

30CrMnSiMo 钢深冷试验研究

李芳¹ 翟志成²

(1 中煤张家口煤矿机械有限责任公司 河北 张家口 075002; 2 河北省高端智能矿山装备技术创新中心 河北 张家口 076250)

摘要: 深冷处理是一种改善材料强度、韧性和耐磨性等力学性能,从而提高工件使用寿命的清洁、经济的技术,在工业生产的多方面均得到应用。本文对合金结构钢 30CrMnSiMo 进行深冷处理,并进行力学性能试验,研究了深冷处理技术对合金结构钢的作用效果,并介绍了深冷处理技术的原理。旨在将深冷处理技术应用到生产实践中,为企业提高效益。

关键词: 深冷处理; 30CrMnSiMo; 力学性能

0 引言

深冷处理又称超低温处理,它是常规冷处理的一种延伸,是指将材料放置在特定可控的低温环境中(通常以氮为制冷剂、-130℃以下),使材料在低温下发生微观组织结构改变,从而达到改善材料力学性能的一种材料处理方法。深冷处理主要通过提高材料的力学性能来提高使用寿命,其操作简便,不易破坏工件外形,所使用的冷却材料对环境友好、成本低,目前已在多领域得到应用。

深冷技术的应用最早可追溯到 19 世纪,瑞士钟表匠及一些有经验的工具制造商会将钟表的关键零部件及工具钢埋在寒冷的雪山中,以改善性能,提高使用寿命。此时还是深冷处理的萌芽阶段,深冷处理概念的正式提出是在 1939 年由前苏联科学家提出的。美国最早对应用于航空领域的金属进行深冷处理技术研究,随后多家公司机构对深冷处理进行了深入研究,并成立了专门的深冷处理研究组织。英国的 BOC 公司将深冷处理技术成功应用到实际生产中,使工件效果得到明显改善。此外,日本的相关研究人员也对深冷处理技术进行了深入研究,并取得了一定成绩。我国早在 1960 年就对高速钢进行过低温处理研究,随后我国开始研究深冷处理工艺在多种材料上的应用,并取得了很大成绩。最近几年深冷处理的研究已不再局限于黑色金属,而是扩展到有色金属以及复合材料方面,并取得了一定的进展。

从现有研究资料及应用数据统计发现,深冷技术主要还是被应用于工模具方面,其中以刀具应用最为普遍,相关的研究也比较成熟。但是对于深冷处理在合金结构钢方面的研究较少。有学者对 40CrNiMo 钢进行了深冷处理,测试其深冷处理后的力学性能及微观组织,并与

传统热处理后的样品进行对比。结果显示,40CrNiMo 钢经深冷处理后的硬度、耐磨性、塑性均优于常规热处理,且使用寿命也明显增加,如果应用于生产会有明显的经济效益。为了探讨深冷处理对合金结构钢的影响,本文做了合金结构钢 30CrMnSiMo 的深冷试验,希望其成果能运用到生产实践中。

1 试验方法

1.1 试验材料的确定

本次试验主要是为了研究深冷处理技术对合金结构钢力学性能的影响。30CrMnSiMo 是马氏体耐磨合金结构钢,具有良好的强韧性和耐磨性,经过 920℃ 高温淬火、低温回火后其抗拉强度可以达到 1700MPa 以上,冲击韧性值可以达到 40 ~ 50J/cm²,硬度值可以达到 47 ~ 52HRC。30CrMnSiMo 合金结构钢因其良好的力学性能得到广泛应用,公司生产的煤化工用破碎机的齿板就是用该种材料铸造而成,因而更方便研究。

1.2 液氮使用方法的确定

根据对深冷试剂(液氮)使用方法的不同,深冷处理分为液体法和气体法。液体法是将工件直接置于液氮中进行冷却,由于温度变化太大,容易造成某些材料低温脆性断裂。气体法也称干低温法,通过液氮气化时吸热和低温氮气循环流动吸热来达到冷却的目的,能最大程度降低直接将工件置于液氮中引起的热冲击,实用性好;其缺点是需要特定的设备和满足条件的环境。根据实际条件,本试验采用液体法。

1.3 深冷处理时间的确定

关于深冷处理时间的研究,一直以来众说纷纭。一些学者认为应该保持足够的深冷时间,保证工件淬透;而另一些学者则认为残留奥氏体转变成马氏体的量只取

决于冷却达到的温度，而与在低温下保持时间的长短没有很直接必然的联系，因为残留奥氏体到马氏体的转变在低温下是瞬间完成的。其实，深冷处理时间的长短应该根据被处理工件的材料、性能要求、形状规则与否、体积大小、冷透所需时间、残留奥氏体转变稳定化的情况及使用工况等多种因素综合而定，不可一概而论。由于本试验所用试件体积较小，形状简单，因此深冷处理时间选用 10min。

