

高速钢渗碳技术及其应用

■ 赵步青, 胡会峰, 张日发

高速钢渗碳会使表面含碳量增加, 故很少采用。若采用常规的淬火温度, 可能发生熔化现象, 即使避免熔化, 表面含碳量大大超过基体成分, 也会产生表面脆化。但目前, 高速钢渗碳已被理性地运用于各个领域, 以下简介无莱氏体高速钢渗碳、高速钢高温渗碳、高速钢低温低浓度渗碳技术及其应用。

1. 无莱氏体高速钢

高速钢是莱氏体钢, 用传统的铸锻工艺生产时, 在凝固的最后阶段形成含有大量碳化物的莱

氏体, 导致碳化物偏析, 使力学性能下降。因此, 在高速钢的发展历程中, 一条主线就是如何使碳化物分布均匀, 以减轻或消除碳化物偏析, 生产出无偏析的高速钢。为此, 采取的有效途径是降低含碳量, 从图1、图2可知, 当高速钢中碳的质量分数 < 0.62% 时, 就完全可以避免莱氏体。大连交通大学戚正风等人开发了一种少无莱氏体高速钢^[1], 获国家发明专利。其指导思想是将碳含量降低到能满足刀具心部性能要求的水平, 加工成刀具后

进行渗碳, 通过渗碳在刀具表面形成的碳化物不仅细小而且分布均匀, 从而可获得硬度很高的刃部和韧性很高的心部, 对于切削刀具来说, 这是一种极佳的配合, 在钻头、立铣刀等产品的试验中获得较理想的效果, 可惜并没普遍推广。

