高速钢刀具深冷处理工艺试验研究

中国矿业大学机电学院 （江苏徐州 221008） 冯俊杰
河南天宏焦化（集团）有限责任公司 （平顶山 467021） 高金华

金属切削加工在金属制造业中占有极其重要的地位。切削刀具是切削加工的关键之一，高速钢硬质合金刀具现已被广泛采用。尽管目前有许多强化刀具的方法，但应用时却由于条件要求而受到限制。深冷处理作为一种改善金属材料综合力学性能的手段，由于其成本低、设备简单、不消耗能源且无污染，而越来越受到人们的重视。前苏联、美国、日本等国在利用深冷处理有效提高零件力学性能方面取得了令人满意的效果。

我公司所用刀具全部为外购商品刀具，每年消耗刀具费达几万元，如果通过深冷处理能使刀具寿命平均提高一倍，无疑将取得可观的经济效益。另外，我厂有大型制氮设备，可随时提取深冷所需液体氮，为我们深冷处理提供了非常便利的条件。为此，我们对高速钢刀具深冷处理进行了系列试验研究，并应用于生产，取得了比较满意的效果。

一、深冷处理对高速钢力学性能的影响

试验研究了深冷处理工序安排及深冷处理工艺规程对硬度、红硬性、冲击韧度及抗弯强度的影响，并进行了切削试验。

1. 热处理工艺对 W18Cr4V 钢力学性能的影响

为获得深冷处理工序与淬火、回火工序的最佳配合，我们分别在淬火后、一次回火及三次回火后进行深冷处理，并与常规的淬火加三次回火进行力学性能对比试验。

该项试验将 ϕ12mm 的 W18Cr4V 棒料加工成各种力学性能试样，在试验室进行淬火、回火及深冷处理，然后进行性能测试。

试验结果表明，淬火、回火、深冷处理三道工序安排不同，性能有明显差别，力学性能数据见表 1。

（1）硬度、红硬度 W18Cr4V 钢冷却到室温时，组织中有大量残余奥氏体，淬火后立即进行深冷处理，将促进其残余奥氏体转变，所以工艺硬度比较高，而红硬性差别更明显，凡经深冷处理后红硬性均有提高，且附加回火温度越高，提高幅度越大。

表 1 热处理工艺路线对 W18Cr4V 钢力学性能的影响

序号	热处理工艺	硬度 HRC	冲击韧度		红硬性			切削 1300mm 后刀面磨损量/mm
			a_K /J·cm^{-2}	提高率（%）	600℃ ×4h	615℃ ×4h	630℃ ×4h	
1	1280℃淬火 + 560℃ × 1h 三次回火	64.0	21.8	0	61.8	60.7	58.8	0.56
2	1280℃淬火 + 深冷处理 + 560℃ × 1h 三次回火	65.0	22	0.9	62.3	61.2	59.8	0.17
3	1280℃淬火 + 560℃ × 1h 回火 + 深冷处理 + 560℃ × 2h 回二次回火	64.5	23.5	7.8	62.4	61.2	60.4	0.14
4	1280℃淬火 + 560℃ × 2h 三次回火 + 深冷处理	64.5	25.7	17.9	62.3	61.6	59.6	0.16

红硬性是制定刀具切削性能好坏的重要标志之一。由此可见，深冷处理可使高速钢具有更好的热稳定性，刀具在切削过程中将会具有更高的抗热磨损能力。

（2）冲击韧度 对工具钢等脆性材料来说，韧性是一个重要性能指标。韧性越高，切削刃抗冲击和振动的能力越强，韧性是影响刀具切削能力的重要因素之一。由表 1 数据可看到，W18Cr4V 钢经深冷处理后，在红硬性提高的同时，冲击韧度也得到相应提高。

一般情况下，硬度和冲击韧度是相互矛盾的性能指标，硬度提高时可导致韧性降低，但深冷处理却使高速钢强度和韧性都有所提高，这对提高刀具耐用度是十分有利的。

（3）切削试验 切削试验在铣床上进行，测量上述各工艺处理的刀具后刀面磨损值与铣削行程的关系。机床：X62W；铣削方式：直角自由逆铣；工件材料：45 钢锻件，硬度 220HB。

