第34卷 第4期 材 料 热 处 理 学 报 Vol. 34 No. 4
2013年 4月 TRANSACTIONS OF MATERIALS AND HEAT TREATMENT April 2013

新型冷作模具钢 SDC99 性能

李晨辉， 吴晓春， 谢 尘， 汪宏斌
(上海大学材料科学与工程学院，上海 200072)

摘 要： 对比研究了4种Cr8型模具钢的硬度、冲击韧性、抗弯强度及耐磨性能，借助JMatPro分别计算Cr8和Cr12型模具钢的碳化物类型与数量，讨论Cr8型模具钢合金化原理。结果表明：新型高强韧冷作模具钢SDC99成分设计合理，实物质量与进口钢相当。Cr8型模具钢通过成分调整，降低M_7C_3型莱氏体碳化物含量，大幅度提高冲击韧性；同时提高Mo、V等强碳化物形成元素含量，以增加二次碳化物，保证碳化物总量，提高耐磨性；加入Ni、Si等非碳化物形成元素细化晶粒，强化基体，增强韧性。

关键词： Cr8型模具钢；力学性能；JMatPro模拟；合金设计
中图分类号： TG142.1 **文献标志码：** A **文章编号：** 1009-6264(2013)04-0080-05

Research on properties of a new developed cold work die steel SDC99

LI Chen-hui， WU Xiao-chun， XIE Chen， WANG Hong-bin
(School of Materials Science and Engineering，Shanghai University，Shanghai 200072，China)

Abstract: Hardness，impact toughness，bend strength and wear resistance of a new developed cold work die steel SDC99 were examined and compared with those of Cr8 type die steels. Type and amount of carbides in Cr8 and Cr12 die steels were simulated by JMatPro，alloy design principle of Cr8 die steel was discussed. Experimental results indicate that the new develeped die steel SDC99 shows excellent mechanical properties. Through modifying the chemical composition，impact toughness of Cr8 tool steel is improved substantially by reducing M_7C_3 ledeburite carbides. Strong carbide forming elements such as Mo，V in Cr8 tool steel are increased for more secondary carbides to improve wear resistance. Non-carbide forming elements like Ni，Si are added to fine grains，strengthen matrix and improve toughness.

Key words: Cr8-type die steel； mechanical property； JMatPro simulation； alloy design

冷作模具钢主要用于冷态金属成形，如冷冲模、冷挤压模、冷镦模等。一般工作的实际温度低于200～300 ℃[1]。随着能源和环境问题的日益突出以及人们对安全的关注，高强度钢板被大量应用，而成形高强度钢板就要求冷作模具钢具有更好耐磨性与冲击韧性，为降低能耗，要求冷作模具钢易于加工，热处理简单并且变形小。传统高碳高铬Cr12型模具钢(简称Cr12钢)中碳化物偏析严重，基体中大块莱氏体碳化物处易产生应力集中而萌生裂纹。尽管耐磨性较好，但在高强度大冲击的服役条件下常因韧性不足而崩刃失效，并且该类模具材料机加工成本较高，迫切要求开发兼顾耐磨性具有高强韧性的模具钢。

20世纪80年代，国外先后研制出含Cr量约8%的Cr8型模具钢(简称Cr8钢)，如BOHLER K340、K360等[2]。上海大学与宝钢特钢合作以Cr12MoV为基础成功开发出新型高强韧冷作模具钢SDC99，替代国内常用Cr12钢，以提高效率降低能耗。SDC99钢一定程度上满足了工业发展需要，但仍需进一步开发高强韧高耐磨兼具优异切削性能的钢种。通过对比分析DC53、ASSAB88、Hitachi MetalsSLD-Magic等类似钢种，全面评定新开发的SDC99钢的质量。运用金属材料相图计算与性能模拟软件JMatPro进行模拟，讨论Cr8钢合金化原理，并为进一步开发兼具较好切削性能的模具钢提供理论依据。

