

# 4Cr5MoVSi 模具钢的 Al 合金化与组织性能研究<sup>①</sup>

刘校培<sup>1</sup>, 徐慧<sup>1</sup>, 李攀<sup>2</sup>, 陈秋莉<sup>1</sup>, 魏政顺<sup>1</sup>, 郭晓光<sup>3</sup>, 卢志安<sup>3</sup>

(1.河南机电职业学院, 河南 郑州 451191; 2.河南职业技术学院, 河南 郑州 450046; 3.郑州大学, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 采用光学显微镜、透射电子显微镜、拉伸试验机等手段,研究了 Al 元素含量对淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢微观组织、物相、硬度、拉伸和冲击性能的影响。结果表明,Al 含量为 0~0.6% (质量分数,下同)的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的组织为马氏体,Al 含量为 1.2%~1.8% 的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的组织为马氏体外+ $\delta$  铁素体。未添加 Al 和添加 0.3%~1.8% Al 的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的物相主要为  $\alpha$ -Fe 和  $M_7C_3$  相。Al 含量为 0.3%~1.2% 的淬回火态、淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的硬度变化幅度较小,当 Al 元素含量增加至 1.8% 时,淬回火态和淬回火态模具钢的硬度显著减小。加入适量的 Al 元素有助于提升淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的室温抗拉强度、断后伸长率和冲击韧性,添加 1.2% Al 元素的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢具有较高的硬度、抗拉强度和冲击韧性。

**关键词:** 4Cr5MoVSi; 模具钢; Al 合金化; 淬回火; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.032

文章编号: 0253-6099(2025)05-0181-05

## Al Alloying and Microstructure Properties of 4Cr5MoVSi Die Steel

LIU Xiaopei<sup>1</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, LI Pan<sup>2</sup>, CHEN Qiuli<sup>1</sup>, WEI Zhengshun<sup>1</sup>, GUO Xiaoguang<sup>3</sup>, LU Zhi'an<sup>3</sup>

(1. Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, Henan, China; 2. Henan Vocational and Technical College, Zhengzhou 450046, Henan, China; 3. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

**Abstract:** Influence of Al content on the microstructure, phases, hardness, tensile and impact properties of quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel was studied by using optical microscopy, transmission electron microscopy (TEM), tensile testing machine among other instruments. It is found martensite is formed in the quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel with Al content of 0-0.6% (mass fraction, the same below), while martensite plus  $\delta$  ferrite are formed in the quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel with Al content of 1.2%-1.8%. Without adding Al or with an addition of 0.3%-1.8% Al, 4Cr5MoVSi die steel after quench and tempering has  $\alpha$ -Fe and  $M_7C_3$  formed as its main phases. The 4Cr5MoVSi die steel with an Al content of 0.3%-1.2% has its relatively small variation in its hardness after quenching and tempering; however, with Al content up to 1.8%, the quenched and tempered die steel has its hardness significantly reduced. It is concluded that an appropriate addition of Al is beneficial to improvement in the room-temperature tensile strength, elongation at break, and impact toughness of quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel; with an addition of 1.2% Al, the quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel can have higher hardness, strength, and impact toughness.

**Key words:** 4Cr5MoVSi; die steel; Al alloying; quenching and tempering; microstructure; mechanical property

4Cr5MoVSi 模具钢作为一种热作模具钢,具有优异的淬透性、高温强度和耐磨性,广泛应用于压铸模、热锻模等领域<sup>[1]</sup>。然而,随着现代制造业对模具性能要求的不断提高,传统 4Cr5MoVSi 模具钢在硬度、强度和热疲劳性能等方面已难以满足日益严苛的工况需

求<sup>[2-4]</sup>,需要进一步通过成分设计、热处理工艺优化等手段提升其综合性能<sup>[5]</sup>。近年来,铝 (Al) 合金化作为一种有效的强韧化手段,在钢铁材料领域受到广泛关注,已有研究结果表明,添加适量 Al 元素可以细化晶粒、提高淬透性、改善高温强度和抗氧化性能<sup>[6]</sup>。然

① 收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 河南省科技攻关项目(22102310255)

