显微组织、抗热裂性和耐高温磨损性能的影响,为 5CrNiMo 模具钢的改性提供新的思路和试验数据。

1 试验材料及方法

采用的试验材料为在 5CrNiMo 模具钢中添加不同含量合金元素钒,采用感应熔炼法制备而成的 5CrNiMoV_x($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样,各试样的化学成分如表 1 所示。各试样的实验室具体制备工艺流程:第一步,根据模具钢试样化学成分准确配料;第二步,在 GW-0.5-250/1J 型中频感应熔炼炉中熔炼模具钢试样,熔炼温度设置到 1 655 ℃、熔体覆盖剂型号为 C3 型 KING CASTER,二次精炼温度设置到 1 625 ℃、精炼时间 25 min、保护气氛采用氩气;第三步,采用自制金属型模具进行浇注,模具预热温度 380 ℃、浇注温度设置到 1 610 ℃;第四步,去掉表面氧化皮,获得模具钢试样,试样尺寸为 $\varnothing 60\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。

表 1 5CrNiMoV_x($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样化学成分
Table 1 Chemical compositions of 5CrNiMoV_x($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) die steel specimens

编号(钒含量)	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	V	S	P	Fe
试样1($x=0$)	0.55	0.68	0.71	1.65	0.18	0.22	0	<0.02	<0.02	Bal.
试样2($x=0.1$)	0.55	0.67	0.72	1.64	0.18	0.22	0.1	<0.02	<0.02	Bal.
试样3($x=0.2$)	0.54	0.68	0.71	1.66	0.19	0.23	0.2	<0.02	<0.02	Bal.
试样4($x=0.3$)	0.55	0.69	0.72	1.65	0.19	0.22	0.3	<0.02	<0.02	Bal.
试样5($x=0.4$)	0.56	0.68	0.72	1.65	0.19	0.23	0.4	<0.02	<0.02	Bal.
试样6($x=0.5$)	0.55	0.68	0.71	1.65	0.18	0.23	0.5	<0.02	<0.02	Bal.

模具钢试样抗热裂性测试,采用热裂环法,抗热裂性能测试试样具体尺寸如图 1 所示。在试样中部切取磨损试样,其耐高温磨损性能测试采用 MMUD-5B 型高温摩擦磨损试验机,磨轮转速 500 r/min、无油润滑、磨损时间 15 min、对磨材料为试样本体、试验温度 500 ℃,记录磨损体积以此表征试样的耐高温磨损性能,并用 EVO18 型扫描电镜观察试样的表面磨损形貌。

采用线切割在试样中部切取金相试样,经过由

粗到细的金相砂纸磨制并抛光后,用 Koller 试剂(12 mLHNO₃+24 mLHF+64 mLH₂O)浸蚀 15 s 后快速冲洗并吹干,然后置于 ZEISS 型金相显微镜和 EVO18 型扫描电镜下观察内部显微组织。

2 试验结果及讨论

2.1 抗热裂性能

不同钒含量微合金化的 5CrNiMoV_x ($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样抗热裂性能如表 2 所

示。从表2可知,钒微合金化有助于减小5CrNiMo模具钢试样的裂纹长度,提高试样的抗热裂性能。此外,从表2还可以看出,随钒含量从 $x=0$ 逐渐增加到 $x=0.5\%$,试样的裂纹长度先减小后增大;当钒含量 $x=0.3\%$ 时,试样的裂纹长度最短(0.03 mm),

较不添加钒时,裂纹长度减小3.4 mm;当钒含量进一步增大时,试样的裂纹长度非但没有进一步减小,反而有所增大,当钒含量提高到 $x=0.5\%$ 时,试样裂纹长度增大到1.77 mm,试样抗热裂性能非但没有进一步提高,反而有所降低。

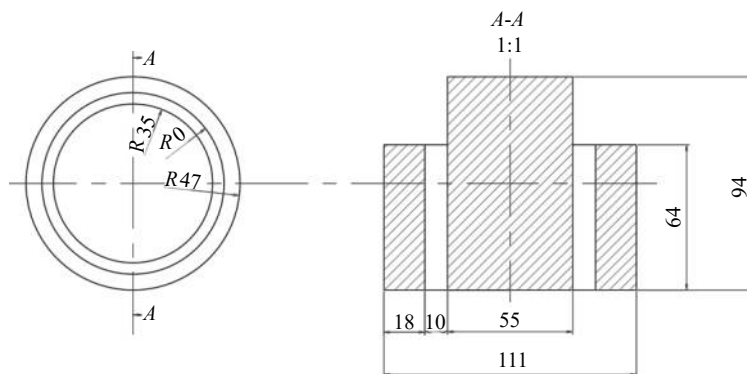


图1 5CrNiMoVx($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样抗热裂性测试棒尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensional drawing of 5CrNiMoVx($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) die steel test bar for hot cracking resistance test

