

· 综述 ·



我国模具钢的发展及研究现状

迟宏宵^{1,2}, 马党参^{1,2}, 周 健^{1,2}, 谷金波^{1,2}, 邱英南^{1,2}

(1 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081; 2 先进特殊钢全国重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 模具钢是高端装备制造的核心基础材料, 支撑汽车、航空、航天、电子、医疗、机械等制造业各产业的成形生产。我国已是全球模具制造与消费第一大国, 模具钢实现了全品类自主供给, 正由规模扩张向高质量转型。本研究系统梳理热作、塑料、冷作三大类模具钢在合金设计、生产技术、热处理调控、表面处理改性、服役失效机理、创新制备工艺等方面的产业化与研发进展。指出了在组织均匀性、一致稳定性、创新材料设计、表面强化处理、数智化研发及生产等方面不足。提出了未来应重点关注基于 AI 数智化研发与全流程智能生产控制、短流程高均匀性先进冶金制造技术迭代、匹配基材的一体化复合强化技术、完善服役失效机理与全生命周期评价体系、建设行业级模具钢大数据与智能服务平台等方面的建议, 加速推进我国由模具钢制造大国向模具钢强国转变。

关键词: 模具钢; 发展; 研究; 现状; 趋势

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260114 **中图分类号:** TF142. 1

Development and Research Status of Die and Mould Steel in China

Chi Hongxiao^{1,2}, Ma Dangshen^{1,2}, Zhou Jian^{1,2}, Gu Jinbo^{1,2}, Di Yingnan^{1,2}

(1 Institute for Special Steels, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;
2 State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Beijing 100081, China)

Abstract : Die and mould steel is a core foundational material for high-end equipment manufacturing, supporting the forming production of various manufacturing industry chains, including automotive, aviation, aerospace, electronics, medical devices, and general machinery. China has already become the world's largest manufacturer and market of dies and moulds, and has achieved self-sufficiency in all categories of die and mould steel, transitioning from scale-driven expansion to high-quality development. This paper systematically reviews the progress in research and industrialization of the three major categories—hot-work, plastic mould, and cold-work die and mould steels—covering alloy design, processing technologies, heat treatment regulation, surface treatment and modification, service failure mechanisms, and innovative preparation processes. It identifies shortcomings in microstructural uniformity, consistency, and stability; innovative material design; surface strengthening treatment; and digital-intelligent R&D and production. Furthermore, it proposes that future efforts should focus on: AI-driven digital-intelligent R&D and whole-process intelligent production control; upgrading of short-process, high-uniformity advanced metallurgical manufacturing technologies; development of integrated composite strengthening techniques that are compatible with the base material; improvement of service failure mechanisms and full-life-cycle evaluation systems; and establishment of an industry-level big-data and intelligent service platform for die and mould steels. These measures are intended to accelerate China's transformation from a major producer into a global powerhouse in die and mould steel.

Key Words : Die Steel; Development; Research; Current Status; Trends

模具是制造业的“工业母机”, 被誉为工业之基、百业之母。模具广泛应用于工业生产各个领域, 约 75% 的粗加工工业品、50% 的精加工零件和绝大部分塑料制品均由模具加工成形, 在为我国国民经济发展、国防现代化和高技术服务中起到了十分重要的支撑作用。工欲善其事, 必先利其器, 没有高水平模具就没有高水平产品早已成为共识, 现

代模具产业体系更是保障供应链自主可控、支撑产业升级与保持产品竞争力的关键力量。模具钢是制造模具的主体原材料, 其质量水平不但决定了模具的精度、质量、寿命, 还直接影响着终端产品的品质、成本与制效。

近年来, 中国已稳居世界模具消费第一大国地位, 模具消费额突破 3000 亿元, 进口额仅为 10 亿美

基金项目: 重点新材料研发及应用国家科技重大专项(2025ZD0611103)

作者简介: 迟宏宵(1983—), 男, 博士, 正高级工程师; **E-mail:** chihongxiao@163.com; **收稿日期:** 2026-07-27

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

元。我国模具制造技术水平实现全面跃升,部分产品已接近甚至达到国际先进水平。作为全球重要的模具制造大国,中国模具不仅支撑起国内 36 万亿元规模的零件成形制造产业,满足了国内 97% 以上的模具消费需求,更对汽车、家电、包装等传统产业形成强力支撑,同时精准匹配航空航天、信息电子、能源储运及医疗大健康等战略产业与新兴产业的巨大成形制造需求^[1-2]。在模具产业强劲拉动下,我国模具钢产业也实现了快速发展,我国不但能够提供品类齐全的钢种体系、尺寸丰富的品种规格,还能够实现按需设计、更低制造成本的工艺多样制备方法,很好地满足了不同性能要求、不同应用场景及高性价比的模具应用需求。然而,面对全球制造业格局的深刻变革与国内产业升级的内在需求,中国模具钢产业正处于从“量的积累”向“质的飞跃”转型的关键阶段。目前,行业仍面临技术创新不足,高端依赖进口等问题,高技术水平模具钢仍存在一定差距。按照使用用途,模具钢通常分为热作模具钢、塑料模具钢和冷作模具钢三大类别。本研究将简述我国三大类主要模具钢材料的发展和研究现状,对模具钢材料的研究和发展给出参考意义。

1 热作模具钢的发展及研究现状

热作模具钢是用于制造在高温下使金属材料发生塑性变形或成形的模具材料,广泛应用于热锻、压铸、热挤压等成形工艺领域,常用热作模具钢

的牌号及特点见表 1。由于服役过程中需承受交变热应力、机械磨损以及高温氧化等多重作用,热作模具钢的性能要求极为严苛,需同时具备高的热强性、热稳定性、抗热疲劳性、耐磨性和足够的韧性。H13 钢(4Cr5MoSiV1)因其优异的综合性能,仍是目前应用最广泛、最具代表性的热作模具钢,然而随着现代制造业向大型化、复杂化、精密化方向发展,国内外学者围绕合金成分优化、制备工艺改进、热处理工艺创新以及表面改性等方面开展了大量研究工作。

1.1 合金设计与成分优化

1.1.1 主合金元素的影响

Mo 和 V 是热作模具钢中最重要的强化元素,在 5%w[Cr] 型中合金热作模具钢中合理设计 Mo、V 含量是主合金元素调控的重点。增加 Mo 含量可促进 M₂C 型碳化物弥散析出,提高钢的抗回火软化能力和热稳定性。在 4Cr5Mo2V 钢中,将 w[Mo] 从 1.9% 提高至 2.4% 后,在 650 ℃ 长期保温过程中可析出更多细小的 M₂C 型二次碳化物,有效阻碍富 Cr 碳化物的长大,表现出更好的热稳定性。V 含量的增加则促进 MC 型碳化物的析出,细化晶粒,但过量 V 会形成粗大的共晶碳化物,损害冲击韧性。

1.1.2 微合金化元素的影响

在传统 H13 钢基础上,通过添加 Ni、Co、W、Nb 等元素开发改进型钢种已成为重要研究方向。Ni 元素可显著提高钢的淬透性和韧性,研究表明,含

表 1 常用热作模具钢的牌号及特点

Table 1 Grades and characteristics of common hot-work die steels

中国牌号	国外近似牌号	主要特点及用途
4Cr5MoSiV1	AISI H13、1.2344、SKD61、DAC、DHA1、ASSAB 8407、W302	中温热强性、硬度、耐磨性优良,抗热疲劳性能良好,变形小,常用于铝/镁/锌压铸模、热挤压模、锻模及穿孔用工具、芯棒等
4Cr5MoSiV	AISI H11、1.2343、SKD6、ASSAB 8402、VIDAR 1 ESR、W300	中温热强性、韧性和抗热疲劳性能优异,变形小,可用于压铸模、热挤压模、穿孔工具、芯棒、锻模等
4Cr5Mo1V	W400、DAC-i	韧性、热强度和回火稳定性平衡好,通常用于尺寸规格较大的压铸模具等
4Cr5Mo2V	DIEVAR、ASSAB 8418、DAC55、W350	抗热疲劳龟裂、抗热冲蚀性能和抗热磨损性能优良,常用于压铸模、热挤压模、热成形模等
4Cr5Mo3V	1.2367、W360、W403	高温强度和抗回火软化能力优良,韧性、热强度和回火稳定性平衡好,常用于具有高热强性的小型压铸模具、锻模、各类工具等
3Cr2W8V	AISI H21、SKD5、1.2567	含钨热作钢,工作温度可达 650 ℃,高温强度、硬度和热稳定性好,用于高温高压下冲击负荷不大的凸凹模、压铸模、热挤压模、精锻模及有色金属成型模等
5CrNiMo	AISI L6、SKT4、GFA、DM、1.2713、55NiCrMoV7	淬透性高,韧性优异,用于冲击载荷大、工作温度不太高的大中型锻模等
5CrMnMo	AISI 6G、JIS SKT3、1.2311、	性能与 5CrNiMo 相近,淬透性和耐热疲劳性稍差,用于尺寸相对稍小的中型锻模等
4Cr3Mo3SiV	AISI H10、W303	具有优异的淬透性,较高的韧性和高温强度,适宜制作中型热加压机、热冲模、热锻模和压铸模等