2. 高速钢高温渗碳低温淬火

高速钢在奥氏体状态对碳的吸收能力很强, 图3充分表明了这一点^[2]。T1 (W18Cr4V) 钢经 930℃ × 8h 渗碳后, 表面 w_c 达

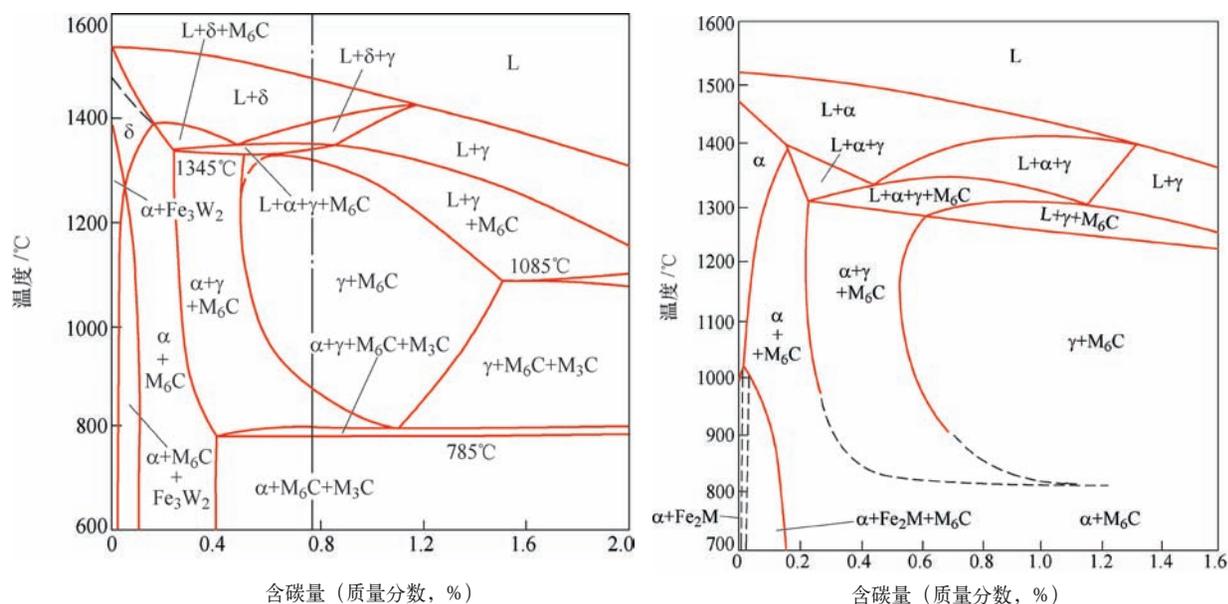


图1 Fe-W-Cr-C系在18%W、4%Cr时的Fe-C伪二元相图 图2 Fe-W-Mo-Cr-C系在6%W、5%Mo、4%Cr、2%V时的Fe-C伪二元相图

到2.60%， w_C 高于1.0%的渗层深0.75mm左右。含有大量的碳化物形成元素的高速钢渗碳时的化学反应机理与普通碳素钢不同，在吸收、渗入过程中，不但以固溶于奥氏体中的形式存在，也可以碳化物的形式存在，即在渗入的同时（而不是在冷却时）就析出碳化物。实际上，所渗入的碳绝大部分在渗碳温度下以碳化物形式析出，碳化物皆为颗粒状，其类型随碳含量的增加按 $MC \rightarrow M_6C \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_3C$ 顺序而变化。在上例中， w_C 为2%的渗层中已含有大量的 M_3C 型碳化物。随着钢中碳含量的上升，在某一奥氏体化温度下的固溶碳也略有增加。在一定范围内，这种固溶碳的提高对二次硬化是有利的，但过多则促使残留奥氏体量增加，反而降低二次硬度。

正如碳饱和度对高速钢组织转变的影响一样，渗碳层与心部的淬火、回火与二次硬化的特性也不同。如按渗碳前加热到心部合适的温度淬火，则对表面讲就将发生过热、过烧。反之，如果以发挥渗碳层正常淬火的二次

硬化性能为目的，则心部将处于淬火欠热状态。当渗层表面碳量过高，分布梯度过陡时，上述矛盾更加突出，很难找到一个能基本上正常发挥表层和心部双重潜力的温度。为了缓和这一矛盾，高速钢渗碳一般分为两段：渗入和扩散，炉气碳势保持在较低水平，但温度可稍提高些，一般选在该钢种正常淬火温度的下限偏低些，如M2钢可选用1180~1150℃，经过扩散后直接淬火。正确选择渗碳温度、时间和炉气碳势，经上述渗碳→扩散→淬火→回火后，可以获得高硬、高耐磨的表层及具有一定热硬性、良好韧性的心部，这对大部分模具

及某些简单刀具来说是一种外硬内韧的良好配合。

图4是T15钢(W12Cr4V5Co5)经830℃和900℃渗碳后再加热至1067℃扩散不同时间，淬回火后表面硬度分布状态。由图4可知，长时间的扩散处理和多次回火可避免表层残留奥氏体过多，导致回火难以充分，硬度反而比心部低的情况。比较理想的表面硬度分布，是表面硬度最高，且向内下降平稳。全渗碳硬化层深度达到1mm，其中66HRC以上的深度为0.5mm；心部二次硬化经低温淬火、正常回火处理为62~63HRC。