切削试验结果见表 2。

表 2　切削试验数据

序号	热处理工艺	不同切削行程后刀面磨损量/mm					
		300	600	900	1200	1500	1800
1	1280℃淬火 + 560℃ × 1h 三次回火	0.17	0.23	0.23	0.28	0.31	0.58
2	1280℃淬火 + 深冷处理 + 560℃ × 1h 三次回火	0.075	0.1	0.13	0.15	0.16	0.17
3	1280℃淬火 + 560℃ × 1h 回火 + 深冷处理 + 560℃ × 1h 二次回火	0.095	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14
4	1280℃淬火 + 560℃ × 1h 三次回火 + 深冷处理	0.065	0.075	0.09	0.095	0.12	0.16

试验结果表明，凡经深冷处理的高速钢刀具，切削能力显著提高，在铣削行程相同的条件下，后刀面磨损量大大减小；还应看到其中工艺 4 处理的刀具后刀面磨损量最小，而且该工艺处理后红硬性、冲击韧度也较高，这种工艺对工具制造厂适用。在淬火三次回火后进行深冷处理，从红硬性、冲击韧度及切削性能全面衡量也具有较好的效果，且适用于成品刀具，所以我们最终确定采用该工艺进行进一步试验。

2. 深冷处理规范对高速钢力学性能的影响

根据上述试验结果，确定在淬火、三次回火后施加深冷处理，这种工序安排对自行处理外购商品刀具是十分有利的。在工序安排确定后，我们进一步研究深冷处理工艺规范对高速钢力学性能的影响。

该项试验是从工具厂出产的已经淬火加三次回火处理的 W18Cr4V 钢刀具上截取试样，在试验室只进行不同方式的深冷处理，然后测试其力学性能。

根据深冷处理方式不同，我们规定出如下工艺规范。

工艺一：原始态（淬火 + 三次回火）；工艺二：慢速，长时间深冷处理；工艺三：慢速，长时间深冷处理，去应力回火；工艺四：快速，短时间深冷处理，去应力回火；工艺五：快速，多次、冲击式深冷处理，去应力回火。

（1）硬度、红硬性　淬火、三次回火的 W18Cr4V 钢经深冷处理硬度变化很小，可以认为室温硬度不发生变化。我们对淬火、三次回火的 W18Cr4V 钢进行了不同方式的深冷处理，测量了大量的硬度数据，部分数据见表 3。

表 3　W18Cr4V 钢深冷处理前后硬度值

序号	未冷处理	深冷处理工艺 2		深冷处理工艺 3		深冷处理工艺 4	
	HRC	HRC	硬度差 HRC	HRC	硬度差 HRC	HRC	硬度差 HRC
1	62.7	62.5	-0.2	—	—	—	—
2	63.0	62.8	0.2	—	—	—	—
3	64.0	64.0	0	63.8	-0.2	63.8	-0.1
4	63.1	63.6	+0.5	—	—	—	—
5	63.5	63.0	-0.5	—	—	—	—
6	62.2	62.6	+0.4	—	—	—	—
7	63.1	63.6	+0.5	63.4	+0.3	—	—
8	62.2	62.6	+0.4	62.9	+0.7	—	—
9	63.5	63.0	-0.5	64.0	+0.5	—	—
10	63.4	63.2	0.2	62.7	-0.7	63.4	0
11	63.4	64.0	+0.6	64	+0.6	64.0	+0.6
12	62.8	62.7	-0.1	63.3	+0.5	63.3	+0.5
13	63.3	63.7	0.4	63.5	+0.2	62.2	+0.9

由表 3 可以看出，深冷处理后硬度稍许升高，也可稍许降低，但均不超过 1HRC，且无规律可循。因此可以说淬回火态 W18Cr4V 钢深冷处理后室温硬度基本不变。

红硬性的测定是与原始硬度相比的降低值大小来衡量（见表 4）。

表 4　深冷处理工艺规范对 W18Cr4V 钢力学性能的影响

序号	工艺规程	红硬度 HRC			冲击韧度		抗弯强度	
		加热前	630℃ × 4h 加热后	硬度差	a_K /J·cm^{-2}	提高率（%）	σ_{bb} /MPa	提高率（%）
1	原始态（淬火 + 三次回火）	65.3	58.6	6.7	27.2	0	2672	0
2	慢速，长时间深冷处理	64.6	60.3	4.3	34.0	25.0	3177	19.1
3	慢速，长时间深冷处理，去应力回火	64.5	59.5	5.0	39.8	46.7	3335	25.1
4	快速，短时间深冷处理，去应力回火	65.7	59.9	5.8	29.8	8.8	3106	16.5
5	快速，多次冲击式深冷处理，去应力回火	65.0	59.0	6.0	32.3	18.8	2965	11.2