1 实验材料及方法

实验所用SDC99钢制备方法为中频感应熔炼-电渣重熔-锻造为圆钢-退火，对比钢种分别为DC53、ASSAB88、SLD-Magic，均由相应企业提供，选取Cr12MoV钢作为Cr12钢代表，实验钢初始组织均为球化退火组织。在电子布氏硬度计(Brinell Hardness Tester HBE-3000A)和洛氏硬度计上测试硬度。试样

收稿日期： 2012-02-04； 修订日期： 2012-08-20
基金项目： 国家科技支撑计划资助项目(2007BAE510B04)；上海市重点学科建设项目资助(S30107)
作者简介： 李晨辉(1990—)，男，从事工模具钢研发，E-mail: canoe@shu.edu.cn。
通讯作者： 吴晓春，教授，电话：021-56331461。

经热处理后在 JB-30B 型冲击试验机上测试，冲击试样无缺口尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。用精密型微机控制电子万能试验机 CMT-5305 进行抗弯强度实验，尺寸为 7.5 mm×5 mm×100 mm。磨损实验采用 MMS-2A 型环/块对磨摩擦磨损试验机，试样尺寸为 3 mm×7 mm×30 mm，磨损后在 VHX-600 型超景深显微镜下测量磨痕宽度。试样经 4% 硝酸酒精腐蚀后用正立式金相显微镜(OM，LV150，Nikon) 观察组织。运用 JMatPro 进行平衡相图计算并分析讨论。实验钢的化学成分与初始退火硬度见表 1。

表 1　实验钢的化学成分(质量分数，%) 与初始退火硬度(HBS)

Table 1　Chemical composition(mass fraction，%) and initially annealed hardness(HBS) of tested steels

Steel	Chemical composition	Initially annealed hardness/HBS
SDC99	Fe-0.91% C-8.6% Cr-1.5% Mo-V-Si-Mn	222
DC53	Fe-1% C-8% Cr-2.3% Mo-V-Si-Mn	244
ASSAB88	Fe-0.93% C-7.7% Cr-2.5% Mo-0.5% V-Si-Mn	221
SLD-Magic	Fe-1.0% C-8.3% Cr-Ni-0.9% Mo-W-Al-Cu-S	228

2　实验结果

2.1　硬度与冲击韧性

冷作模具钢一般在退火态下进行机加工成形，采用球化退火工艺可以降低硬度便于成形加工，并为淬回火处理做好组织准备。球化退火可使片状碳化物转变为球状碳化物，球化退火态组织为莱氏体碳化物与粒状珠光体，这种组织加热时球状碳化物溶于奥氏体较慢，奥氏体晶粒不易长大，故有较宽的淬火加热温度范围[3]。其中 DC53、ASSAB88 与 SLD-Magic 钢交货状态即为球化退火状态，具体工艺参考对应原厂工艺，SDC99 具体球化工艺为加热至 860 ℃保温 3 h 快冷至 730 ℃等温 4 h 后炉冷。原始球化退火硬度见表 1 所示。4 种 Cr8 钢的退火态硬度均比较低。

为防止成形过程中因冲击重载荷、偏心弯曲载荷、应力集中等引起的崩刃与断裂，冷作模具材料应具有一定的强度和韧性。陈再良等[4]认为，由于材料韧度不足引起的失效，失效前无宏观征兆和具有断裂突发性，是冷作模具最危险的失效形式。