W6Mo5Cr4V2钢渗碳用于

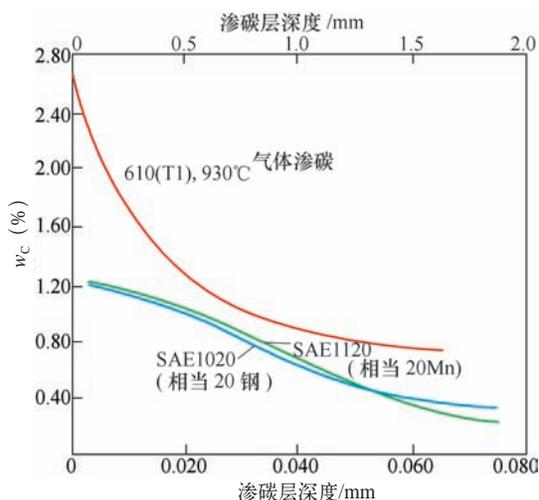


图3 T1钢和低碳钢经930℃、8h渗碳后碳量的分布

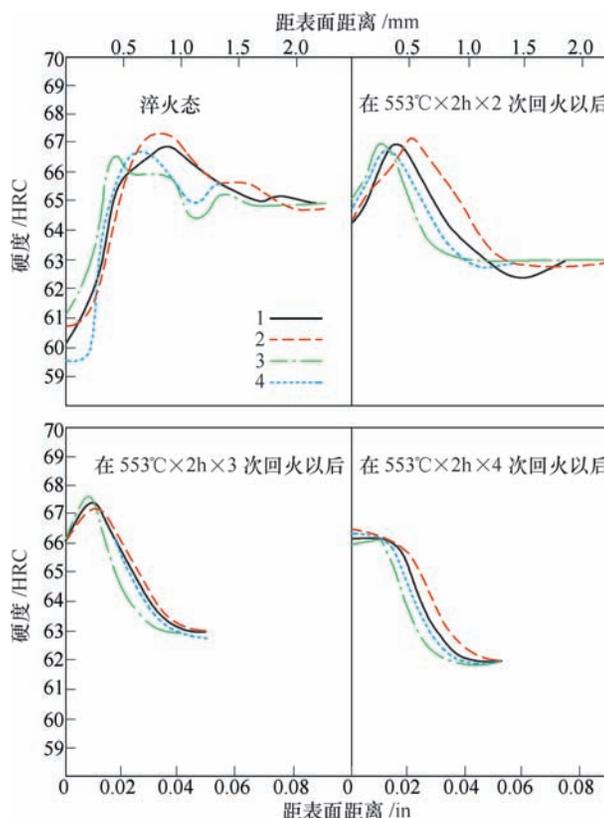


图4 T15钢渗碳处理直接淬回火后表层的硬度分布

- 1—900℃，3h渗碳，1067℃，20min扩散，油淬
- 2—900℃，3h渗碳，1067℃，40min扩散，油淬
- 3—830℃，30min渗碳，1067℃，20min扩散，油淬
- 4—830℃，30min渗碳，1067℃，40min扩散，油淬

制冷锻螺母六方套模，1066℃固体渗碳，开箱空冷淬火，554℃×2.5h×2次回火，冷锻寿命达240万件，是该钢常规淬火回火模具的2.4倍，是W18Cr4V钢模具的6.8倍。

还有很多使用高温渗碳降温淬火提高模具、刀具寿命的实例，不一一列举。

3. 高速钢低温低浓度渗碳机理及工艺

日刊《日本机械师》1985年第8期(P32~36)报道高速钢低于 A_{c1} 温度以下750℃渗碳机理、性能、工艺要点和应用效果，国内山西淮海机械厂夏期成等人早于1984年开始就进行低温低浓度渗碳试验^[3]，并投入小批量生产，经统计分析对比，各种高速钢刀具的使用寿命分别提高到0.73~3.3倍。这种处理方法设备简单，工艺简便，工具变形甚微，成本低，适用性强，使用刀具的加工厂可应用此工艺自制个别切削性能不能满足要求的专用刀具，以适应机械加工的个性化要求。

(1) 低温低浓度渗碳机理 传统的渗碳温度大多在900℃以上，因为根据Fe-C相图可知，奥氏体对C的固溶量最高可达2%左右，而铁素体对碳的固溶量约为0.02%，因而一般认为铁素体是不能接受渗碳的。但是根据相分析表明，高速钢中的铁素体含有多种合金元素(见表1)其总量约5%，因此是含有多种元素的合金铁素体。

研究表明，合金元素置换于铁素体中，由于原子尺寸因素和

电子因素综合作用结果，会引起点阵常数的变化。尺寸因素一般可用欠配合度参量 Y 来表示：

$$Y = (d_M - d_{Fe}) / d_{Fe}$$

式中， d_M 代表其中合金元素的原子直径， Y 值越大，形成固溶体的点阵常数的变化也越大。电子因素可用负电性 X 表示化学亲和力关系，如 $(X_M - X_{Fe})^2$ 的值越大，化学亲和力就越强，固溶体点阵常数变化越小。有关合金元素的上述参数及其对点阵常数变化的作用列于表2。

表2中“ d_{12} ”是配位数为12的原子直径，点阵常数变化是Fe-X固溶中，溶质1%（原子）引起的点阵常数的变化。

根据以上数据，可以算出由于合金元素的原子尺寸因素和电子因素的综合作用，引起W6Mo5Cr4V2和W18Cr4V钢中合金铁素体的点阵常数变化分别为+0.0043Å和0.0037Å。

