



热锻模具钢服役行为及性能提升策略研究进展

左鹏鹏¹, 熊宇涵¹, 吴红庆², 关海龙³, 蔡乐飞⁴, 李绍宏⁵

(1 江苏科技大学材料科学与工程学院, 镇江 212100; 2 湖北汽车工业学院材料科学与工程学院, 十堰 442002;

3 江苏宏晟模具钢材料科技有限公司, 无锡 214405; 4 江苏奇锦工模具有限公司, 苏州 215311;

5 昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650500)

摘要:热锻模具钢是金属零部件热锻成形制造用的关键材料, 承受高温、高应力及反复冷热交变循环的苛刻服役条件, 易发生热磨损、热疲劳、塑性变形和蠕变等多种复杂机制耦合的失效行为。因此, 热锻模具钢的服役性能直接关系到锻件质量与生产成本, 亟须全面认知其失效行为演化规律并提出有效的性能提升策略。围绕这一需求, 综述了热锻模具钢服役行为及失效机制的研究进展, 系统梳理了合金成分优化、热处理组织与性能精确调控、表面改性与强化以及纳米颗粒强化基体等四种典型性能提升策略及其作用效果。在此基础上, 总结了多策略协同应用在延长模具寿命和改善服役性能方面的显著潜力和单一强化策略无法全面认识多因素耦合作用下失效行为动态演化规律的不足, 以及面向实际工况的协同强化设计与服役性能预测模型尚不健全的现状。最后, 展望指出未来研究重点应聚焦于各类强化技术的有机协同和人工智能技术在材料设计与性能预测方面的应用, 两者互为支撑, 有望为热锻模具钢在更长寿命、更高可靠性和更优经济性目标下的不断发展提供理论支撑与技术路径。

关键词:热锻模具钢; 服役寿命; 服役行为; 失效机制; 性能提升策略

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260093 中图分类号: TG142. 45

Research Progress on Service Behavior and Performance Improvement Strategies of Hot-forging Die Steel

Zuo Pengpeng¹, Xiong Yuhan¹, Wu Hongqing², Guan Hailong³, Cai Lefei⁴, Li Shaohong⁵

(1 School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2 School of Materials Science and Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China; 3 Jiangsu Hongsheng Mould Steel Material Technology Co., Ltd., Wuxi 214400, China; 4 Jiangsu Qijin Tools and Dies Co., Ltd., Suzhou 215311, China; 5 School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract : Hot-forging die steel is a critical material used in the hot-forging of metal components. It is subjected to harsh service conditions involving high temperatures, high stresses, and repeated thermal cycling, making it prone to failure mechanisms resulting from the coupling of various complex processes, such as thermal wear, thermal fatigue, plastic deformation, and creep. Therefore, the in-service performance of hot-forging die steel directly affects the quality of forgings and production costs, making it imperative to fully understand the evolution of its failure behavior and propose effective strategies for performance enhancement. Addressing this need, this paper reviews research progress on the in-service behavior and failure mechanisms of hot-forging die steels and systematically summarizes four typical performance enhancement strategies—alloy composition optimization, precise control of heat-treated microstructure and properties, surface modification and strengthening, and nanoparticle-reinforced matrix—along with their respective effects. Based on this, the paper summarizes the significant potential of the synergistic application of multiple strategies in extending die life and improving in-service performance; highlights the limitation that a single strengthening strategy cannot fully account for the dynamic evolution of failure behavior under the coupled effects of multiple factors; and notes the current inadequacy of collaborative strengthening design and in-service performance prediction models tailored to actual operating conditions. Finally, the outlook indicates that future research should focus on the organic synergy of various strengthening technologies and the application of artificial intelligence in material design and performance prediction. These two areas mutually reinforce each other and are expected to provide the theoretical foundation and technical pathways for the continuous development of hot-forging die steels toward the goals of longer service life, higher reliability, and greater economic efficiency.

Key Words : Hot-forging Die Steel; Service Life; Service Behavior; Failure Mechanism; Performance Optimization Strategies

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51761022), 2025 年江苏省产学研合作项目 (BY20250409)

作者简介: 左鹏鹏 (1988—), 男, 博士(后), 讲师; E-mail : zpp0513@163.com; 收稿日期: 2026-06-22

通信作者: 李绍宏 (1982—), 男, 博士, 副教授; E-mail : uniquelesh@163.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

热锻因其在工件成型过程中能提高材料力学性能并降低材料损耗等优势,一直被先进制造领域广泛应用^[1-2]。热锻模具作为热金属成型的关键装备,其使用寿命直接影响产品的制造成本和效率。据统计^[2-3],模具成本通常在终端产品的成本构成中占 8%~15%,若加上因换模造成的停机损失则高达 50%。因此,提高热锻模具的使用寿命是降低制造成本和提高产品质量必不可少的重要环节。然而,因热锻模具在严苛服役环境(高温和高载荷接触、周期性的冷热循环等)下受热变形、热磨损和热疲劳等多重服役因素的制约,极易发生多种形式的复杂失效,从而导致服役寿命较低^[1, 4]。热锻模具常见的失效形式主要包括模具表面热磨损(含磨粒磨损、黏着磨损和氧化磨损等)^[1, 3, 5]、热疲劳引起的表面龟裂^[2, 6-7]、周期性高载荷引起的断裂^[8]以及高温下塑性变形^[1, 4, 8-9]等。其中,表面热磨损和热疲劳已成为影响热锻模具服役寿命的关键指标^[5-7]。

近年来,科研人员针对热锻模具服役寿命的改善途径,从材料与工艺技术等方面提出了很多办法,例如:1)通过合金成分设计与优化,电渣重熔技

术提纯,控锻控冷和热处理组织调控方面细化晶粒,从而增加材料硬度和强韧性^[10-11];2)尝试在钢中添加纳米颗粒实现材料基体纳米强化,以提高模具表面性能^[4, 9];3)从工作条件,包括温度、载荷、润滑冷却介质等方面控制热锻模具表面损伤^[3, 10];4)采用表面改性技术在模具钢表面制备一层强化涂层^[6, 12],增加抗热磨损和耐冷热疲劳性能。此外,通过大量失效分析发现,基于热锻模具服役过程的数值模拟与仿真分析,可以可视化探讨其失效原因,并给出合理的改善措施^[2, 6, 8]。

综述了热锻模具钢在多变恶劣工况下的服役行为、失效机制和性能提升策略,内容涵盖热锻模具钢磨损行为、热疲劳行为、塑性变形与蠕变行为等,并对关键服役行为中的失效机制进行了探讨,针对不同失效形式或服役行为提出了合理的改善措施。最后,对现有研究进展和不足进行了总结,并对未来研究方向和技术发展提出了展望。

