

·新材料新技术·

## 新型 Cr-Mo-V 精铸热作模具钢的研制

王树奇 陈康敏 崔向红\* 洪 扁

(江苏大学材料科学与工程学院, 镇江 212013; \*吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130022)

**摘 要** 在研究热作模具钢主要成分合金化原理的基础上, 用 250 kg 中频感应炉熔炼研究新型精铸热作模具钢, 并采用 MG2000 高温摩擦磨损试验机对试验钢进行 400 °C 磨损试验。研究表明, 根据 V/C 3.0,  $C_{\text{总}} 0.1\% \sim 0.2\%$ ,  $Cr/(Cr + Mo) 0.68 \sim 0.85$ ,  $Cr/C_{\text{总}} > 16.6$ ,  $Mo/C_{\text{总}} > 16$  原则, 设计的新型精铸热作模具钢(%: 0.32C, 3.54Cr, 2.41Mo, 1.02V) 具有高的耐高温磨性, 其 400 °C 高温磨损率为 H13 钢(%: 0.45C, 5.3Cr, 1.4Mo, 0.83V) 的 30%, 3Cr2W8V 钢(%: 0.37C, 2.48Cr, 7.82W, 0.41V) 的 20% ~ 25%。

**关键词** Cr-Mo-V 新型热作模具钢 精铸 高温耐磨性

## Development of a New Cr-Mo-V Precision Casting Hot Working Die Steel

Wang Shuqi, Chen Kangmin, Cui Xianghong\* and Hong Bian

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

\*School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022)

**Abstract** Based on research of main composition alloying principle for hot working die steel, the studied new precision casting hot working die steel was melted by a 250 kg medium frequency induction furnace and the wearing test on test steels at 400 °C was carried by MG2000 high temperature friction-wear testing machine. The research results showed that according to the principle of V/C- 3.0,  $C_{\text{total}} 0.1\% \sim 0.2\%$ ,  $Cr/(Cr + Mo) 0.68 \sim 0.85$ ,  $Cr/C_{\text{total}} > 16.6$ ,  $Mo/C_{\text{total}} > 16$ , a designed new precision casting hot working die steel - 0.32C, 3.54Cr, 2.41Mo, 1.02V had higher high-temperature wear resistance, of which the high-temperature wear rate at 400 °C was 30% that of 0.45C- 5.3Cr- 1.4Mo- 0.83V hot working die steel H13 and was 20% ~ 25% that of 0.37C- 2.48Cr- 7.82W- 0.41V die steel 3Cr2W8V.

**Material Index** Cr-Mo-V New Hot Working Die Steel, Precision Casting, Wear Resistance at High Temperature

精铸热作模具有材料利用率高、切削加工量小、生产周期短、成本低、寿命高等优点, 目前国外精密铸造热作模具已形成规模生产, 并得到较广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。国内也进行了相应研究和应用, 但影响面尚小, 使用寿命尚待提高<sup>[3,4]</sup>。因此, 精铸热作模具技术仍未成为国内热作模具主流制造技术。目前国内精铸热作模具钢寿命与国外相比尚有差距, 其主要原因是热作模具钢合金化不合理、高温耐磨性较低<sup>[4]</sup>。本课题研究了 Cr-Mo-V 精铸热作模具钢的合金成分设计和高温耐磨性, 并与常用 H13 和 3Cr2W8V 锻钢进行对比。

### 1 试验方法

采用 250 kg 中频感应炉不氧化法工艺熔炼精铸热作模具钢, 当钢液温度高达 1 550 °C 时, 插铝出钢, 在浇包中加入复合变质剂, 对钢液进行孕育变质处理, 最后浇注楔形试样。精铸钢经 1 020 °C 保温 1 h 油冷获得马氏体-贝氏体复相组织, 经