作者简介: 刘校培(1983—),男,河南平顶山人,讲师,主要研究方向为机械工程材料。E-mail: xiaopei83@163.com

而,关于 Al 对 4Cr5MoVSi 模具钢组织与性能影响方面的研究仍相对匮乏,如 4Cr5MoVSi 模具钢中 Al 的适宜添加量,Al 对 4Cr5MoVSi 模具钢微观组织演变以及强度、韧性、耐磨性、热疲劳性能等方面的影响机制仍需进一步探究<sup>[7-9]</sup>。针对上述问题,本文通过在 4Cr5MoVSi 模具钢中添加不同含量 Al 元素,考察 Al 含量对淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢微观组织、硬度、拉伸和冲击性能的影响,探求适宜的 Al 添加量并探讨其作用机理,以期为开发高性能 Al 合金化 4Cr5MoVSi 模具钢提供理论指导和技术支持。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验材料包括商用 4Cr5MoVSi 模具钢和高纯 Al 锭(质量分数 99.94%),采用砂型铸造的方法<sup>[10]</sup>浇铸制备不同 Al 含量(0、0.3%、0.6%、1.2%和 1.8%,质量分数,下同)的 4Cr5MoVSi 模具钢。预先将原材料经过清洗、除油和烘干后置于中频感应炉中进行熔化,根据各元素烧损情况调整原料添加量,出炉前进行扒渣和脱氧处理,出炉温度为 1 585 ℃,浇铸温度为 1 540 ℃,浇铸完成后空冷至室温。不同 Al 含量 4Cr5MoVSi 模具钢的实测化学成分如表 1 所示。

表 1 不同 Al 含量的 4Cr5MoVSi 模具钢的  
实测化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 4Cr5MoVSi die steel  
with different Al content %

Al	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N	Fe
0	0.56	0.92	0.78	0.010	0.004	5.33	1.12	0.83	0.003	余量
0.3	0.56	0.89	0.80	0.009	0.004	5.26	1.15	0.79	0.002	余量
0.6	0.56	0.91	0.81	0.011	0.003	5.42	1.09	0.80	0.002	余量
1.2	0.56	0.90	0.79	0.010	0.005	5.36	1.13	0.81	0.002	余量
1.8	0.56	0.93	0.80	0.009	0.004	5.41	1.15	0.83	0.003	余量

### 1.2 模具钢的热处理

将不同 Al 含量的 4Cr5MoVSi 模具钢铸锭加工成长×宽×高为 150 mm×50 mm×30 mm 的试件,置于 ZMF-1700C 型真空箱式炉中进行退火、淬火与回火热处理。预先将模具钢进行等温球化退火处理:随炉升温至 870 ℃,保温 2 h 后随炉冷却至 750 ℃,保温 5 h,随炉冷却至 510 ℃后空冷至室温;然后重新置于箱式炉中进行 870 ℃/15 min 预热+1 050 ℃/30 min 淬火处理,油冷至室温后进行 525 ℃/2 h 的回火热处理,空冷至室温。