表2 5CrNiMoVx($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样抗热裂性能

Table 2 Hot cracking resistance of 5CrNiMoVx ($x=0, 0.1, 0.2,0.3,0.4,0.5$) die steel samples

试样编号	钒含量/%	裂纹长度/mm
试样1	$x=0$	3.46
试样2	$x=0.1$	1.67
试样3	$x=0.2$	0.95
试样4	$x=0.3$	0.03
试样5	$x=0.4$	0.82
试样6	$x=0.5$	1.77

2.2 耐高温磨损性能

不同钒含量微合金化的5CrNiMoVx ($x=0, 0.1, 0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样耐高温磨损性能如表3所示。从表3可知,钒微合金化有助于减小5CrNiMo模具钢试样的磨损体积,提高试样的耐高温磨损性能。此外,从表3还可以看出,随钒含量从0逐渐增加到0.5%,试样的磨损体积先减小后增大;当钒含量 $x=0.3\%$ 时,试样的磨损体积最小($19 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$),较不添加钒时,磨损体积减小 $16 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$;当钒含量进一步增大时,试样的磨损体积非但没有进一步减小,反而有所增大,当钒含量提高 $x=0.5\%$ 时,试样磨损体积增大到 $29 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,试样抗热裂性能非但没有进一步提高,反而有所降低。

表3 模具钢试样耐高温磨损性能

Table 3 Wear resistance of die steel specimens at high temperature

试样编号	钒含量/%	高温磨损体积 $\times 10^3/\text{mm}^3$
试样1	$x=0$	27
试样2	$x=0.1$	30
试样3	$x=0.2$	22
试样4	$x=0.3$	19
试样5	$x=0.4$	23
试样6	$x=0.5$	29

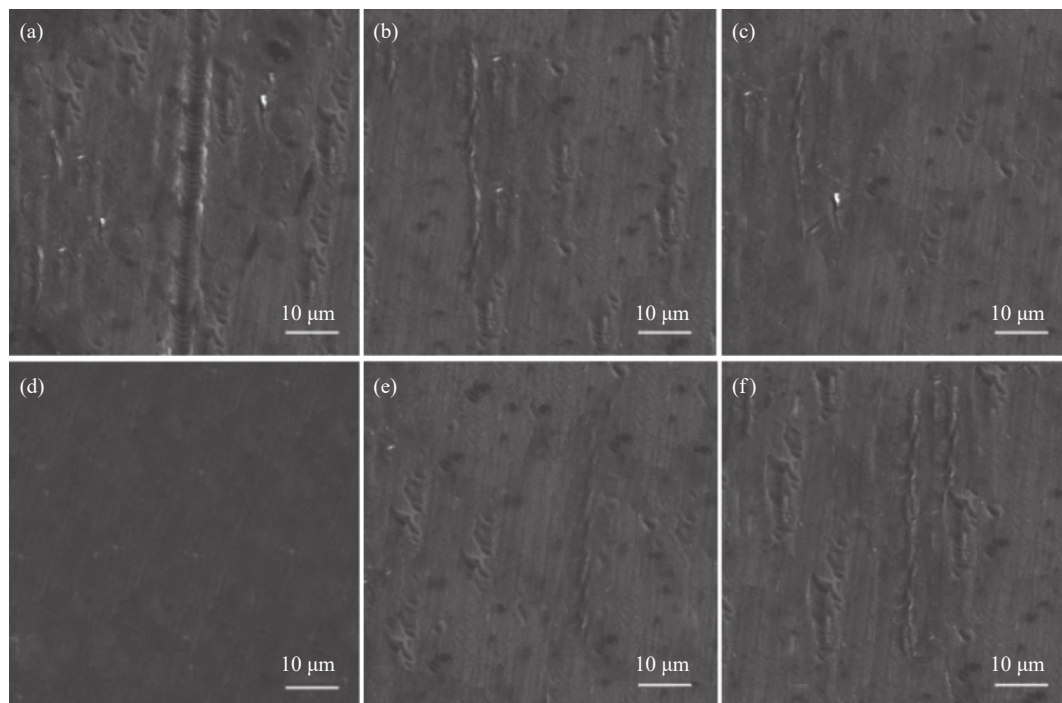
图2是不同钒含量微合金化的5CrNiMoVx($x=0, 0.1, 0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样高温磨损后的表面形貌。从图2可以看出,当钒含量 $x=0$ (不添加钒,图2(a))时,试样磨损情况最严重,试样表面较多体积较大的凹坑以及较多的粗大磨痕。当钒含量 $x=0.3\%$ (图2(d))时,试样磨损情况最轻微,试样表面未见明显的凹坑,磨痕也较细。此外,从图2还可以看出,随钒含量逐渐从0增大到0.5%,试样的磨损情况先减轻后加重。