从表4可以看到：不论采用那种方式进行深冷处理，红硬性均有明显提高，这表明了深冷处理对红硬性的有益作用。但深冷处理具体工艺规范不同，红硬性提高幅度不同，其中工艺2的红硬性最高（硬度最小），可见在液氮中长时间停留，效果较好。

（2）冲击韧度、抗弯强度　短时间液氮处理不仅红硬性提高少，冲击韧度提高幅度也小，进而说明深冷处理的强韧性效果只有长时间在液氮中停留才能发挥出来。而以同样时间在液氮停留后，进行一次去应力回火，冲击韧度得到明显提高，其中工艺3中使 a_K 值提高46.7%，这对高速钢这类脆性材料至关重要。

弯曲试验产生的应力状态与许多刀具表面应力状态相似，因此，抗弯试验经常作为高速钢力学性能试验之一。淬火态W18Cr4V钢经深冷处理后，抗弯强度均有不同程度提高，与冲击韧度变化规律基本相同。长时间在液氮停留后抗弯曲程度提高幅度大于短时间停留，深冷处理后的消应力回火也同样有利于抗弯强度的提高。由此可见，深冷处理后进行去应力回火是十分必要的。

通过上述试验我们确定对成品高速钢刀具采用深冷处理，其工艺规范为：慢速降温与升温，长时间在液氮中停留，深冷处理后去应力回火。

二、深冷处理对W18Cr4V钢组织结构的影响

早在20世纪30年代人们就开始研究冷处理对钢组织性能的影响，确认淬火钢零下温度的冷却可导致残余奥氏体转变，提高钢的硬度和耐磨性，并在生产中得到应用。到了70年代，人们又重新对零下温度处理产生兴趣，并由通常－78℃处理扩展到－196℃处理，被称之为“深冷处理”、“超低温处理”。对于深冷处理机理目前有不同解释，美国一些学者认为：深冷原理只能用物理学观点加以解释，即用原子动能随温度变化而解释低温处理过程，还有的物理学者认为深冷处理与超导以及物质的第四动态——超流动态有关；前苏联学者通过对钢经过1228℃淬火进行深冷处理研究，在一系列试验结果的基础上认为：降温在－70～75℃重新发生马氏体转变，并延续到－130～140℃，直到－196℃转变终止，在－90℃～20℃温度回升时，晶格缺陷密度较高的区域马氏体加速分解进行。在位错处析出碳原子，形成极为细小的合金碳化物，由基体组织细化，弥散碳化物析出，当然也包括用残余奥氏体转变去解释深冷处理过程，越来越为大量试验所证实。

对于经过淬火、三次回火的高速钢，虽然已有大量碳化物析出，但由于高速钢具有良好的抗回火稳定性，即使经560℃回火，基体仍保持一定的过饱和度，处于热力学不稳定状态，深冷处理时，随着温度的降低，溶解度曲线向低碳方向延续。相对而言，过饱和度又进一步提高，在深冷处理时又伴随热应力作用，因此在升温时（从－196℃回升至室温）将发生碳化物析出。因在低温下发生的析出过程受动力学条件限制，只能形成尺寸细小、数量多而弥散的碳化物。由于微细碳化物析出的应力状态及温度升降的热力学作用，基体组织碎化，大量超微细碳化物的均匀弥散析出及基体组织细化，是淬回火态高速钢深冷处理后力学性能进一步提高的主要原因。

对高速钢的主要力学性能要求是硬度和韧性。一般是在保证足够韧性的基础上寻求尽可能高的硬度。高速钢淬火回火后的组织是马氏体与碳化物，残余奥氏体数量已不多，深冷处理时残余奥氏体转变已不是主要相变过程，因此与淬火态高速钢深冷处理不同，淬回火态高速钢深冷处理后室温硬度变化很小，基体组织中片状马氏体的强度性能是以其内部孪晶亚结构、固溶强化、片状晶大小及第二相沉淀等的作用达到的。其中固溶强化孪晶亚结构是造成强度高、韧性低的主要原因，使得高速钢具有很低的韧性值，特别是大量的间隙碳原子在晶格中造成的不对称畸变，可使韧性大为降低。在深冷处理时，虽然不改变马氏体亚结构，但由于大量超微细碳化物的析出，马氏体过饱和度减小，固溶强化作用减弱从而使韧性得到提高。