### 1.3 测试方法

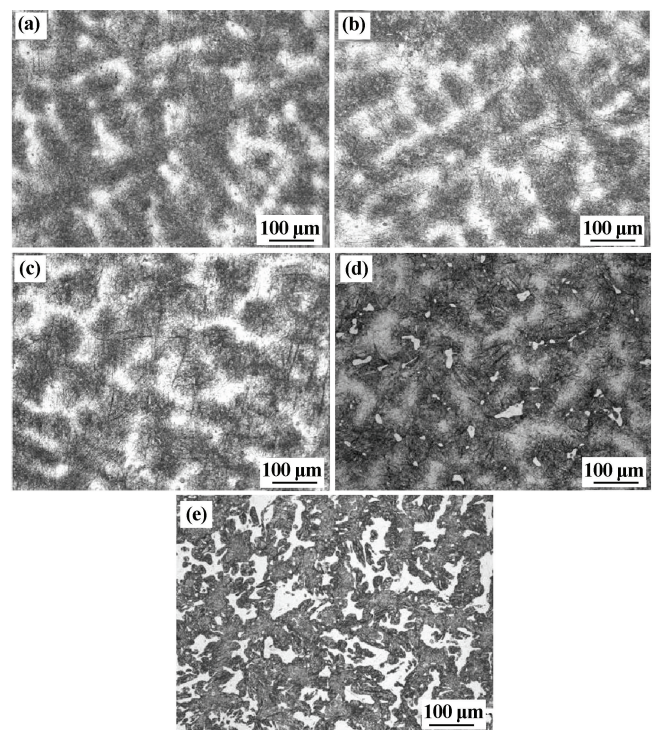
金相试样经过切割、打磨、抛光和腐蚀后,分别采

用蔡司 Axio Imager 2 型金相显微镜和 S-4800 型扫描电子显微镜观察其显微组织;采用 Smartlab SE 型 X 射线衍射仪分析其物相组成;透射电镜试样经过切块、手工打磨(70 μm)、冲压、双喷离子减薄后,在日立 HT7800 透射电子显微镜上观察其微观结构;在 Rockwell<sup>®</sup> 2000 型洛氏硬度计上测试硬度,载荷 50 g,保持载荷时间设定为 15 s,取 3 点平均值作为结果;采用 INSTRON 5500 型拉伸试验机进行室温拉伸性能试验,拉伸速率为 1 mm/min,5 根试样去掉最大值和最小值后取平均值作为结果;在 HIT450P 型摆锤冲击试验机上进行无缺口(10 mm×10 mm×55 mm)室温冲击性能试验,取 3 根试样平均值作为结果。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 显微组织和物相组成

图 1 为不同 Al 含量淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的扫描电镜显微形貌。Al 含量 0、0.3%和 0.6%时,淬回火态模具钢的显微组织较为相似,主要由亮白色马氏体(合金元素含量较高)和黑灰色马氏体(合金元素含量较低)组成;Al 含量增至 1.2%时,淬回火态模具钢中除马氏体组织外,还新出现了块状/颗粒状 δ 铁素体;继续增加 Al 含量至 1.8%时,淬回火态模具钢中 δ



(a) 0; (b) 0.3%; (c) 0.6%; (d) 1.2%; (e) 1.8%

图 1 不同 Al 含量淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的  
光学显微形貌

Fig.1 Optical microstructures of quenched and tempered  
4Cr5MoVSi die steel with different Al content

铁素体尺寸和体积分数(32.6%)进一步增大。能谱分析结果表明,这些形状不规则的白色 δ 铁素体富 Al、贫 Cr,由于其具有高温稳定性,在淬回火热处理过程中无法消除而残留在模具钢基体中<sup>[11]</sup>。

图 2 为不同 Al 含量淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的 X 射线衍射图谱。对比分析可知,Al 含量 0~1.8% 的模具钢主要由 α-Fe 和 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 相组成。可见,Al 的添加并没有改变淬回火态模具钢的物相组成。

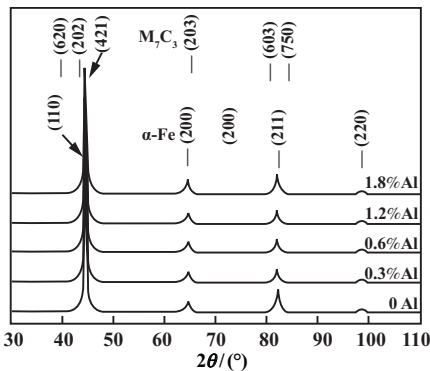
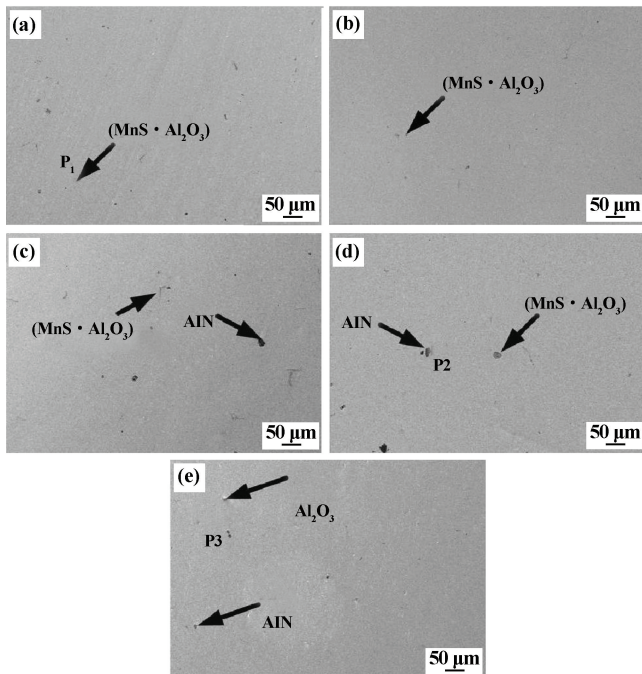