对 4 种 Cr8 钢冲击韧性进行研究，并与 Cr12MoV 比较，统一纵向取样位置为靠近边部的 1/4 半径处。热处理工艺分 No. 1 低温淬火低温回火和 No. 2 高温淬火高温回火两种，具体热处理工艺见表 2，其中奥氏体化时间 10 min，淬火后回火时间 2 h，2 次回火。按表 2 工艺分别进行热处理后，测试硬度与冲击韧性结果见表 2。结果表明，SDC99 其力学性能在保持硬度较高的同时，冲击功为 Cr12MoV 的 1.8 倍，达到进口 Cr8 钢水平。Cr12 与 Cr8 钢经低温淬火低温回火热处理后的冲击韧性均明显高于经高温淬火高温回火后的冲击韧性，主要原因是 No. 1 工艺奥氏体化时未溶碳化物较多，晶粒细小，低温回火后作为韧性相残留奥氏体较多，碳化物较小，基体强度高; No. 2 高温回火过程中残留奥氏体转变、基体组织转变为回火索氏体及碳化物析出长大，引起韧性下降。

表 2　实际热处理温度 (奥氏体化温度×10 min，回火温度×2 h×2 次) ，热处理后冲击功(J) 与硬度(HRC)

Table 2　Experimental heat treatment (austenized for 10 min，tempered for 2 h twice) ，impact toughness (J) and hardness (HRC) of the steels after heat treatment

Steel	SDC99	DC53	ASSAB88	SLD-Magic	Cr12MoV
Process No. 1	1040 ℃ +210 ℃	1030 ℃ +200 ℃	1030 ℃ +200 ℃	1030 ℃ +200 ℃	1020 ℃ +185 ℃
Property	78 J，62 HRC	76 J，61 HRC	75 J，61 HRC	82 J，60 HRC	44 J，62.5 HRC
Process No. 2	1080 ℃ +520 ℃	1040 ℃ +520 ℃	1040 ℃ +520 ℃	1040 ℃ +520 ℃	1100 ℃ +520 ℃
Property	45 J，62 HRC	44 J，61.5 HRC	38 J，62 HRC	46 J，61.5 HRC	20 J，62 HRC

2.2　抗弯强度

模具在使用过程中经常受到强度较高的压力和弯曲作用，马党参等[5]认为对于强度高但塑性韧性低的模具钢，可以通过弯曲实验测定其强度和塑性。弯曲实验时，试样的受力状态与大多数模具服役时受力状态相似，因此能较好的反映模具材料的使用性能。弯曲实验应变量绝对值较大，能较好反应不同钢种间变形抗力的差别。实验过程参考金属材料弯曲试验方法 ISO-7438。试样为横向取样，采用 No. 1 低淬低回热处理工艺，加载速率为 5 mm/min，压头直径 d 为 20 mm，支撑辊直径为 20 mm，跨距为 80 mm。载荷随加载位移增大而升高，形成单调递增的曲线，在曲线的最高点即试样发生弯曲断裂时，产生最大位移与最大弯曲力，具体结果对比见表 3。结果表明，SDC99 在最大弯曲力与进口 Cr8 钢基本相当的情况下，具有较小的变形位移; 即模具承受相同载荷下形变量最小。

表3 不同实验钢的弯曲实验结果

Table 3 Bending test data of different tested steels

Steel	Maximum force /kN	Maximum displacement /mm	Bending strength /MPa	Bend fracture energy /J
SDC99	3.60	3.40	2300.00	–
DC53	2.86	3.84	1830.49	5.59
ASSAB88	3.77	5.51	2416.41	11.28
SLD-Magic	3.78	5.75	2415.58	11.79

2.3 耐磨性

冷作模具钢在服役时受到较大的应力与摩擦力，要求模具在强烈摩擦下仍保持其尺寸精度，冷作模具钢必须具有高的耐磨性，同时高的耐磨性可以直接提高模具使用寿命。而模具钢服役过程中的磨损是比较复杂的过程[6]；磨损状况与磨损机制随工作条件的容易变化；材料的磨损常常涉及到机械工程学、物理学、力学、化学、金属学等多种学科[7]。实验采用环/块型摩擦磨损实验机 MMS-2A，试样经 No. 1 低淬低回热处理后制成尺寸为 3 mm × 7 mm × 30 mm 试样，对磨位置为 3 mm × 30 mm 面中间部分，对磨圆环的材料为 W6Mo5Cr4V2 高速钢，硬度为 68 HRC，内径 ϕ16 mm，外径 ϕ40 mm，厚度 10 mm，转速为 200 r/min，对磨时间 60 min，载荷为 200 N，无润滑。磨损后计算平均摩擦系数并多次测量磨痕宽度得到磨痕宽度平均值利用如下公式计算磨损体积。

$$V = \frac{R^2 L}{2}\left[2\arcsin\left(\frac{B}{2R}\right) - \sin\left(2\arcsin\left(\frac{B}{2R}\right)\right)\right]$$

