

· 工艺材料进展 ·

## 国内外热作模具钢的研究进展

李 勇<sup>1</sup> 左秀荣<sup>1</sup> 陈蕴博<sup>2</sup> 王森辉<sup>2</sup> 赵 新<sup>3</sup>

(1 郑州大学物理工程学院材料物理教育部重点实验室, 郑州 450052; 2 机械科学研究总院先进制造技术研究中心 & 先进成形与装备国家重点实验室, 北京 100083; 3 郑州航空工业管理学院, 郑州 450015)

**摘 要** 介绍了国内外传统和新型热锻、热挤压和压铸用热作模具, 以及特殊用途热作模具的钢种和特点; 热作模具钢热处理和表面处理技术的研究进展。提高模具钢纯净度、均匀和细化组织, 用计算机模拟技术开发热作模具钢新钢种是目前提高热作模具钢寿命的重要方法。

**关键词** 热作模具钢 研究 进展

## Progress of Research in Hot Working Die Steel at Home and Abroad

Li Yong<sup>1</sup>, Zuo Xiurong<sup>1</sup>, Chen Yunbo<sup>2</sup>, Wang Miaohui<sup>2</sup> and Zhao Xin<sup>3</sup>

(1 Ministry of Education Key Lab of Material Physics, School of Physical Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052; 2 Advanced Manufacture Technology Center; China Academy of Machinery Science & Technology; State Key Lab of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing 100083; 3 Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015)

**Abstract** The steel grades and characteristics of traditional and new developed hot working die steels at home and abroad including die steels for hot forging, hot extrusion and pressured casting, as well as for special properties service are presented in this article, while the research progress on heat treatment and surface treatment for hot working die steel is introduced. At present, increasing cleanliness of die steels, homogenizing and fining structure, and developing new grades and processes of hot working die steel by computer simulation technology are important methods to increase service life of hot working die steels.

**Material Index** Hot Working Die Steel, Research, Progress

20 世纪 80 年代以来, 我国的模具工业发展迅速, 目前我国模具总产值已跃居世界第 3, 仅次于日本和美国。尽管我国模具和模具钢的发展非常迅速, 但现阶段还不能全面满足国内需求, 每年中高档模具仍需大量从国外进口, 原因之一就是国产模具钢在很多方面与国际先进水平还有一定差距<sup>[1]</sup>。热作模具的工作条件极为恶劣复杂, 都是直接与加热的坯料甚至液态金属相接触, 并且在服役过程中不仅需要反复地被加热和冷却, 而且还受到冲击载荷的作用, 因此为了满足热作模具的使用要求对热作模具钢的性能具有极为苛刻的要求<sup>[2]</sup>。当前热作模具钢的发展日新月异, 国内外开发出了许多性能优异的新钢种, 许多新技术新工艺在模具钢的冶炼和热处理过程中的应用极大地提高了模具钢的质量和性能。

本文主要从钢种的改良和新钢种的开发研制、用高新技术提升模具钢的质量、热作模具钢的热处理技术和表面处理技术 3 个方面简述当前国内外热

作模具钢的发展现状。

### 1 热作模具钢钢种的发展

我国传统上热作模具用钢主要是 5CrMnMo、5CrNiMo 和 3Cr2W8V 3 个钢号, 其中 5CrMnMo 和 5CrNiMo 主要用于中小锻模, 对于更大截面或更高温度的热锻模, 这两种钢的淬透性和淬硬性都达不到要求, 热稳定性也差<sup>[3]</sup>。基于传统热锻模具钢在性能上存在不足, 按照合金化成分设计原理并结合我国资源情况在 5CrNiMo 钢的基础上研制开发出一些新型的钢种(表 1), 新钢种与传统钢种相比较, 淬透性及热稳定性明显得到提高。

由于铸造模具与普通机械加工制造的模具相比具有多方面的优越性, 国内外都非常重视其发展。目前国外精密铸造热锻模已形成规模生产, 并得到较广泛应用, 但国内铸造的热锻模寿命较低与国外相比有较大的差距<sup>[5]</sup>。

为了提高铸造热锻模具钢的性能, 国内目前研

表1 传统及新型热作模具钢的牌号和特点

Table 1 Specification and characteristics of traditional and new developed hot working die steels