图 2 不同 Al 含量的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的 XRD 图谱  
Fig. 2 XRD patterns of quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel with different Al content

图 3 为不同 Al 含量淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢中夹杂物的扫描电镜显微形貌。在未添加 Al 元素的



(a) 0; (b) 0.3%; (c) 0.6%; (d) 1.2%; (e) 1.8%

图 3 不同 Al 含量的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢中夹杂物的扫描电镜显微形貌

Fig. 3 SEM images of inclusions in quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel with different Al content

淬回火态模具钢的基体组织中可见条带状灰色夹杂物,能谱分析结果表明这些夹杂物主要含 Mn、S、Al 和 O 元素,结合文献 [12] 可知,这些夹杂物主要为 MnS·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;加入 0.3%Al 后,淬回火态模具钢中灰色夹杂物数量减少,能谱分析结果与未添加 Al 时相似,夹杂物主要为 MnS·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;加入 0.6%Al 后,淬回火态模具钢中灰色 MnS·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物数量进一步减少,同时可见黑灰色颗粒状 AlN 夹杂;Al 含量增至 1.2%时,淬回火态模具钢中夹杂物数量明显减少,夹杂物类型不变;Al 含量增至 1.8%时,淬回火态模具钢中可见颗粒状 AlN 夹杂和类球形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂,而 MnS·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂基本消失。可见,随着 Al 含量增加,模具钢中夹杂物逐渐从条带状 MnS·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物演变为 AlN 夹杂和类球形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂,含 Al 模具钢中夹杂物数量明显较未添加 Al 模具钢更少。

### 2.2 力学性能

表 2 为不同 Al 含量 4Cr5MoVSi 模具钢的洛氏硬度、拉伸性能和冲击性能测试结果。

表 2 不同 Al 含量 4Cr5MoVSi 模具钢的洛氏硬度、拉伸性能和冲击性能

Table 2 Rockwell hardness, tensile and impact properties of quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel with different Al content

Al 含量/%	硬度(HRC)		抗拉强度/ MPa	断后 伸长率/%	冲击韧性/ (J·cm <sup>-2</sup> )
	淬火态	淬回火态			
0	64.2	61.8	976	1.8	7.2
0.3	63.5	62.3	1 012	2.7	8.6
0.6	63.1	62.4	1 092	3.1	9.3
1.2	62.4	62.1	1 314	5.6	10.5
1.8	53.8	54.3	844	2.1	6.9

由表 2 可知:

1) 未添加 Al 元素的淬火态和淬回火态模具钢的硬度分别为 64.2HRC 和 61.8HRC;Al 含量从 0.3% 增至 1.2%时,淬火态和淬回火态模具钢的硬度变化幅度较小,Al 元素含量增至 1.8%时,淬火态和淬回火态模具钢的硬度显著减小。这主要是因为模具钢中添加过量(1.8%)的 Al 会在模具钢中形成大量的具有高温稳定性的 δ 铁素体<sup>[13]</sup>,在淬火与回火热处理过程中,这种 δ 铁素体难以消除并保留下来影响最终的力学性能(硬度、拉伸性能和冲击性能)<sup>[14]</sup>。