2.3 显微组织

不同钒含量微合金化的5CrNiMoVx ($x=0, 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样显微组织金相照片如图3所示。从图3(a)~(f)的对比可以看出,当试样中不添加合金元素钒(图3(a), $x=0$)时,试样内部晶粒较为粗大,组织分布均匀性较差;与不添加合金元

素钒相比,当试样中添加合金元素钒后,试样内部晶粒得到细化,组织分布更为均匀。此外,从图3还可以看出,随试样中合金元素钒含量从 $x=0$ 逐渐增加

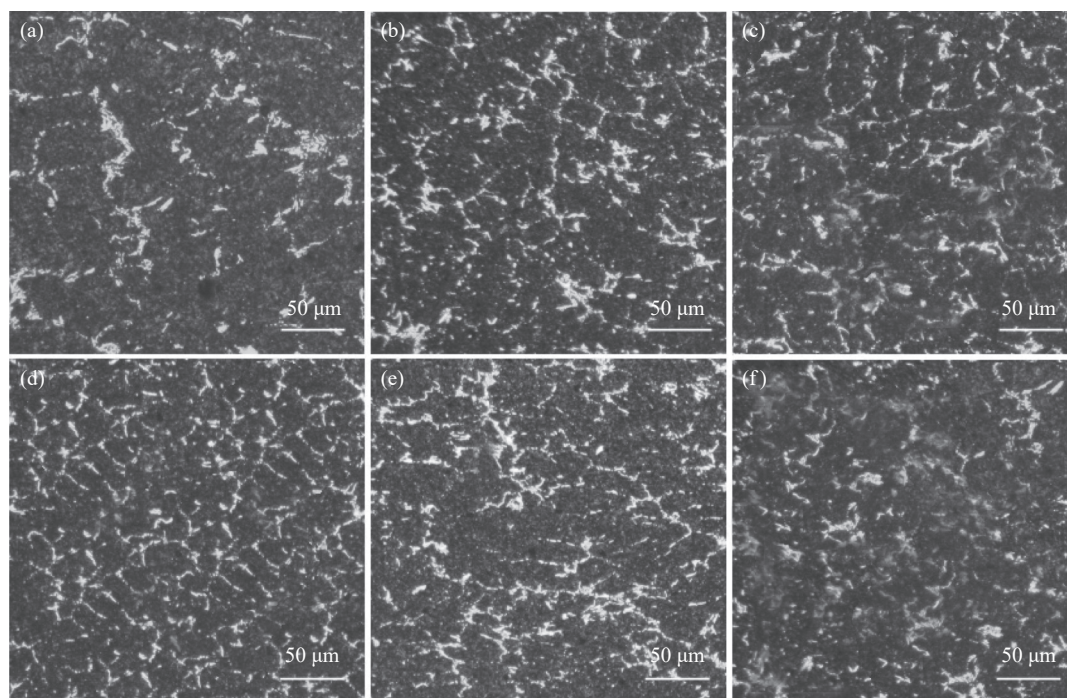
到 $x=0.5\%$,试样内部晶粒尺寸表现出先减小后增大的变化趋势。当试样中合金元素钒含量 $x=0.3\%$ 时,试样内部晶粒最细小,组织分布均匀性最好。



(a) $x=0$; (b) $x=0.1$; (c) $x=0.2$; (d) $x=0.3$; (e) $x=0.4$; (f) $x=0.5$

图2 5CrNiMoV $x(x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5)$ 模具钢试样高温磨损形貌

Fig. 2 Wear morphologies of 5CrNiMoV $x(x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5)$ die steel at high temperature



(a) $x=0$; (b) $x=0.1$; (c) $x=0.2$; (d) $x=0.3$; (e) $x=0.4$; (f) $x=0.5$

图3 5CrNiMoV $x(x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5)$ 模具钢试样显微组织金相照片

Fig. 3 Microstructure metallographic photographs of 5CrNiMoV $x(x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5)$ die steel at high temperature