分类	牌号	特点
热锻 模具钢	5CrMnMo	用于厚度 $\leq 250$ mm的小型热锻模
	5CrNiMo	用于300~400 mm厚度的大中型热锻模
	45Cr2NiMoVSi	有二次硬化现象,热稳定性明显提高,调质后在500 mm $\times$ 500 mm截面上保持表面和心部的硬度几乎一致,实测高温性能优于5CrNiMo <sup>[4]</sup>
	3Cr2MoWVN 5Cr2NiMoVSi	大截面热锻模具钢
热挤压 及压铸 模具钢	3Cr2W8V	热稳定性高,使用温度达650 $^{\circ}$ C,但导热性能低,冷热疲劳性能差,模具使用寿命不高
	DH21	在H13基础上研制出的,与H13相比其热强性和高温抗冲性能显著提高 <sup>[9]</sup>
	DIEVAR	瑞典公司在H13钢的基础上结合H10、H11、QRO90、DN1.2367钢的合金化及强韧化特点,提高高温强度及韧性推出的钢种 <sup>[10]</sup>
	SWPH13	国产优质H13钢
	HM1	在3Cr3Mo3V钢基础上增加W、V含量,模具寿命是3Cr2W8V钢的2~3倍 <sup>[11]</sup>
	Y <sub>4</sub>	合理的成分配比达到高的热强性、热稳定性及良好的韧性和塑性,抗冷热疲劳性能明显优于3Cr2W8V
	Y <sub>10</sub>	模具使用寿命普遍比3Cr2W8V钢提高1倍以上 <sup>[12]</sup>
特殊性能 热作 模具钢	5Cr4Mo3Si- MnVA1	在4Cr3Mo3V钢的基础上通过调整合金元素开发的,在700 $^{\circ}$ C仍可以保持40 HRC的硬度,其性能比3Cr2W8V大幅度提高 <sup>[13]</sup>
	PH	基体钢,工作温度可以达到700 $^{\circ}$ C以上 <sup>[16]</sup>
	5Mn15	我国研制的一种析出硬化型热作模具钢,其用于制作压力机锻模,使用寿命比5CrNiMo高1~1.5倍 <sup>[17]</sup>
	AH	我国开发的性能优良的奥氏体型热作模具钢,其使用温度可以超过700 $^{\circ}$ C

究主要集中在两个方面:(1)优化模具钢合金元素成分;(2)对现行的铸造热锻模具钢进行变质处理。目前国内的铸造热锻模的合金成分设计主要以高温耐磨性为依据,其原因主要是国内的铸造热锻模寿命较低,其高温耐磨性能不高<sup>[6]</sup>。国内对铸造热锻模进行变质处理的研究主要使用RE、Nb等元素,单独使用或进行复合变质。

3Cr2W8V钢广泛用于黑色、有色金属热挤压模具和Cu、Al合金的压铸模具,这种钢的热稳定性高,使用温度达650 $^{\circ}$ C,但钨系热作模具钢的导热性能低,造成其冷热疲劳性能差,模具使用寿命不高<sup>[7,8]</sup>。当前实际生产对热挤压及压铸模具用钢性能的要求越来越高,为了适应这种变化提高热作模具钢的性能,国内外的研究工作者经过多次研究试制后,相继研发了一些综合性能高的热作模具钢。

从当前的研究情况来看,国内外的研究者主要是基于H13、3Cr3Mo3V这两种在国内外应用较广的钢种从优化模具钢的成分,改进模具钢的生产工艺

流程两个方面发展新钢种,提高热挤压及压铸模具钢的性能,形成了一批性能优良的新钢种(表1)。

为了提高H13热作模具钢的性能,世界各国通过调整优化合金成分研发了许多新型钢种,当前H13钢成分优化改进有两种趋势:(1)是低Si高Mo的合金化途径<sup>[14]</sup>;(2)加入Nb微合金化的方法,Nb的适量加入(0.07%)可以起到细化晶粒、提高热稳定性、热疲劳性能<sup>[15]</sup>的作用。

近年来,在3Cr3Mo3V钢的基础上国内外研制了一些强韧性好、热稳定性高的热作模具钢,较有代表性的有瑞典的QR090M、日本的QDH、德国的GS-999等,这些钢都具有较高的高温性能和冷热疲劳性能,我国在3Cr3Mo3V钢的基础上新发展的钢种中有代表性的有:HM1、Y<sub>4</sub>、Y<sub>10</sub>、HD等<sup>[4]</sup>。