1 热锻模具钢服役行为及失效机制

热锻模具钢的服役行为及主要失效形式如图 1 所示,包括如下三种:表面热磨损行为(包括磨粒磨

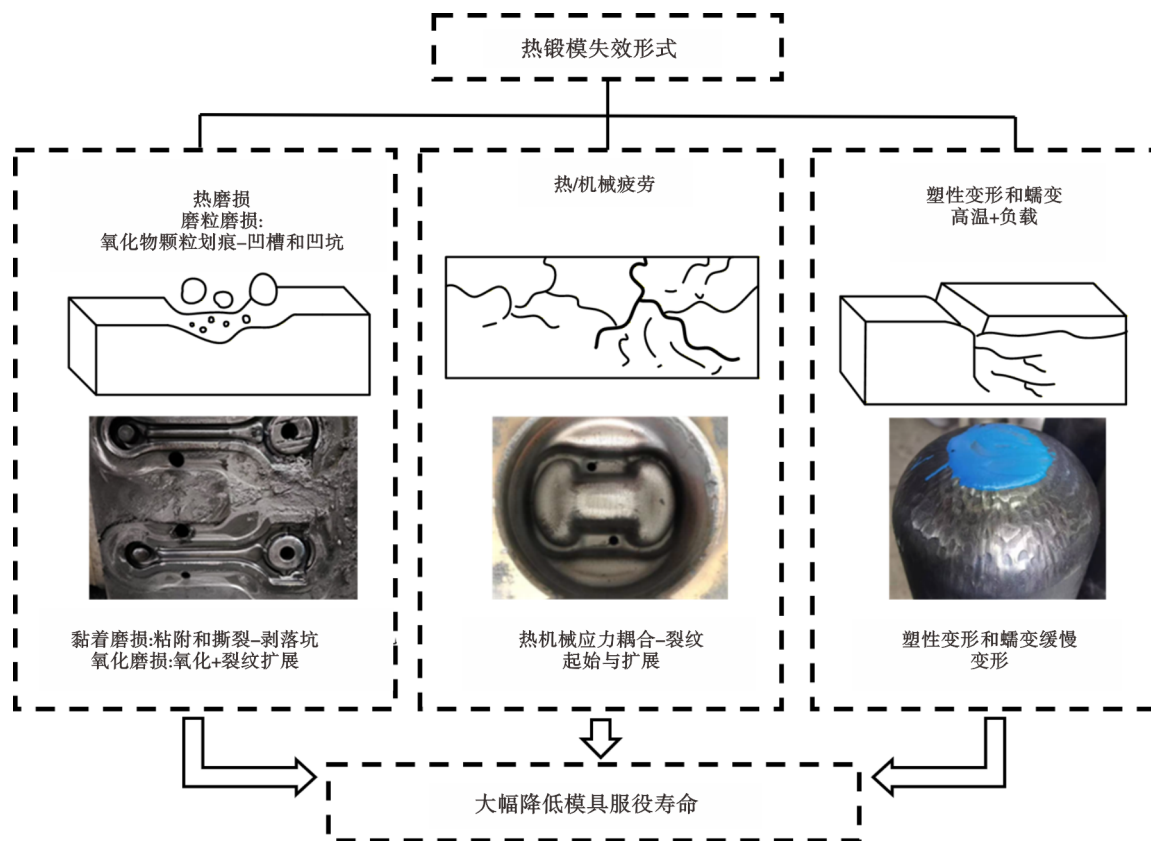


图 1 热锻模具钢服役行为及失效机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of service behavior and failure mechanisms of hot-forging die steels

损、黏着磨损、氧化磨损等失效形式)、热疲劳行为(包括由应力、材料缺陷及工艺不当、热/机械疲劳等引起的热龟裂失效形式)和塑性变形与蠕变行为(包括坍塌、挤出和挤入等失效形式)。下面针对热锻模具钢的三种服役行为和失效形式,通过国内外文献调研,具体阐述其失效机制^[1, 8, 10]。

1.1 热磨损行为

热磨损行为是导致热锻模具失效的主要形式之一,并且通常是与热疲劳共同作用引起模具失效。在热锻过程中,模具型腔与高温锻坯发生强烈的摩擦,造成型腔表面材料损耗和尺寸轮廓磨损失效。按磨损破坏机理不同,可分为磨粒磨损、黏着磨损和氧化磨损等,各类磨损模型的示意图如图2所示^[13]。

磨粒磨损是最根本的失效形式。氧化皮等硬度较高的碎屑和氧化物作为磨粒,将材料磨掉并在模具表面造成犁沟,形成摩擦痕迹。锻造时,如果坯料表面的氧化物、碎屑未被清理干净就进入型腔,容易造成磨料作用的加剧,锻造模具表面上容易产生明显的一道道沟槽^[3, 5, 12]。

黏着磨损通常出现在模具和工件材料之间,形成局部粘连或撕裂的特征。坯料在温度和载荷增加到一定程度时,可能在模具表面形成局部粘连,后续在脱模或下次冲击时将模具表层刮下来一层材料,这种先黏着后撕裂的粘连不断发生,模具表面就会留下一些坑坑洼洼的磨损失效区域,尤其是模具表面不够耐磨,或者润滑不好时,黏着磨损格外突出^[14]。

氧化磨损是在模具反复受热过程中,表面金属被氧化生成氧化物,然后在摩擦应力作用下剥落的

一种磨损形式。热锻模具服役时,表面温度至少可达500~700℃,使模具的表面迅速氧化,生成的氧化皮一方面较脆易开裂剥落,另一方面本身也变成磨料颗粒,加剧对下层基体的磨粒磨损。因此,氧化磨损常被看作磨粒磨损和热疲劳的协同作用结果^[15]。

热锻模具在服役中经常表现出多机制耦合磨损^[16-17],数值仿真研究发现^[18-19]热/机械疲劳诱发的开裂及氧化颗粒的强烈流动会显著加速磨粒磨损,而最大磨损通常出现在型腔面温度较高的区域,约为其他区域的10倍。在模具型腔上的不同区域内,黏着磨损是主要的磨损机制,但在一些温度较高区域中,氧化磨损则占主要地位。根据工程上失效的热锻模不同区域的磨损量和表面形貌的不完全统计可知,不同区域的磨损机制有所不同,比如磨粒磨损在有些区域约占90%,而在其他区域则仅占20%,反而以热疲劳导致的剥落磨损为主。尤其是经表面渗氮强化和充分润滑冷却的模具中,磨粒磨损量很少,取而代之的是由反复产生的热应力引发的表面疲劳龟裂后形成的剥落磨损。这就表明材料强度和加工工艺控制削弱了某种磨损机制之后,其他的磨损机制就可能表现出来。因而对于热锻模具的磨损,需要考虑热、力及环境的叠加作用。

1.2 热疲劳行为

热锻模具服役过程中由于不断地交替加热与冷却,发生周期性冷热循环而产生的热龟裂失效现象称为冷热循环疲劳(又称热疲劳)。热锻模具在工作过程中,表面直接与高温锻坯接触,导致表面温度升高而膨胀,模具内部在较低的温度下限制表层的膨胀,而在喷淋冷却润滑液时则相反,这种反

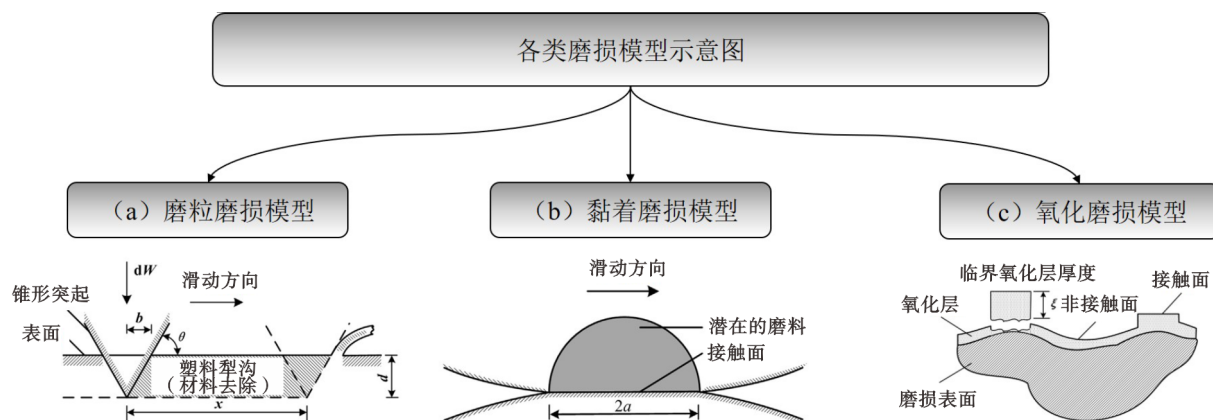


图2 热锻模具钢各类磨损模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of various wear models of hot-forging die steel