440 °C 或 600 °C 回火; 锻钢 H13、3Cr2W8V 钢经奥氏体化油冷分别在 600 °C 或 620 °C 回火。

采用 MG-2000 型销盘式高温摩擦磨损试验机进行高温磨损实验。试验规范确定为: 干摩擦条件, 试验温度为 400 °C, 载荷为 100 N, 滑动速度为 2 m/s, 总滑行距离为  $1.8 \times 10^3$  m。销( $\Phi 6$  mm  $\times$  12 mm) 材料为新型铸钢和锻钢; 对磨盘( $\Phi 70$  mm  $\times$  8 mm) 为 Cr12MoV, 58HRC; 试验前将销、盘摩擦表面磨光, 并用溶剂清洗, 除去表面油污; 试样在磨损前后用丙酮清洗干燥后, 用分析天平(精度为 0.01 mg) 称取试样重量, 由此计算磨损率  $W_s = V/p \cdot d$  (式中  $V$  为磨损体积损失(磨损失重/密度),  $d$  为滑行距离,  $p$  为载荷)。

### 2 Cr-Mo-V 精铸热作模具钢合金成分设计

热作模具在使用过程中承受小能量的多冲机械载荷, 模具表面承受反复冷热循环和与材料加工接触时产生的热作用和高温摩擦磨损。因此,

要求模具材料具有以下性能:(1) 韧性:高的多冲疲劳抗力,防止低寿命的机械破坏;(2) 高的热疲劳抗力、热强性(热稳定性)防止与热作用有关的热疲劳开裂、塑性变形;(3) 良好的高温磨损抗力,防止高温磨损。

Cr 的加入应保证对基体的固溶并防止 Cr 过量且减少形成  $(Cr, Fe)_7C_3$  和  $M_{23}C_6$ 。Mo 首先保证对基体的固溶强化以保证基体的热强性和热稳定性,其次 Mo 可抑制 Cr 的碳化物析出。但过量的 Mo 导致  $Mo_2C$  转变为  $M_6C$ ,沿原奥氏体晶界、马氏体板条界析出,大颗粒状的  $M_6C$  会使合金脆化。V 的加入加强  $V_4C_3$  弥散析出,有利于 Mo、Cr 进入基体固溶强化,过多的 V 进入基体降低原子间的结合力,使基体的热强性和热稳定性降低。

精铸热作模具钢的合金化主要原则为:

(1) 防止 V 进入基体中,同时预防过多的碳余量使 Mo、Cr 的碳化物增多,降低 Mo、Cr 固溶作用。V 作为强碳化物形成元素,首先与碳结合形成  $V_4C_3$ ,过多的 V 除形成碳化物以外,其余将进入基体中。Mo、Cr 也有与 V 争夺碳的作用,而形成 Mo、Cr 的碳化物。因此,要保证一定的 V/C 或碳余量。但要防止 V 进入基体中并预防过多的碳余量使 Mo、Cr 的碳化物增多,降低了 Mo、Cr 固溶作用。因此,在一定含碳量下,对 V/C 或余下的碳量有要求。

(2) 防止过多形成 Cr 的碳化物(一定碳余量下)。Cr 的碳化物的大量析出是有害的,由于 Cr

的碳化物稳定性差和大量 Cr 进入碳化物降低基体的稳定性、抗回火性和热强性。对于 Cr-Mo-V 型热作模具钢<sup>[5]</sup>,一般认为  $Cr/(Cr + Mo) > 0.85$  为主要形成 Cr 的碳化物; $Cr/(Cr + Mo) < 0.68$  主要形成 Mo 的碳化物。

(3) 保证基体中固溶有一定量的 Cr 和 Mo。当形成  $Cr_7C_3$   $Cr/C_{余} < 10.1$  则无 Cr 的固溶;当形成  $Cr_{23}C_6$   $Cr/C_{余} < 16.6$  则无 Cr 的固溶;当形成  $Mo_2C$   $Mo/C_{余} < 16$  则无 Mo 的固溶。上述经验数值可用于粗略估计基体中 Cr 和 Mo 固溶状况。