新技术新工艺的发展对模具提出了更严格的要求,一些普通热作模具钢已不能满足其要求,必须采用特殊性能钢种制作热作模具,才能使模具达到其技术要求并延长其使用寿命。这类特殊性能热作模具钢主要有基体钢、析出硬化钢、奥氏体型热作模具钢等。我国在这些方面也发展了一些性能优良的钢种,比如5Cr4Mo3SiMnVA1(基体钢)、PH钢(析出硬化钢)、5Mn15(奥氏体钢)、AH(奥氏体钢)等。

## 2 新技术在提高模具钢质量上的应用

对模具钢而言,提高其纯净度已经成为提高模具性能和寿命的重要手段。提高钢材的纯净度主要是指控制钢中五害元素的含量,通过降低P、S含量可明显提高材料的冲击韧性和热疲劳性能,改善材料的等向性能<sup>[18]</sup>;H、N、O对钢材的性能也有诸多有害的影响,降低这些元素的含量对改善和提高钢材的性能是非常有利的<sup>[19]</sup>。目前往往采用真空精炼、电渣重熔、乃至保护气氛重熔、真空自耗等先进的冶炼工艺来提高模具钢的冶炼质量,各种精炼技术的运用提高了钢的纯净度,极大地降低钢中的夹杂物和偏析,并改善夹杂物的形态。

为了提升模具钢的质量除了追求高的纯净度外,更需要微观组织的均匀细小,特别是对模具钢中碳化物的有效控制。为了实现这一目的,一些新的工艺技术被采用,比如为了改善H13钢偏析减少一次碳化物,广泛采用高温扩散退火的方法,该方法的应用同时也使二次碳化物成球形分布在铁素体的基体上,所有这些提高了H13钢的横向冲击韧性。为了提高H13钢的等向性能则采用等向锻造工艺,通过等向锻造的模具钢横向的塑性和韧性均得到很大

提高,等向性能提高明显。宝钢集团五钢公司与上海大学合作采用以上这些先进技术,改进工艺方法,在有效提高了钢材的纯净度和均匀度后,成功研制了具有国际先进水平的 SWPH13 钢,这一热作模具钢的性能已达到并超过瑞典名牌 ASSAB8407(H13) 钢,不但取代了进口而且还可以替代出口<sup>[20]</sup>。

现代计算机技术的应用使模具钢的研究开发取得长足的进步,也使新钢种的研发周期加快,比如应用大型商业化软件 Thermo-calc 研究开发了 Nb 微合金化热作模具钢,有效提高了钢的热疲劳性能<sup>[21]</sup>。利用计算机技术对热加工工艺过程进行模拟,从而开发出先进的热加工工艺也是当前计算机技术在提高模具钢质量方面一个重要的应用。采用有限元分析软件对热连轧过程的金属三维流动进行了有限元模拟,从而确定了安全可行的轧制方案<sup>[22]</sup>。将计算和实验结合起来解决实际生产问题,可消除传统实验方法中存在的感性因素、减少盲目性,使新钢种的开发以及新工艺的制定向理性化、科学化、高效化发展,从而节省大量的研究经费、研究时间和人力。

### 3 模具钢的热处理技术的进展

#### 3.1 高温淬火工艺

随淬火温度的升高,H13 钢的热强性、断裂韧性和热疲劳抗力能被明显的增强。基于这种原因,人们发展了高温淬火工艺。用高温淬火高温回火代替普通球化退火,然后再进行普通的淬火和回火,这种工艺既是双重淬火工艺,又能在几乎不降低冲击韧性的前提下得到最大的断裂韧性,硬度也高于普通热处理<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 强烈淬火技术

虽然强烈淬火的冷却速度极大,但可避免开裂,减少畸变,显著提高钢的力学性能,延长零件使用寿命,而且在许多情况下,强烈淬火技术还有节能、高效、环保等效果,是一种前景广阔的热处理技术<sup>[24]</sup>。

#### 3.3 深冷处理

深冷处理是常规热处理的延伸,是以液氮为制冷剂在低于零下 130 °C 的温度对材料进行处理的方法。该方法能够改变材料的力学性能,可在不降低材料强度及硬度的情况下,显著提高材料的韧性。近年来,国内外已对深冷处理进行了广泛的研究,并在工模具上不断得到应用,处理过的工模具使用寿命得到明显提高,但在工艺的稳定性以及对某些材料的作用机理方面的研究还不够深入,阻碍了深冷处理在工业上的广泛应用<sup>[25]</sup>。