复的冷热循环产生的应力,使模壁表层不断地处于压应力和拉应力作用之下,循环往复产生表层累积弹塑性变形,从而形成热疲劳裂纹(又称热龟裂)。一般认为热疲劳损伤最明显的反馈之一是对材料回火稳定性的降低和表层硬度的逐渐减小。模具在长时间冷热循环的使用过程中,模具钢表面发生逐渐软化和硬度降低,甚至出现内部组织的变化,如马氏体板条宽化、位错湮灭、碳化物粗化、第二相颗粒溶解等。热疲劳裂纹通常是在表面萌生,并不断向内扩展,最终形成网状的龟裂纹形态。此外,热裂纹的产生与冷热循环产生的应力、表面微观缺陷和高温氧化都有很大关系,尤其是热裂纹尖端不断在高温下氧化,氧化物的存在加速了热裂纹的进一步扩展。

国内外研究者针对热疲劳机制和性能提升进行了大量研究。比如:周虎等^[20]在 H13 热锻模具钢表面采用激光熔覆制备 Stellite6 及 Y_2O_3 /Stellite6 复合涂层,结果表明复合涂层在 400 ~ 800 °C 热疲劳条件下显著提升了模具钢的抗热疲劳、热稳定性和抗高温氧化性能,并有效减缓了硬度衰减。姚亮等^[21]基于有限元与损伤力学相结合的方法,构建了热锻模具钢多层金属熔覆涂层在循环热载荷下的热-力耦合疲劳寿命预测模型。这些研究都为提升热锻模具钢服役寿命与工程应用可靠性提供了理论依据。

1.3 塑性变形与蠕变行为

塑性变形是指模具服役时载荷过大造成的永久变形,分为宏观变形(如型腔塌陷、形位尺寸超差等)以及微观变形(组织回复、蠕变等)。模具在热锻生产中,尤其在坯料充填模腔时,受到较大锻压应力作用,如果模具材料强度不能抵抗该应力,则造成塑性变形,模具型腔部分下陷或膨胀,造成制件尺寸精度下降。这种失效情况大多发生在模具使用初期及中期,常出现型腔棱边圆角处被压溃、模膛变浅等失效现象,称为“塌陷”或“塌模”。模具表面过早发生塌陷变形,一般认为由于模具钢强度和硬度偏低造成在服役温度条件下出现屈服,提高材料淬硬强度后,可明显降低塌陷失效^[1, 9, 11]。由此可见,材料在服役温度下的屈服强度对抵抗塑性变形失效具有重要的影响。热锻模具的塑性变形一般与模具型腔温度有关,随着模具型腔温度升高,材料的屈服强度和硬度会显著下降,即热软化现象,当模具型腔出现反复加热时,其表层发生回火

现象,模具材料流动应力有所下降。因此,当模具处于高温和高应力状态下,其模腔某一局部部位有可能会呈现局部屈服而变形。

蠕变行为,是指材料在恒定温度下施加一定应力,从而发生缓慢塑性变形的过程。实际使用的热锻模具虽然不像高温蠕变构件一样,连续施加应力,但频繁的循环中,若某区域高温、高应力工况出现累积,也会产生蠕变效应。例如:每次热循环期间高温和高应力工况会作用在模具的型腔表层材料上,尽管每次作用时间很短,但数千次的循环等效一个蠕变时效。蠕变会导致模具尺寸逐渐变化,同时在内部产生晶格滑移及亚结构的形成,影响材料的后续承载能力^[22]。此外,热疲劳和蠕变也经常协同作用,形成疲劳-蠕变损伤,加速模具的失效。

模具发生塑性变形和蠕变行为往往受服役过程中的工艺参数影响。Ibrahim 等^[23]通过有限元模拟仿真研究表明,使役温度升高会导致模具硬度下降并出现热软化,下模的硬度损失大于上模,最终两者均发生塑性变形。Emamveridian 等^[24]的数值仿真表明,材料损失受滑动距离、接触时间、压力/应力与温度等因素共同控制,且几何形状也会改变这些参数的分布。总之,如果热锻模具处于关键位置,特别是在恒温锻造或加热保温阶段较长的工况下,还是应该考虑蠕变对模具精度与开裂失效影响的,否则将严重影响模具精度与使用寿命,为了避免模具塑性变形导致模具塌陷失效,应该从材料上以及模具制造的工艺上去考虑。一方面是采用高温强度较高的材料或加工状态,例如使用二次硬化型热作模具钢(W 和 Mo 含量高的钢种),在锻造温度下其抗软化能力较强,则抗塌陷性良好。另一方面是控制热锻模的加工参数以避免高应力和高温,例如坯件加热温度不宜过高,避免高冲击锻压及高摩擦等,以降低模具峰值应力,或在模具塑性变形量大的地方(如凸模端部)预留补偿或增加尺寸以抵消塑性变形。塑性变形缺陷情况严重时也可对塌陷模具进行修复和消除变形后继续使用,但是修复数量有限,多次塌陷往往意味着模具钢本身已疲劳损伤严重。总体来说,增强模具高温强度和合理控制塑性变形是预防塑性变形失效的主要措施。

2 热锻模钢性能提升策略

图 3 展示了热锻模具钢核心性能指标^[25],对于热锻模具钢来说,首先要求较高的硬度及红硬性,保证其在服役过程中不会发生变形,高强度能保证

模具钢具有足够的抵抗塑性变形的能力,而高韧性能够降低钢在服役过程中模具的开裂。其次,模具钢在服役过程中会受到长期反复冷热循环的作用,使模具钢内部形成热交变应力,在反复的热交变应力下,容易产生裂纹,造成热疲劳开裂。因此,要求热锻模具钢具有良好的耐热疲劳性能和热稳定性。同时,热锻模具服役过程中极易发生高温摩擦磨损,大幅降低使用寿命。因此,热锻模具钢还须具备耐高温摩擦磨损性能。除上述各项性能之外,热锻模具钢的高淬透性保证锻模整个截面获得均匀和稳定的力学性能,而良好的导热性便于热量尽快散出,避免模腔表面温度过高降低硬度和强度。

综上所述,提高热锻模具钢的热稳定性、高温强度、高温韧性、耐热疲劳和耐热磨损等核心性能是提升其使用寿命的关键,但目前的强化方法难以在满足经济性的前提下显著提高材料的综合性能。因此,迫切需要开发新的合金体系、热处理工艺或表面强化技术等,以显著提高模具钢的使用性能,从而改善热锻模具钢的失效行为。下面将重点阐述热锻模具钢性能提升的四个策略。

2.1 合金成分优化设计

热锻模具钢作为热作模具钢的一种,其性能主要取决于合金成分、冶金纯净度以及热处理过程中微观组织的演变。经过40余年热作模具钢国产化攻关,国内已形成普通精炼、电渣重熔(ESR)、真空自耗(VAR)、真空感应熔炼(VIM)+VAR 双联等不

