

高速钢工具硬度与热处理

江苏镇江拓普工具公司 (212014) 赵步青

高速钢自问世至今，一直以制造金属切削刀具为主。随着科技的进步以及超硬刀具材料的研制与发展，高速钢在模具和其他领域的应用范围越来越广。以下简单介绍一下高速钢工具的硬度与热处理问题。

1. 高速钢刀具硬度与热处理

高速钢新标准 GB/T 9943—2008，将高速钢的品质分为三个档次，即低合金高速钢（HSS—L）、普通高速钢（HSS）、高性能高速钢（HSS—E），对它们的硬度要求各异，分别为 $\geq 63\text{HRC}$ 、 $\geq 64\text{HRC}$ 和 $\geq 65\text{HRC}$ 。对于制作具体刀具的硬度要求也不一样，并不是硬度越高越好，而是有一个比较合适的范围。表1为HSS、HSS—E钢制刀具的硬度推荐值。

表1 高速钢刀具硬度推荐值（HRC）

钢种 刀具名称	HSS	HSS—E
直柄麻花钻	63.5~66(直径 $\leq 6\text{mm}$)	64~66(直径 $\leq 4\text{mm}$)
	64~66.5(直径 $> 6\text{mm}$)	65~67(直径 $> 4\text{mm}$)
立铣刀	63.5~66(直径 $\leq 6\text{mm}$)	63.5~66.5(直径 $\leq 6\text{mm}$)
	64.5~66(直径 $> 6\text{mm}$)	65~67(直径 $> 6\text{mm}$)
正方形车刀条	64~66(4~16mm)	65~67(4~16mm)
	65~67(>16mm)	66~68(>16mm)
三面刃铣刀	64~66(厚度 $\leq 8\text{mm}$)	65~67(厚度 $\leq 8\text{mm}$)
	64~66.5(厚度 $> 8\text{mm}$)	65.5~67(厚度 $> 8\text{mm}$)
中齿锯片铣刀	62.5~65(厚度 $\leq 1\text{mm}$)	64~65.5(厚度 $\leq 1\text{mm}$)
	63.5~66(厚度 $> 1\text{mm}$)	65~67(厚度 $> 1\text{mm}$)
机用丝锥	62~65(M3~M8)	64~66(M3~M8)
	63~66(M>8)	65~67(M>8)
齿轮滚刀	64.5~66(M3~5)	65~67(M3~5)
	63.5~66(M>5)	65~66.5(M>5)
凹、凸半圆铣刀	64~66	65~67.5
角度铣刀	63.5~66	64~67

(续)

钢种 刀具名称	HSS	HSS—E
拉力	63.5~66	64~67
推力	64~66	65~67.5
插齿刀	64~66	65~67
刨齿刀	64~66	65~67
锥齿轮铣刀	64~66	65~67
剃刀片	62~64	63~65
密齿大薄锯片	62~65	64~66

高速钢刀具的硬度与其碳饱和度(A)有对应关系，即碳饱和度越高，硬度越高，淬火温度越低。可用简单的数学式表达为： $\text{HRC} = \frac{A}{0.1285A + 0.00185}$ 。以M2钢为例，对应关系见表2。

表2 M2钢硬度和碳饱和度的关系

序号	A (%)	理论计算硬度 HRC	实际硬度值 HRC	推荐淬火温度 /℃
1	0.70	64.5	63~65	1227~1238
2	0.72	64.9	63.5~65.5	1224~1233
3	0.74	65.1	63.5~65.8	1220~1232
4	0.76	65.4	64~66	1218~1231
5	0.78	65.7	64.5~66.2	1216~1226
6	0.80	66.0	65~66.5	1210~1222
7	0.82	66.2	65.5~66.8	1210~1220
8	0.84	65.4	66~66.8	1208~1218
9	0.86	66.7	66.5~67	1205~1215
10	0.88	66.9	66.5~67.2	1203~1213
11	0.90	67.1	67~67.5	1200~1210

根据A值确定淬火温度是完全可行的。对于M2钢除车刀、丝锥等特殊产品外，一般产品淬火温度在1215~1230℃之间选择，淬火晶粒度在10.5~9.5之间波动，选择的最佳晶粒号为10级（电炉冶炼），可视不同

产品及用途,上下浮动 0.5 级,这对保证产品质量有好处。

A 值低的钢材,易产生硬度不足,其耐磨性差,红硬性低;A 值高的材料,易产生过热。

对于高速钢刀具硬度如何定位,笔者认为,低合金高速钢不能因其低合金 ($W + 1.8Mo > 6.5$) 而放低硬度要求,硬度应 $\geq 63HRC$;普通高速钢刀具硬度最好控制在 65~66HRC,特殊产品可上下浮动;高性能高速钢硬度虽能达到 67~70HRC,但不能用。达到高硬度和用不用高硬度是完全不同的概念。钢厂应保证达到高硬度,用不用高硬度是工具厂的事。我们追求高硬度,但不惟高硬度。根据我们的经验,HSS—E 刀具最好将硬度控制在 66~67HRC,个别产品可以提高或降低硬度,总之最终要落实到提高刀具寿命的课题上。

