

文章编号:1673-9981(2007)02-0150-04

# 深冷处理技术在金属材料中的应用

邱庆忠

(华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 501640)

**摘要:**介绍了金属材料深冷处理技术的发展历史,阐述了国内外深冷处理工艺对工件性能影响的研究及金属材料的深冷处理机理。

**关键词:**深冷处理;残余奥氏体;马氏体

**中图分类号:** TG249.1

**文献标识码:** A

深冷处理是常规冷处理的延伸,是以液氮为制冷剂在低于 $-130^{\circ}\text{C}$ 的温度对材料进行处理的方法。该法能改变材料的力学性能,可在不降低材料强度及硬度的情况下,显著提高材料的韧性,使其具有广阔的应用前景。

## 1 深冷处理技术的发展与应用

深冷处理由苏联科学家于1939年提出。20世纪60年代后期,美国学者发现深冷处理工艺在工具材料及其它工业领域中具有重大的应用价值<sup>[1-2]</sup>。1965年美国 Louisiana 技术大学的 F. Barron 教授研究发现:经深冷处理的模具钢与未经深冷处理的模具钢相比,虽然硬度增加有限,但其磨粒磨损抗力却显著提高,耐磨性比原来提高2.0~6.6倍,且经 $-190^{\circ}\text{C}$ 深冷处理的工件的耐磨性是经 $-84^{\circ}\text{C}$ 冷处理的2.6倍。深冷处理对工具钢的耐磨性有明显提高,而其他钢种变化不大<sup>[3]</sup>。前苏联也较早采用深冷处理来提高高速刀具的使用寿命,并进行了大量试验研究<sup>[4-5]</sup>。进入20世纪80年代,各国对深冷技术的研究更加深入。美国的 3X Instruments & Tolling, Material Improvement 及 Amecry 等专业化深冷处理公司对材料进行深冷处理的研究表明,

深冷处理可将刀具、磨具、齿轮、轴承、特殊弹簧、硬质合金、高速钢、钴基合金的使用寿命提高5~10倍<sup>[6]</sup>。日本近藤正男研究了深冷处理和马氏体相变的关系;大川雄史研究了深冷处理对 SKD 模具钢的使用寿命及 SKD11 钢耐磨性的影响;山中正喜研究了深冷处理对工具钢 (SK3, SKD11, SKS11 和 SKD51) 的耐磨性的影响<sup>[7]</sup>。深冷处理技术在20世纪80年代末传入我国,首先应用于工具钢及模具钢。近年来,深冷处理技术的应用范围逐步从黑色金属扩大到有色金属(铝合金,铜合金)及复合材料等方面。

## 2 深冷处理工艺

### 2.1 深冷方式和深冷速度

深冷处理方式可分为液体法和气体法两种。液体法是将工件直接放入液氮中,处理温度为 $-150^{\circ}\text{C}$ ,该法的缺点是热冲击性大,有时甚至造成工件开裂<sup>[8-9]</sup>。气体法是通过液氮的气化潜热和低温氮气吸热来致冷,处理温度达 $-196^{\circ}\text{C}$ ,处理效果较好。

目前,对深冷速度主要有两种观点:一种认为深冷的升降速度不能太快,即不赞成将工件直接浸入

收稿日期:2006-11-15

作者简介:邱庆忠(1977-),男,江西赣州人,硕士研究生。

液氮中,因为激冷将导致工件内部的应力增大,易造成工件的变形或开裂.如日本的“深冷急热法”,工件淬火后不马上进行冷处理,而是先水浴,再放入处理槽中在 $-80^{\circ}\text{C}$ 或 $-180^{\circ}\text{C}$ 下进行冷处理,保温一段时间后立即放入 $60^{\circ}\text{C}$ 热水浴中,使试样快速回温以减少内应力,然后选用不同温度回火 $1\text{h}^{[10]}$ .另一种则认为应快速冷却或升温,这样会使奥氏体更易转变为马氏体,且直浸冷却速率比油淬慢,不易引起材料的变形或开裂.如前苏联的“冲击法”,被处理的工件直接快速地放入液氮中,深冷到所需的温度后保温 $5\sim 30\text{min}$ ,然后取出放在室温下,待其回复到室温后,再在 $200\sim 500^{\circ}\text{C}$ 的油中回火 $1\text{h}$ .该方法明显地提高了高速钢刀具的使用寿命.