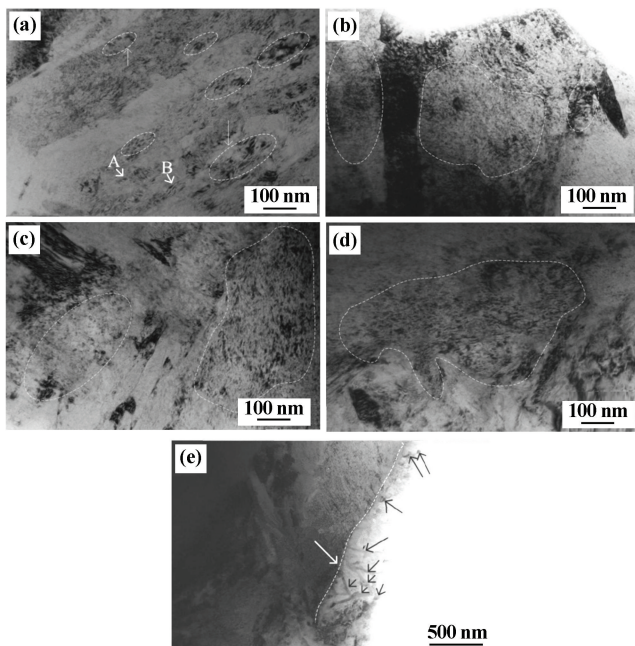
2) 未添加 Al 的模具钢抗拉强度和断后伸长率分别为 976 MPa 和 1.8%;添加不同含量 Al 后,含 Al 模具钢的抗拉强度和断后伸长率均随着 Al 含量增加而先增后减,在 Al 元素含量 1.2% 时取得抗拉强度和断

后伸长率最大值;继续增加 Al 含量至 1.8%,模具钢的抗拉强度和断后伸长率明显减小。可见,加入 Al 可以一定程度提升淬回火态模具钢的抗拉强度和断后伸长率,但并不是 Al 含量越高越好,适宜的 Al 含量为 1.2%。

3) 随着 Al 含量增加,含 Al 模具钢的冲击韧性先增加后减小,Al 含量 1.2%时模具钢取得冲击韧性最大值( $10.5 \text{ J/cm}^2$ )。

### 2.3 分析与讨论

图 4 为不同 Al 含量淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的透射电镜微观结构。未添加 Al 的淬回火态模具钢的组织中可见板条马氏体、细小颗粒状和长条状碳化物,以及局部团聚状碳化物(碳化物尺寸为  $6\sim 40 \text{ nm}$ ),能谱分析结果表明颗粒状碳化物富 V,而长条状碳化物为  $\text{M}_3\text{C}$  型碳化物;加入 0.3% Al 后,模具钢中颗粒状碳化物数量明显增多、尺寸有所减小,而长条状  $\text{M}_3\text{C}$  型碳化物减少;继续增加 Al 含量至 1.2%时,模具钢中颗粒状碳化物数量进一步增多、尺寸有所减小;当 Al 含量增至 1.8%时,模具钢的马氏体/铁素体界面处出现了较多的长条状  $\text{M}_3\text{C}$  型碳化物,而细小二次碳化物数量明显减少,这主要是因为  $\text{M}_3\text{C}$  型碳化物的形成消耗了基体组织中以固溶形式存在的 C、Mo、V 等元素<sup>[15-16]</sup>。



(a) 0; (b) 0.3%; (c) 0.6%; (d) 1.2%; (e) 1.8%

图 4 不同 Al 含量淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的透射电镜微观结构

Fig.4 TEM images of quenched and tempered 4Cr5MoVSi die steel with different Al content

由上述试验结果可知,未添加 Al 的淬回火态模具

钢中存在尺寸  $6\sim 40 \text{ nm}$  的颗粒状和长条状碳化物;加入 0.3%~1.2% Al 的淬回火态模具钢中存在大量尺寸细小、均匀分布的颗粒状富 V 碳化物;而 Al 含量达到 1.8%时淬回火态模具钢中出现了较多的长条状  $\text{M}_3\text{C}$  型碳化物,细小二次碳化物数量明显减少。由此可见,Al 的加入可以改善淬回火态模具钢中二次碳化物析出,加入 0.3%~1.2% Al 的淬回火态模具钢中的析出强化效果相对更好<sup>[17]</sup>,这主要是因为加入适量的 Al 可以降低 C 在奥氏体中的扩散速度并抑制热处理冷却过程中碳化物的长大和聚集<sup>[18-19]</sup>,使碳化物更细小且分布更均匀。此外,Al 含量 0~0.6%的淬回火态模具钢的组织为马氏体,夹杂物数量较多,而 1.2% Al 的淬回火态模具钢的组织中除硬度和强度较高的马氏体外,还存在少量韧性较好的块状/颗粒状  $\delta$  铁素体,夹杂物数量较少,因此 1.2% Al 的淬回火态模具钢同时具有较高的拉伸强度、断后伸长率和冲击韧性<sup>[20]</sup>;如果 Al 含量过量(1.8%),大量形状不规则的白色  $\delta$  铁素体的形成,以及铁素体/马氏体界面处粗大的长条状  $\text{M}_3\text{C}$  型碳化物的出现,会显著降低淬回火态模具钢的硬度和强度。整体而言,Al 含量 1.2%时,淬回火态模具钢具有较高的硬度、抗拉强度和冲击韧性。

