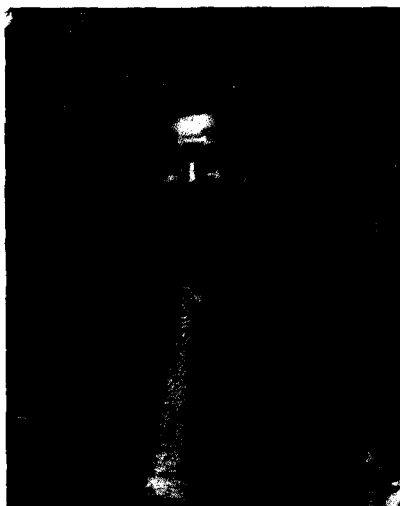


工模具真空淬火介质

江苏镇江拓普工具公司 (212014) 赵步青



近几年,我国工模具发展神速,已成为世界上名副其实的工模具制造大国,热处理设备厂也赚足了大钞,不管是盐浴炉还是真空炉,几乎成几何级数增长,政府给力,企业争气,热处理行业红红火火,出现了前所未有的鼎盛高速发展期。盐浴淬火、真空淬火两条巨龙打起了擂台,你方唱罢我登场,好不热闹。

真空热处理技术的崛起和迅猛发展,一方面源于工业技术的需要,另一方面则由于真空技术具有其他热处理不可比拟的突出优点,具体表现在:①无氧化、无脱碳并有除锈作用,省去了表面磨削加工工序,从而节约了钢材及原材料消耗,节省加工工时。②脱气作用。在常压下溶入金属的气体,如 O_2 、 H_2 、 N_2 等,在负压时从金属内部向表面扩散而逸出,这种现象称为脱气。真空淬火加热具有脱气特性,使材料表面纯洁度提高,从而提高了工模具的疲劳强度、塑性、韧性以及耐蚀性能。③有利于去除工件表面残留油脂,提高产品质量。④被处理件无氢脆危险,防止钛和难熔金属表面脆化。⑤热处理畸变小。由于真空加热缓慢,工件内外温差小;真空加热一般预热1~2次,工件截面温差小,热应力也小,因而不会因外力作用产生更大的变形。一般来说,真空淬火的变形为盐浴淬火的10%~50%。⑥节省能源。由于真空加热室采用比热容小、隔热效果好的材料作为隔热屏,因而蓄热量较

小,炉子的热效率高,可实现快速升温和快速降温。生产成本低、耗电少,能量消耗为常规热处理的50%,法国MI-Co资料介绍,盐浴淬火能耗成本是真空淬火的300%。⑦真空淬火工艺稳定,重复性好。⑧操作安全,自动化程度高。⑨工作环境整洁,无污染、无公害。

然而,真空炉也不是十全十美的,还有不少需要完善的地方,主要缺点如下:①某些合金元素(如Cr、Mn等)在真空中较高温加热时蒸发较大,生产中需充入惰性气体加以保护。②真空热处理设备投资较大,动辄四五十万元甚至数百万元人民币(进口设备)。但只要生产任务饱满,设备运转正常,可以在2~3年内收回投资。③生产能力低。一台真空炉24h运转,按日产4炉,每炉处理工件约100kg计算,每天只能处理400kg,而一台高温盐浴炉24h至少能处理1000kg工件。④真空油淬存在引爆隐患(国内外都发生过爆炸事故)。

真空热处理可根据淬火工件的形状、尺寸、材质,以及技术要求选择油淬、气淬或硝盐淬火等方式。

一、真空油淬

真空炉淬火,最初就以油淬居多。虽然目前气淬越来越多,油淬越来越少,但较大工件以及淬火温度在 $1000^{\circ}C$ 以下、淬透性比较高的小零件仍用油淬。

1. 真空淬火油

真空油淬对淬火油有如下要求:①蒸汽压低,不易挥发。要求蒸汽压低于 $10^{-4} \sim 10^{-2} Pa$,以确保真空度在 $10^{-1} \sim 10 Pa$ 条件下,真空淬火油不会产生明显的挥发。②杂质与残炭少,酸值低。真空油淬后,零件表面的光亮度应不低于标准试样的70%。