按上述合金化原则,在精铸热作模具钢中,Cr 的加入,应保证对基体的固溶,防止 Cr 过量, $Cr/(Cr + Mo)$  在 0.68 ~ 0.85,减少形成  $(Cr, Fe)_7C_3$  和  $M_{23}C_6$ ,  $Cr/C_{余} > 16.6$ ,增加 Cr 的固溶。Mo 首先对基体的固溶强化,来保证基体的热强性和热稳定性,其次可抑制 Cr 的碳化物的析出,控制  $Mo/C_{余} > 16$ ;V 的加入,加强  $V_4C_3$  弥散析出,有利于 Mo、Cr 进入基体固溶强化;控制 V/C 在 3 左右,保证基体具有高的热强性和热稳定性。

### 3 精铸热作模具钢与常用模具钢的高温磨损性能对比

根据上述合金成分设计原则得到的高耐磨精铸热作模具钢与 H13 钢、3Cr2W8V 锻钢高温磨损性能对比见表 1。可见,精铸模具钢具有高的的高温耐磨性,磨损率明显低于常用 H13 和 3Cr2W8V 锻钢。锻钢无论硬度高还是低,其高温磨损率都

表 1 新型精铸热作模具钢、H13 钢、3Cr2W8V 锻钢热作模具钢 400 °C 时磨损率对比

Table 1 Comparison of wear resistance at 400 °C between new precision cast hot working die steel and forged hot working die steels H13 and 3Cr2W8V

钢种	成分/%					淬火			回火温度 /°C	HRC	磨损率 / $10^{-14} m^3 \cdot (N \cdot m)^{-1}$
	C	Cr	Mo	W	V	温度/°C	时间/h	冷却			
精铸模具钢	0.32	3.54	2.41	-	1.02	1 020	1	油冷	440	45	1.921 6
									600	39	1.861 9
H13	0.45	5.3	1.4	-	0.83	1 040	1	油冷	600	48	6.647 4
									620	41	6.457 0
3Cr2W8V	0.37	2.48	-	7.82	0.41	1 060	1	油冷	600	47	10.024 2
									620	41	7.908 6

很大,高温耐磨性差。

图 1 示出了 H13、3Cr2W8V 钢与精铸热作模具钢的高温磨损后的磨面形貌。可以明显看出锻钢表面磨损严重,剥落面积大,磨面粗糙;而精铸热作模具钢磨面磨损并不严重,剥落区少而浅,没有明显的大面积剥落,表面磨痕细小。

热作模具与炽热金属直接接触模具表面温度可达到 400 ~ 500 °C,在高温下磨损金属易于氧化,在磨损表面形成一层氧化膜<sup>[6,7]</sup>。一方面氧化膜对磨损表面起到保护作用;另一方面氧化膜往往脆性较大,在外力作用下氧化膜极易发生裂纹萌生和裂纹的疲劳扩展而产生疲劳剥落。剥落下

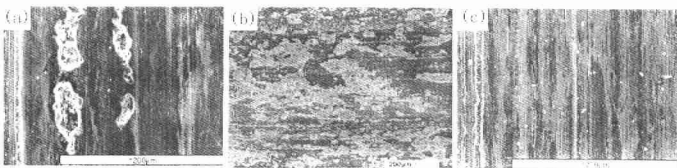


图1 H13 (a), 3Cr2W8V (b) 模具钢和新型精铸热作模具钢(c) 400 °C 高温磨损形貌  
Fig.1 Wear morphology of the steel H13 (a), 3Cr2W8V (b) and new precision cast hot working die steel (c) at 400 °C

来的氧化物一部分离开摩擦系统,造成磨损;另一部分氧化物在摩擦表面被磨碎成颗粒状碾压在剥落区内,这部分氧化物对磨损表面有保护作用,一定程度上降低磨损率。因此,磨损率取决于剥离出摩擦系统的氧化物的数量。氧化物的剥落取决于氧化膜与基体的结合力,而基体的强韧性和热强性是保证结合良好的关键。热强性高及强韧性高对表面的氧化物膜起到良好的支撑作用,并阻碍裂纹的扩展,使氧化膜不易剥落,磨损率降低。