V – 磨损体积，mm^3，R – 对磨圆环半径 20 mm，L – 试块宽度 3 mm，B – 磨痕宽度平均值 mm。

结果如表4。磨损实验 SDC99 在磨损体积相差较小的情况下，具有较低的摩擦系数。成形过程中模具钢表面低的摩擦系数能降低摩擦力，有利于得到好的成形表面。

表4 不同实验钢的磨损实验结果

Table 4 Wear test data of different tool steels

Steel	SDC99	DC53	ASSAB88	SLD-Magic
Average friction coefficient	0.2844	0.3365	0.3234	0.3074
Wear volume /mm^3	1.27	1.25	1.10	1.25

3 分析讨论

由图1可知 Cr12MoV 钢网状莱氏体碳化物明显多于 SDC99 钢。模具钢在承受冲击载荷时，大量的不规则莱氏体碳化物的存在是导致冲击韧性低的主要原因之一。为对比分析 Cr12 与 Cr8 钢碳化物种类与数量的变化，Cr12MoV 与 SDC99 比较，SKD11 与 SLD-Magic 比较，说明 SDC99 合金设计原则及 Cr8 钢共有的合金化特点，运用 JMatPro 进行平衡相图及碳化物类型与数量的计算。Sente Software 基于热力学数据库开发的金属材料相图计算与材料性能模拟软件 JMatPro，可以用来计算金属材料多元平衡相图与多种性能，平衡态相与温度关系计算结果如图2。

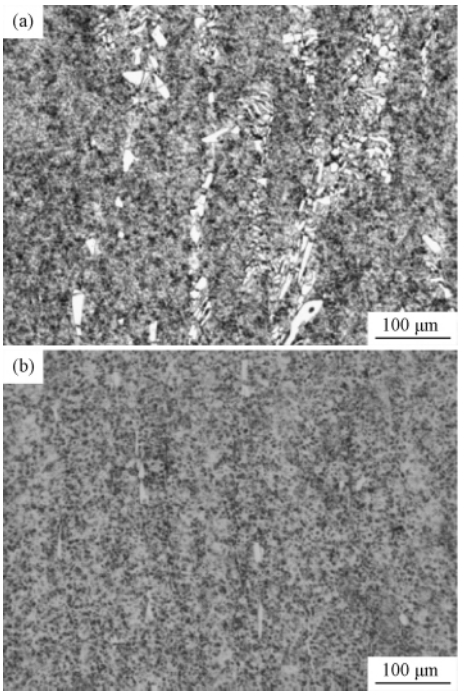

图1 低倍金相(a) Cr12MoV 钢；(b) SDC99 钢 (No. 1 低淬低回工艺)

Fig. 1 Metallographs (a) Cr12MoV and (b) SDC99 steels (after heat treatment with process No. 1)