0.8%w[Ni]的QDH钢在整个回火温度区间内的冲击功均高于不含Ni钢^[3]。Co元素的添加能促进二次硬化碳化物的形核并降低其粗化速率,从而提高高温强度^[4]。W和Mo的复合添加可形成高热稳定性的M₆C型碳化物,细化晶粒并提升抗回火软化性能^[5]。适当的Nb微合金化可形成NbC,抑制淬火过程中奥氏体晶粒长大,改善冲击性能。然而,Nb的添加会促进凝固过程中大尺寸液析碳氮化物的形成,遗传到钢材退火组织中,恶化材料性能。

1. 1. 3 稀土处理与纳米颗粒强化

添加稀土元素可有效变质夹杂物、细化铸态组织、改善碳化物分布。适量稀土Ce的加入可将H13钢中不规则的Mg-Al-O类和MnS类夹杂物变质为球状稀土硫氧化物,显著降低夹杂物的数量和尺寸^[6]。陈荣春研究表明,稀土Y的添加可细化枝晶组织、促进VC粒子的析出,使冲击功提升35.7%^[7]。稀土La的添加可抑制碳化物在回火过程中的融合长大,当w[La]为0.052%时回火稳定性最佳^[8]。吉林大学姜启川、丘峰团队开展了大量纳米颗粒强化合金化研究工作^[9]。通过在钢液中引入纳米TiC或TiC+TiB₂等颗粒,可显著细化晶粒、促进碳化物均匀分布,同步提升强度与韧性(如图1所示)^[10-13]。

1. 2 冶炼与成形工艺

1. 2. 1 电渣重熔技术

电渣重熔(ESR)是制备高品质热作模具钢的主流技术,可显著提高钢的纯净度和组织均匀性,电渣重熔的渣系选择、电极熔化速度、电力制度控制和冷却强度控制等是控制铸锭冶金质量的关键因素。优化ESR渣系对控制钢中夹杂物至关重要,王

胖杰研究表明^[14],采用含稀土氧化物的渣系进行电渣重熔,可实现钢中稀土的均匀添加,有效改善枝晶偏析和一次碳化物尺寸。

1. 2. 2 热加工工艺

锻造是改善热作模具钢组织和性能的重要工艺环节之一,通过多次墩拔及多向锻造可有效破碎铸态枝晶和网状碳化物,提高等向性。合适的锻造比和锻造温度的控制对碳化物细化至关重要。随着新能源汽车一体化压铸工艺所需的特大型压铸模具钢制造难度不断提高,采用电渣重熔+锻造工艺+超细化处理等工艺控制是制备高性能特大型压铸模具钢的关键,我国已尝试开发了厚度≥730 mm的超大型一体化压铸模具钢模块,等向性可实现0.9以上(钢研总院开发的大型一体化压铸模具钢性能如图2所示)^[15-16]。

1. 2. 3 增材制造技术

激光选区熔化(SLM/L-PBF)和激光定向能量沉积(LDED)等增材制造技术为热作模具的成形与修复提供了新途径^[17]。增材制造特有的快速凝固特征可获得细小的微观组织,有效地避免了成分和组织偏析。然而,H13钢在增材制造过程中易产生裂纹缺陷,需通过基板预热和工艺参数优化可实现无裂纹成形^[18-19],针对H13钢打印开裂问题,国内外开发了专用增材制造模具钢钢种。研究表明,SLM成形H13钢经直接回火处理后,由于保留了细小的胞状结构和弥散的纳米碳化物,其抗回火软化性能优于传统淬回火处理^[20]。电子束粉末床熔融(EB-PBF)技术由于较低的残余应力和自回火效应,可制备出无粗大碳化物析出的H13钢^[21]。

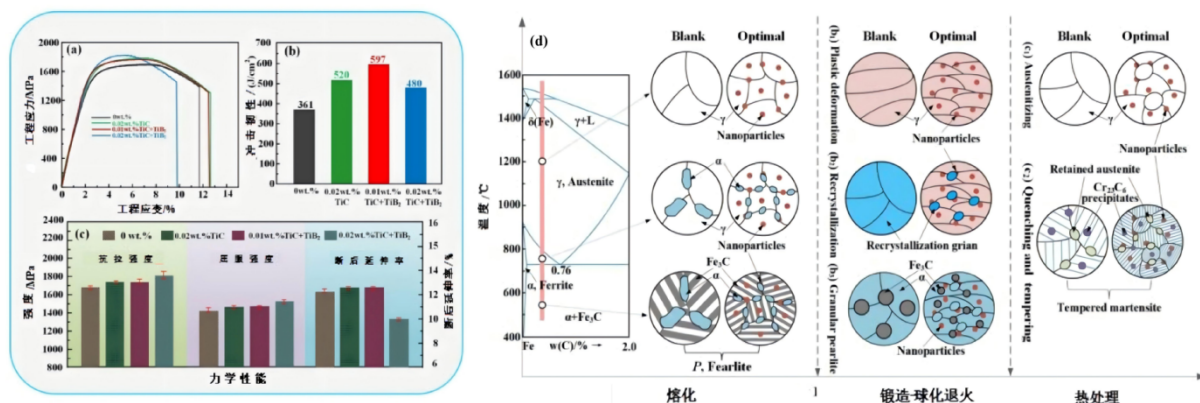


图1 添加纳米颗粒对高铬模具钢力学性能的影响及微观组织优化机理:(a)室温拉伸性能,(b)冲击韧性,(c)断裂应变,(d)组织优化机理

Fig. 1 Effects of nanoparticle addition on the (a) room-temperature tensile properties, (b) impact toughness, (c) fracture strain of high-chromium die steel, and (d) the mechanism of microstructure optimization

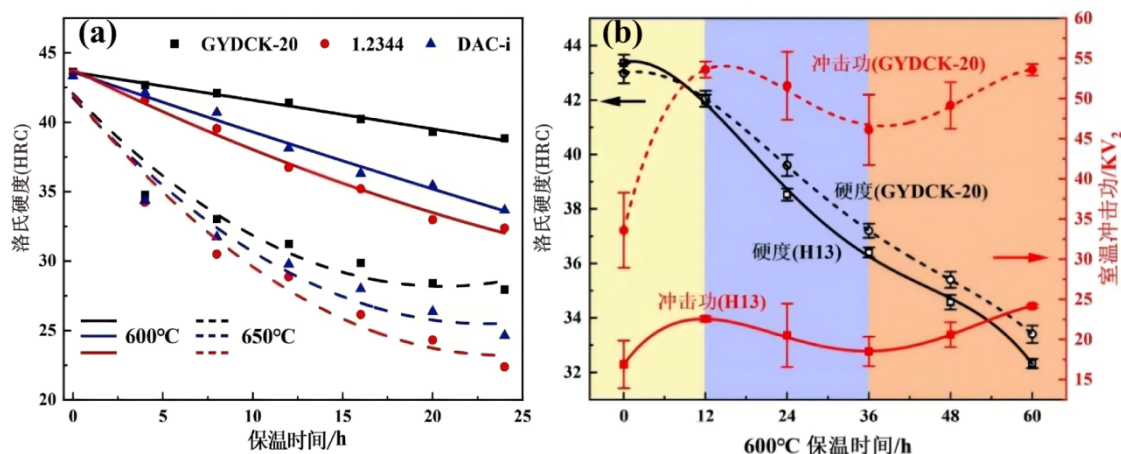


图2 DCK 20 超大型模块(截面尺寸:730×1000 mm):(a)心部横向冲击韧性,(b)高温热稳定性

Fig. 2 DCK 20 ultra-large module (cross-section: 730×1000 mm): (a) transverse impact toughness of the core, (b) high-temperature thermal stability