测试结果表明，碳原子在铁素体中处于八面体间隙中，这是因为八面体虽然间隙较小，但其是不等轴的，碳原子渗入时只需挤开上下最近的两个原子。人们

用晶体学分析的方法研究铁素体溶碳能力时发现，铁素体的溶碳能力[C] (%)与八面体间隙直径(d_o)对碳原子直径(d_C)比值的变化($\Delta = d_o/d_C$)具有良好的回归关系。

$$[C] = 0.7686 + 0.1133 \ln \Delta d_o/d_C$$

上述中 d_o 的大小与点阵常数的变化有直接关系。根据上述有关数据就可算出W6Mo5Cr4V2和W18Cr4V钢中合金铁素体溶碳的能力。在20℃时分别为0.103%和0.086%，而在750℃时为0.15%和0.14%。

有人用X射线能谱仪测定高速钢基体碳的强度，低温渗碳渗层铁素体基体为500cps（每秒脉冲数），而心部未渗碳的基体为340cps，证实了低温渗碳后渗层基体的含碳量明显高于未渗碳的心部基体。

由此认为，通用高速钢的合金铁素体几乎不含碳，是在特定成分（欠碳）条件下合金元素和碳在不同合金相之间分配的一个具体结果，并不代表这种合金相铁素体的最大溶解能力。高速钢低温低浓度渗碳就是在 A_{c1} 以下

表1 W6Mo5Cr4V2及W18Cr4V钢基体的合金成分

成分 钢号	基体合金成分（质量分数，%）					基体合金成分（原子分数，%）				
	W	Mo	Cr	V	合计	W	Mo	Cr	V	合计
W6Mo5Cr4V2	0.9	1.5	2.2	0.2	4.8	0.273	0.873	2.326	0.186	3.658
W18Cr4V	2.1	—	3.1	0.1	5.2	0.638	—	3.313	0.093	4.044

表2 合金成分对铁的固溶体点阵常数的作用

元素	原子直径 $(d_{12}, \text{Å})$	欠配合度 Y (%)	负电性 X	$(X - X_{Fe})$	点阵常数变化 $/\text{Å}$
Fe	2.54	0	1.8	0	0
W	2.82	+11.0	1.7	0.01	+0.0011
Mo	2.89	+0.2	1.8	0	+0.0024
Cr	2.55	+0.4	1.6	0.04	+0.0005
V	2.72	+7.1	1.6	0.04	+0.0010

的珠光体相区通过固溶和扩散过程,对合金铁素体进行低浓度渗碳,使渗层的碳量提高0.10%~0.15% (质量分数)。

与传统的高温渗碳工艺相比,低温渗碳温度降低约200℃,为了获得一定深度的渗层,需要考虑碳的扩散条件。根据有关数据推算,得出碳在920℃ γ -Fe中和700℃ α -Fe中的扩散系数分别为 $1.62 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ 和 $6.62 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$,即碳在铁素体中的扩散系数比在奥氏体中要大3倍多。这是因为体心立方的铁素体致密度小,故碳原子在其中较易迁移。虽然合金铁素体中置换存在形成碳化物的合金元素,会降低碳的扩散系数,但前者仍起主导作用,只要合金铁素体中固溶产生一定的碳浓度梯度,是完全有可能形成较深的渗碳层。

(2) 铁素体区域渗碳的特点和性能 由于是在 A_{c1} 以下(一般700~750℃)渗碳,渗层的碳含量提高控制在合金铁素体最大溶碳能力之内,因而不会形成过量渗碳,更不会产生影响力学性能的大块碳化物。由于固溶于合金铁素体中的碳会趋于偏聚在形成碳化物的合金原子周围的间隙中,在从渗碳温度冷至室温的过程中,随着碳的固溶量减小,在渗层中会析出高度弥散的碳化物,并优先析出钒的碳化物。

凡在奥氏体状态的高速工具,为防止晶粒粗大,往往要比常规降低40~60℃欠热淬火,势必会影响热硬性等性能的发,而在铁素体区域的低温渗碳,采

用常规的淬火加热温度,仍可获得细小晶粒。

由于表面碳含量提高,其碳含量达到“定比碳”的水平,二次硬化效果十分明显,淬火、回火后上升到65~68HRC。625℃×4h后的热硬性也能达到62HRC以上的高水平(未渗碳肯定低于61HRC)。