为突出碳化物类型及数量的变化，液相与奥氏体相、铁素体相在图2中未被显示。从计算结果可知，Cr12MoV 在室温下(模拟为 20 ℃，下同)，平衡组织为铁素体与碳化物；M_7C_3 与 M_2C 是主要碳化物类型，少量的 MC 型碳化物；在 800 ℃与 200 ℃之间有部分 $M_{23}C_6$ 型碳化物析出；M_7C_3 型碳化物自液相析出，形成莱氏体碳化物，在以后的热处理过程中，奥氏体化温度保温时仍有约 10%(质量分数，下同)的 M_7C_3 未溶碳化物，使得莱氏体碳化物形态不易控制。SDC99 碳化物类型主要是 M_7C_3 与 $M_{23}C_6$ 型，1040 ℃奥氏体化时未溶 M_7C_3 碳化物为 4.5%，与 Cr12MoV 相比未溶 M_7C_3 碳化物减少了 55%。SKD11 室温下碳化物总量 16%，奥氏体化温度为 1030 ℃时，存在 11.17% 未溶 M_7C_3 碳化物。SLD-Magic 的碳化物总量为 11%，室温下 M_7C_3 型碳化物有 5.18%；M_2C 型碳化物有 5.19%；MC 型为 0.45%，奥氏体化温度为 1030 ℃时有 5% 的

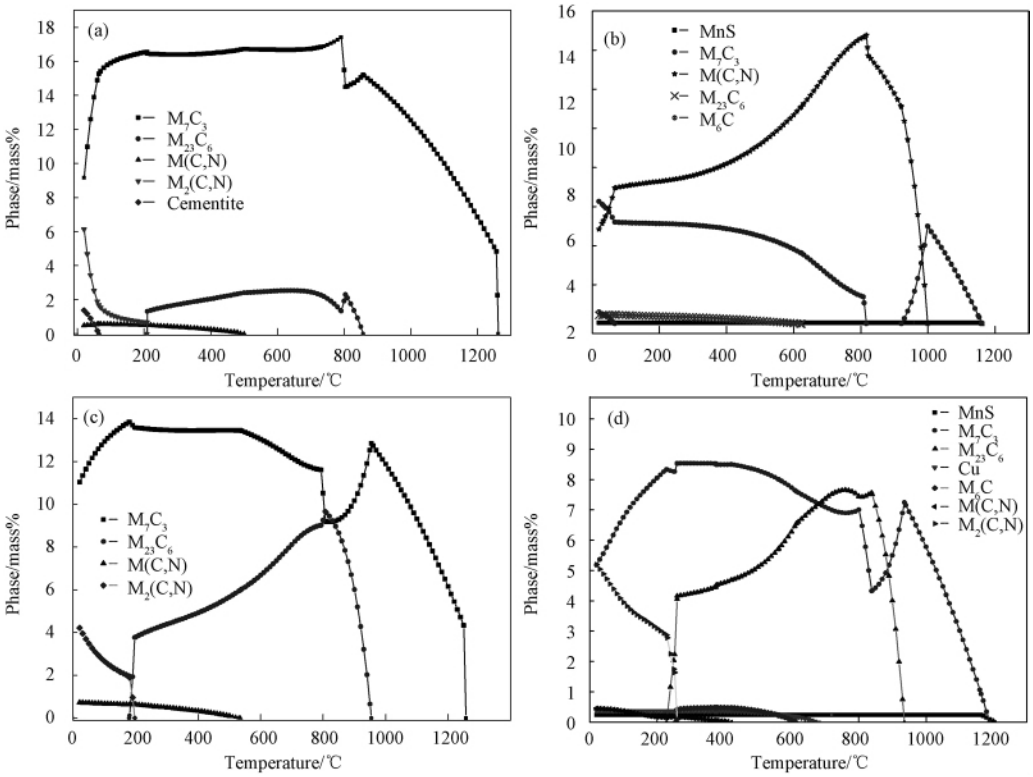

图 2　JMatPro 模拟结果　(a) Cr12MoV; (b) SDC99; (c) SKD11; (d) SLD-Magic

Fig. 2　Results of simulation by JMatPro for different steels　(a) Cr12MoV; (b) SDC99; (c) SKD11; (d) SLD-Magic

M_7C_3未溶碳化物,与 SKD11 相比减少了 55%。说明与 Cr12 钢相比,Cr8 钢奥氏体化时未溶 M_7C_3碳化物已大大减少,具体对比见表 5。

表 5　由 JMatPro 模拟 1030 ℃奥氏体化时未溶 M_7C_3 碳化物量对比(质量分数,%)