## 2.2 回火工艺和深冷工艺顺序

按回火工艺的順序,深冷处理可分为回火后深冷与回火前深冷.研究表明:回火前深冷能较大地提高工件的切削性,回火后深冷能大幅度提高工件的力学性能.对于受冲击载荷较大、易弯曲的模具,应采用回火后深冷.而对于要求硬度高、动载荷较大的模具,则选用回火前深冷 $^{[11-12]}$ .回火后深冷能使硬度较低的奥氏体转变为较硬的、更稳定的、耐磨性和抗热性更高的马氏体.对于20号钢而言,采用回火后深冷对其硬度、强度提高不明显,因为中低碳钢淬火后残余奥氏体的数量较少,回火后会形成残余奥氏体稳定体.对于T8钢、3Cr2W8V钢和9SiCr钢,采用回火后深冷能显著提高强度,但冲击韧性下降;采用回火前深冷,T8钢的硬度、韧性不变而抗弯强度提高,3Cr2W8V钢的硬度、强度、韧性均提高,9SiCr钢的硬度提高不明显,但冲击韧性提高近两倍.

## 2.3 深冷处理的时间和次数

深冷处理时间的长短,主要应考虑被处理零件的导热性、体积、冷透所需的时间及残余奥氏体的转化稳定情况等因素,不必考虑奥氏体向马氏体的转变速度.很多学者认为,深冷处理时间长的要比短的效果好,因为长时间深冷可以使钢中的残余奥氏体充分地转变及更有利于碳化物粒子的形成,转变完成后,材料的硬度不会再有明显的变化.工件尺寸越小,完成转变所需的时间越短.

关于深冷的次数,一般认为经二次深冷处理效果最佳 $^{[13]}$ ,如前苏联采用的“热循环稳定处理法”.因为经二次深冷可以最大限度地改善材料的力学性能,重复第一次的变化,即细小碳化物的析出,马氏

体针(片)的细化以及残余奥氏体向马氏体的转变,经二次深冷后,材料的组织将不再发生变化.材料不同深冷温度也不同,材料硬度的增加也不一样,但有一点可以肯定,深冷处理不会降低材料的原有硬度.

## 2.4 硬度和尺寸的影响

材料经深冷处理后硬度有一定的增加,主要是因为深冷处理会使一部分残余奥氏体转变为针状马氏体.硬度的提高取决于深冷处理前残余奥氏体的数量.由于马氏体与奥氏体的比容不同,若深冷处理前的残余奥氏体数量过多,在随后的深冷处理过程中将有大量的残余奥氏体向马氏体转变,从而使工件的尺寸变大,如直径 $10\text{mm}$ 工件的胀量为 $2\mu\text{m}$ .因此,可通过深冷处理前的淬火温度来控制深冷处理前的残余奥氏体量.GCr15钢经常规热处理后,基体中存在一定量的残余奥氏体,这种残余奥氏体在零件存放和使用过程中,将部分转变为比容较大的马氏体,从而使零件的尺寸有所增大.这种尺寸的增大极有可能造成精密装配件“卡死”,一旦发生这种事故,将造成难以预计的损失.对于精密装配件材料,应用深冷处理工艺不但可以提高材料的硬度和耐磨性,而且有利于提高零件尺寸的稳定性,如通过低温深冷处理,提高柴油机运行的可靠性 $^{[14]}$ .

深冷处理能提高工件的冲击韧性,但不同的深冷处理工艺对工件冲击韧性的提高程度不同.一般工件经过不同时间的深冷处理后,冲击韧性会有不同程度地提高,当深冷时间达到一定时,冲击韧性不再有明显地提高.林晓婷等人 $^{[13-18]}$ 认为,采用多次短时间的深冷处理会较大程度地提高高速钢的冲击韧性.