③临界压强（即得到大气压下相同冷却能力的最低压强）低，冷却性能好，要求工件在真空淬火油中冷却后，能达到常压下盐浴淬火相同的硬度值，不得有明显的渗碳层。④热稳定性好，即抗老化性能好，使用寿命长。

用于真空淬火的油已商品化、标准化，如美国海斯公司的H1油、H2油，日本初光公司的HV1油、HV2油，前苏联的BM1~4油等。1979年，我国研制成功并投入生产的ZZ-1、ZZ-2真空淬火油具有冷却能力高，饱和蒸汽压低，热稳定良好，以及对工件无腐蚀的特性而且质量稳定，适于工具钢的真空淬火，显然一般淬火油不能满足上述要求。

2. 真空淬火油特性

图1为T8钢分别在真空淬火油、普通淬火油和矿物油中进行真空加热淬火后硬度的变化曲线。普通淬火油在常压下（0.1MPa）淬火后硬度为66HRC，试样可完全淬硬，然而随着淬火时压力的降低，硬度急剧下降，到 5×10^4 Pa以下时降至最低，已不能将工件淬硬。矿物油在常压下淬火，仅使试样硬度达到42HRC，压力下降后硬度反而升高，到 2.5×10^4 Pa时可使淬火后硬度达到63~65HRC。在更低的压力下淬火硬度趋于下降。真空淬火油则能在较宽的区域内淬到63HRC以上的高硬度，这为工模具钢真空油淬谋求高硬度创造了条件。

图2为上述3种油在不同压力下的特性温度与冷却速度的关系比较。从图2看出，冷却速度由蒸汽膜存在的时间及试样从800℃冷却到400℃所需要的时间来表示（℃/s）。从蒸汽膜存在的时间看，在 10^4 Pa以下真空淬火油最短，从800℃→400℃冷却时间比较，尽管各种油在真空状态下比常压下时间要长，但真空淬火油比矿物油冷却时间要短。在 2×10^4 Pa左右以真空淬火油的冷却时间最短。

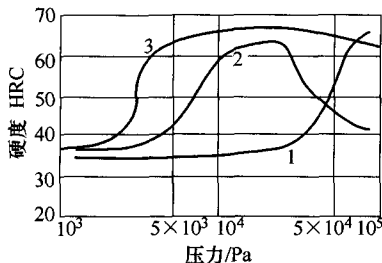


图1 真空淬火油与一般淬火油冷却能力的比较

试样：T8钢，800℃淬入80℃油中

1-普通淬火油 2-矿物油 3-真空淬火油

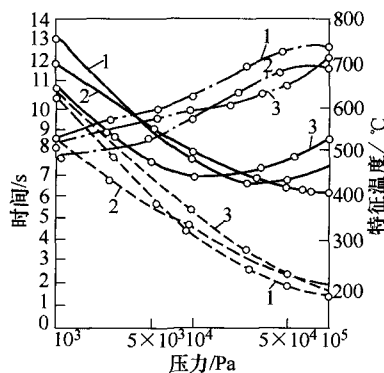


图2 在不同压力下，几种淬火油冷却能力与特性温度的比较

1-真空淬火油 2-普通淬火油 3-矿物油

在低压下，真空淬火油的特性温度也较高，因此，真空淬火也适合于在低压下工作，有优异的淬火能力。

3. 应用案例

用 $\phi 8\text{mm} \times 24\text{mm}$ 银棒测得不同真空度下国产ZZ-1、ZZ-2真空淬火油冷却曲线如图3、图4所示。GCr15钢 $\phi 20\text{mm} \times 6\text{mm}$ 试样在840℃和T10钢 $\phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 试样在800℃于ZZ-1、ZZ-2两