1.3 表面改性技术

渗氮处理可在热作模具钢表面形成高硬度的化合物层和扩散层,显著提高耐磨性和抗热疲劳性能。研究表明,循环渗氮制备的无化合物渗层可有效延缓热疲劳裂纹的萌生。离子渗氮与PVD涂层的复合处理可获得更优异的综合性能^[22]。钒含量对渗氮层组织有显著影响,适量V可细化基体组织、增加扩散层厚度,渗氮温度500℃、保温时间8h时,H13钢表面硬度可达1250HV,渗氮层厚度为241μm^[23]。

激光熔覆是热作模具表面强化和修复的重要手段,TiAlN和TiAlSiN等PVD涂层可显著提高模具钢的抗高温氧化性和耐蚀性。CrN/TiN多层涂层在真空电弧等离子体辅助沉积下表现出优异的热稳定性,32层CrN/TiN涂层在空气中加热至1120~1125℃仍保持热稳定性^[24]。AlCrN/渗氮层复合涂层在400~600℃范围内表现出良好的高温摩擦学性能^[25]。Wu等^[26]在H13钢表面激光熔覆高熵合金涂层(如AlCoCrFeNiW_x),W元素的添加促进BCC相形成和富W第二相析出,800℃保温后仍能保持较高的硬度和耐磨性。

1.4 服役性能与失效分析

热稳定性反映材料在高温下抵抗软化的能力,碳化物的粗化是导致热稳定性下降的主要原因之一,通过优化合金成分(如提高Mo、V含量、添加W等)可有效抑制碳化物粗化,提升热稳定性^[27]。热疲劳是热作模具最主要的失效形式之一,热疲劳裂纹的萌生和扩展受材料组织、碳化物特征、氧化行为等多种因素影响,研究表明,细小的碳化物和均匀的组织可有效延缓裂纹萌生^[28]。Mo含量的增加

可提高钢的抗回火软化性,延缓裂纹萌生,但过高的Mo含量会因韧性降低而加速裂纹扩展^[29]。高温磨损是热作模具的另一主要失效形式,高温磨损过程中磨面形成的摩擦氧化物层对基体起保护作用,其稳定性取决于基体的热强性,可通过合金元素影响碳化物类型和分布来调控耐磨性^[30]。采用渗钒处理可将H13钢的磨损率降低至常规热处理的六分之一^[31]。

2 塑料模具钢的发展及研究现状

塑料模具钢是用于制造塑料成型模具的材料,广泛应用于注塑、吹塑、挤出等成形工艺领域。随着塑料工业的快速发展,塑料制品在汽车、家电、电子、医疗器械等领域的应用日益广泛,对塑料模具的尺寸精度、表面质量和服役寿命提出了更高要求,相应的塑料模具钢需要兼具良好的切削加工性、抛光性能以及足够的强度和韧性,对于成形过程中会释放腐蚀性气体及添加玻纤增强的特殊塑料制品,还要具有良好的耐腐蚀性和耐磨性。目前,国内常用的合金塑料模具钢见表2。近年来,国内外主要围绕塑料模具钢的成分优化、冶炼工艺、热处理制度及表面改性技术开展研究工作,提升塑料模具钢的质量性能。

2.1 合金优化设计

随着高分子材料的发展,高强及超高强度工程塑料用量不断增加,汽车保险杠、仪表盘、车门等大型塑料制品在汽车零件及家电中应用越来越多。为提升模具抛光性能及蚀刻性能,要求特大型预硬塑料模具钢具有更优异的组织 and 硬度均匀性及高

表 2 常用塑料模具钢的牌号及特点

Table 2 Grades and characteristics of common plastic mould steels

中国钢号	国外近似牌号	主要性能特点及用途
3Cr2Mo	P20 618 M202	硬度 HRC30~36, 预硬态供货, 无需热处理, 适用于模架、中低价位模具镶件、中小型塑料模具
3Cr2NiMnMo	718 1.2738 M238	预硬态, 硬度 HRC32~38, 添加镍, 淬透性更优, 韧性好, 适用于大中型塑料模具、汽车零部件模具等
2CrNiMnMoV	XPM	大截面高均匀性高硬度高韧性预硬塑料模具钢, 具有优异的抛光性能和焊接性能, 更适合大型模具及修复, 应用于大中型高抛光塑料及汽车零部件模具等
10Ni3MnCuAl	NAK80	硬度 HRC37~43, 含析出硬化元素, 抛光性能好, 用于高镜面、高精度塑料模具, 如家电、汽车内饰件等
(2~4)Cr13 型	S136 2083 STAVAX POLMAX	硬度 HRC48~52, 良好的耐腐蚀性和抛光性, 适用于 PVC、含氟塑料等腐蚀性材料成型的模具, 亦适用于高光洁度模具
4Cr13 改进型 (+N)	MIRAX TYRAX M303 M333	具有很高的组织均匀性, 优异的耐蚀性和抛光性能, 应用于精密光学器件、高端存储介质、高端塑料制品等超高光洁度模具
3Cr17(Ni)Mo	1.2316 GS-2316 M300	具有优良的强韧性和较高的耐蚀性, 适宜制作各种类型的要求高精度、高耐磨, 又要求耐蚀性的塑料模具和透明塑料制品模具
3Cr17(Ni)Mo 改进型	M340 M380	具有较高的硬度与韧性配合, 优异的耐蚀性, 适用于各类高精度、高耐磨性, 有一定韧性要求, 且有良好耐腐蚀需求的塑料模具及透明塑料制品模具
9Cr18(Mo/V)	N685/N695/N690	具有很高的硬度和耐磨性, 韧性较低, 适宜制作承受摩擦并在腐蚀介质中工作的模具及量具、不锈钢片机械刀具及剪切工具、手术刀片、高耐磨设备零件等

硬度预硬化能力。基于传统 3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo 预硬化塑料模具钢, 通过降 C、Ni、Mn、Mo、V 等合金元素保证淬透性、强度和韧性^[32-33]。对于耐蚀塑料模具钢, 通过氮合金化是提升耐蚀塑料模具钢性能的重要手段, 同时, 通过降碳增氮减少碳化物偏析, 提高组织均匀性, 进而改善抛光性能, 解决了硬度与韧性的矛盾问题, 实现了抛光、耐蚀、韧性的同步提升。为了获得不同性能侧重, 合适的 C-N 配比是设计核心。因此, 钢研总院基于大量耐蚀塑料模具钢合金设计基础, 总结提出了耐蚀塑料模具钢 C-N 匹配定量化合金设计准则。结合 Ni、Mo 合金化进一步提升耐蚀性, 微量 V 细化晶粒并提升强韧性。为了解决 N 在马氏体不锈钢中的溶解度极限问题, 采用加压电渣冶炼技术, 可实现超高氮合金化。基于此, 钢研总院与抚顺特钢等单位成功开发了 Cor-Mir[®]、Cor-Wear[®]、FS636、FS669 等氮合金化高耐蚀高抛光系列化塑料模具钢品种^[34-36]。

2.2 热处理及组织调控

大截面塑料模具钢通常以预硬化状态交货, 要求截面硬度均匀(偏差 $\leq 3\text{HRC}$)且具有良好的切削加工性, 塑料模具钢的显微组织对力学及使用性能有着重要影响。针对 1.2738 预硬化塑料模具钢特大型模块, 有研究提出了回火索氏体抛光性能最佳, 而上贝氏体和珠光体因含有粗大碳化物导致抛