低温低浓度渗碳的碳势不宜过高,不要超过1.10%,渗层也不宜超过0.80mm,一般达0.40~0.70mm,淬火、回火后可进行正常余量的磨加工,因此,适用于精度要求高的各种成形刀具。另外,低温渗碳的高速钢刀具与其他成品表面强化处理无排他性,如可进行蒸汽处理、氧氮化、渗氮、QPQ、TiN涂层等。

(3) 低温低浓度渗碳工艺 由于是在 A_{c1} 以下处理,所以应安排在淬火、回火工序前进行。渗碳温度设定700~750℃,选用在CO-CO₂气体气氛中进行为宜,在气体气氛中加热时,碳存在于钢的表面,表示渗碳能力的指数(含碳量%)叫做渗碳气体的渗碳能力。在750℃所得的渗碳气体的渗碳能力和CO-CO₂之间的关系见图4。很明显,当CO多、CO₂少时,渗碳气体能力为最高,因此进行低温渗碳时选择气体浓度是很重要的。

图5是渗碳量对W6Mo5Cr4V2钢回火硬度的影响。由图可知,在560℃×1h×2次回火时, w_c 为1.0%~1.10%时的硬度达67HRC峰值,超过此含碳量,硬度反而向低走,主要是残留奥氏体多了,硬度不升反降的主要原因。

图6是CO-CO₂气氛中

渗碳能力和750℃×4h后的W6Mo5Cr4V2钢的表面碳含量的关系。此条件下,为使其表面碳含量达1.0%~1.10%,气氛气体的渗碳能力调整到0.47%左右。

图7是在渗碳能力为0.47%的气氛气体中对W6Mo5Cr4V2进行渗碳的效果,结果表明,表面 w_c 在1.0%~1.10%时,渗层厚度为0.40~0.60mm。

图8所示的是表3中两种高速钢:W6Mo5Cr4V2钢680~700℃×6h、W18Cr4V钢730~750℃×6h低温装箱固体渗碳后渗层中的含碳量,由图可知,两种钢的渗碳能力基本相近。

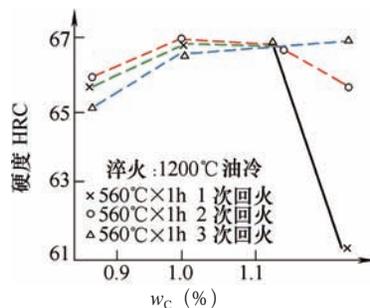


图5 碳对W6Mo5Cr4V2淬火硬度的影响

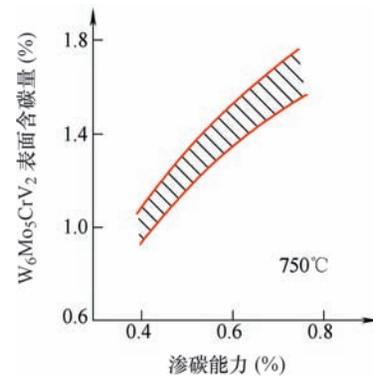


图6 渗碳能力和表面含碳量的关系

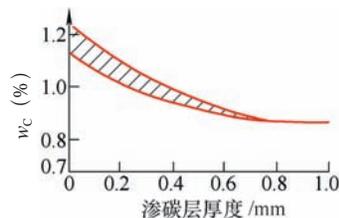


图7 W6Mo5Cr4V2MIC处理后的表面含碳量

由表及图示值可见，低温渗碳可使表面C增多0.13%左右，扩散层深度可达0.50~0.60mm，经淬火、回火后，硬度达65~68HRC，经625℃×4h热硬性试验，硬度提高1.5~2.0HRC。

(4) 低温低浓度渗碳工具应用效果 沟槽加工后经粗磨(留余量0.15mm)的高速钢钻头先用气体渗碳炉进行缓慢渗碳处理，使 w_c 为1.0%~1.10%，经淬火、回火加工后蒸汽处理，此时钻头表面的 w_c 在0.95%~1.05%之间，硬度为940HV，硬化层深度为0.60~0.70mm。