笔者曾在多篇论文中阐述“硬度是表面现象,金相

组织才是本质”的基本观点。对高速钢刀具来说,要达到 63HRC 以上的硬度,只是举手之劳,但要达到理想的金相组织,可不是一件容易的事。2008 年 4 月底,我们组织人员对 $\phi 15mm$ 和 $\phi 17mmW6Mo5Cr4V2Al$ (501) 原材料进行淬火温度、金相和硬度的专门试验,大家可从中得到启发。其化学成分见表 3。

表 3 501 钢主要化学成分

规格/mm	主要化学成分 (质量分数,%)					
	C	W	Mo	Cr	V	Al
$\phi 15$	1.08	6.05	4.75	4.15	1.83	1.00
$\phi 17$	1.09	6.13	4.71	4.09	1.77	0.98

热处理工艺见表 4,我们试验采用 1173℃、1186℃、1195℃、1205℃ 和 1215℃ 5 种不同的温度淬火,随着淬火温度的升高,晶粒度长大不明显,但到 1215℃ 以后就会发生过热。

表 4 501 钢热处理工艺试验

规格/mm	1173℃			1186℃			1195℃			1205℃			1215℃		
	晶粒度 (级)	淬火后 HRC	回火后 HRC	晶粒度 (级)	淬火后 HRC	回火后 HRC	晶粒度 (级)	淬火后 HRC	回火后 HRC	晶粒度 (级)	淬火后 HRC	回火后 HRC	晶粒度 (级)	淬火后 HRC	回火后 HRC
$\phi 14$	11	63	66.8	10.5	64	66.9	10.5	64	66.9	10.5	62.3	67.2	10.5*	61.5	67.5
$\phi 17$	11	63	66.9	10.5	64	67.1	10.5	64	67.2	10.5	62.0	67.4	10	61.5	67.8

注:1. 预热温度为 860℃,预热时间统一为 6min,加热时间为 3min。

2. 冷却剂为 610℃ 中性盐,分级 2min。

3. 回火温度均为 560℃,时间 1h,3 次,回火程度一般。

4. 1215℃ 淬火的 $\phi 17mm$ 规格,因原材料碳化物颗粒较大,淬火后晶粒度为 10 号,过热 1 级,其余均不过热。

5. 硬度均经平磨后测三点取平均值。

从表 4 不难发现, $\phi 15mm$ 规格的钢温度从 1173℃ 提高到 1215℃,晶粒号只长大不到一个级别,硬度都能达到 66HRC 以上,细看碳化物溶解程度和回火后的碳化物弥散度,就有较大差别。若用 5 种淬火工艺制造同种产品,刀具寿命肯定有差别或有较大差别,这也是很多工具厂产品质量提不高的真正原因所在。在这里需要特别指出,测硬度不要忘记看金相;看晶粒度,更要看碳化物溶解程度,因为过热是以碳化物变化为判据的。

关于高速钢淬火晶粒度对刀具寿命的影响,国内外学者意见不同,但大多数人认为,热处理应以金相为准,不能照搬书本或标准文本的淬火温度。前苏联在 20 世纪 70 年代,对 $\phi 8mmP6M5$ (M2) 高速钢钻头进行试验表明,当晶粒度为 9.5 级时钻头具有最高的使用寿命,晶粒度过粗或过细,寿命都会降低(如图 1 所示)。

对此笔者也有亲身体会。

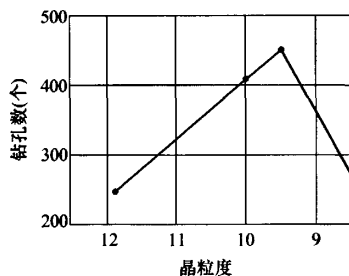


图 1 晶粒度对钻头寿命的影响

在刀具产品的技术标准中,对热处理要求惟一只有硬度这个量化的指标。建议各单位加强出厂产品的金相抽验,防止金相不合格的产品流到客户手中。例如 20 世纪 80 年代后期,有家工具厂出口的齿轮滚