光质量下降(如图 3 所示)^[37]。赵卢亮等对 P20 钢进行 1 250 °C 高温扩散退火, 发现随着保温时间延长, Cr、Mo 元素偏析带硬度与基体硬度差逐步降低, 经 1 250 °C $\times 6\text{ h}$ 处理后表面粗糙度 Ra 达到 0.014 μm , 抛光性能最佳^[38]。对于大型模块, 冷却速率控制尤为关键, 刘继浩等研究了 3Cr2MnNiMoV 钢的 CCT 曲线, 发现冷速在 0.3~16 °C/s 时主要得到马氏体组织, 硬度保持稳定^[32-33]。热处理工艺对 10Ni3MnCuAl 钢的组织性能影响显著, 通过 880 °C 固溶+530 °C 时效可获得板条马氏体+粒状贝氏体组织, 获得较高的冲击韧性^[39], 时效过程中形成的 B2 结构 NiAl 相与基体完全共格, 尺寸为纳米级, 是实现高硬度和高抛光性的关键^[40]。热处理工艺对耐蚀塑料模具钢的强韧性、耐蚀性和耐磨性有重要影响。对 N 合金化 Cr13 钢研究表明, 低温回火(240 °C)试样腐蚀速率仅为 0.005 g/($\text{m}^2\cdot\text{h}$), 远低于高温回火(500 °C)的 0.026 g/($\text{m}^2\cdot\text{h}$), 高温回火则具有更高的耐磨性^[41]。

2.3 生产工艺控制

电渣重熔(ESR)是提升塑料模具钢品质的重要手段。在质量控制方面, 通过对电极坯成分、渣系、渣料控制、保护气氛等全流程参数的精准控制, 实现了对铝含量、氧含量及夹杂物的有效管控^[42-43]。在工艺控制方面, 通过熔速、浅熔池、冷却强度控制, 有效改善了铸锭的凝固质量和成分和组

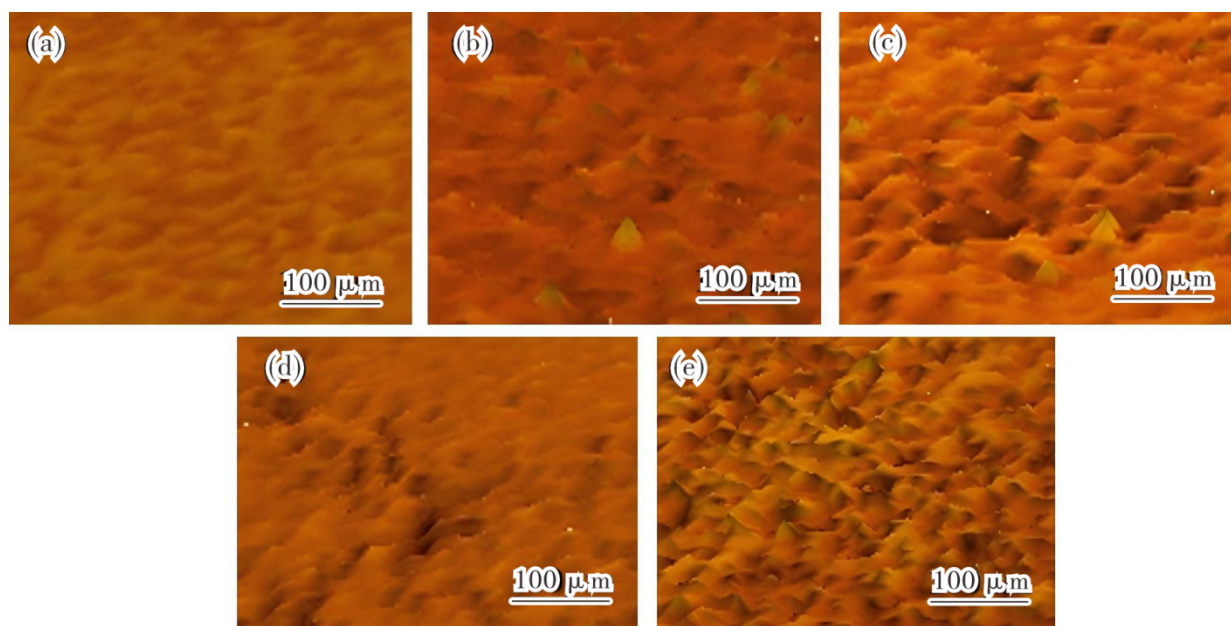


图3 1.2738 预硬化塑料模具钢不同组织类型的抛光表面形貌:(a) 回火索氏体,(b) 回火贝氏体,(c) 珠光体+回火贝氏体,(d) 珠光体,(e) 索氏体+颗粒状碳化物

Fig. 3 Surface morphology of polished specimens with various microstructures in 1.2738 pre-hardened plastic mould steel: (a) tempered sorbite, (b) tempered bainite, (c) pearlite + tempered bainite, (d) pearlite, (e) sorbite + granular carbide

织均匀性,还探索研究了双回路导电、抽锭电渣重熔等新工艺的开发和优化^[44]。通过电渣重熔工艺的改进,可显著提升了塑料模具钢的抛光性能、力学性能和耐腐蚀性能^[45-46];大型塑料模具钢模块的锻造工艺对消除内部缺陷、细化晶粒及组织至关重要。Chen 等采用多向锻造(MDF)技术对SDP1 钢进行组织调控,发现MDF 比传统镦拔锻造(TUSF)具有更高的空洞闭合效率和更好的组织均匀性^[47-48]。刘航航对厚大断面718H 钢的研究表明,1 250 °C×12 h 高温扩散可有效消除元素微观偏析,配合水空交替淬火可实现835 mm 厚模块全截面硬度控制在33~37 HRC 范围内^[49]。

2.4 切削加工工艺与增材制造技术

塑料模具钢的切削加工性能直接影响制模效率与生产成本。Aydin 等研究了纳米石墨烯增强MQL 在DIN-1.2738 钢铣削中的应用,发现在1% 石墨烯N-MQL 条件下,切削温度降低30.1%,表面粗糙度改善40.2%^[50]。Akdulum 等采用机器学习方法对1.2311 材料镗削表面粗糙度进行预测,结合虚拟采样和特征增强,预测精度提高61.9%^[51-52]。Hamdi 等优化了DIN 1.2738 钢车削中的MQL 参数,发现喷嘴距离10 mm、流量51 ml/h、角度60°时表面粗糙度可控制在0.15~0.18 μm^[53]。Batuhan 等对Mirrax 塑料模具钢的EDM 加工进行多目标优化,发现放电电

流是最显著的影响参数^[54]。

选区激光熔化(SLM)技术为随形冷却塑料模具的制造提供了新途径,可显著改善模具冷却效果,提升产品生产效率与质量性能。国内针对低成本塑料模具钢开展了相关研究工作,张梦醒等采用真空雾化技术制备了718HH 塑料模具钢粉末,其D50 为43.52 μm,流动性18.44 s/50 g,SLM 成形件抗拉强度1 392 MPa,冲击韧性15.3 J,优于传统锻态材料^[55-56]。通过SLM 成形后热处理工艺调控,可实现打印后热处理促使完全马氏体转变,位错密度降低,冲击功从15.3 J 提升至39.7 J^[55]。

3 冷作模具钢的发展及研究现状

冷作模具钢主要用于制造在冷状态下对工件进行冲压、拉伸、冷镦、挤压、压印、辊压等加工成型的钢材的统称,要求材料兼具高硬度、高耐磨性、足够的韧性和良好的尺寸稳定性。依据对冷作模具钢的耐磨性、韧性、尺寸稳定性等要求的不同,国内常用的冷作模具钢见表3。Cr12 型冷作模具钢(如Cr12MoV、D2 等)由于具有较高的耐磨性,应用最广泛。但存在共晶碳化物粗大、网状分布严重等问题,导致材料韧性较低。因此,如何通过成分设计、工艺优化和表面改性等手段实现碳化物的调控和力学及服役性能的提升,成为研究热点。