1.4 回火工艺和深冷工艺顺序的确定

按回火工艺的顺序，深冷处理可分为回火前深冷和回火后深冷。关于回火后深冷还是回火前深冷现在还没有统一的观点，有的采用回火前深冷，有的采用回火后深冷。一些研究表明，回火前深冷能较大地提高工件的切削性能，回火后深冷能较大幅度地提高工件的力学性能。为了进行对比，本试验分别进行了回火前深冷和回火后深冷的试验。

1.5 深冷处理次数及回火温度的确定

到底进行几次深冷处理效果最好，目前没有统一意见，大多数认为次数多好，也有学者认为两次深冷处理对材料力学性能的改善效果最好，认为二次深冷处理可以使材料重复第一次的变化，促使残余奥氏体进一步转变为马氏体、进一步析出弥散分布的细小碳化物、马氏体进一步碎裂细化，从而使材料强韧性进一步提高。但也有学者认为一次深冷处理已经足够。鉴于本试验实际条件，采用了一次深冷处理。

深冷处理的回火温度，一些研究人员认为深冷处理后应该进行低温回火，而另外一些研究人员则认为应采用中温回火，回火温度普遍在 100 ~ 560℃ 之间。本次试验采用的回火温度为 300℃。

1.6 试验工艺的确定

综合以上各种因素，本试验确定的试验路线如表 1 所示。

表 1 试验工艺路线表

试块	试验路线
1#	920℃ 水淬 → 300℃ 回火，空冷
2#	920℃ 水淬 → 深冷处理 10min → 300℃ 回火，空冷
3#	920℃ 水淬 → 300℃ 回火，空冷 → 深冷处理 10min

根据表 1，试验时将完全相同的 1#、2#、3# 试块放到同一热处理炉中加热到 920℃，随后出炉快速将这些试块放到 20℃ 左右的水中进行完全冷却，淬火后将 2# 试块进行液氮深冷处理，保温 10min，随后让 2# 试块回温到室温。然后将 1#、2#、3# 试块统一放到同一个回火炉中进行 300℃ 回火，回火后将这些试块统一进行空冷到室温。最后将 3# 试块在液氮中进行深冷处理，保温 10min，随后取出，放到室温环境。最后对三块试块分

别进行取样，做力学性能试验，试验结果取平均值。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

室温下，分别对经过不同处理的三种试块根据国家标准要求进行了硬度测试和磨损试验（表 2）、冲击试验和拉伸试验（表 3）、金相组织观察（图 1 ~ 图 3），所有力学测试及微观结构观察均依照国家相关试验标准在实验室完成。

表 2 硬度及磨损量

试样	硬度值 HRC	磨损量 /g
1#	45 ~ 48	0.4426
2#	47 ~ 52	0.3566
3#	44 ~ 48	0.4418

表 3 冲击及拉伸试验

试样	冲击 / (KV2/J)	ReL/MPa	Rm/MPa	A/%	Z/%
1#	14	1320	1530	2.0	5
2#	12	1470	1650	1.8	7
3#	12	1380	1580	1.7	4.6