同纯净度等级冶炼技术。其中,热锻模具钢一般只需要普通精炼或电渣重熔即可满足服役纯净度要求,比如:国产普通精炼5CrNiMo钢纯净度完全满足中小锤锻模;国产电渣H13和3Cr2W8V钢可完全替代进口,已成为量大面广的热锻模具钢。表1列出了热作模具钢中主要合金元素的作用机理和对组织与性能的影响。向热锻模具钢中添加一些特定的合金元素,可以有效地改善热锻模具钢显微组织、提高表面硬度、强化热稳定性,大幅度提高模具服役寿命、降低磨损速率。一般来说,通过优化合金元素(C、Cr、Mo、V、Mn、Si等)的含量,可以提高热作模具钢的综合性能。比如:降低热作模具钢中Cr的含量,会析出更少的 $M_{23}C_6$ 型碳化物,从而提高钢的热稳定及抗热疲劳性能^[26];提高Mo含量可促进 $M_{23}C_6$ 向 M_6C 转变,抑制 $M_{23}C_6$ 的形核与长大,提高钢的强度及热稳定性^[27];增加V含量则会使钢液凝固过程中产生较多的共晶碳化物,导致材料韧性显著降低;Si对增加残余奥氏体的数量和稳定性具有显著作用^[28];Ni被广泛用于提高淬透性和抑制晶间析出物,从而提高韧性^[29];W元素的加入可以有效地提高钢的红硬性及冲击韧性^[30]。此外,C是钢中重要的元素,含量过高会降低韧性、塑性和导热性;过低则无法保证必要的强度,合适的C含量可以保证钢的强度和硬度,同时避免在高温下韧性不足。

近年来,随着热锻模具向着高精密、高性能和长寿命方向发展,国内外学者在当前量大面广的铬系中合金热锻模具钢基础上,利用合金成分优化设

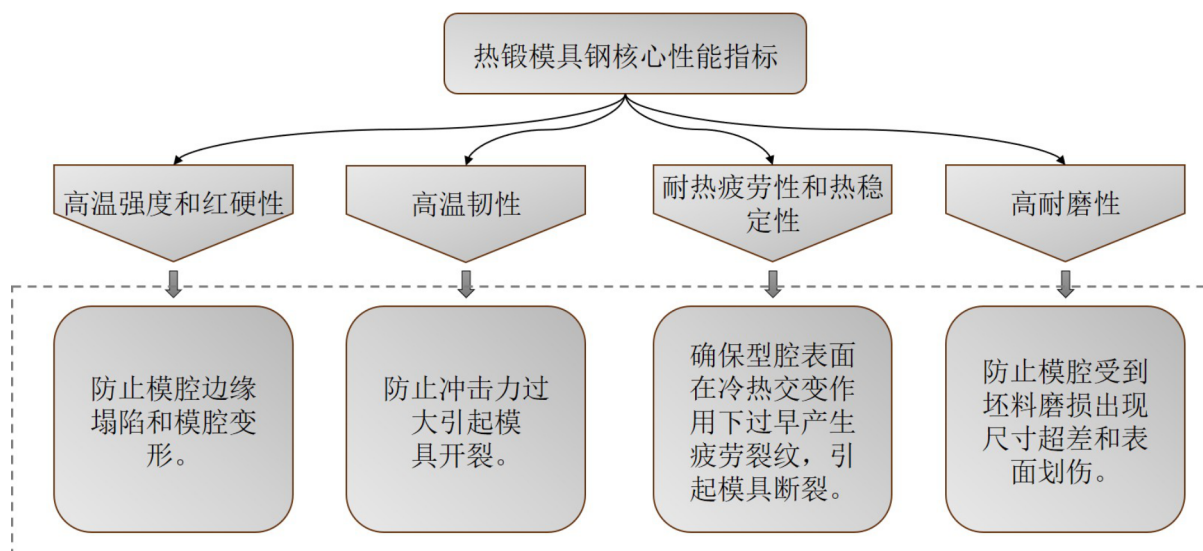


图3 热锻模具钢核心性能指标

Fig. 3 Key performance indicators of hot-forging die steel

表 1 热作模具钢中主要元素作用机理及对组织和性能的影响

Table 1 Functional mechanisms of major elements in hot work die steel and their effects on microstructure and properties			
元素	作用机理	对组织和性能的影响	参考文献
C	形成固溶体和碳化物	提高硬度、强度及耐磨性;含量过高会降低韧性	[31]
Cr	普遍存在于模具钢中,形成 $M_{23}C_6$ 碳化物	含量过高会增加碳化物偏析和粗化倾向,降低热疲劳性能	[32]
Mo	在回火时析出碳化物,产生二次硬化	显著提升高温强度	[27, 33]
V	形成高硬度、高稳定性的 VC 碳化物,产生二次硬化	细化晶粒和组织,提高热稳定性	[34-35]
Mn	降低马氏体转变温度,形成少量残余奥氏体	提高强度、硬度和淬硬性,而不太损害塑性和韧性	[36]
Si	固溶于铁素体	提高强度、硬度和热稳定性	[28]

计开发了几种改进型热作模具钢,见表 2。Di 等^[37]在 H13 钢的基础上降低 Si 和 V 元素的含量,开发了一种新型 Cr5 系热作模具钢,改善了钢的热稳定性和抗热疲劳性能;Li 等^[26]在 H11 钢的基础上减少了 Cr、Mo 和 V 含量,优化了 Si/Mn 比,同时加入 Nb 和 Ni,开发了一种新型 Cr3 系热作模具钢,提高了模具钢的热稳定性和冲击韧性;Ding 等^[38]在 H13 钢的基础上降低 Cr 含量,增加 W 和 Mo 含量,提高了模具钢的强度和热稳定性。除此之外,采用 N 元素替换热作模具钢中的 C 元素已成为提高模具钢使用寿命的合金化新思路。N 作为一种气体合金元素,添加到模具钢中有助于提高硬度和韧性,同时可以提高热稳定性。Gu 等^[39]在 Dievar 钢的基础上进行微量的 N 合金化,发现加入微量 N 后,热作模具钢在不同回火温度下的强度和韧性均有所提高,在回火温度为 600 ℃时综合性能最高,微量 N 的加入促进了 V (C, N) 的形成,提高了析出物的熔点和稳定性。微量 N 合金化主要的强化机制是晶粒细化和析出强化。Wang 等^[40]在 H13 钢的基础上,以 N 代 C,适量添加 Mo,适当减 V 和 Si,开发了一种新型高氮热作模具钢 3Cr5Mo2SiVN,与硬度相近的 H13 相比,3Cr5Mo2SiVN 钢的冲击功和延伸率分别提高了 50% 和 13%。

合金优化设计促进了热锻模具钢的组织 and 性能的改善,主要是通过形成具有良好热稳定性的高硬度相、细化晶粒和获得抗氧化性的相等方式实现。通过增强材料的高温硬度、强韧性、热稳定性、

抗氧化性等使热锻模具的热疲劳性能得到全面改善和提高,从而使热锻模具钢具有更好的高温服役疲劳寿命。Mo、W、Cr、V、Ti 和 Nb 等是热锻模具钢抗塑性变形性能改善过程中常添加的典型合金元素,这些合金元素的优化大幅度提高了热锻模具钢的抗塑性变形能力。因此,未来热锻模具钢合金化发展的方向将继续趋向于精炼、多元素协同化、结构细化与调控等方面。

2. 2 热处理组织与性能精准调控

热处理工艺不当容易导致热锻模具失效,开展热处理工艺优化研究,实现微观组织的精准调控,是提升热锻模具钢寿命的核心途径。热处理工艺可分为整体热处理及表面处理两大类,其中整体热处理对模具钢最为重要,整体热处理工艺主要包括预备热处理(退火)与最终热处理(淬火+回火),该工艺关键在于控制加热温度,保温时间及冷却方式,从而调控模具钢至最佳服役性能。以常用的热锻模具钢 H13 为例,如图 4 所示^[38, 42-43],从球化退火态均匀弥散分布的细小碳化物,到奥氏体化过程中碳化物的部分溶解,再经淬火形成高硬度马氏体,最后通过多次回火获得稳定的回火马氏体和弥散析出的二次碳化物,各阶段组织的演变直接决定了材料的硬度、强度、韧性、耐磨性及热疲劳性能。合理控制奥氏体化温度、淬火冷却速度以及回火温度和次数,可实现碳化物形态、尺寸及分布的精确调控,促进组织均匀化,降低残余应力,提高组织稳定性和服役可靠性。因此,建立热处理工艺—组织演