表3 常用冷作模具钢的牌号及特点

Table 3 Grades and characteristics of common cold-work die steels

中国钢号	国外近似牌号	主要性能特点及用途
Cr12MoV	SKD11、DC11、SLD	高耐磨性,较高的淬透性,热处理变形小,但冲击韧性偏低,用于承受重负荷、高耐磨的冷冲模、冲头、剪刀片、冷挤压模等
Cr12Mo1V1	D2、1.2379、XW42、K110	比Cr12MoV具有更好的耐磨性和二次硬化能力,碳化物分布更均匀,可用于高精度长寿命冷冲模、冷锻模、拉丝模、成形轧辊等
Cr8Mo2SiV	DC53、SLD-MAGIC、ASSAB 88、K340	较D2/Cr12Mo1V1具有更高的冲击韧性,耐磨性优良,热处理变形小,用于对韧性和耐磨性要求较高的冷冲压模具、冷锻模、成形模及高负荷冲裁模。
Cr8	—	耐磨性较好,成本较低,适用于中低负荷冷冲压模具、成形模、一般耐磨零件。
LD (7Cr7Mo2V2Si)	—	高强韧性配合,抗冲击性能优良,耐磨性好,适用于承受强烈冲击的冷锻模、冷挤压模、冲头等。
9CrWMn (CrWMn)	O1、SKS3 (JIS)、1.2510、DF-2、K460	油淬微变形,综合力学性能好,淬透性及韧性优于高铬钢,用于中小型冷冲模、量具、切削刀具、精密模具等。
9CrSi (9SiCr)	1.2008、1.2108	高硬度,良好的淬透性,耐磨性较好,耐回火稳定性好,用于冲模、剪刀、刀具以及要求一定耐回火性的模具。
9Mn2V	O2	淬透性及韧性优于9CrWMn,热处理变形小,用于精密量具、复杂形状冷冲模、成形模等。

3.1 合金优化设计

冷作模具钢中碳化物的种类、形态、尺寸及分布对材料性能起决定性作用。常见碳化物类型包括 M_7C_3 型、 $M_{23}C_6$ 型、MC 型及 M_6C 型等。经济型 Cr 元素与 C 含量的配比直接影响共晶碳化物的尺寸和含量,进而影响材料的淬硬性、冲击韧性,通过 C-Cr 元素的精准匹配和获得不同性能的冷作模具钢材料^[57],通过降低 Cr 含量并增加 Mo、V 等合金元素,可有效抑制粗大共晶碳化物的形成,促进细小二次碳化物的均匀析出^[58]。通过稀土元素对共晶碳化物凝固组织细化是改善碳化物尺寸和分布的有效手段之一^[59]。

3.2 热处理工艺优化

针对铸态组织中存在的碳化物偏析问题,高温均质化处理可有效促进元素扩散和碳化物分解。Du 等对 Cr8 冷作模具钢进行 1 250 °C×6 h 均质化处理后,共晶碳化物面积分数降至 1.97%,硬度提高 145.1%,抗拉强度提升 48.4%^[60]。淬火温度和时间直接影响冷作模具钢的基体组织、碳化物溶解行为及残余奥氏体含量。Öztürk 等发现,对含 Mo 的 X210Cr12 钢进行等温淬火处理,可显著细化一次碳化物的尺寸与分布,使磨损率降低约 30%^[61]。Çakir 等对 DIN 1.2379 钢的研究表明,等温淬火(400 °C 等温)可获得与常规淬火回火相当的硬度(55 HRC)和耐磨性(92%),但冲击韧性提高约 3 倍^[62]。深冷处理可促进残余奥氏体向马氏体转变,析出超细弥散碳化物,从而提高硬度与耐磨性。Boztepe 等对 D3 钢的研究表明,双重回火-深冷-双重回火(DTCDDT)组合处理因形成均匀细小的碳化物,使磨损率降低

80.3%^[63]。深冷处理的效果与处理温度、时间及顺序密切相关,合理的工艺设计是实现强韧性协同提升的关键^[64]。

3.3 表面强化处理技术

物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)技术广泛应用于冷作模具钢的表面强化,提高耐磨性。Leonov 等制备的 CrN/TiN 多层涂层(32 层)在 1 200 °C 真空环境下仍保持热稳定性^[24]。Wu 等对比了 HVOF 喷涂 WC-CoCr 涂层与 Cr12MoV 钢的耐磨性,发现涂层在各温度下均表现出更低的磨损率^[65]。激光表面淬火和激光熔覆技术因其热影响区小、加工灵活等优势受到关注。Zhang 等对 7CrSiMnMoV 钢进行激光表面淬火,表面硬度从 260 HV1 提升至 949.2 HV1,摩擦系数和磨损体积显著降低^[66]。元莎等采用 HKS-G 技术(多源多弧离子镀)在 Cr8 钢表面形成厚度 10.8 μm、硬度 3 326 HV 的涂层,使模具最大磨损量减少 23%,寿命达到 476 190 次^[67]。离子渗氮可显著提高冷作模具钢的表面硬度和耐磨性。7Cr7Mo2V2Si 钢经 540 °C 离子渗氮后,磨损量降低 86.21%,摩擦系数降低 37.96%^[68]。孔德军等对 Cr12MoV 钢进行渗硼处理,表面形成 FeB 相,残余应力由拉应力转变为压应力,改善了摩擦磨损性能^[69-70]。需要注意的是,渗氮层过厚或脉状组织过多可能降低材料的疲劳性能,需合理控制工艺参数。杨程等^[71]利用超声滚压加工(USRP)技术,在 DC53 钢表面引入梯度硬化层,使表面硬度从 720 HV 提升至 818.6 HV。

3.4 粉末冶金、喷射成形及连铸技术

传统常规铸锭法无法彻底避免由于共晶反应

产生的碳化物粗大和偏析的问题,粉末冶金和喷射成形工艺是一种突破传统冶金的快速凝固工艺,可有效解决传统冶金工艺的偏析和高合金化问题(粉末冶金、喷射成形对碳化物尺寸及均匀性改善如图4所示),使工具钢各项性能均获得极大提升(如图5和图6所示)。粉末冶金工艺相对工序复杂、流程长、生产成本低。与电渣重熔和粉末冶金相比,喷射成形工具钢的工序步骤明显减少,可省去电渣重熔的二次重熔步骤,也可省去粉末冶金制备过程中粉末筛分、装罐、包套、脱气、热等静压等步骤,具有短流程、低成本、绿色化特征。目前,国内天工国际、河冶科技已建成规模化先进粉末冶金工艺产线,河冶科技、天工国际、江苏豪然、正达新材料等公司均有较为完整的工业化喷射成形工具钢产线,具备了粉末冶金和喷射成形规模化的生产能力,并

形成了粉末冶金和喷射成形系列化产品^[72-73]。天工国际、正达新材料等公司采用喷射成形工艺制备Cr8Mo2SiV等冷作模具钢,碳化物较传统熔铸钢有很大改善,在市场上得到广泛应用。天工国际利用粉末冶金制备复杂模具的优势,通过热等静压近净成形技术开发了具有复杂流到了压铸模具,结合增材制造镶嵌件,为压铸模具提供了新的解决方案。天工国际利用粉末冶金高氮化的先天技术优势,还开发了粉末冶金高氮型耐蚀塑料模具钢。

连铸工艺是特殊钢制备的流程简化、效率提升、质量稳定性改善、单线产能提升的重要工艺路线。我国在低合金塑料模具钢、中碳中合金热作模具钢及少量低碳高合金耐蚀塑料模具钢部分品种实现了模具钢产品的连铸工艺生产。在高速钢、冷作模具钢等高碳高合金莱氏体钢产品的连铸工艺