图 4 是不同钒含量微合金化的 5CrNiMoV x ($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样显微组织扫描电镜(SEM)照片。从图 4(a)~(f) 的对比可以看出,当试样中不添加合金元素钒(图 4(a), $x=0$)时,试样中除了细小的颗粒状碳化物外,还有粗大的块状碳化物和粗大的骨状碳化物,碳化物分布均匀性较差。与不添加合金元素钒相比,当试样中添加合金元素钒后,试样中未发现粗大的骨状碳化物和大块状碳化物,碳化物更细小,碳化物分布也更为均匀。此外,从图 3 还可以看出,随试样中合金元素钒含量从 $x=0$ 逐渐增加到 $x=0.5\%$, 试样中碳化物呈现出先细化后粗化的变化趋势。当试样中合金元素钒含量 $x=0.3\%$ 时,试样内部碳化物最为细小,呈弥散分布。

由此可以看出,在 5CrNiMo 模具钢试样中添加合金元素钒,有助于细化模具钢试样的内部组织,并避免出现粗大的碳化物,提高模具钢试样的抗热裂

性能和耐高温磨损性能。这主要是因为 5CrNiMo 模具钢试样中添加合金元素钒后,钒元素与碳元素可以形成稳定性好、熔点很高的碳化物,实现晶粒细化效果,同时也可以促使模具钢试样在高温条件下仍可以保持较为细小的、弥散分布的内部组织,从而可以显著降低模具钢试样的过热敏感性,从而有效提高模具钢试样的抗热裂性能和耐高温磨损性能^[9]。但是,当模具钢试样中添加的合金元素钒含量较低时,钒的积极作用难以充分发挥;适当提高模具钢试样中合金元素钒含量有助于模具钢获得较为细小的、均匀分布的内部组织,同时获得弥散分布的、细小颗粒状的、稳定性高和极难熔的碳化物,从而显著提高 5CrNiMo 模具钢试样的抗热裂性能和耐高温磨损性能^[10]。如果模具钢试样中合金元素钒含量过多,容易引起成分偏析以及碳化物的粗化,使得 5CrNiMoV 模具钢试样的抗热裂性能和耐高温磨损性能出现下降^[8-10]。

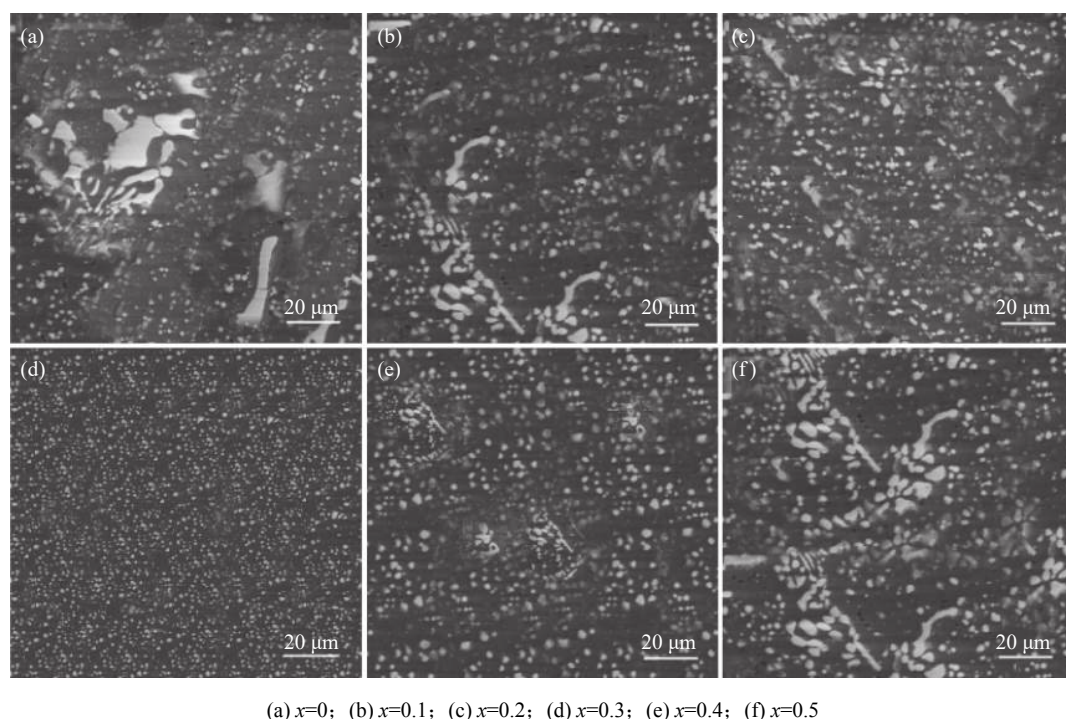


图 4 5CrNiMoV x ($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样显微组织 SEM 照片