刀,经用户一用就崩齿。后经金相分析,发现是回火不合格造成的,追溯原始记录,回火也是三次,但没有回火后的金相记录,最后查出其本质问题是未冷到室温又进行了下一次回火;又如回火不充分的滚丝模螺纹磨一磨就裂;加热温度低,保温时间不足的刀具不耐磨;过热超标的刀具易崩刃等。这些都是由于金相监控不严而造成的过失,我们一定要引以为戒,把硬度和金相控制在最佳状态,使耐磨性和韧性有机结合,在保证韧性的前提下,努力提高硬度。

2. 高速钢模具硬度与热处理

随着机械工业的迅速发展,仪表、家电、钟表和电子等行业异军崛起,高速钢大量进入模具工业,尤其以中小型模具最为常见。

高速钢具有很高的硬度、抗压强度和耐磨性,采用低温淬火,通过二次硬化温度回火、快速加热等工艺措施,可以有效地改善其韧性,被越来越多地用于重载荷、高寿命的冷作模具, HSS 用的较多, HSS—L、HSS—E 用的相对较少。通过适当的热处理,高速钢也可以用来制造热作模具。

以下简称高速钢模具硬度与热处理的关系。

用于制造冷作模具的高速钢,其淬火加热温度比刀具要低 50~60℃,而回火温度往往高于 560℃。笔者在实践中摸索出 W18Cr4V、M2 钢淬火温度同硬度的经验公式,即:

$$t_{(W18)} = 1260 - (64 - H) \times 10$$

$$t_{(M2)} = 1190 - (64 - H) \times 10$$

式中 t ——选择的淬火温度,℃;

H ——要求硬度的平均值, HRC。

需要特别指出的是:第一次回火拟用 580~590℃,第二、第三次用 550℃。例如, M2 钢冲头要求硬度 61~63HRC, $t = 1190 - (64 - 62) \times 10^\circ\text{C} = 1170^\circ\text{C}$,加热系数按刀具延长 1/3,金相组织淬火晶粒度 11.5~12 级(见图 2)。如果习惯上用 550℃回火,则计算出来的数据要减去 20℃,即为选择的淬火加热温度。本例则用 1150℃加热、550℃ $\times 1\text{h} \times 3$ 次回火,硬度正好落在 61~63HRC 的范围内。

对于冲棒、冲头等模具,淬火后要不要进行 550℃以上的高温回火,经实践证明,结论是肯定的。硬度只是一种表象,金相组织才是本质。对于 M2 钢而言,要

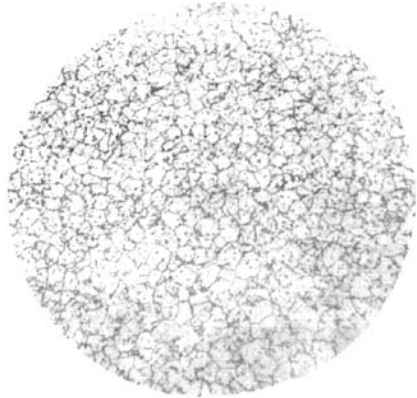


图 2 M2 钢模具淬火晶粒号(12 号) $\times 500$

取得 61~63HRC 的硬度,至少有 5 种工艺可获得此值,但每种工艺处理的模具寿命差异很大。检验热处理工艺是否先进,最直观的是看处理的产品是否高寿命,而且还要稳定、可靠和经济。

俄罗斯某工厂采用 P6M5 (M2) 钢制作冷镦冲头,其理论和实践都值得借鉴。

M2 钢制作的模具,淬火温度肯定不能像刀具那样高,一定要低,但低到什么程度要仔细研究。

当加热到 1140~1150℃时,铬的碳化物 Cr_{23}C_6 几乎全部溶到奥氏体中; 1150~1190℃是性能变化不大的区域; 1190~1200℃加热时, M_6C 型碳化物大量溶入。按照在不同温度下相成分有规律变化的原理,在所有的正常淬火加热温度范围内,随着温度的升高,回火后的硬度单调地上升;然而在不同的温度区间,硬度增加的幅度是不一样的。在 1100~1150℃和 1200~1230℃的温度范围内,硬度上升的幅度要高于 1150~1190℃区域。实践证明,在 1150~1190℃区间淬火,奥氏体晶粒的大小及残留奥氏体数量变化不大,但硬度有点差别。

对于追求高强度、高韧性的模具, M2 钢淬火晶粒度不应大于 12 级,与之相对的温度为 1160~1180℃。

试验证明, M2 钢经 1160~1180℃淬火、520~530℃回火,可获得最高的硬度值;而经 1200~1230℃淬火、550℃回火,也可以获得最高的硬度;但高淬高回的热处理工艺,在模具生产中失败的教训是不不少的。

M2 钢经 1160~1180℃淬火、520~530℃ $\times 1\text{h} \times 3$ 次回火,硬度可达 63.5~64.5HRC;经 550℃三次回火,硬度下降 0.5~1.5HRC,韧性却提高了 10%~15%;再