表 2 国内外典型的改进型热锻模具钢

Table 2 Typical modified hot-forging die steels at home and abroad

原牌号	现牌号	主要成分变化	对性能的影响	参考文献
	GYDCK-20	降低 Si 和 V 元素的含量	提高热稳定及抗热疲劳性能	[37]
H13	CXN03	大幅降低 Cr 含量,增加 W 和 Mo 含量	强度略有下降,显著提高热稳定性	[38]
	3Cr5Mo2SiVN	以 N 代 C、适量添加 Mo,减少 Si、V 含量	冲击功和伸长率分别提高了 50% 和 13%	[40]
H11	SDH68	减少了 Cr、Mo、V 含量,优化 Si/Mn 比,并添加了 Ni、Nb 元素	提高了冲击韧性和热稳定性	[26]
Dievar	Dievar(N)	添加微量 N 元素	提高强度及热稳定性	[39, 41]

变—性能响应之间的关联规律,对于实现热锻模具钢综合性能优化、延长模具使用寿命以及满足复杂服役条件下的高性能制造需求具有重要意义。

表3列举了各类热作模具钢淬火和回火工艺的改进参数,H13钢采用1 040 ℃淬火+570 ℃回火的最优工艺处理后,其回火组织均匀且强韧性最好;4Cr5Mo2V钢在1 030 ℃×50 min奥氏体化+油淬+560 ℃×2 h×2次回火处理后的韧性与耐磨性最佳;SDCM钢1 080 ℃淬火+640 ℃回火2次处理后获得高热导率和高耐磨性;NOS525钢在1 090 ℃淬火+560 ℃回火+600 ℃回火2次处理后提升了强度、韧性与抗坍塌能力;55NiCrMoV7在850 ℃×5 h

淬火+600 ℃×5 h回火处理后,其强度、塑性、韧性和硬度得到最佳配合。可见,传统热处理工艺已难以满足高端热锻模具对长寿命、高可靠性的需求。因此,开展热处理工艺优化研究,实现微观组织的精准调控,成为提升热锻模具钢性能的核心途径。

常规热处理后,特别是高合金热锻模具钢中存在大量的残余奥氏体,而深冷处理能有效地消除残余奥氏体,从而使硬度和耐磨性大幅度提高,并能防止应变诱发脆性马氏体的形成^[50]。根据使用的温度范围,深冷处理分为冷处理(最高-60 ℃)、浅低温处理(-60 ℃至-90 ℃)和深低温处理(低于-125 ℃)。Bensley等^[51]将常规热处理与浅低温处理

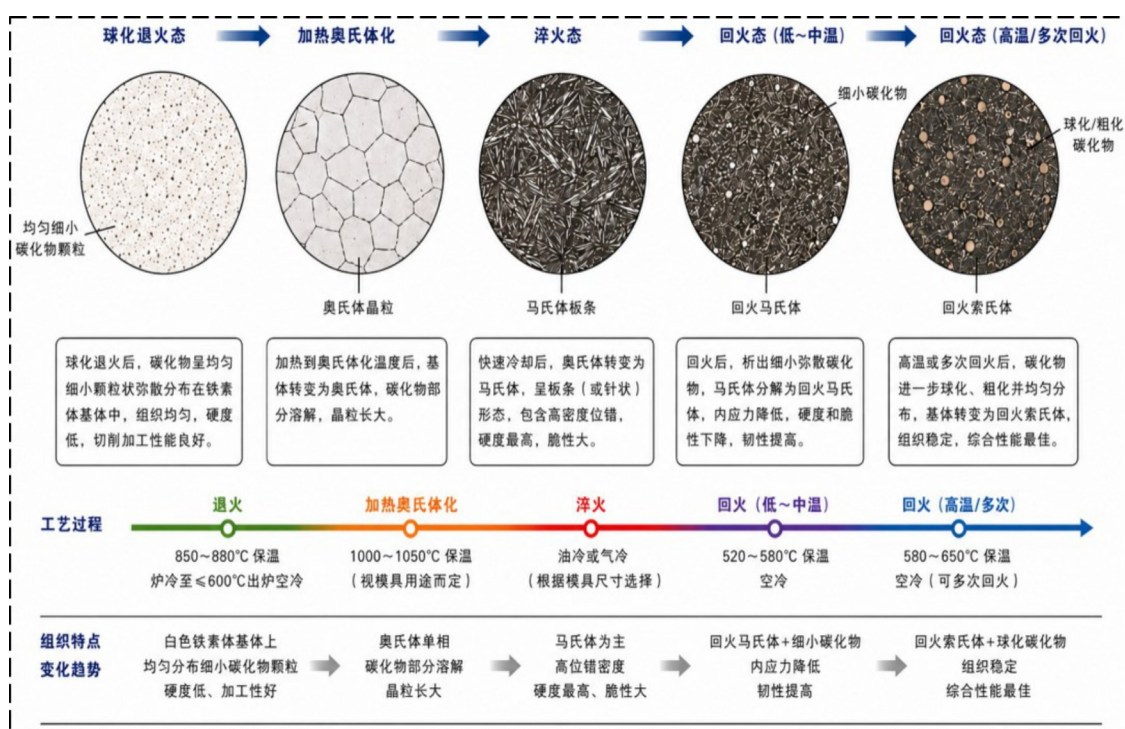


图4 H13钢经不同热处理工艺从退火态到淬回火态显微组织演变示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing the microstructural evolution of H13 steel from the annealed state to the quenched and tempered state under different heat treatment processes

表3 各类热作模具钢改进淬、回火工艺对性能的影响

Table 3 Effect of optimized quenching and tempering processes on the properties of various types of hot work die steels				
钢种	原淬、回火工艺	改进后的淬、回火工艺	对性能的影响	参考文献
H13	1020~1060 ℃淬火+570~610 ℃回火2次	1040 ℃淬火+570 ℃回火2次	回火组织均匀且强韧性最好	[42-43]
4Cr5Mo2V	1030~1090 ℃淬火+550~590 ℃回火2次	1030 ℃油淬+560 ℃回火2次	韧性和耐磨性能最好	[44]
SDCM	1030~1140 ℃淬火+520~700 ℃回火2次	1080 ℃淬火+640 ℃回火2次	韧性和硬度得到最佳配合	[45-46]
NOS525	1030 ℃淬火+560 ℃回火+600 ℃回火2次	1090 ℃淬火+560 ℃回火+600 ℃回火2次	抗拉强度和屈服强度分别提高了17.6%和18.7%	[47-48]
55NiCrMoV7	850~910 ℃×5 h淬火+600 ℃×5 h回火	850 ℃×5 h淬火+600 ℃×5 h回火	强度、塑性、韧性和硬度得到最佳配合	[49]

和深低温处理进行了比较,发现残余奥氏体质量分数分别从 28% 降低到 22% 和 14%。Li 等^[52]发现深冷处理可以提高 H13 钢的抗热疲劳性能,这主要是因为深冷处理促进了细小碳化物的析出,分散的碳化物,对边界迁移产生强烈的钉扎效应,从而阻止热疲劳裂纹的萌生与扩展。此外,深冷处理使大颗粒 $M_{23}C_6$ 型碳化物数量减少,小颗粒 M_6C 型碳化物数量增加,这对碳化物分布有积极影响,进一步改善了模具钢的热疲劳性能。