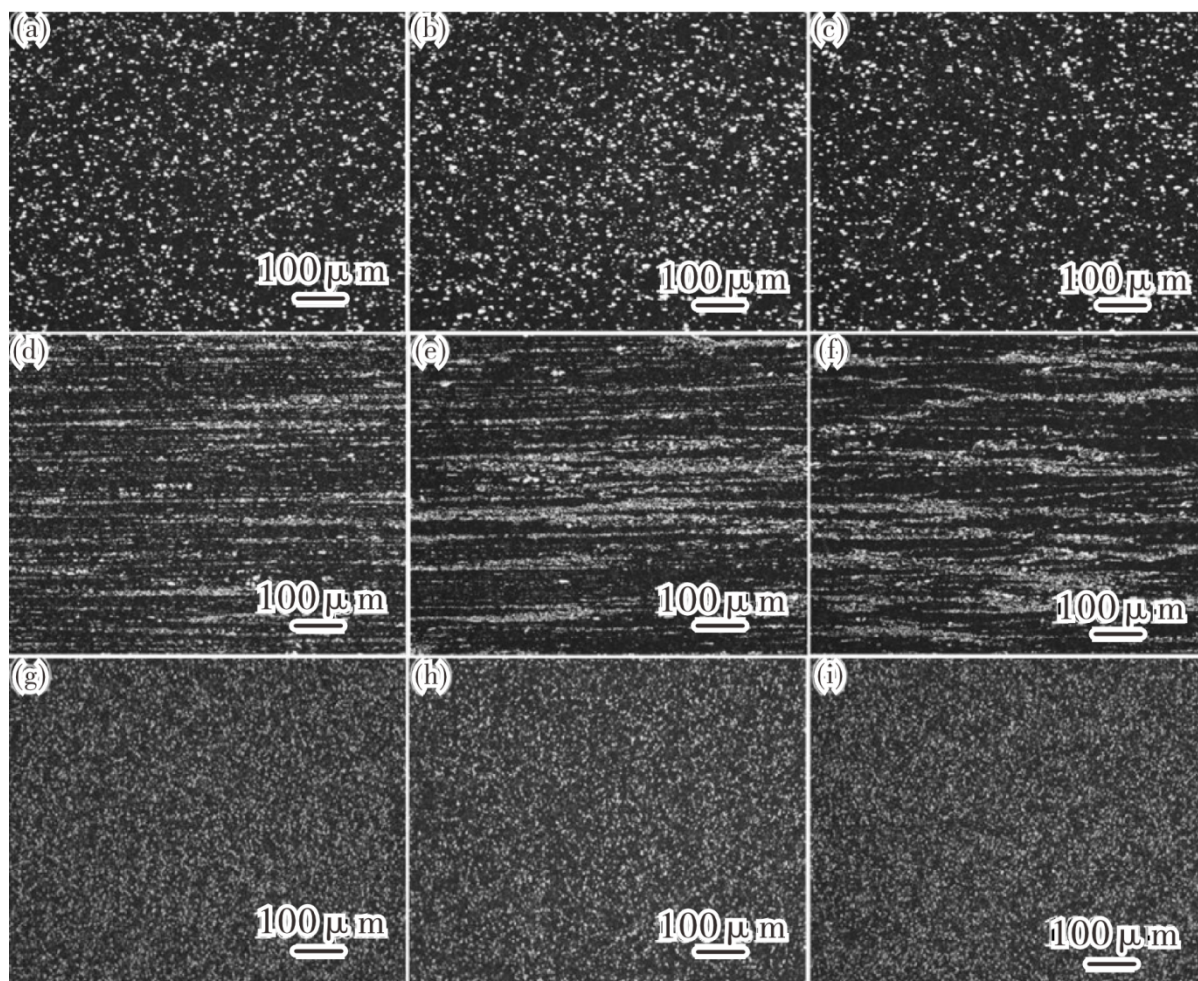


图4 不同制备工艺M3钢退火组织碳化物分布特征(纵截面):(a)~(c) 喷射成形,(d)~(f) 电渣重熔,(g)~(i) 粉末冶金M3分别为试验钢边部、半径1/2位置、心部碳化物分布

Fig. 4 Carbide distribution characteristics in annealed microstructures of M3 steel prepared by different processes (longitudinal section): (a)~(c) spray-formed, (d)~(f) electroslag-re熔, and (g)~(i) powder-metallurgy M3 steel, showing carbide distributions at the edge, mid-radius (1/2 radius), and center, respectively

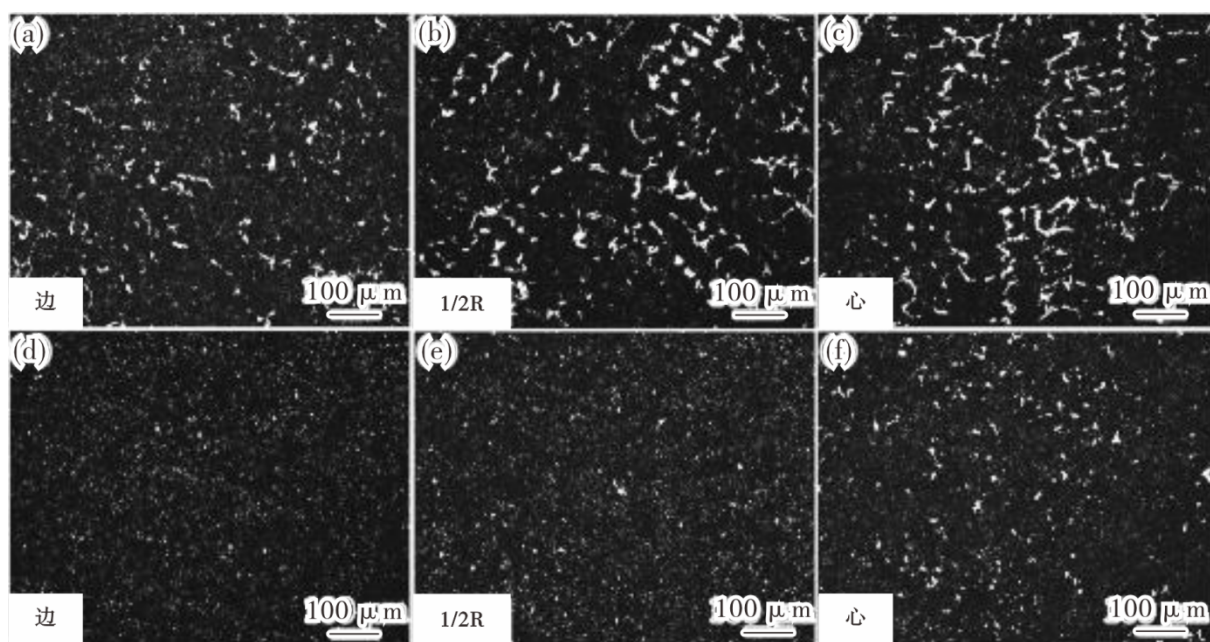


图5 不同制备工艺DC53钢退火组织碳化物分布特征对比:(a)–(c)电渣重熔组织,(d)–(f)喷射成形组织

Fig. 5 Carbide distribution characteristics of annealed DC53 steel prepared by different processes: (a) – (c) electroslag remelting, (d) – (f) spray forming

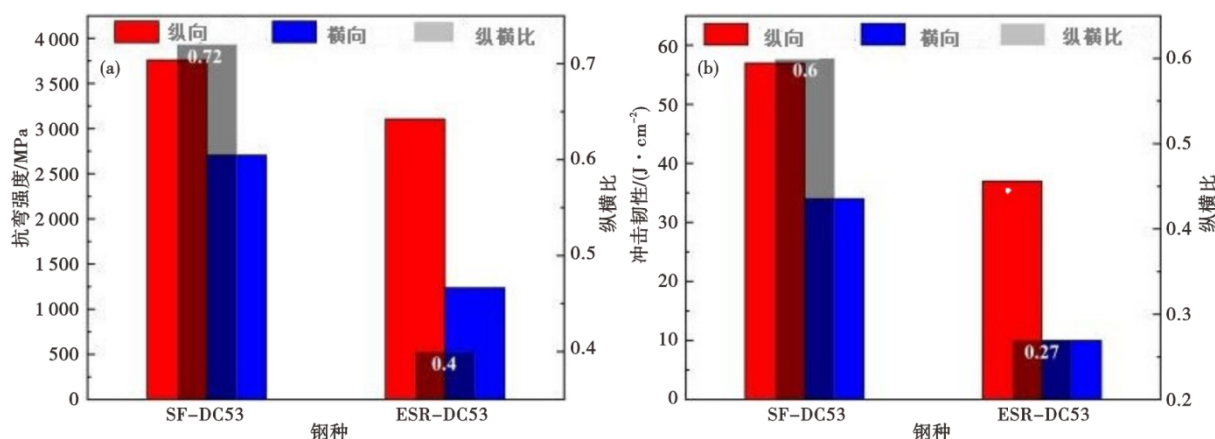


图6 不同制备工艺DC53钢力学性能对比:(a)抗弯强度,(b)冲击韧性

Fig. 6 Mechanical properties comparison of DC53 steel prepared by different processes: (a) bending strength, (b) impact toughness