## 4 模具钢的表面处理及其进展

### 4.1 表面渗氮

目前对渗氮的研究主要集中在等离子渗氮上,气体渗氮、盐浴渗氮等传统工艺尽管在工业上已经取得了较好的应用,但是由于这些传统工艺所用材料往往具有易爆炸性、有毒性,在实际应用中会对工人及环境造成伤害,从而限制了这些传统工艺的应用。等离子渗氮就没有气体盐浴渗氮工艺的不利因素,而且可以避免复合层即白亮层的形成和控制扩散层的质量<sup>[26]</sup>。

### 4.2 激光表面处理

高能束表面强化技术的特点是加热速度快、工件变形小、不需冷却介质、可控性能好,便于实现自动化控制,在高能束表面强化技术中尤以激光表面改性的研究应用最多。目前对激光表面处理的研究主要是利用这种技术的可控性好、对基体影响小的特性,结合其它技术进行某些新工艺的开发研究,比如利用激光表面处理技术进行功能梯度材料的设计并应用在模具上,从而提高模具的性能<sup>[27]</sup>;还有人把激光表面处理技术与仿生学相结合,在材料表面进行激光仿生耦合设计,从而提高材料的表面性能<sup>[28]</sup>。

除此之外,对激光表面处理进行数学模拟也是目前研究的一个热点。这方面的研究,一方面是基于实际的激光表面处理,由于涉及的参数很多,因此需要确定一个最优的工艺,这就需要一个数学模型来帮助预测最优的工艺参数;另一方面运用数学模型可以使人们对最终结果的相互影响有更好的理解<sup>[29]</sup>。

### 4.3 表面气相沉积强化

气相沉积分为化学气相沉积(CVD)和物理气相沉积(PVD)。这方面的研究主要是在模具表面形成一层陶瓷涂层,但是应用陶瓷涂层的最大问题在于陶瓷涂层在热膨胀性能上与模具钢基体不匹配,这会造成涂层的早期开裂失效。在陶瓷涂覆前进行等离子渗氮是提高陶瓷涂层与基体结合力的有效方法,对提高热作模具寿命的效果显著,得到广泛研究<sup>[30]</sup>。鉴于各种陶瓷涂层,无论是单层还是多层或与渗氮复合,都不可避免造成与基体热膨胀性能的差异,所以对模具热疲劳性能的影响是无法避免的。因此有人提出设计出一种复合涂层系统,复合涂层系统除了使压铸模表面具有抗焊合、抗熔损、抗氧化、耐磨损等功能外,该涂层系统最大的特点是减少热量向模具的传递,减缓模具的温度变化,以提高

模具钢的热疲劳抗力<sup>[31,32]</sup>。

## 5 结论

(1)制造业的快速发展对模具钢的性能提出了越来越高的要求,原有的模具钢已经无法满足现代制造业的需求。为适应制造业的发展,结合当前模具钢在应用中出现的问題,国内外对模具钢成分进行优化改进,研究开发出了许多性能优异的新型热作模具钢。

(2)应用高新技术,提高模具钢冶金质量和对组织性能进行均匀化,是提高模具钢性能的另一条重要的途径,我国 SWPH13 钢的成功研制就是这条思路的具体体现。

(3)对热作模具钢进行合理热处理和表面处理,是在现有材料基础上发挥材料潜力,提高热作模具使用寿命的常用方法。

国家 863 计划项目资助(2007AA03Z511)