## 3 深冷处理机理

关于有色金属及其它材料的深冷机理研究得较少,而黑色金属(钢铁)的深冷机理研究得较为深入,特别是对现有的机工模具钢的深冷机理,国内外的研究已较为广泛和深入.

### 3.1 碳化物析出

从马氏体中析出超细碳化物,从而产生弥散强化.马氏体经 $-196^{\circ}\text{C}$ 深冷处理后体积收缩,Fe的晶格常数有缩小的趋势,从而增强了碳原子析出的驱动力.在低温下碳化物扩散更为困难,扩散距离更短,于是在马氏体的基体上析出了大量的弥散的超

微细碳化物。经过深冷处理的工件与没经过深冷处理的工件相比,碳化物体积分数增加了近一倍,大量碳化物的析出,提高了合金的硬度和韧性<sup>[19-22]</sup>。

### 3.2 残余奥氏体的改变

低温下残余奥氏体发生分解转变为马氏体,提高了工件的硬度和强度。有学者认为深冷能完全消除残余奥氏体,也有学者认为深冷只能降低残余奥氏体的数量,不能完全消除残余的奥氏体<sup>[23]</sup>。深冷处理还改变了残余奥氏体的形状、分布和亚结构,有利于提高钢的强韧性<sup>[24]</sup>。对合金工具钢和结构钢来说,硬度主要取决于内部残余奥氏体的量。在深冷处理过程中,残余奥氏体的量受两个因素制约:一是深冷处理前材料中奥氏体的量;二是材料的马氏体开始转变点  $M_s$  和马氏体转变结束点  $M_f$ 。而马氏体开始转变点  $M_s$  主要取决于钢的化学成分,其中又以碳含量的影响最为显著。一般在易磨损场合使用的热处理钢的常见组织是马氏体、碳化物及残余奥氏体。材料中残余奥氏体的存在,除了降低硬度以外,在使用或保存过程中残余奥氏体还会发生转变,使材料在磨削过程中可能出现裂缝。从这个角度来看,残余奥氏体的存在会损害材料的耐磨性。但是经深冷处理之后的残余奥氏体是相当稳定的组织,此时残余奥氏体处于等轴压力状态,而等轴压力不会引起塑性变形,这部分残余奥氏体很少再发生转变,它在磨损过程中以韧性相出现,起到缓和应力,防止接触疲劳扩展的作用,所以不能简单地说残余奥氏体对材料的耐磨性有益或有害。

### 3.3 组织细化

深冷处理能够使马氏体析出弥散碳化物,使组织晶粒细化,从而使工件的强度和韧性得到很大的提高。晶粒细化是指原来粗大的马氏体板条发生了碎化,从马氏体的基体上析出了大量的弥散的超微细碳化物。晶粒细化的效果与深冷处理过程中能否使试样有更大的体积收缩,造成更大的内应力,引进更多的缺陷及内能的增大有关。有学者认为,晶粒细化的原因是由于马氏体点阵常数发生了变化;也有学者认为,马氏体分解析出微细碳化物时造成了组织细化<sup>[25-26]</sup>。

### 3.4 残余应力与原子动能

深冷过程中容易在工件缺陷(微孔)、内应力集中的部位及空位表面产生残余应力,这种应力可以减轻缺陷对材料局部强度的损害,最终表现为磨料

磨损抗力的提高。由于原子间既存在使原子紧靠在一起的结合力,又存在使之分开的动能。深冷处理转移了部分原子间的动能,从而使原子之间的结合更紧密,提高了材料的强度和韧性。此外,深冷处理还能减弱合金结构钢的高温回火脆性,提高不锈钢的耐蚀性等<sup>[27]</sup>。

## 4 结 语

深冷处理是提高材料强度和韧性的一种处理工艺,已得到广泛应用。但在工艺的稳定性和对某些材料的作用机理方面的研究还不够深入,阻碍了深冷处理在工业上的大规模应用。随着金属深冷处理技术研究的不断深入,对其机理的研究也会更加全面,这将推动深冷技术在我国材料、机械等行业中的广泛应用。