技术方面,我国通过90 t EBT→LF→VD→(150 mm×630 mm)连铸矩形坯→一火加热→15道次轧制成材的短流程工艺,成功开发Cr12MoV钢矩形连铸坯及轧制19 mm厚扁钢产品,实现了高碳高合金冷作模具钢的低成本制备^[74-75]。

4 结论与展望

经过多年产业发展与技术进步,我国模具钢已形成了完整且丰富的钢种体系,可基本较好的满足国内大部分模具应用需求。特大型宽扁钢、喷射成形、粉末冶金、加压电渣、高合金连铸等特色工艺产品不断实现产业化突破,为下游模具市场提供了即

齐全又经济的模具钢产品,产业自主配套能力大幅提升。但在超大截面材料的组织性能均匀性、高端产品质量性能一致性、批次稳定性、创新强韧化机制的材料设计、极端与苛刻服役工况要求的专用高性能模具材料、表面强化处理技术、数智化研发范式及生产控制等方面仍然存在一定差距,有待进一步深入研究与发展。展望未来,笔者认为应重点关注以下几个方面。

1) 基于AI数智化研发与全流程智能生产控制

大力构建基于AI驱动新材料快速研发的知识

体系,加速开展建立模具材料专用高质量数据基础、融合大数据训练的专用大模型与智能体开发、机器学习算法优化、基于图像识别的显微组织数字化量化表征、高通量试验与服役失效数字孪生模型等工作,搭建模具钢智能设计平台,实现高性能模具材料的高效高质开发;在冶金生产关键工序部署多源传感器,依托 AI 实时采集关键工艺参数,建立工艺参数与冶金质量的关联预测模型,开发自适应智能调控系统,实现冶金生产全流程在线智能管控。

2) 短流程、高均匀性先进冶金制造技术迭代

持续推进粉末冶金、喷射成形、连铸短流程工艺规模化普及与质量提升,优化低偏析凝固技术、高等向性热加工工艺、超细化均质化控制等工艺技术,攻克特大型模具钢全截面组织均匀化技术。完善高氮耐蚀模具钢增氮控氮技术及加压电渣冶炼工艺,进一步提升高氮钢的质量及稳定性。提升连铸高合金模具钢的产品质量,扩大高质量低成本推广应用。

3) 注重发展匹配基材的一体化复合强化技术

加强注重表面处理强化与延寿技术的研发与应用,基于不同应用场景需求与基体模具材料特征,发展“基体热处理+复合涂层+梯度控制”多层梯度复合表面强化技术,综合研发喷丸、渗氮、氧

化、PVD、CVD、超声辊压、激光熔覆、增材制造等多种表面强化技术路线,构建耐热、耐磨、耐蚀、抗疲劳、高抛光全体系表面处理技术谱系与修复再制造技术。

4) 完善服役失效机理与全生命周期评价体系

系统开展冷热疲劳、高温磨损、腐蚀磨损等耦合失效机理研究,量化杂质元素、碳化物、夹杂物、残余奥氏体、组织均匀性、性能调控等对模具寿命的影响规律;建立专业统一的模具钢耐蚀性、耐磨性、抛光性能、疲劳性能、加工性能标准化评价方法;构建“评价标准-冶金质量-性能调控-服役应用”一体化材料数据库,实现材料的精准选材、控性与用材。

5) 行业级模具钢大数据与智能服务平台建设

整合国内冶金厂、高校、科研院所、销售服务商、模具终端应用企业的原材料质量、性能、工艺、应用及失效数据,搭建全链路贯通的一体化研发模式与模具钢行业数据库;开发智能选型 AI 工具,根据终端产品工况自动推荐适配国产模具钢牌号、质量与性能要求与成套模具工艺;探索利用工业互联网构建一体化模式,打通研发、生产、质检、售后数据链路,实现全产业链数据互通,持续提升国产模具钢市场的研发、服务竞争力,推动我国由模具钢制造大国向模具钢强国转变。

参考文献

- [1] 秦珂. 中国模具行业迎来高质量发展[J]. 现代制造, 2020 (1): 56.
- [2] 秦珂. “十五五”开篇之际话中国模具凝心聚力, 迎接未来[J]. 金属加工(冷加工), 2025(12): 1-4+26.
- [3] 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.
- [4] Dong L L, Zhou J, Gu J B, et al. Study on the effect of co microalloying on the high-temperature tensile behavior of 4Cr5Mo2V hot work die steel [J]. Steel Research International, 2025, 96 (7): 2400819.
- [5] Huang X D, Huang Q Y, Yang X C, et al. Enhanced mechanical and wear properties of a modified H13 hot work die steel through controlled formation of M_6C and stabilization of M_2C [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 41: 7562-7576.
- [6] 杨礼林, 徐祺昊, 赵莉萍. 稀土 Ce 对 4Cr5MoSiV1 钢组织的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(3): 242-247.
- [7] 陈荣春. 稀土 Y 对 H13 钢组织及性能的影响[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [8] 赵帆, 周文健, 张志豪. 稀土钕对 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.
- [9] 姜启川. 高效纳米强化合金技术及其在热作模具钢上产业化应用. 2020 中国铸造活动周论文集[C]. 2020.
- [10] Li C D, Li Y L, Zou Y Z, et al. Thermal fatigue performance enhancement of new high-Cr martensitic die steels based on overall microstructure manipulation by trace TiC - TiB₂ nanoparticles [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 901: 146468.
- [11] 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.
- [12] 张赫. 纳米颗粒调控新型高 Cr 工模具钢微观组织及使役性能[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [13] 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.
- [14] 王盼杰. 电渣重熔 H13 钢枝晶偏析和一次碳化物的控制与改善[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.
- [15] 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 Technol-