## 参考文献

- 1 陈再枝,马党参.我国模具钢的发展战略分析.钢铁,2006,41(4):5
- 2 于波,谢建庆,王 霆.新型热作模具用钢的发展现状及应用.热处理技术与装备,2008,26(9):6
- 3 赵昌盛.模具材料及热处理手册.北京:机械工业出版社,2008
- 4 朱宗元.我国热作模具钢性能数据集(续Ⅲ).机械工程材料,2001,25(8):39
- 5 方健儒,姜启川,赵宇光,等.铸造热锻模具钢的研究与应用.铸造,2002,51(1):7
- 6 Cui Xianghong, Shan Jun, Yang Ziyun, et al. Alloying Design for High Wear-Resistant Cast Hot-Forging Die Steels. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 15(4):67
- 7 朱宗元.我国热作模具钢性能数据集(续Ⅶ).机械工程材料,2001,25(8):38
- 8 潘振鹏,王桂棠,蔡莲淑.我国高强度热作模具钢的研究和应用.特殊钢,2003,24(1):1
- 9 程先华.热作模具钢合金化及其强化机制.上海金属,2001,23(2):1
- 10 张洪奎,徐明华.浅析我国模具钢的发展空间.热处理,2008,23(5):7
- 11 曲传江,常家芸,李忆莲.3Cr3Mo3W2V 钢贝氏体马氏体复合组织的研究.金属热处理学报,1996,17(1):21
- 12 史正良,刘金龙.热作模具钢的选择与应用.煤矿机械,2007,28(12):126
- 13 Cui Kun, He Xiangshan, Luo Xuexin. High-performance Hot Die Steel. The Proceedings of the 1 ~ (st) International Conference on Die & Mould Technology, Beijing, 2000
- 14 潘晓化,朱祖昌. H13 热作模具钢的化学成分及其改进和发展的研究.模具制造,2006(4):78
- 15 Shahram Kheirandish, Ahmad Noorian. Effect of Niobium on Microstructure of Cast AISI H13 Hot Work Tool Steel. Iron and Steel Research, 2008, 15(4):61
- 16 冯颖章,叶清键,潘振鹏.高热强性热作模具钢的研制开发及模具寿命的提高.广东机械学院学报,1995,13(3):64
- 17 崔 昆.国内外模具用钢发展概况.金属热处理,2007,32(1):1
- 18 许珞萍,吴晓春,李 麟,等.我国模具钢标准的思考.上海金属,2004,26(2):1
- 19 高海潮.氢、氮、氧对钢的危害来源及对策.包头钢铁学院学报,1999,18(S1):373
- 20 徐匡迪.关于洁净钢的若干基本问题.金属学报,2009,45(3):257
- 21 胡心彬,李 麟,吴晓春. Thermo-calc 在热作模具钢成分设计中的应用.热处理,2004,19(3):27
- 22 洪慧平,康永林.热作模具钢连轧过程力学参数的有限元分析.北京科技大学学报,2003,25(1):44
- 23 黄春峰.国外新型热作模具钢及其热处理工艺.航空精密制造技术,2004,40(3):16
- 24 攀东黎. 强烈淬火——一种新的强化钢的热处理方法.热处理,2005,20(4):1
- 25 唐明华,刘先兰.模具钢深冷处理的应用研究.机床与液压,2003(5):2
- 26 Da Silva L L G, Ueda M, Nakazato R Z. Enhanced Corrosion Resistance of AISI H13 Steel Treated by Nitrogen Plasma Immersion Ion Implantation. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(19-20):8291
- 27 Waheed Ul Haq, Syed Andrew J Pinkerton, Zhu Liu, et al. Coincident Wire and Powder Deposition by Laser to Form Compositionally Graded Material. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(16-17):7083
- 28 Zhang Z H, Zhou H, Ren L Q, et al. Tensile Property of H13 Die Steel with Convex-shaped Biomimetic Surface. Applied Surface Science, 2007, 253(22):8939
- 29 Tobar N J, Alvarez C, Amado J M, et al. Laser Transformation Hardening of a Tool Steel Simulation-based Parameter Optimization and Experimental Results. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(22-23):6362
- 30 Rodríguez-Baracaldo R, Benito J A, Puchi-Cabrera E S, et al. High Temperature Wear Resistance of (TiAl)N PVD Coating on Untreated and Gas Nitrided AISI H13 Steel with Different Heat Treatments. Wear, 2007, 262(3-4):380
- 31 Lin J, Carrera S, Kunrath A O, et al. Design Methodology for Optimized Die Coatings: The Case for Aluminum Pressure Die-casting. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(6):2930
- 32 Rojo A, Oseguera J, Salas O, et al. Process Structure Properties Relationship during Formation of CrN and AlN Layers on H13 Steel. Surface & Coatings Technology, 2008, 203(3-4):217

李 勇(1981-),男,硕士研究生,金属材料 and 热处理研究。

收稿日期:2009-11-06