提高温度至 580℃ 回火，硬度又下降 0.5HRC，但韧性提高很多。

俄罗斯 P6M5 钢冲头的使用寿命表明：当被冲工件硬度低于 80HRB 时，冲头可以在 63 ~ 64HRC 硬度下使用，可获得较高的使用寿命；而当被冲工件的硬度较高（82 ~ 92HRB）时，就应提高回火温度。

从俄罗斯 P6M5 钢冷激冲头有关的技术报道中，可得到如下启示：

(1) M2 钢制作模具，淬火温度应比刀具低得多，但最低限为 1150℃，否则，那么多的合金元素就白加了。

(2) M2 钢经 1160 ~ 1180℃ 淬火、520 ~ 530℃ 回火，可获得最高的硬度。如需要 58 ~ 62HRC 的硬度，可通过提高回火温度来调节，这样对提高模具韧性有益。

(3) 在 1160 ~ 1180℃ 淬火，可获得最大的抗弯强度和冲击韧度。在该区域内淬火，对于不同成分但符合国际标准的 M2 钢，不必要再去选择什么最佳温度。

粉末高速钢不光是数控刀具的理想材料，同样也是极好的模具材料。例如冲制各种链条的某类冲头，开始用 Cr12MoV 钢制作，平均寿命只有 0.6 ~ 0.8 万件；后改用 M2 钢，寿命大大提高，但不足 5 万件；使用 $\phi 6.5\text{mm}$ 银亮钢丝 S390 粉末高速钢（W10Mo3Cr5V5Co8）制作 $\phi 6.0\text{mm} \times 58\text{mm}$ 冲头，使用寿命在 23 ~ 32 万件，远远超过某进口冲头 8 万件的水平。

其热处理工艺简介如下：① 600℃ × 6min + 850℃ × 4min 两次盐浴预热。② 1215℃ × 2min 盐浴加热。③ 600℃ 中性盐分级 2min，进行 280℃ × 30min 等温淬火，晶粒度 12 ~ 11.5 级，淬火后的硬度 64 ~ 65HRC。

（上接第 35 页）

采取的措施为：

(1) 提高回火温度，使回火后的硬度为 58 ~ 61HRC。第一次回火后，工件冷到室温，再回第二次火，回火温度比第一次低 10℃，保温时间 150min。

(2) 对曲柄进行强力喷丸，使表面形成压应力，利于磨削。

(3) 工件磨削时的磨削量减少（杆部及内端面），

④ 560℃ × 1h + 540℃ × 1h × 3 次共 4 次回火，回火后硬度 67.2HRC。

如此高的硬度制作冲头，简直不可思议，但粉末高速钢韧性特别高。据试验考证，66HRC 时 S390 钢的抗弯强度为 4950MPa，与 M2 钢 63HRC 的抗弯强度基本相当。经 6 家链条厂试验， $\phi 6\text{mm}$ 冲头使用寿命最低为 23 万件，最高为 32 万件，一般为 29 ~ 30 万件。

另外，还有不少高速钢模具热处理的实例，请详见近期由机械工业出版社出版的《模具热处理工艺 500 例》一书。

3. 高速钢量具硬度与热处理

高速钢制作量具并不多，但在某种情况下还有其独到之处。例如用摩擦焊制作通止塞规，其寿命比 Cr12、9SiCr 提高数十倍。检查锯片铣刀的内孔精度，以前用 9SiCr 等合金钢制造通止规，由于锯片铣刀硬度比塞规硬度还高，操作工往往没等机床停下就测量，塞规磨损很快失效，我们改用 M2 钢料头与 45 钢对焊或整体采用高速钢，都取得了很好的效果。塞规采用刀具下限温度淬火，硬度 63 ~ 66HRC，成品经蒸汽处理或氮化。

用高速钢制造的量块、卡板等小型量具，经过常规淬火回火后，再经冷处理，或淬火后经冷处理再回火，硬度控制在 64 ~ 66HRC，这看起来好像是大材小用，但实际上量具经久耐用，而且这些量具往往数量少、品种多，如用高速钢边角料或废料制作，经济上将是很合算的。

除上述工具外，高速钢还用来制作高温轴承、弹簧和散热片等机械零部件。MW

(20080416)

并对首件进行磨削烧伤检查，最大程度满足工件的表面硬度（保证质量，磨削效率下降 40%）。

(4) 更换为粒度大（磨外端面）、硬度低的磨削砂轮，以减少磨削热和烧伤。

(5) 对于孔部由砂轮磨削改为车孔。工件车孔时对工件表面形成压应力，利于吸收变形应力。

经过以上努力，目前裂纹问题基本解决。MW

(20080608)