- ogy, 2024, 33: 2464-2477.
- [16] 周 许, 王石军, 鄢 磊, 等. 汽车压铸用4Cr5Mo2V大型模具钢640 mm×1100 mm锻坯的研制[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 70-74.
- [17] 刘世锋, 孙志雄, 魏瑛康, 等. 粉末床熔融增材制造工模具钢的研究进展[J]. 钢铁, 2024, 59(6): 2-21.
- [18] Kunz J, Herzog S, Kaletsch A, et al. Influence of initial defect density on mechanical properties of AISI H13 hot-work tool steel produced by laser powder bed fusion and hot isostatic pressing [J]. Powder Metallurgy, 2022, 65(1): 1-12.
- [19] Panahi N, Åsberg M, Oikonomou C, et al. Effect of preheating temperature on the porosity and microstructure of martensitic hot work tool steel manufactured with L-PBF [J]. Procedia CIRP, 2022, 111: 166-170.
- [20] Deirmina F, Amirabdollahian S, Lindwall G, et al. On the origin of enhanced tempering resistance of the laser additively manufactured hot work tool steel in the As-built condition[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2025, 56(1): 88-110.
- [21] Liu W, Wang J Y, Wei Y K, et al. Electron beam melting of H13 hot-work steels: Mechanical properties, microstructure evolution, precipitation behavior [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 37: 5283-5294.
- [22] Gurada C, Mundotia R, Mhatre U, et al. Thermal fatigue resistance studies of multilayer CrN and AlTiN coatings deposited on plasma nitrided H-13 hot work steel [J]. Lubricants, 2023, 11(1): 19.
- [23] 田泽明. 渗氮工艺对H13热作模具钢性能的影响分析[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(4): 67-70.
- [24] Leonov A A, Denisova Y A, Denisov V V, et al. Structure and properties of CrN/TiN multi-layer coatings obtained by vacuum-arc plasma-assisted deposition method [J]. Coatings, 2023, 13(2): 351.
- [25] Zhao W, Kong D J. Microstructure, bonding strength, and friction - wear performance of AlCrN/nitrided layer composite coating on H13 hot work mould steel [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2019, 16(3): 951-965.
- [26] Wu T, Chen Y X, Shi S Q, et al. Effects of W alloying on the lattice distortion and wear behavior of laser cladding AlCoCrFeNiWx high-entropy alloy coatings[J]. Materials, 2021, 14(18): 5450.
- [27] Huang S, Wu R M, Li W, et al. Fluctuations of properties of Cr-Mo-V hot work die steels by artificial increment of vanadium [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 105024.
- [28] Hu Z Q, Wang K K. Comparative study on thermal fatigue behavior of two hot work die steels [J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2022, 11(3): 425-433.
- [29] 邓俊杰. Mo含量对5%Cr系热作模具钢组织和冷热疲劳性能的影响研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.
- [30] 蒋沁洋, 丁恒楠, 罗 锐, 等. 改进型H13钢的微观形貌及高温性能[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(11): 1411-1418.
- [31] 谭慎路. H13模具钢表面渗金属层的组织性能研究[D]. 锦州:辽宁工业大学, 2022.
- [32] 刘继浩, 迟宏宵, 曹建春, 等. 冷却速率对新型高硬度预硬化塑料模具钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(6): 103-109.
- [33] 刘继浩. 预硬化塑料模具钢2Cr2MnNiMoV组织性能调控研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
- [34] Fan Y, Zhou J, Gu J B, et al. Effect of N on the microstructure and wear resistance of 4Cr13 corrosion-resistant plastic mold steel [J]. Materials, 2024, 17(2): 308.
- [35] 刘 明, 祝仁龙, 马兵刚, 等. 碳氮调控对Cr13型耐蚀塑料模具钢组织和性能的影响[J]. 模具制造, 2023, 23(8): 77-81.
- [36] 谢官利. C-N含量对Cr13型耐蚀塑料模具钢组织和性能的影响[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
- [37] Chi H X, Liu J H, Zhou J, et al. Influence of microstructure on the mechanical properties and polishing performance of large pre-hardened plastic mold steel blocks [J]. Metals, 2024, 14(4): 477.
- [38] 赵卢亮, 邢春桥, 姚 赞. 高温扩散退火对P20塑料模具钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2026, 47(4): 141-148.
- [39] 王剑锋, 迟宏宵, 刘建雄, 等. 固溶处理对10Ni3MnCuAl塑料模具钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(12): 185-188.
- [40] Luo Y, Wu X C. Investigation of precipitation in a aging hardened plastic mould steel [J]. Advanced Materials Research, 2012, 528: 152-155.
- [41] 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.
- [42] 王文洋, 王怡群, 王晓飞, 等. ZYP40R塑料模具钢电渣重熔工艺实践[J]. 大型铸锻件, 2021(2): 10-12.
- [43] 王振武, 王显庭. 电渣重熔优质塑料模具钢A718的冶金质量和生产成本分析[J]. 天津冶金, 1998(2): 18-21.
- [44] 臧喜民, 邓 鑫, 李万明, 等. 抽锭电渣重熔718塑料模具钢板坯锭的新工艺[J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(1): 39-42+48.
- [45] 苗招亮. 导电方式对电渣重熔S136塑料模具钢凝固质量及性能的影响[D]. 沈阳:东北大学, 2019.
- [46] 管迎春, 唐国翌, 叶 强. 耐蚀镜面塑料模具钢4Cr13(1.2083)质量的分析[J]. 特殊钢, 2006, 27(5): 55-57.
- [47] Chen X, Wu B Y, Li J Y, et al. Microstructural evolution in large-section plastic mould steel during multi-directional forging [J]. Metals, 2022, 12(7): 1175.
- [48] Chen X, Wu B Y, Wu B L, et al. Multi-scale analysis of void evolution in large-section plastic mold steel during multi-directional forging[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(12): 1961-1977.
- [49] 刘航航. 厚大断面预硬型718H塑料模具钢组织调控及力学性能研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.
- [50] Aydın M, Günay Y, Yapan Y F, et al. Machining performance analysis and optimization in the milling of mold steel under MQL with nanofluid[J]. Machining Science and Technology, 2026, 30(2): 424-448.
- [51] Akdulum A, Kayir Y. Prediction of surface roughness in boring of 1.2311 material using machine learning enhanced by virtual sam-

- pling methods [J]. International Journal of Material Forming, 2026, 19(2): 36.
- [52] Akdulum A, Stüzgünol M, Kayir Y. Prediction of feed force with machine learning algorithms in boring of AISI P20 plastic mold steel[J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110704.
- [53] Hamdi A, Yapan Y F, Uysal A, et al. The effects of minimum quantity lubrication parameters on the lubrication efficiency in the turning of plastic mold steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(11): 5803-5821.
- [54] Erman B, Kalyon A. Multi objective optimization of parameters in EDM of Mirrax steel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2023, 38(7): 848-858.
- [55] Zhang M X, Zhang B N, Ma D S, et al. A novel low-cost selective laser-melted 718HH plastic mold steel with an excellent combination of strength and toughness[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2025, 32(7): 2076-2088.
- [56] 张梦醒, 马党参, 周 健, 等. 718HH 塑料模具钢的粉末特性及其激光选区熔化成形性能[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(6): 27-32.
- [57] Chi H X, Di Y N, Zhang N, et al. New insight into the relationship between the C-Cr ratio and carbides, mechanical property of cold working die steel[J]. Materials Research Express, 2023, 10(12): 126512.
- [58] Shen X Y, Peng M L, Fu H, et al. Enhanced wear resistance of a die steel *via* modification of the M7C3 and M23C6 carbides[J]. Wear, 2025, 576: 206106.
- [59] Cao K, Wang Z G, Wang D, et al. Effects of niobium and yttrium additions on carbide characteristics, microstructural evolution, and performance enhancement in D2 cold work die steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38: 5579-5593.
- [60] Du L H, Wang W, Ke D Q, et al. Effect of homogenization treatment on carbides and mechanical properties of As-cast Cr8 cold work die steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2026, 57(6): 2833-2853.
- [61] Öztürk Ş, Eruslu S Ö, Yılmaz S O, et al. Effect of austempering on the mechanical properties of X210Cr12 cold work tool steel with molybdenum addition[J]. Materials Testing, 2026, 68(4): 630-640.
- [62] Çakir F H, Ceritbinmez F. Investigating the potential of austempering for cold work steels: A comparative study on DIN 1.2379 tool steel[J]. Sādhanā, 2025, 50(3): 119.
- [63] Boztepe A, Gecü R. Achieving synergistic improvement on wear performance of D3 cold-work steel by modifying the number and order of deep cryogenic and tempering treatments [J]. Tribology Transactions, 2025, 68(2): 274-287.
- [64] Li J W, Cai X, Wang Y W, et al. Multiscale analysis of the microstructure and stress evolution in cold work die steel during deep cryogenic treatment[J]. Materials, 2018, 11(11): 2122.
- [65] Hong S, Wu Y P, Wang B, et al. Improvement in tribological properties of Cr12MoV cold work die steel by HVOF sprayed WC-CoCr cermet coatings[J]. Coatings, 2019, 9(12): 825.
- [66] Zhang M, Yi C Y, Yang H Y, et al. Hardened layer microstructure and wear resistance of 7CrSiMnMoV cold work tool steel after laser surface quenching: Processes and mechanisms [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2025, 25(4): 239.
- [67] 元 莎. Cr8 型模具钢强韧化技术与服役性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2022.
- [68] 西克宇. 冷作模具用 7Cr7Mo2V2Si 钢热处理工艺优化及其对力学性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- [69] 孔德军, 谢春洋. Cr12MoV 冷作模具钢渗硼层表面与界面分析[J]. 兵工学报, 2015(3): 571-576.
- [70] 潘 婷. Cr12 型冷作模具钢渗硼工艺及性能[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [71] 杨 程, 刘思琪, 郭 鑫, 等. 超声滚压对 DC53 钢表面性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(10): 100-108.
- [72] 于 洋, 徐圣航, 廖 俊. 粉末冶金工模具钢的生产技术及应用研究进展(上)[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(1): 1-10+16.
- [73] 迟宏宵, 刘继浩, 马党参, 等. 喷射成形技术在高合金工具钢中的应用及研究进展[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 14-21.
- [74] 朱喜达, 陆家生, 赵勇智, 等. 冷作模具钢(Cr12MoV)短流程生产工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 10-13.
- [75] 姚 健, 朱喜达, 刘 宇, 等. 高碳高合金工模具钢连铸工艺发展现状[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 66-72.