图9a、9b为W6Mo5Cr4V2钻头表面硬化层硬度分布的情况，图10为W6Mo5Cr4V3Co8经渗碳淬火、回火后硬度达950HV的分布情况。将上述两种高速钢在750℃进行气体渗碳，使表面 w_c 达1.0%~1.10%，渗层深度在0.50~0.60mm，淬火、回火加工成品，表面硬度约950HV，在提高耐磨性的同时，也不丧失原有的韧性，因而提高了钻头的切削性能与使用寿命。

经渗碳处理后，刀具的热硬性提高甚微，因此在加工SUS304之类的奥氏体不锈钢或在干切削时效果不太理想。此外，切削硬度超过40HRC的调质

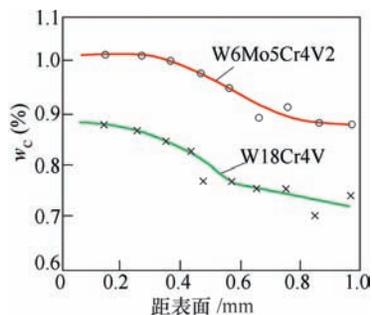


图8 高速钢低温渗碳后渗层碳的分布

钢时，渗碳钻头也不如渗氮的产品好。实践考核，渗碳后的钻头在钻削硬度低于40HRC制品时，寿命普遍提高2倍左右。今后，渗碳钻头可望使大批量生产线上

调质件的孔加工降低成本。表4为渗碳处理和渗氮处理刀具的特性和切削试验结果。

低温渗碳对高速钢刀具寿命的影响如表5所示。

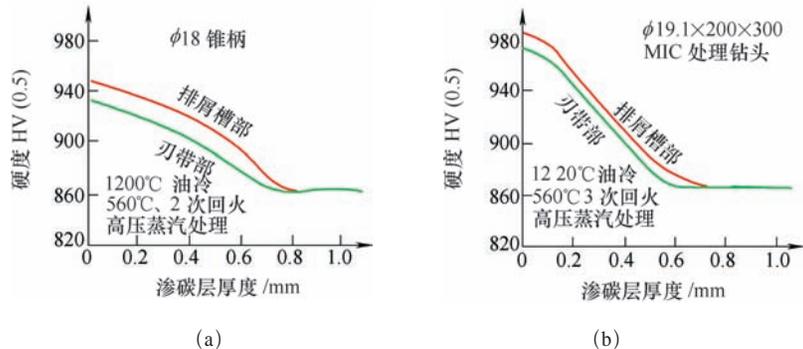


图9 M2钢经MIC处理后表面硬化层硬度的分布

表3 两种高速钢的化学成分(质量分数) (%)

元素	C	W	Mo	Cr	V	Si	Mn	S	P
W6Mo5Cr4V2	0.86	6.09	4.80	4.02	1.76	0.19	0.27	0.024	0.014
W18Cr4V	0.74	18.07	0.05	4.11	1.15	0.26	0.33	0.023	0.016

表4 低温渗碳和渗氮处理特性的比较

项目	低温渗碳	渗氮处理
表面硬度HV	950	1000~1200
硬化层深度/mm	0.50~0.70	0.03~0.15
韧性	大	小
耐磨性	中	大
处理工序	淬火回火之前	回火精加工磨削之后
产量	大	小
成本	小	大

表5 低温渗碳对高速钢刀具寿命的影响

刀具名称	刀具材料	刀具主要尺寸/mm	刀具热处理工艺	刀具寿命/件	使用寿命对比
直柄麻花钻	W18Cr4V	8.9	常规热处理	480	1
			低温渗碳	2090	4.35
铰刀	W18Cr4V	26	常规热处理	440	1
			低温渗碳	860	1.95
扩孔钻	W6Mo5Cr4V2	26	常规热处理	220	1
			低温渗碳	390	1.77
丝锥	W18Cr4V	M27	常规热处理	1157	1
			低温渗碳	4991	4.31
丝锥	W18Cr4V	M56	常规热处理	200	1
			低温C-N共渗	804	4
			低温C-N共渗+低温渗碳	1842	9.16