Table 5　Comparison of undissolved M_7C_3carbide and total amount of carbides in the steels austenized at 1030 ℃ simulated by JMatPro(mass%)

Steel	Cr12MoV	SDC99	SKD11	SLD-Magic
Undissolved M_7C_3	11.84	4.6	11.17	5
Total carbide	17	12	16	11

通过表 5 对比可知,SDC99 与 SLD-Magic 钢均有约 60% 的碳化物在奥氏体化时溶于基体,而 Cr12MoV 与 SKD11 只有约 30% 的碳化物溶于基体。奥氏体化时相对较多的碳化物溶解,更多的合金元素溶入基体中使得回火过程中析出的二次碳化物增多,与未溶碳化物相比,二次碳化物细小弥散均匀分布于基体中可有效提高强度与韧性。减少未溶碳化物含量并改善其形态分布,同时增加二次碳化物数量是开发高强韧模具钢 SDC99 主要合金设计原则。碳化物形态与分布对力学性能有直接影响,SDC99 适当降低 C 和 Cr 的含量,减轻偏析,减少未溶莱氏体碳化物,调整 C 与碳化物形成元素及非碳化物形成元素之间的比例,使得莱氏体碳化物的形态与分布趋向合理,二次碳化物增多,同时提高 Mo、V 含量,细化晶粒,强化基体。李绍宏[8] 等对 SDC99 和 Cr12MoV 进行电解萃取后,用 XRD 和激光粒度分析仪进行碳化物分析; 淬回火后 SDC99 碳化物中位径 1.21 μm,而 Cr12MoV 碳化物中位径为 11.37 μm; 认为大量析出的二次碳化物 $M_{23}C_6$的强化作用是 SDC99 具有高强韧性的主要原因。Kubota 等[9] 在研究了 SLD-Magic 耐磨性后,指出 SLD-Magic 的碳化物比 SKD11 碳化物要细小,且碳化物间平均距离为 3.8 μm,而 SKD11 碳化物平均间距为 5.8 μm。

与 Cr12 钢相比,Cr8 钢降低了 C 和 Cr 的含量,以减少莱氏体碳化物,减轻偏析,同时加入其它元素如 Mo、V、Ni、Si、Al 等以调整力学性能; 其中提高 Mo、V 等强碳化物形成元素含量可以增加二次碳化物,细化晶粒,使得整体上碳化物分布均匀弥散,增强韧性; 曹光晖等[10] 认为,Ni、Si 可降低初生碳化物长大速度而促使组织细化并且 Si 能提高回火稳定性,强化基体; Ni 能起到固溶强化,能够稳定高温奥氏体细化晶粒从而提高材料的韧性。Geng[11-12] 等在研究了 4Cr13 钢加入 Cu 元素的性能比较后,指出铜的加入

提高了4Cr13钢冲击韧性，弥散分布于基体中的Cu颗粒降低了剪切变形抗力，改善了切削性能。Soon-Tae Kim[13]等指出，S和Cu对于提高切削性能具有协同机制；同时硫化物具有润滑功能，利于得到高质量成形表面。因此，可以在SDC99钢基础上适当提高或加入易切削元素，调整元素间的比例，相应提高强化基体元素的含量，抵消易切削元素对力学性能带来的负面影响，借以开发出兼具高强韧性及良好切削性能的冷作模具钢。

4 结论

1）硬度相当情况下4种Cr8钢普遍具有高的冲击功，实验钢经低淬低回处理后的冲击功约2倍于高淬高回工艺的冲击功。SDC99冲击功是Cr12MoV的1.8倍，达到进口Cr8钢水平；在抗弯强度基本相同的情况下，弯曲位移较小；磨损体积相差较小的情况下，摩擦系数较小；SDC99体现出较好的综合力学性能，实物质量与同类进口模具钢相当；

2）Cr8型模具钢降低C和Cr含量，减少未溶莱氏体碳化物，减轻偏析；提高Mo、V等强碳化物形成元素含量，增加二次碳化物含量以保证碳化物总量，细化晶粒；加入Ni、Si等非碳化物形成元素强化基体、增强韧性，改善碳化物的形态与分布，进一步提高性能。

参 考 文 献

[1] 陈再枝，蓝德年. 模具钢手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2002.