Fig. 4 Microstructure SEM photographs of 5CrNiMoV x ($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) die steel at high temperature

3 结论

1) 添加合金元素钒有助于细化 5CrNiMoV 模具钢试样的显微组织和碳化钒,提高模具钢试样的抗热裂性能和耐高温磨损性能;随模具钢试样中钒含量从 $x=0$ 逐渐增加到 $x=0.5\%$, 5CrNiMoV x

($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样的显微组织和碳化物均先细化后粗化,抗热裂性能和耐高温磨损性能先提高后下降。

2) 与不添加钒($x=0$)相比,当钒含量 $x=0.3\%$ 时, 5CrNiMoV x 模具钢试样的裂纹长度减小 3.4 mm、磨损体积减小 $16 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,模具钢试样的抗热裂性

能和耐高温磨损性能显著提高。

3)为了提高模具钢试样的抗热裂性能和耐高温

磨损性能, 5CrNiMoV x ($x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$) 模具钢试样的钒含量优选为 $x=0.3\%$ 。

参考文献

- [1] Zhang Yan, Wang Zhenxu, Xu Yu, *et al.* Effect of quenching temperature on corrosion resistance of 40Cr13 plastic die steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(1): 80–84.
(张艳, 王振旭, 徐豫, 等. 淬火温度对40Cr13塑料模具钢耐腐蚀性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(1): 80–84.)
- [2] Huang Biaocai, Ning Bo, Chen Yuye, *et al.* Effect of heat treatment processes on microstructure and properties of P20 die steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(1): 88–91.
(黄标彩, 宁博, 陈玉叶, 等. 热处理工艺对P20模具钢组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2021, 46(1): 88–91.)
- [3] Wang Zhiguo, He Zhenfeng, Zhao Jibin, *et al.* Microstructure transformation and difference of 316L stainless steel by laser deposition on surface of mold steel[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(2): 105–113.
(王志国, 何振丰, 赵吉宾, 等. 模具钢表面激光沉积316L不锈钢的组织转变及差异性[J]. *材料工程*, 2021, 49(2): 105–113.)
- [4] Qiu Yu, Yuan Fei, Zeng Yuansong, *et al.* Hot deformation behavior and hot processing maps of 4Cr5MoSiV1 hot working die steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(2): 71–77.
(邱宇, 袁飞, 曾元松, 等. 4Cr5MoSiV1热作模具钢的热变形行为与热加工图[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(2): 71–77.)
- [5] Sun Ruibao. Effect of preheating temperature on performance of 3Cr2W8Vsr new type of die casting die steel[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(10): 153–155.
(孙瑞宝. 预热温度对3Cr2W8Vsr新型压铸模具钢性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(10): 153–155.)
- [6] Sun Xiaoming, Wei Huacheng, Du Xiaozhong, *et al.* Application of DEFORM-3D in cavity analysis of pre-forging mold for integral steel wheel[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45(8): 23–31.
(孙晓明, 魏华成, 杜晓钟, 等. DEFORM-3D在整体辗钢车轮预锻模具型腔分析中的应用[J]. *锻压技术*, 2020, 45(8): 23–31.)
- [7] Zhang Yongqiang, Xu Guocai, Zuo Pengpeng, *et al.* Prediction of thermo-mechanical fatigue damage and life for H13 hot-work die steel[J]. *Shanghai Metals*, 2020, 42(3): 12–16, 20.
(张永强, 徐国财, 左鹏鹏, 等. H13热作模具钢热-机械疲劳损伤和寿命的预测[J]. *上海金属*, 2020, 42(3): 12–16, 20.)
- [8] Yuan Changwang, Huang Jiajin, Li Shengci, *et al.* Influence of die and temperature on microstructure and properties of 1500 MPa thermoforming steel[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2020, 11(4): 37–43.
(袁昌望, 黄加进, 李声慈, 等. 模具及温度对1500 MPa级热成形钢组织性能的影响[J]. *有色金属科学与工程*, 2020, 11(4): 37–43.)
- [9] Ding Xiangqin, Ji Shijun. Study on the properties of a new type of mechanical die steel containing titanium[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(6): 170–174.
(丁向琴, 冀世军. 新型含钛机械模具钢的性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41(6): 170–174.)
- [10] Yu Shujing, Li Jiming. Effect of vanadium content on the properties of 40Cr die steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(5): 166–170.
(于淑静, 李纪明. 钒添加量对40Cr模具钢性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41(5): 166–170.)

编辑 邓淑惠