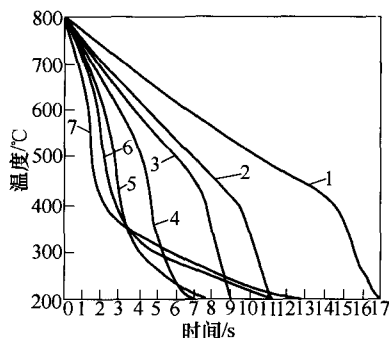


图3 ZZ-1号油在不同真空度下的冷却曲线

1-0.013kPa 2-5kPa 3-10kPa 4-26.6kPa
5-50kPa 6-66.6kPa 7-101kPa

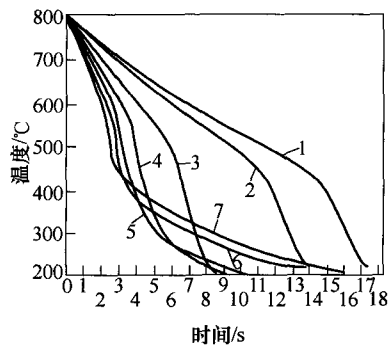


图4 ZZ-2号油在不同真空度下的冷却曲线

1-0.013kPa 2-5kPa 3-10kPa 4-26.6kPa 5-50kPa
6-66.6kPa 7-101kPa

种真空油中淬火后的硬度见表1和表2。

表1 GCr15钢试样在不同压力下的淬火硬度

油品名称	淬火时的压力/Pa	温度/℃	淬火后硬度HRC
ZZ-1	760 × 133.32	25~30	66 66 66 66
ZZ-2			65 65 66 65
ZZ-1	380 × 133.32	25~30	64 64 63 63
ZZ-2			61 60 61 61
ZZ-1	76 × 133.32	25~30	65 65 65 65
ZZ-2			60 61 61 62
ZZ-1	10 ⁻¹ × 133.32	25~30	36 36 36 36
ZZ-2			31 31 31 31

表2 T10钢试样在不同压力下的淬火硬度

油品名称	淬火时的压力/Pa	温度/℃	淬火后硬度HRC
ZZ-1	760 × 133.32	25~30	62 62 62 62
ZZ-2			61 62 62 62
ZZ-1	380 × 133.32	25~30	62 62 62 62
ZZ-2			61 62 62 62
ZZ-1	76 × 133.32	25~30	60 61 62 62
ZZ-2			61 62 61 62
ZZ-1	10 ⁻¹ × 133.32	25~30	35 36 35 35
ZZ-2			34 33 34 34

由于真空加热的工件具有良好的表面状态,因而钢在真空淬火油中冷却可以获得与常规工艺相同的硬度值。从原理上讲,真空淬火时维持液面压力为临界压强即可获得接近于大气压下的冷速。除此之外,提高气压可以提高油的蒸发和凝固温度,因而可以避免因油本身升温造成的挥发损失和对设备的污染。工艺上常采用向冷却室充填纯N₂至40~73kPa(高于67kPa时对特性影响已不明显)的方法。实践证明,对于某些低淬透性钢,若将气压增大至大气压之上,将可获得更高的冷速。这是由于蒸汽膜进一步变薄了,缩短了传热慢的蒸汽膜阶段,增压油淬进一步发展为油淬+气冷淬火,这就提高了大型及精密工模具的淬火效果,为减少变形提供了多种选择的可能性。

4. 使用要点

为了满足较大工件淬火冷却的需要,真空淬火油量要足够大。根据入油工件、料盘、卡具等从入油温度冷至油池温度时释放出的热量进行热平衡计算得出最少油量,再补加一定的安全油量。考虑到因搅拌以及局部激烈升温造成的油膨胀、沸腾,一般取工件重量与油重量之比1:10~1:15为好。