### 3 结论

1) 0~0.6% Al 的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的组织为马氏体,1.2%~1.8% Al 的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的组织为马氏体+ $\delta$  铁素体,1.8% Al 的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢中形状不规则的  $\delta$  铁素体体积分数进一步增大,达到 32.6%。

2) 0~1.8% Al 的淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的物相主要为  $\alpha$ -Fe 和  $\text{M}_7\text{C}_3$  相,Al 的添加并没有改变淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的物相组成。当 Al 含量从 0.3%增至 1.2%时,淬回火态和淬回火态模具钢的硬度变化幅度较小,而当 Al 含量增至 1.8%时,淬回火态和淬回火态模具钢的硬度显著减小。

3) 添加 Al 可以一定程度上提升淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢的抗拉强度和断后伸长率,且随着 Al 含量增加,4Cr5MoVSi 模具钢的冲击韧性先增加后减小,Al 含量 1.2%时淬回火态 4Cr5MoVSi 模具钢具有较高的硬度、抗拉强度和冲击韧性。

### 参考文献(References):

- [1] 樊明强,赵英利,王超,等. 国内热锻模具钢的发展现状[J]. 河北冶金, 2024(5): 9-13.  
FAN Mingqiang, ZHAO Yingli, WANG Chao, et al. The development status of hot forging die steel in China [J]. Hebei Metallurgy,