表2对比分析了精铸热作模具钢与H13、3Cr2W8V钢合金成分设计参数。在精铸热作模具钢中,碳化物以弥散析出的 $V_4C_3$ 为主,还有少量的Cr、Mo碳化物。Cr、Mo主要作为固溶元素存在于基体中,保证钢的热强性和热稳定性。 $C_{\text{Fe}}$ 较低,韧性较高。因此,热强性和强韧性高对表面氧化物膜起到良好的支撑作用,并阻碍裂纹扩展,使氧化膜不易剥落,磨损率降低。

表2 新型精铸热作模具钢和H13和3Cr2W8V钢的合金成分设计参数

Table 2 Alloying design parameters for new cast hot working die steel and the steels H13 and 3Cr2W8V

钢种	V/C	$C_{\text{Fe}}/\%$	$\frac{\text{Cr}}{\text{Cr} + \text{Mo}}$	Cr/ $C_{\text{Fe}}$	Mo/ $C_{\text{Fe}}$
精铸模具钢	3.19	0.14	0.73	25.3	17.2
H13	1.84	0.30	0.87	17.6	-
3Cr2W8V	1.11	0.30	0.54	-	13.0

H13和3Cr2W8V钢也属Cr-Mo(W)-V型,即Cr、Mo(W)、V为主要的合金元素。在H13钢中V/C较低, $V_4C_3$ 较少,Cr/(Cr+Mo) > 0.85以铬的碳化物为主, $C_{\text{Fe}}$ 较高,表明铬碳化物较多;Cr/ $C_{\text{Fe}}$ 为17.6表明基体中有一定量铬固溶。在3Cr2W8V钢中V/C更低, $V_4C_3$ 更少,Cr/(Cr+Mo) < 0.68以钨的碳化物( $M_6C$ 型)为主,高 $C_{\text{Fe}}$ 说明

钨碳化物多,Mo(W)/ $C_{\text{Fe}}$ 为13.0表明基体中钨含量并不充足<sup>[5]</sup>。相比之下,Cr-Mo-V精铸模具钢以 $V_4C_3$ 为主要碳化物,还含有少量的Cr、Mo碳化物,Cr、Mo主要固溶于基体中,保证了足够的热强性和韧性。因此,Cr-Mo-V精铸模具钢具有高的耐磨性,而H13和3Cr2W8V钢的磨损率高,耐磨性差。

#### 4 结论

(1) Cr-Mo-V精铸热作模具钢合金成分设计参数控制为:V/C3.0,  $C_{\text{Fe}}$  0.1% ~ 0.2%, Cr/(Cr+Mo) 0.68 ~ 0.85, Cr/ $C_{\text{Fe}}$  > 16.6, Mo/ $C_{\text{Fe}}$  > 16。

(2) Cr-Mo-V精铸热作模具钢以 $V_4C_3$ 为主要碳化物,Cr、Mo主要固溶于基体中,具有高的耐高温耐磨性,磨损率明显低于常用H13和3Cr2W8V锻钢。

国家863基金资助项目(2002AA331180)

#### 参考文献

- 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
- 贺俊杰,兰杰,翟春泉.模具的精密铸造技术.铸造,2000,49(3):156
- 兰杰,贺俊杰,丁文江.RE对铸造H13钢凝固组织及冲击韧性的影响.钢铁,2000,35(10):49
- 崔向红,王树奇,姜启川.铸造热锻模具的应用及失效分析.金属热处理,2001(1):17
- 马茂元,宋伟.G-Mo(W)-V型热作模具钢的合金化.热加工工艺,1990(2):40
- Esno Marui, Norihiko Hasegawa, Hiroki Endo, et al. Research on the Wear Characteristics of Hypereutectoid Steel. Wear, 1997, 205: 186
- 顾晓华,毛志远.5CrNiMo钢在高温蓄积中的动态氧化行为.浙江大学学报,1998,32(6):769

王树奇(1962-),男,教授,博士生导师,1997年哈尔滨工业大学毕业,从事复合材料、新型金属材料研究。

收稿日期:2005-06-07