### 参考文献:

- [1] DONALD R D. The promise of cryogenic processing [J]. Machine Design, 1981, 53(2): 73-76.
- [2] THOMAS P S. Deep cryogenics [J]. Heat Treating, 1986 (2): 35-38.
- [3] BORRON R F. Cryogenics [J]. Heat Treating, 1974 (6): 12.
- [4] 陈凯旋. 深冷处理 [J]. 国外金属加工, 1989(4): 18.
- [5] COLLINS D N. Deep cryogenic treatment of tool steels [J]. Heat Treatment of Metals, 1996(1): 40.
- [6] 黄世民. 冷处理及其在工业上的应用 [J]. 材料工程, 1992(1): 47-51.
- [7] 戴涛, 范蜀晋. 低温技术的进展(一) [J]. 国外金属热处理, 1998(1): 8.
- [8] 黄根哲. 钢深冷处理的组织转变及疲劳断口 [J]. 金属热处理, 1992, 17(1): 27-31.
- [9] 陈红卫. 深冷处理对硬质合金机械性能的影响 [J]. 硬质合金, 1995, 12(1): 33.
- [10] 大川雄史. 模具的深冷处理 [J]. 国外模具技术, 1990 (1): 82.
- [11] 李智超, 董允. 回火深冷处理试验 [J]. 热加工工艺, 1989, 81(5): 37-40.
- [12] 刘亚俊, 李勇, 曾志新, 等. 深冷处理提高 YM1 硬质合金刀片耐磨性能的机理研究 [J]. 工具技术, 2001, 35 (3): 19-20.
- [13] 林晓娉, 董允, 王亚红. 高速钢深冷处理及其机理研究 [J]. 金属热处理学报, 1998, 19(2): 21.
- [14] 丁剑, 张获, 阎王廷, 等. 深冷处理工艺参数对 GCr15

- 钢相对耐磨性的影响[J]. 热加工工艺, 2002(6):3-4.
- [15] MOORE K, COLLINS D N. Cryogenic treatment of three-heat treated tool steels[J]. Key Engineering Materials, 1993, 86/87(1): 47-54.
- [16] COLLINS D N. Deep cryogenic treatment of tool steels: a review[J]. Heat Treatment of Metals, 1996, 23(2): 40-42.
- [17] CHRIS W. Cryogenic temperature-extends tool life[J]. Advanced Materials & Process, 1994, 146(12): 63-64.
- [18] COLVER D. New dry refrigerant treatments improve characteristics and wear resistance of metal parts [J]. Industrial Heating, 1986, 53(3): 37-38.
- [19] 安丽丽, 李士燕. 深冷处理对冷冲压模具钢 Cr12MoV 力学性能影响的研究[J]. 机械研究与应用, 2003, 16(1): 12-13.
- [20] HUANG J Y, ZHU Y T, LIAO X Z. Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel[J]. Materials Science and Engineering. 2003(A339):241-244.
- [21] 顾彪, 丛吉远. 深冷处理引起高速钢的性能改善与微结构变化[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(3): 285.
- [22] 李士燕, 陈长风, 李雄, 等. 深冷处理对高碳钢抗磨粒磨损性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(8): 276.
- [23] 佟晓辉. Cr12 钢冷冲模深冷处理与耐磨性[J]. 机械工程材料, 1994, 18(3): 34-36.
- [24] 钱士强, 李曼萍, 严敏杰. T8 钢深冷处理后的马氏体形态和回火特性研究[J]. 热加工工艺, 2001(4): 3-6.
- [25] 李勇, 曾志新, 周志斌. W12Mo3Cr4V 刀具的深冷处理试验研究[J]. 工具技术, 2003, 37(2): 9-11.
- [26] 张兴元, 徐宏兴, 李智超. 60Si2Mn 冷冲模具钢强韧化工艺对比研究[J]. 热加工工艺, 2005(3): 40.
- [27] WIBERG S. Cryogenic-fact or fiction: a metallurgist's viewpoint [J]. Metal Heat Treating Digest, 1997 (7-8): 14.

## Deep cryogenic treatment applying in metal material

QIU Qing-zhong

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper retrospectes deep cryogenic treatment history of metal material, describes its technology and mechanism.

**Key words:** deep cryogenic treatment; residual austenite; martensite