真空淬火油的品质,如酸值、残炭、水分、离子量等都可能使工件严重着色,有时它们对光亮度的影响远大于真空度的影响,使用过程中需定期检测粘度、闪点、冷却性能及水分。据分析,当真空淬火油中水的质量分数达0.03%时,就足以使淬火件表面变得灰暗;当水的质量分数达到0.3%时,油的冷却特性将发生明显改变,很可能发生淬裂。在液压压力降低时,含水的油将发生沸腾,从而严重地破坏真空,鉴于此,新油在第一次使用前需进行调制,每次停炉后还应保持炉子的真空,以防止空气和水分再次溶入油中。

真空淬火油的使用温度应控制在40~80℃为宜。油温过低,粘度大、冷却速度低,淬火后工件硬度不均匀,表面不光亮。在冬季淬火前,需将真空淬火油预热。油温过高,则将使油迅速蒸发,对真空炉造成污染并加速油的老化。

在生产中,为能迅速调节油温并使油温均匀化,油池常设搅拌装置以加强油的循环和对流。搅拌必须到位,若搅拌不足,则易使尺寸大、结构复杂的工件及长杆件等出现软点和软带(软块);若油的搅拌过于强烈,将使工件产生较大的变形。控制工件入油后的开始搅拌时间、调节搅拌的激烈程度以及实现断续搅拌,可以减少变形和软点。

5. 真空油淬的不足

不管采取多少措施,只要是油淬,工件变形实属难免,我们只能因势利导,努力使变形减少到最低量,并采取补校措施,将变形矫正过来。

高温油淬产生瞬时渗碳已是不争的事实。高速钢工具经真空油淬后,将在工件表面出现由残留奥氏体和碳化物组成的白亮层。分析认为,这与钢在高温(900~1200℃)油淬阶段的瞬时渗碳有关。一般的解释是,真空淬火油是由C、H、O组成的有机化合物,在与活性的高速钢表面接触时,将形成一层薄而致密的、包围着工件的油蒸汽外套,其中的CH₄、CO将发生分解并析出浓度大和传播特性较高的活性碳,可很快渗入钢中。有研究表明,M2钢于1.33Pa、1200℃下加热后油淬所得瞬间渗碳层可达35~50 μm。X射线显微分析证明,距表面10 μm内是耐蚀的白亮层,其碳浓度达1.50%~1.70%,从表面到50 μm处,碳降至基体含量0.80%~0.90%。白亮层是由大量复合碳化

物和残留奥氏体组成的，其与内部交界处有粗晶马氏体，因而表面硬度低下。

油淬工件出炉后应进行去油清理，注意不要对周边环境造成污染。

二、真空气淬

1. 真空气淬介质

真空气淬的冷速与气体的种类、气体压力、流速、炉子结构及装炉状况有关。可供使用的气体有Ar、He、H₂和N₂。设相同条件下空气的传热速率为1，则Ar为0.70，He为6，H₂为7，N₂为0.99。热处理用气体技术要求见表3。

表3 热处理用气体技术要求 (JB/T 7530—1994) (%)

气体名称		指标要求 (V/V)					
		氩含量	氮含量	氢含量	氧含量	总碳含量 (以甲烷计)	水含量
高纯氩气		≥99.999	≤0.0005	≤0.0001	≤0.0002	≤0.0002	≤0.0004
氩气		≥99.99	≤0.007	≤0.0005	≤0.001	≤0.004	≤0.002 ^①
高纯氮		—	≥99.999 ^②	≤0.0001	≤0.0003	≤0.0003	≤0.0005 ^③
纯氮		—	≥99.996 ^②	≤0.0005	≤0.001	CO≤0.0005 CO ₂ ≤0.0005 CH ₄ ≤0.0005	≤0.0005 ^③
工业 气 态 氮	I 类	—	≥99.5	—	≤0.5	—	露点 ≤-43℃
	I 类 I 级	—	≥99.5	—	≤0.5	—	游离水 ≤100mL/瓶
	II 类 II 级	—	≥99.8	—	≤1.5	—	游离水 ≤100mL/瓶
	氢气	—	≤0.006	≥99.99	≤0.0005	CO≤0.0005 CO ₂ ≤0.0005 CH ₄ ≤0.001	≤0.003