非贯穿孔腔型面碳氮共渗工艺研究

■ 寻丹, 谢成, 张朝铭, 范康燕

摘要: 碳氮共渗适用于要求表面高硬度、高耐磨性、心部有一定强韧性的零件。零件非贯穿孔腔型面进行滴注式气体碳氮共渗时易出现渗层偏浅、渗层不均匀等现象。通过对某型航空发动机零件止动垫圈碳氮共渗后渗层偏浅原因分析, 制订相应改进措施, 对类似零件碳氮共渗生产起到指导作用。

关键词: 碳氮共渗; 非贯穿孔腔; 渗层偏浅

某型航空发动机零件止动垫圈, 如图1所示, 材料为16Cr3NiWMoVNB, T1、T2表面要求有较高的硬度和耐磨性, 设计要求零件表面硬度 $\geq 89\text{HR}15\text{N}$, 中心硬度 $33\sim 43.5\text{HRC}$ 。为确保设计要求, 对零件T1、T2面进行碳氮共渗, 深度 $0.40\sim 0.55\text{mm}$, 其余面镀

铜保护。

零件加工路线为: 领料 \rightarrow 调质 \rightarrow 粗加工 \rightarrow 镀铜 \rightarrow 碳氮共渗 \rightarrow 除铜 \rightarrow 淬火 \rightarrow 精加工 \rightarrow 氧化磷化 \rightarrow 检验。氧化磷化后零件碳氮共渗面应呈均匀黑色, 非碳氮共渗面应呈灰白色, 在实际生产加工中, 发现零件T1面颜色不均匀,

出现灰白与黑色相间的花斑, 如图2所示。对颜色有问题零件进行金相剖切, 检查结果T1面碳氮共渗渗层不均匀, 灰色花斑处无渗层, 造成多批零件报废。

1. 原因分析

止动垫圈采用井式炉滴注式

日本人曾作 $\phi 18\text{mm}$ 、 $\phi 12\text{mm}$ 锥柄钻低温渗碳切削试验, 钻孔数目较未渗碳者提高50%以上; $\phi 8.5\text{mm}$ 、 $\phi 11.5\text{mm}$ 直柄钻渗碳钻较未渗碳者寿命提高40%; 经低温渗碳的 $\phi 9.8\text{mm}$ 、 $\phi 13\text{mm}$ 锥钻的W6Mo5Cr4V3Co8钢产品, 寿命提高1倍多。

有人用废W6Mo5Cr4V2料

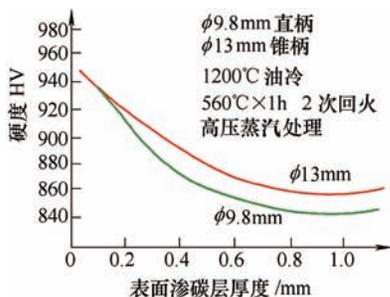


图10 渗碳回火后硬度分布情况

头, 制作检查锯片铣刀内孔塞规(止通规), 经低温渗碳处理, 塞规表面硬度达到 $67\sim 68\text{HRC}$, 使用寿命较原9SiCr、GCr15钢提高20多倍。

由于低温渗碳后的表面碳含量增加有限, 大概达到该钢定比碳(也叫平衡碳)的水平, 碳化物分布均匀, 因而无需改变随后的热处理工艺。低温渗碳的费用仅占刀具成本的5%左右, 但其创造的经济效益十分可观。由此可见, 低温渗碳极易纳入某些特殊刀具的生产工艺。

综上所述, 不管是无莱氏体渗碳、高温渗碳, 还是低温渗碳都是在一定的条件下才适用,

并不具备普遍性, 但只要应用得好, 同样可以为企业节能增效。

参考文献

- [1] 戚正风. 无碳化物偏析高速钢[J]. 金属热处理, 2011, 36(10): 1-5.
- [2] 邓玉昆, 陈景榕, 王世章. 高速工具钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 555.
- [3] 夏期成. 高速钢低温低浓度渗碳[J]. 工具技术, 1989(3): 44~45, 1989(4): 40~42.

作者简介: 赵步青、胡会峰、张日发, 安徽嘉龙锋钢刀具有限公司。 MW 20170116