刀具切削试验时，刀具磨损量的测量结果说明，深冷处理可以提高高速钢的耐磨性。基体组织马氏体具有高硬度，有好的耐磨性，更重要的是马氏体能很好地支撑碳化物，使碳化物能有效地抵抗磨损，淬火态W18Cr4V钢深冷处理后，在马氏体本体上析出大量超微细碳化物，因此耐磨性得以提高。

在深冷处理过程中由于析出大量微细碳化物，

固溶强化作用减弱，但弥散强化、晶界强化作用加强，从而在保证硬度不变的条件下，韧性、耐磨性得到提高。

三、高速钢刀具深冷处理使用效果

经深冷处理的高速钢刀具在平顶山煤业集团机电装备公司热处理车间、机修车间、金工车间进行了切削试验，试验刀具有 ϕ20mm 锥柄立铣刀、ϕ21.2mm 钻头。

由于切削与很多因素有关，如切削速度、进刀量、刀具磨损角度、操作者的技术水平及材料的软硬程度等，很难用具体的数字来描绘其使用效果。根据现场观测及操作者反映的情况，试验得出如下结果。

（1）经深冷处理的刀具明显比没经深冷处理的刀具好用，表现在可提高进给速度，减少磨刀次数，同时使用中感觉良好，无异常声音，振动小。

（2）试验时，我们也通过两种特殊情况，证实深冷处理有明显效果：其一，原有一批铣刀，因热处理质量问题一直无法使用，我们将这批刀具经深冷处理后，投入使用，工人反映使用效果很好；其二，有一批连接环，因材质问题无法钻孔，后经正火、退火也不行，普通钻头一钻就断，后用经深冷处理的钻头，一次可连续钻几十个。

四、结语

通过一系列的试验研究，我们认为：

（1）深冷处理可显著提高高速钢刀具的使用寿命，使刀具具有在硬度不降低的前提下，红硬性有所增加，冲击韧度可提高 46.7%，抗弯强度可提高 25.1%。

（2）深冷处理具有成本低、设备简单、不消耗能源且无污染的特点，可作为中小型机械厂自行提高自制或外购刀具使用寿命的有效方法。

（3）深冷处理较为理想的工艺规范为：慢速降温与升温，长时间液氮停留，深冷处理后去应力回火。

（20030819）

《机械工人》（冷加工）2004 年第 2 期要目

电加工设备应用专辑（二）
电火花加工技术在现代制造业中的应用
混粉电火花加工技术
可编程控制器控制的可控充、放电式电火花涂覆装置
电火花齿轮跑合工艺的应用
铝合金模具材料的电火花加工
工件坐标系在电火花加工中的应用
传统加工与数控加工的合理衔接
长内锥孔喷嘴的加工
高硬度材料槽的磨削加工
批量生产的数控加工工艺规程
CCMT（一）走近台商
精英荟萃　凯柏精机
行业论坛——台湾机床发展之路
走近台商
CE100 柔性化刀具系统
车床加工内球面装置
复合锥面扩钻孔
加工中心刀具长度补偿功能应用技巧
简易对刀仪
渐开线齿形误差超差原因及消除
加工中心组合夹具的组装技术
机床部件结合面灌胶技术
利用工装加工超长轴
铣镗床镗铣轴配磨间隙的确定
新型高速快换夹头
测量缸盖喷油嘴孔深度检具
凸轮的非接触式精密测量方法
锥齿轮的齿形变换
立式加工中心 ATC 机械手重力平衡装置
CAK6152 数控车床驱动板的维修
转塔式液压数控冲床的应用
T68 镗床工作台大修
用电脑做机床外部存储器
加工中心限位开关故障排除
车床正、反转操纵机构设计
润滑油和切削液
CA6140 车床的数控化改造
S7 可编程控制器在 SKW75 高速扎管机上的应用
液压执行元件欠速机理、原因和排除措施
数控加工中心工艺文件的编制方法
Mastercam 在数控铣削加工编程中的应用
SolidEdge 中曲面类零件精确设计的实现
提高 DHG4011 数控切割机加工能力的方法
广数数控系统知识讲座
第 2 讲　数控系统配置与传动比的计算
海德汉进给传动精度系列讲座