注：① 在15℃，大于11.8MPa条件下测定。
② 包含微量惰性气体。
③ 液态氮不规定水含量。

在任何压强下，H₂都具有最大的热传导能力和最大的冷却速度，H₂可以应用于装有石墨元件的真空炉，但对含碳量较高的钢种，在冷却过程的高温阶段（1050℃以上）有可能造成轻微脱碳，对高强度钢有造成氢脆的危险，因此，真空高压气淬人们不会选用H₂作为冷却介质。

冷却速度仅次于H₂的是惰性气体He。在空气中He含量仅为0.0005%（体积分数），一般在天然气液化过程中制取He的费用比N₂可高至上百倍，只有在某些特殊场合下才选用He作为真空气淬介质。

Ar的冷却能力比空气低，它在大气中的体积分数为0.93%，用压缩空气使之液化，精馏的成本较高，所以Ar也不是理想的高压气淬介质。

N₂资源丰富，成本低，在略低于大气压下进行强制循

环，冷却强度可上升20倍。它是使用安全、冶金损害小的中性气体。N₂在200～1200℃下，对常用工模具钢呈惰性状态，是工模具高压气淬较理想的淬火介质。

N₂中含O₂（如体积分数达0.001%以上）可使高温下的钢产生轻微的氧化、脱碳，因而一般常规使用的高纯氮的纯度为99.999%（相对露点-62℃，相应于真空度1.33Pa）。鉴于高纯氮价格昂贵，有时在无特殊要求的情况下，可选用一般氮气。实践证明，这对一般工具产品表面状态无明显损害，工业用普通氮气的纯度为99.9%。氧气站提供的氮气含氧量高达1.5%（体积分数），含较多的水，需经过净化后方可使用。

2. 使用要点

在高压气淬时，为了淬得高硬度，往往会提高冷却气体的压力。淬火冷却速度随气压上升明显提高，但并非气压越高越好，对于尺寸较大，比表面小的工件，在较高气压下，决定冷却速度的主导因素是钢的内部热传导。因为对流传热加速冷却的效果难以到达工件中心。此时提高气压对增大冷却速度的作用不十分明显。又考虑到一般的真空炉只在低于大气压时密封效果较好，以及为了节约高纯气体，故真空气淬时的常用压力为0.5×10⁵～0.8×10⁵Pa，最高取0.92×10⁵～0.99×10⁵Pa。

例：M2钢制成的φ25mm×40mm试样，装炉量100kg，真空热处理工艺：850℃×25min+1050℃×15min两次预热，1220℃×4min加热，气淬冷至550～500℃出炉续冷。当淬火气体压力为1×10⁵Pa时，冷却需185s，2×10⁵Pa时为110s，5×10⁵Pa时为55s。即随着气体压力的升高，冷速加大，冷却时间减少。560℃×1h两次回火后硬度由750HV提高至880HV（65HRC）以上。

此外，加压气淬还扩大了高合金工

模具钢气淬的材料品种和尺寸范围,但气压又不能太高,由于动力和气体消耗成比例增长,设备需有严格的防护措施等。提高气体的流速也可以提高其冷却速度,例如,当气体流速从10.2m/s提高到50.8m/s时(一般情况下不大于25m/s), N_2 、 H_2 、He的对流传导系数将提高3倍。

为了提高气体冷却能力,确保工具淬火质量,应采取合适的装炉量,一般只装额定值的60%~70%,工件在炉中保持上下、左右、前后适当的间隔,均匀有序地摆放工件,可以进一步改善冷却时的热交换条件。真空淬火质量好,但装炉量有限是制约真空炉快速发展的因素之一。