- 2024(5):9-13.
- [2] 姚宏康,曹立军,冯明明. H13 钢铝型材挤压模桥裂分析及解决方法[J]. 模具制造, 2021,21(9):82-84.  
YAO Hongkang, CAO Lijun, FENG Mingming. Analysis and solution of bridge crack of H13 steel aluminum extruding die[J]. Die & Mould Manufacture, 2021,21(9):82-84.
- [3] 陈浩炜,李吉航,战东平,等. 冷作模具钢中碳化物控制技术的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2024,36(7):827-843.  
CHEN Haowei, LI Jihang, ZHAN Dongping, et al. Research progress of carbide control technology in cold work die steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024,36(7):827-843.
- [4] LONG Q, GAO X, ZENG J, et al. Effect of Al on the properties and structure of 7CrSiMnMoV die steel[J]. JOM, 2025, 77(3): 1620-1632.
- [5] 毛宏,吴红庆,涂宇杰,等. 热处理工艺对3种不同Cr系冷作模具钢热处理变形的影响[J]. 材料热处理学报, 2024,45(8):154-163.  
MAO Hong, WU Hongqing, TU Yujie, et al. Effect of heat treatment process on heat treatment deformation of three different Cr series cold working die steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024,45(8):154-163.
- [6] ÁVILA B N, SATO B K, RIBEIRO F S F, et al. Grinding effect of thermoplastic mold steel using green manufacturing concepts combined with various conventional wheels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(5):2443-2456.
- [7] 王要利,宋克兴,张彦敏,等. 微量钛对4Cr5MoSiV1合金钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021,42(3):112-119.  
WANG Yaoli, SONG Kexing, ZHANG Yanmin, et al. Effect of trace titanium on microstructure and properties of 4Cr5MoSiV1 alloy steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021,42(3):112-119.
- [8] 王永健,张彦敏,王要利,等. 钛微合金化新型模具钢成分设计及组织性能分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019,40(5):1-6.  
WANG Yongjian, ZHANG Yanmin, WANG Yaoli, et al. Composition design and microstructure analysis of titanium microalloyed new die steel[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2019,40(5):1-6.
- [9] 樊译,马党参,迟宏宵,等. 淬回火工艺对N-Mo合金化Cr13型耐蚀塑料模具钢组织与力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2024,48(4):8-14.  
FAN Yi, MA Dangshen, CHI Hongxiao, et al. Effect of quenching and tempering process on microstructure and mechanical properties of N-Mo alloyed Cr13 type corrosion resistant plastic die steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024,48(4):8-14.
- [10] 戴宇恒,满廷慧,李朋,等. 稀土合金化对高碳高合金工模具钢的影响[J]. 材料导报, 2024,38(23):230-237.  
DAI Yuheng, MAN Tinghui, LI Peng, et al. Effect of rare earth alloying on high-carbon high-alloy tool and die steel[J]. Materials Reports, 2024,38(23):230-237.
- [11] 陈蒙,吴日铭. 钒对热作模具钢表面渗碳组织及性能的影响[J]. 模具工业, 2021,47(11):74-78.  
CHEN Meng, WU Riming. Effect of vanadium on surface carburizing structure and properties of hot working die steel[J]. Die & Mould Industry, 2021,47(11):74-78.
- [12] 关海龙,岳建博,田家龙,等. 镍对新型热作模具钢连续冷却转变规律与冲击功的影响[J]. 特殊钢, 2024,45(6):108-116.  
GUAN Hailong, YUE Jianbo, TIAN Jialong, et al. Effect of nickel on continuous cooling transition law and impact energy of new hot work die steel[J]. Special Steel, 2024,45(6):108-116.
- [13] MISHIGDORZHIYN U L, SEMENOV A P, ULAKHANOV N S, et al. Surface alloying of 3Cr2V8F and 5CrNM die steels by means of an electron beam in vacuum with B<sub>4</sub>C and Al treatment pastes[J]. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2022,16(3):408-411.
- [14] 史术华,高擎,钱亚军. 低温回火对低碳马氏体超高强钢组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):174-178.  
SHI Shuhua, GAO Qing, QIAN Yajun. Effect of low-temperature tempering on microstructure and mechanical properties of low-carbon martensitic ultra-high strength steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):174-178.
- [15] 谢官利,迟宏宵,李祖来,等. 回火温度对N合金化耐蚀塑料模具钢组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022,43(3):99-107.  
XIE Guanli, CHI Hongxiao, LI Zulai, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of N-alloyed corrosion-resistant plastic die steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022,43(3):99-107.
- [16] 李敏,姚玉梅,李俊杰,等. 淬火-配分处理对齿轮轴用钢组织性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):170-174.  
LI Min, YAO Yumei, LI Junjie, et al. Effect of quenching and partitioning treatment on microstructure and properties of steel for gear shafts[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):170-174.
- [17] FU J W, WANG J C. Effect of Al content on the thermal conductivity and corrosion resistance of die steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022,31(3):2112-2120.
- [18] 廖婷婷,杨何,刘浩龙,等. 冷作模具钢Cr12在不同热处理工艺下的微观组织与力学性能的研究[J]. 成都工业学院学报, 2024,27(1):1-4.  
LIAO Tingting, YANG He, LIU Haolong, et al. Study on microstructure and mechanical properties of cold working die steel Cr12 under different heat treatment processes[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2024,27(1):1-4.
- [19] 冯贵层,张敬尧. 铸造冷作Cr5Mo1V模具钢的合金化与组织性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2022,42(2):200-204.  
FENG Guiceng, ZHANG Jingyao. Alloying and properties of as-cast cold work Cr5Mo1V die steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022,42(2):200-204.
- [20] LIU Y X, WANG Z G, HU X Q, et al. Effects of Y addition on carbide morphology and impact properties of D2 cold work die steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,33:5040-5051.

引用本文:刘校培,徐慧,李攀,等. 4Cr5MoVSi 模具钢的 Al 合金化与组织性能研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):181-185.

LIU Xiaopei, XU Hui, LI Pan, et al. Al alloying and microstructure properties of 4Cr5MoVSi die steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):181-185.