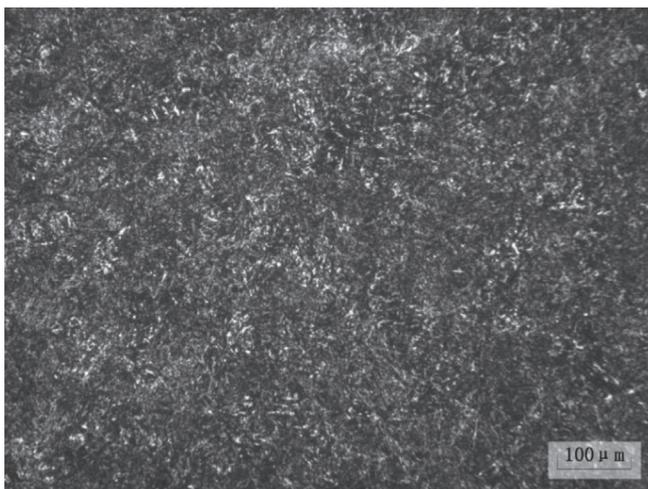


图 1 1# 试样金相组织，回火马氏体

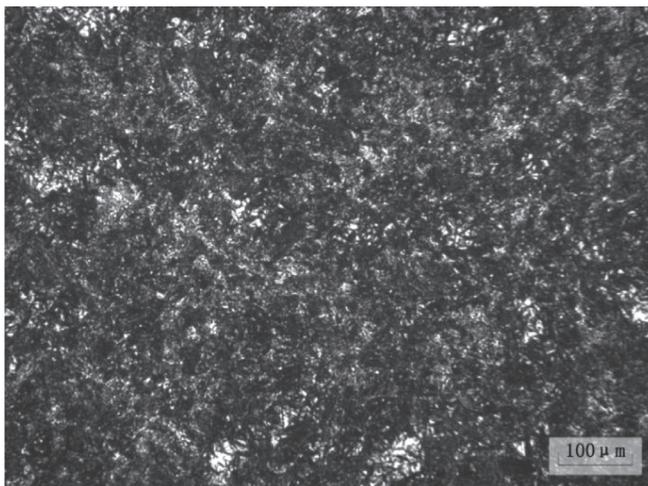


图 2 2# 试样金相组织，回火马氏体 + 少量碳化物

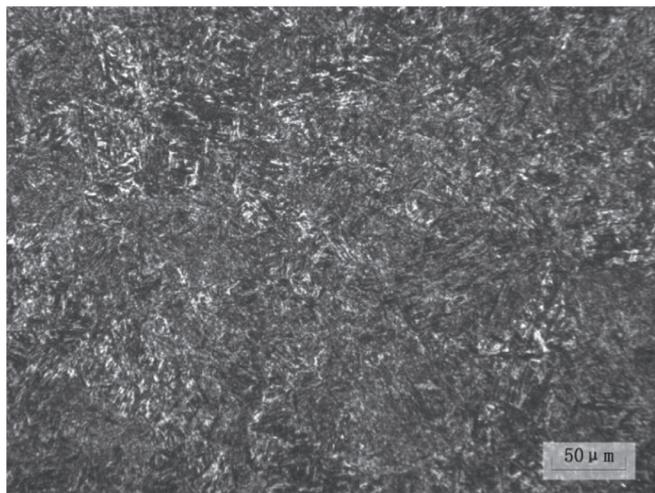


图3 3#试样金相组织,回火马氏体

2.2 试验结果分析

由以上试验结果可以看到,经淬火+深冷+回火处理的2#试样的硬度、强度、耐磨损性要优于经传统淬火+回火处理的1#试样,但是冲击韧性、伸展率及断面收缩率二者相差无几,甚至2#试样在塑韧性方面略差于1#试样。而经淬火+回火+深冷处理的3#试样在硬度、强度、磨损量、塑韧性方面的性能与1#试样差别不大。由于本试验条件有限,试验中拍摄的金相组织图片不是很清晰,在此选取了其中比较清晰的几张来说明试验结果。由金相组织分析可以看到,1#试样的金相组织为典型的回火马氏体,2#试样由于在回火前经过深冷处理,其金相组织为回火马氏体+少量弥散分布的碳化物,且碳化物体积很小,均匀弥散分布于马氏体基体上,3#试样的金相组织仍然为回火马氏体,与1#试样的组织基本一致,由力学性能上也可以得知。

出现以上试验结果的原因可能是淬火后直接深冷处理的2#试样在低温下发生残余奥氏体转变为马氏体的相变,且在激冷情况下马氏体晶格发生收缩变化,从而析出弥散分布的细小碳化物,达到了强化马氏体基体的作用,从而其强度、硬度、耐磨性均得到改善。而经过回火后再进行深冷处理的3#试样由于淬火、回火后金相组织已经比较稳定,所以再进行低温处理对马氏体晶格及残余奥氏体的影响均不大,因而其金相组织及力学性能均与传统淬火加回火后的1#试样差别不大。由本试验可知,深冷处理技术应该在回火前进行,方能起到改善材料力学性能的作用。

综合以上分析,可以得出经过深冷处理的合金结构钢在不牺牲塑韧性的基础上可以有效提高强度、硬度及耐磨性,对于工业生产有很大的经济效益。对于深冷原理的研究自深冷技术问世以来从未间断,不时有各国研究人员提出不同见解,虽然目前为止深冷原理尚未得出确切定论,但是在多年研究中逐渐得出了以下四个方面

的共识。

2.2.1 碳化物析出,弥散强化

由试验结果可知经深冷处理的试块在马氏体基体上分布有大量微细碳化物,产生弥散强化。试块在极低的温度下体积收缩,微观表现为马氏体体积减小,Fe的晶格常数缩小,大量碳原子被“挤”出,而在低温环境下碳原子动能减小,无法进行长距离扩散,于是在马氏体基体上便析出了大量的弥散分布的微细碳化物。经过对比我们发现,经过深冷处理的试块其碳化物明显比没经过深冷处理的试块多很多,正是这些大量微细碳化物的析出,很好提高了材料的力学性能和使用寿命。