合理的热处理工艺可大幅提高热锻模具钢服役性能,延长模具使用寿命。比如常用的淬回火、二次硬化、高温回火以及深冷处理都可以大大延长热锻模具的服役寿命。热处理工艺很多,这些工艺相互关联。精细化、多工艺联用、智能辅助设计将是热处理工艺发展的趋势。因此,必须根据热锻模具钢的具体特性及其预期应用进行实验设计,不断探索最佳的热处理工艺,使热作模具钢能充分发挥其优异的综合性能。

2.3 材料表面改性 with 强化

表面改性技术是提高模具使用寿命的必要手段,可改善其表面性能,从而减少磨损、塌陷、腐蚀和疲劳造成的破坏。热锻模具磨损的本质原因在于表面和工件之间的相互作用。所以,在表面形成一层特定的防护表层,能够提升热锻模具表面的抗磨损和抗氧化能力。此外,热锻模具的热疲劳主要是热应力和机械应力,其在循环累积作用下裂纹萌生并且造成裂纹扩展,从而导致热龟裂失效。当采

用表面改性技术时,能够极大地改变热锻模具钢表层组织的状态,从而使热疲劳行为得以改善。

常用的热锻模具钢表面改性技术有热喷涂、化学气相沉积、堆焊、激光熔覆、渗氮、激光表面处理等。热喷涂是最常用的表面涂层技术,可提高材料表面的热疲劳抗性。化学气相沉积因其优异的性能而广泛用于热锻模具钢的表面处理。研究表明,在这些钢上沉积 TiN、Ti-C-N、Ti-B-N 和 Ti-Al-N 等硬质涂层可显著提高其耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿命。Chen 等^[53]通过激光熔覆 Stellite 6 + Cr_3C_2 + WS_2 涂层,使表面显微硬度为基体的 2.5 倍,摩擦系数降低 30%。渗氮是一种化学热处理工艺。它涉及在高温下将氮原子扩散到模具表面以形成高氮化合物层。目前,主流的渗氮工艺包括气体渗氮和离子渗氮两种,经过渗氮之后,材料的强度、硬度、摩擦磨损系数都得到了显著的提升。因此,多种渗氮与复合表面改性技术可显著提升 H13 钢的耐磨性^[54]、抗热疲劳性能^[55-56]及高温性能^[3]。

图 5 总结了各种表面强化技术的原理示意图^[57],每种技术都具有不同的特点。热喷涂应用范围广,厚度可控,但粘接强度低,易剥离;化学气相沉积被广泛用于增强耐磨性;堆焊增强了表面使用持久性,降低了更换成本,然而,由此产生的高涂层硬度可能导致脆性;渗氮化合物层提高了耐磨性和耐腐蚀性;激光表面处理技术是一种新型的表面处理技术,它能有效地提高材料的硬度,但也会带来高脆性和较大的热影响区,导致显微组织退化。同

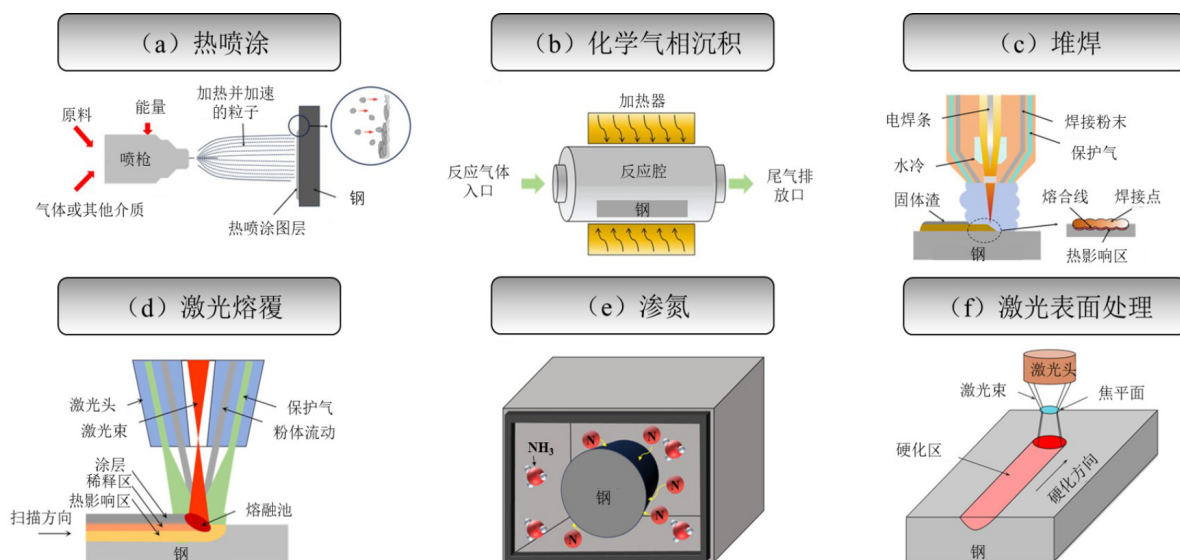


图 5 不同表面强化技术的原理示意图

Fig. 5 Schematic diagrams illustrating the mechanisms of various surface strengthening technologies

时,激光熔覆具有能量密度高、加工快速和热影响区较小的特点,但需要较高的成本。未来研究将聚焦于进一步改善现有技术,并复合使用多种表面强化技术,最大限度发挥复合强化效应以改善热锻模具钢的综合服役性能。

2. 4 基体材料纳米颗粒强化

一种新型的纳米颗粒强化技术引起了学者的关注,并得到了广泛的研究和应用。该技术在提高钢材的综合性能的同时满足环保和经济等条件。纳米颗粒强化技术采用纳米陶瓷颗粒、纳米碳化物、纳米氮化物等对材料基体进行强化,从而极大增强热锻模具钢的耐磨性及寿命。特别是在高温、高载荷、反复冷热交变循环的苛刻条件下,纳米强化可有效地改善模具钢的使役行为。

国内外许多学者针对纳米颗粒对钢的微观组织的影响进行了广泛的研究。纳米颗粒的存在增加了马氏体相变过程中的形核位点数量,促进了形核速率,从而细化了板条马氏体,相变形成的应力场产生了形核位点和形核能量,使更细和更密的碳化物分散沉淀在板条马氏体的界面处^[58-60]。因此,纳米颗粒通过细晶强化和第二相强化机制提升钢的力学性能,对模具钢的耐磨性有显著提升^[61];同时,抑制冷热循环下的氧化和热疲劳裂纹萌生与扩展,也可显著提升模具钢的抗氧化与热疲劳性能^[62]。

钢的显微组织至关重要,因为它直接决定了钢的力学性能。表4总结了纳米陶瓷颗粒(TiC、TiB₂)对H13钢屈服强度、抗拉强度、断裂应变和强塑积方面的提升^[61, 63-64],适量的TiC或TiC+TiB₂能有效地提高材料的力学性能,随着纳米颗粒含量的增加,材料的屈服强度和抗拉强度普遍上升,强塑积也呈现出整体上升的趋势,但变化幅度不大。纳米颗粒的加入显著提高了H13钢的强韧性,从微观组织演变的角度分析了纳米颗粒增强H13钢的强韧化机

理,即纳米颗粒促进异质形核,抑制晶粒长大,细化晶粒,更多更细的晶粒有助于缓解应力集中,增加晶界面积,提高了钢的抗裂纹扩展能力^[61, 63-64]。因此,通过纳米颗粒强化,H13钢的强韧性得到了大幅度提高。

通过基体材料的纳米颗粒强化技术提高热锻模具钢高温耐磨性能(包括硬度、强度),减少模具表面摩擦;同时,通过增强热稳定性,改善了磨损行为中的磨粒磨损、黏着磨损、氧化磨损和热疲劳磨损。未来需要侧重于多种强化技术协同作用的纳米复合强化,为提高热锻模具的综合性能与寿命开展深入研究奠定基础。