关于真空淬火工件的变形问题与常规热处理相似,引起真空淬火变形的原因是组织应力、热应力及淬火前工序留下的残留应力。在加热、冷却过程中,当工件处于塑性高的状态时,工件的自重、相互挤压、振动等也将导致变形并使淬火变形复杂化。但实践考证,真空淬火工件的变形平均小于常规工艺,一般只有盐浴加热淬火的10%~50%。

3. 应用案例

现将真空气淬在工模具热处理中应用非常成功的实例略举一二。

例1: Cr12MoV钢制螺纹铣刀,外形尺寸为135mm×37mm×37mm,淬火压力5bar(1bar=10⁵Pa),工具心部从1020℃冷透至500℃为45min,再经过15min冷却到80℃,工艺时间为4.2h。表面硬度63~64HRC。

例2: Cr12MoV钢制滚丝轮,外形尺寸φ200mm×60mm,1020℃×65min加热,淬火时通入高纯氮气,淬火压力2bar,硬度63~65HRC。

例3: 56NiCrMoV7钢制压铸模,外形尺寸为247mm×268mm×400mm,加热温度890℃,淬火压力5bar,530℃×2h两次回火,46~47HRC,金相组织良好。

例4: M2钢机用丝锥,1220℃加热,淬火压力6bar,金相奥氏体晶粒度10.5级,550℃×1h三次回火,硬度65.2HRC,寿命试验达到一等品。

例5: M2钢制φ80mmM3规格A级齿轮滚刀,1225℃淬火,淬火压力8bar,550℃×1h三次回火,切削试验达到优等品指标。

上海工具厂介绍,用高压气淬处理接柄刀具、

滚刀完全可行,不过该厂所用真空炉均为进口。

三、真空硝盐淬火

盐浴加热采用硝盐分级或等温淬火优越性很多,特别是对减少变形和开裂效果良好,再加上真空淬火的脱气效果,可以使工模具寿命更高,如30CrMnSiNi2A经真空硝盐等温淬火后,其多次冲击疲劳总寿命比常规淬火工艺高1.56~1.92倍。硝盐浴的成分(质量分数):55%KNO₃+45%NaNO₂,在真空下它将迅速蒸发,浴温越高,蒸发越剧烈,所以尽量在较低的温度下使用,或寻找熔点更低的硝盐浴。一般选用温度240~280℃使用,并应在240~280℃或达到工作温度后继续排气,以消除杂质及水蒸汽。使用中加以搅拌可以提高硝盐的冷却能力。如204℃硝盐的冷却烈度为0.5~0.8,激烈搅拌时可达2.25。搅拌还可以防止工件周围介质局部过热。用N₂或Ar提高盐浴液面压力和反复充气至大气压以稀释盐浴槽上方的气氛,可以提高冷却能力并减少硝盐蒸汽对设备的腐蚀。

静止硝盐浴的冷却能力与油相近。一般在Ms~Ms+30℃等温冷却,可获得满意的强度和韧性组织,等温时间应根据具体情况而定。

真空硝盐淬火,看起来简单,实施起来难度不小,其他不提,就讲硝盐槽设计就是一个难题,再好的工艺必须通过实践检验。

四、结语

综上所述,真空淬火介质有油、气和硝盐,虽各有千秋,但气淬有最强大的生命力。尽管气淬有不太完善的地方,但它毕竟代表真空淬火的发展方向,笔者深信气淬一定会有一个新的突破。笔者在调研中发现,国产真空炉在淬高速钢刀具方面和国外还有较大的差距,有关厂家应奋起直追,为使我国工具制造由大国变成强国作出应用的贡献。

MW (20111220)

致谢:在调研和成文过程中,得到上海工具厂张宏教授级高工,哈一工副总工程师宋学全高级工程师,成量副总经理徐和平高级工程师、成量热处理分厂厂长吴小平高级工程师等朋友的指导与帮助,笔者在此深表谢意。