2.2.2 残余奥氏体转变为马氏体

一般淬火后工件中存在大量残余奥氏体,严重影响材料的强度和硬度。淬火后材料在低温下会继续进行马氏体相变,使材料的强度、硬度进一步提高。有学者认为深冷能使残余奥氏体完全转变为马氏体,也有学者认为深冷后仍有部分残余奥氏体存在。残余奥氏体一般以不规则形态分布于材料中,组织不稳定,易产生应力集中,降低材料力学性能,影响使用寿命。深冷处理不仅降低了残余奥氏体量,还能使残余奥氏体的形状变规则、组织变稳定,它以韧性相存在于马氏体基体上,在磨损过程中能起到缓解应力、防止接触疲劳扩展的作用,从而提高材料的力学性能,延长使用寿命。

2.2.3 组织细化

组织细化在提高工件强度的同时能改善工件的塑韧性。工件在深冷处理中会发生体积收缩,对工件造成更大的内应力,工件内部组织的变化也会导致更多的缺陷及内能的增大,而所有这些原因都将影响组织细化对工件作用的大小。深冷处理造成组织细化的原因一方面原来是粗大的板条状马氏体在急剧的温度变化下发生了破裂碎化,晶格常数发生改变,另一方面是由于从马氏体基体上析出了大量弥散分布的细小碳化物。

2.2.4 残余应力与原子动能

深冷过程会使工件体积发生收缩,容易在工件缺陷及内应力集中部位产生残余应力,这种应力可以减少缺陷对材料本身强度的损害,最终表现为材料耐磨性的提高。原子间既存在原子引力,又存在排斥力(原子动能),激冷情况下原子活泼性降低,部分原子动能减少,原子间斥力降低,相对吸引力提高,原子间因而结合得更紧密,使得材料的强度和韧性得到提高。此外,深冷处理还能减弱合金结构钢的高温回火脆性,提高不锈钢的耐腐蚀性等。

3 试验结论

其一,对于合金结构钢30CrMnSiMo而言,采用淬火+深冷+回火的试验方法能在不牺牲塑韧性的基础上

提高材料的硬度、强度和耐磨性。

其二,采用液氮做深冷处理时最好采用气体法,因为实际工件一般形状不规则,薄厚不均,如果采用液体法由于热冲击严重,易引起应力集中,造成材料局部产生裂纹。

其三,本次试验忽略了深冷处理保温时间对材料性能的影响,且没有进行淬火+回火+深冷+回火这样的试验,因此多有不足,还需要进一步研究。

4 结语

随着不断研究,深冷处理逐渐走进人们视野,虽然其原理的认知仍然存在争议,应用也存在局限性,但深冷处理技术作为独特的优化材料性能的工艺措施,已逐渐显现出其自身的优越性及商业价值。未来的世界是科技竞争的世界,深冷技术必将受到更多重视,也必将在更多领域得到应用。作为一家以生产煤炭运输机械为主的机械生产企业,链轮、链条、破碎机、刮板机等产品都可以应用深冷处理技术来提高产品质量。本试验旨在为企业提供一条新的提高工件使用寿命的工艺路线。

参考文献:

- [1] Owaku S. Cryogenic treatment[J]. Heating Treatment, 1981, 21(1): 44-48.
- [2] 陈鼎, 陈吉华, 严红革, 等. 深冷处理原理及其在工业上的应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(3): 68-72.
- [3] Denniss J K. Using deep cryogenic to advantage[J]. Advanced Materials and Processes, 1998, 154(5): 215-218.
- [4] Zhirafar S, Rezaeian A, Pugh M. Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1-3): 298-303.
- [5] 陈鼎, 黄培云, 黎文献. 金属材料深冷处理发展概况[J]. 热加工工艺, 2001(4): 57-60.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 顾彪, 丛吉远. 深冷处理引起高速钢的性能改善与微细结构变化[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(3): 285.
- [9] 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]. 摩擦学报, 2000, 20(4): 276.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 邱庆忠. 深冷处理技术在金属材料中的应用[J]. 材料研究与应用, 2007, 1(2): 150-155.
- [13] 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(12): 9-11.
- [14] 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.
- [15] WIBERG S. Cryogenic-fact or fiction: a metallurgist's viewpoint[J]. Metal Heat Treating Digest, 1997(7-8): 14.
- [16] Mohan Lal D, Renganarayan S, Kalanidhi A. Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels[J]. Cryogenics, 2004, 41(3): 149-155.
- [17] 陈鼎, 董建峰, 马国芝, 等. 有色金属合金的深冷处理发展概况[J]. 材料导报, 2010, 24(11): 1-4.
- [18] 邱庆忠. 深冷处理技术在金属材料中的应用[J]. 材料研究与应用, 2007, 1(2): 151-153.
- [19] Arslan F K, Altinsoy I, Hatman A, et al. Characterization of cryogenic heat treatment Vanadis 4 PM cold work tool steels[J]. Vacuum, 2011, 86(4): 370-373.
- [20] 吴红艳, 艾峥嵘, 刘相华. 钢铁材料深冷处理技术研究和应用进展[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(12): 4-11.

作者简介: 李芳(1987.05-), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 材料科学与工程。