表4 不同含量纳米颗粒强化的H13钢力学性能比较

Table 4 Comparison of the mechanical properties of H13 steel reinforced with nanoparticles of varying concentrations

纳米颗粒成分	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂应变/%	强塑积/(MPa·%)
0%w[TiC]	1 343±11	1 537±14	11.6±0.2	16 202±320
0.01%w[TiC]	1 400±9	1 731±17	14.7±0.7	21 935±227
0.02 %w[TiC]	1 453±13	1 724±6	13.1±0.5	19 412±215
0%w[TiC+TiB ₂]	1 023±6	1 325±7	14.8±0.2	16 348±340
0.01%w[TiC+TiB ₂]	1 035±6	1 343±6	17.2±0.2	19 989±296
0.02%w[TiC+TiB ₂]	1 142±12	1 426±15	16.9±1.2	20 662±492

2. 5 四种策略对性能提升的效果对比

合金优化、热处理组织与性能精确调控、表面改性与强化、基体材料纳米颗粒强化等策略在改善热锻模具钢高温使役行为方面协同发挥着关键作用,见表5。合金优化可提升热锻模具钢的高温硬度与回火稳定性,表面强化可构建耐磨抗氧化屏障,热处理组织与性能精准调控可平衡强韧性,而基体材料的纳米颗粒强化则可增强晶界稳定性。这些策略多措并举,协同作用,可以显著提升热锻模具钢的耐磨性、抗热疲劳性与服役寿命。

表5 四种策略对热锻模具钢性能提升效果对比

Table 5 Comparison of the effects of four strategies on improving the performance of hot-forging die steel

改善措施	改善机理	改善结果	改善目的
合金优化	钢中添加一些特定的合金元素(如Mg、Fe、Mn、Cr、Ni、Co、Mo、V、Ni、Ti、Nb等)	改善热锻模具钢显微组织,提高表面硬度、强化热稳定性	
表面改性与强化	在表面形成一层特定的防护表层(如离子渗氮、气体氮化、激光熔覆、喷丸和补焊等)	提升热锻模具表面的抗磨损能力、抗氧化能力、氧化状态	
热处理组织与性能精准调控	调整钢的处理温度(如淬火、回火、二次硬化、高温回火、深冷处理等)	对热锻模具材料的微观组织、机械性能、热稳定性等改善	提高热锻模使役寿命
基体材料纳米颗粒强化	采用纳米陶瓷颗粒、纳米碳化物、纳米氮化物等对模具材料进行强化	提高材料的高温组织结构性能、高温表面抗磨损能力,减少模具表面摩擦、改善热稳定性	

3 总结与展望

综述了热锻模具钢服役行为及失效形式的研究进展,系统梳理了合金成分优化、热处理工艺对组织与性能的精确调控、表面改性与强化技术,以及基体材料中纳米颗粒强化等四种性能提升策略及其作用效果。多策略协同应用在提升热锻模具钢使用寿命和服役性能方面展现出显著优势。然而,当前研究多集中于单一强化机制的探索,缺乏对多因素耦合作用下失效行为演化规律的深入研究;同时,面向实际工况的协同强化设计与服役性能预测模型尚不健全,亟须进一步开展系统性的基础研究与工程验证。

热锻模具钢的服役行为研究呈现出多学科深度交叉与协同融合的发展趋势。未来,该领域的研

究重点将主要体现在两个层面。其一,着眼于各类强化技术的系统性集成与有机协同,包括但不限于本文所提到的四种策略。通过深入揭示不同强化机制之间的耦合效应与交互作用,有望在复杂热-力-化学耦合服役环境下,充分挖掘材料的性能潜力,为高端模具应用提供更可靠的技术支撑。其二,借助人工智能技术的迅猛发展,应致力于构建高精度、高泛化能力的机器学习模型,实现对热锻模具服役寿命的预测和评估。同时,结合多尺度数值模拟与可视化仿真技术,分析热锻模具钢的失效行为和微观机理,从而精准识别性能退化关键因素,反向指导材料设计与工艺优化。这两大方向互为支撑,既强化了理论认知,也提升了工程应用性,有望推动热锻模具钢向更长寿命、更高可靠性和更优经济性方向不断发展。

参考文献

- [1] Emamverdian A A, Sun Y, Cao C P, et al. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies) - a review [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 129: 105678.
- [2] Li J, Shi Y, Wu X. Effect of initial hardness on the thermal fatigue behavior of AISI H13 steel by experimental and numerical investigations [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2018, 41(6): 1260-1274.
- [3] 李绍宏, 何文超, 张旭, 等. H13型热作模具钢表面改性技术研究进展[J]. *钢铁*, 2021, 56(3): 13-22+40.
- [4] Chang F, Zhang H, Gao Y L, et al. Microstructure evolution and mechanical property enhancement of high-Cr hot work die steel manipulated by trace amounts of nano-sized TiC [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 824: 141788.
- [5] Karmakar D P, Muvvala G, Nath A K. High-temperature abrasive wear characteristics of H13 steel modified by laser remelting and clad with Stellite 6 and Stellite 6/30% WC [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 422: 127498.
- [6] Girisha V A, Joshi M M, Kirthan L J, et al. Thermal fatigue analysis of H13 steel die adopted in pressure-die-casting process [J]. *Sādhanā*, 2019, 44(6): 148.
- [7] Youn K T, Rhyim Y M, Lee J H, et al. An evaluation of thermal fatigue cracking and chemical reaction in die casting mould [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 345-346: 701-704.
- [8] Ghalehbandi S M, Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 113: 104545.
- [9] Chang F, Li C D, Yang H Y, et al. Hot-work die steel with superior mechanical properties at room and high temperatures prepared via a combined approach of composition design and nanoparticle modification [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 1748-1760.
- [10] Cui H Y, Bao Z J, Gong Q, et al. The main failure modes of hot-work die steel and the development status of traditional strengthening methods and nano-strengthening technology [J]. *Materials*, 2024, 17(14): 3455.
- [11] Wang H J, Feng H, Li H B, et al. Thermal stability and softening mechanism of a new type of high nitrogen hot-work die steel 3Cr5Mo2SiVN [J]. *Materials Characterization*, 2024, 210: 113789.
- [12] Hawryluk M, Lachowicz M, Janik M, et al. Influence of the nitrided layer thickness of dies made of two types of tool steel used in hot extrusion of valve forgings made of nickel - chromium steel on the durability of these tools [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21(4): 151.
- [13] Xu W J, Li W H, Wang Y S. Experimental and theoretical analysis of wear mechanism in hot-forging die and optimal design of die geometry [J]. *Wear*, 2014, 318(1-2): 78-88.
- [14] Wang Z, Li S, Li W Y, et al. Transition of wear mechanisms on the elevated-temperature wear of a new hot-work die steel [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2026, 35(7): 6306-6324.
- [15] Zhang P, Lin P Y, Pang X Y, et al. Bionic laser surface remelting for the wear performance after thermal fatigue of B2 die steel based on surface stress simulation [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34(10): 8540-8550.
- [16] 张亚龙. 车轮平衡块温塑性成形模具磨损失效分析及控制 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2014.
- [17] Rajiev R, Sadagopan P, Shanmuga Prakash R. Study on investigation of hot forging die wear analysis - An industrial case study [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27: 2752-2757.
- [18] Gronostajski Z, Kaszuba M, Polak S, et al. The failure mechanisms of hot forging dies [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 657: 147-160.
- [19] Abachi S. *Wear analysis of hot forging dies* [D]. Ankara: Middle