[2] 迟宏宵，马党参，王 昌，等. Cr8Mo2SiV钢二次硬化机理的研究[J]. 金属学报，2010，46(10)：1181－1185.
CHI Hong-xiao，MA Dang-shen，WANG Chang，et al. Study on secondary hardening mechanism of Cr8Mo2SiV steel [J]. Acta Metallurgica Sinica，2010，46(10)：1181－1185.

[3] 陆 兴. 热处理工程基础[M]. 北京：机械工业出版社，2007.

[4] 陈再良，陈蕴博，佟晓辉，等. 典型冷作模具钢性能与失效关系的探讨[J]. 金属热处理，2006，31(2)：87－93.
CHEN Zai-liang，CHEN Yun-bo，TONG Xiao-hui，et al. Mechanical properties and failure types for cold working die steels [J]. Heat Treatment of Metals，2006，31(2)：87－93.

[5] 马党参，迟宏宵，雍岐龙，等. 铝对Cr8WMo2V2SiNb冷作模具钢组织及力学性能的影响[J]. 钢铁，2010，45(6)：79－83.
MA Dang-shen，CHI Hong-xiao，YONG Qi-long，et al. Effect of aluminum on microstructure and mechanical properties of Cr8WMo2V2SiNb steel [J]. Iron and Steel，2010，45(6)：79－83.

[6] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京：冶金工业出版社，1992.

[7] 杜永泽，陈再枝. 钒含量对D2模具钢耐磨性的影响[J]. 钢铁研究学报，1997，9(S)：62－67.
DU Yong-ze，CHEN Zai-zhi. Effect of the vanadium content on wearability of D2 die steel [J]. Journal of Iron and Steel Research，1997，9(S)：62－67.

[8] 李绍宏. 高强韧冷作模具钢组织设计及组织控制研究[D]. 上海大学，2011.
LI Shao-hong. Research of microstructure design and control on high strength high toughness cold work die steel [D]. Shanghai University，2011.

[9] Kubota K，Takuya Ohba，Shigekazu Morito. Frictional properties of new developed cold work tool steel for high tensile strength steel forming die [J]. Wear，2011，271：2884－2889.

[10] 黄光晖，曹念荪，孙培祯，等. Ni和Si在高强韧低合金冷作模具钢(GD钢)中的作用[J]. 材料研究学报，1994，8(2)：134－141.
HUANG Guang-hui，CAO Nian-sun，SUN Pei-zhen，et al. Effects of Ni and Si in a high-strength high-toughness low alloy cold-working die steel (GD steel) [J]. Chinese Journal of Materials Research，1994，8(2)：134－141.

[11] Geng H M，Wu X C，Min Y A，et al. Effect of copperadditionon mechanical properties of 4Cr16Mo [J]. Acta Metallurgica Sinica，2008，21(1)：43－49.

[12] 耿鸿明，吴晓春，闵永安，等. 铜、硫对不锈钢4Cr13加工性能的影响[J]. 钢铁，2008，43(3)：68－71.
GENG Hong-ming，WU Xiao-chun，MIN Yong-an，et al. Effects of Copper and sulfur on mechanical properties of stainless steel 4Cr13 [J]. Iron and Steel，2008，43(3)：68－71.

[13] Kim Soon-Tae，Park Yong-Soo. Effects of copper and sulfur additions on machinability behavior of high performance austenitic stainless steel [J]. Met Mater Int，2009，15(2)：221－230.