- East Technical University, 2004.
- [20] 周 虎, 李日榜, 李宁波, 等. Y_2O_3 对 H13 热锻模基体表面激光熔覆 Stellite 6 熔覆层热疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2025, 38(3): 130-138.
- [21] 姚 亮, 王华君, 鲁建飞, 等. 多层金属热锻模的热机械疲劳寿命预测[J]. 热加工工艺, 2017(3): 117-120.
- [22] 邓芊芊. 金属材料位错等缺陷结构演化与蠕变微观机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [23] Abd AL-Kareem Ahmed I, Mohammed A I, Allow M A. Improvement of forging die life by failure mechanism analysis [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2021, 30(1): 309-317.
- [24] Emamverdian A A, Yu S, Cao C P. Deformation and wear in a H21 (3Cr2W8V) steel die during hot forging: Simulation, mechanical properties, and microstructural evolution[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 268-277.
- [25] 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.
- [26] Li B C, Peng R Z, Wu Z C, et al. Thermal stability and microstructural evolution of the novel 3 %Cr hot-work die steel SDH68 [J]. Materials Today Communications, 2025, 49: 113734.
- [27] Hu T, Wu R M, Li F J, et al. Effect of Mo-related precipitation behavior on the strengthening and thermal stability of 4Cr5Mo2V die steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(12): 10213-10224.
- [28] Wu Y J, Wu R M, Zheng Y F, et al. Silicon in die steels[J]. Metals and Materials International, 2025, 31(4): 915-935.
- [29] Gong W, Yue J B, Tian J L, et al. The effect of nickel on the carbide precipitation behavior in Cr - Mo - V hot-working die steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 4452-4460.
- [30] Xiang S S, Wu R M, Li W, et al. Improved red hardness and toughness of hot work die steel through tungsten alloying[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(8): 6146-6159.
- [31] Ding H N, Cheng X N, Liu T, et al. Microstructure and high-temperature tensile behavior of spray-formed modified 2000 MPa H13 hot work die steel with 0.5wt % carbon[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 842: 143102.
- [32] Li L, Wu X C. Effect of carbides on the thermal stability of Cr3 and Cr5 die-casting die steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(10): 4483-4499.
- [33] Zhang Y Q, Zhang C, Li F, et al. High-temperature oxidation behavior of Cr-Ni-Mo hot-work die steels[J]. Materials, 2022, 15(15): 5145.
- [34] Huang X D, Wang C Y, Pan H J, et al. The role of VC and Fe3Mo3C in strengthening hot work die steel: Insights from first-principles calculations[J]. Results in Engineering, 2025, 28: 108031.
- [35] Zhao X L, Wang B, Sun D J, et al. Effect of pre-existing VC carbides on nitriding and wear behavior of hot-work die steel[J]. Applied Surface Science, 2019, 486: 179-186.
- [36] Lee Y K, Han J. Current opinion in medium manganese steel[J]. Materials Science and Technology, 2015, 31(7): 843-856.
- [37] Di Y N, Ma D S, Chi H X, et al. Thermal stability and thermal fatigue resistance improvement of new high toughness 5% Cr hot working die steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 2464-2477.
- [38] Ding H N, Liu T, Wei J B, et al. Microstructure and tempering softening mechanism of modified H13 steel with the addition of Tungsten, Molybdenum, and lowering of Chromium[J]. Materials & Design, 2022, 224: 111317.
- [39] 谷金波. 微氮合金化热作模具钢强韧化机制及工艺调控探究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [40] Wang H J, Li H B, Feng H, et al. A novel high nitrogen hot-work die steel 3Cr5Mo2SiVN achieving excellent hardness-strength-toughness balance [J]. Materials Characterization, 2023, 203: 113154.
- [41] Li J Y, Zhao P, Yanagimoto J, et al. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of a new type of nitrogen-containing die steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012, 19(6): 511-517.
- [42] Wang J, Xu Z N, Lu X F. Effect of the quenching and tempering temperatures on the microstructure and mechanical properties of H13 steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(3): 1849-1859.
- [43] Lin M, Zhao X F, Han L Z, et al. Microstructural evolution and carbide precipitation in a heat-treated H13 hot work mold steel [J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2016, 5(6): 520-527.
- [44] 周百航, 左鹏鹏, 吴晓春. 淬火温度和回火工艺对 4Cr5Mo2V 钢高温耐磨性能的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(4): 67-73.
- [45] 李奇颖. SDCM 高热导率热冲压模具的摩擦磨损行为研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
- [46] 李 爽. 新型热冲压模具钢组织与高温摩擦磨损机理研究[D]. 上海: 上海大学, 2017.
- [47] Yang Z Y, Yan C L, Tang T Y, et al. Failure analysis and heat treatment process optimization of NOS525 rotary flat binaural hot forging die [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163: 108521.
- [48] Yang Z Y, Yan C L, Wang J L, et al. Investigation of failure analysis and failure delay strategy for H13 steel contact wire clip die[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 169: 109138.
- [49] Yu X S, Wu C, Shi R X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of 55NiCrMoV7 hot-work die steel during quenching and tempering treatments[J]. Advances in Manufacturing, 2021, 9(4): 520-537.
- [50] Kumar T V, Thirumurugan R, Viswanath B. Influence of cryogenic treatment on the metallurgy of ferrous alloys: A review[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2017, 32(16): 1789-1805.
- [51] Bensely A, Venkatesh S, Mohan Lal D, et al. Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized En

- 353 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 479(1-2): 229-235.
- [52] Li J, Zhang X, Bu H Y, et al. Effects of deep cryogenic treatment on the microstructure evolution, mechanical and thermal fatigue properties of H13 hot work die steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 8100-8118.
- [53] Chen W, Liu B, Chen L, et al. Effect of laser cladding stellite 6- $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-WS}_2$ self-lubricating composite coating on wear resistance and microstructure of H13[J]. Metals, 2020, 10(6): 785.
- [54] 朱振中. 低温离子氮化及其对双重处理 H13 模具钢性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [55] Hanief Kohli A, Hanief M, Jagota V. A retrospection of the effect of nitriding processes on the AISI H13 tool steel[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2023, 9(2): 425-440.
- [56] Peng T T, Zhao X B, Chen Y, et al. Improvement of stamping performance of H13 steel by compound-layer free plasma nitriding[J]. Surface Engineering, 2020, 36(5): 492-497.
- [57] Zhang Z D, Wang D, Liu G L, et al. Surface modification of 42CrMo steels: A review from wear and corrosion resistance[J]. Coatings, 2024, 14(3): 337.
- [58] Jiang Y, Zou Y Z, Yang H Y, et al. Development of ceramic nanoparticles reinforced high Cr tool and die steels with high comprehensive performance[J]. Ceramics International, 2024, 50(3): 5052-5064.
- [59] 李传德. 微量纳米陶瓷介质强化 H13 模具钢的组织调控及使役性能强化机制[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [60] Li C D, Wang W X, Qiu F, et al. Application of ceramic nanoparticles in microstructure manipulation and simultaneously strengthening toughness and wear resistance of tool and die steels[J]. Ceramics International, 2023, 49(11): 16661-16672.
- [61] Kou S Q, Dai J N, Wang W X, et al. Enhancement of wear resistance on H13 tool and die steels by trace nanoparticles[J]. Metals, 2022, 12(2): 348.
- [62] 常 芳. 微量纳米颗粒细化高铬热作模具钢组织及其强韧化机制[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [63] Zhang H, Qiu F, Yang H Y, et al. Microstructure manipulation mechanism and mechanical properties improvement of H13 steel via trace nano-($\text{TiC}+\text{TiB}_2$) particles[J]. Materials Characterization, 2022, 188: 111924.
- [64] Li C D, Qiu F, Yang H Y, et al. Role and mechanism of innovative addition process of trace nano-TiCp in microstructure manipulation and significant mechanical properties enhancement of H13 steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 311: 117819.