参考译文，由 Van Phong 技术与贸易有限公司翻译。以已发表的原文为准；图表请参阅原文。

冷处理对金属材料力学性能影响的分析

Le Thanh Binh

《交通运输与机械制造领域的创新：第三届国际科学与实践会议论文集》第二卷，“矿山机械”分会，圣彼得堡，2015年4月14—15日。圣彼得堡：国立矿产资源大学（“矿业大学”），2015年，第126—129页 • UDC 620.172 • ISBN 978-5-4386-0760-1

冷处理（至−80 °C）和深冷处理（至液氮温度−196 °C）作为淬火后的附加工序，在工程技术中被广泛用于改善钢的力学性能。然而，尚未发现将上述处理方法用于提高矿山工具使用性能的相关资料。本综述分析了有关冷处理和深冷处理对钢性能影响的文献数据，并探讨了其在矿山机械制造中应用的可能性。

在淬火时发生的马氏体转变过程中，即使将钢冷却至其M_f温度，其组织中仍会保留一定量的残余奥氏体；如果M_f温度低于零度的钢（图1）在淬火时仅冷却至室温，则残余奥氏体量会增加。钢组织中残余奥氏体的存在会降低材料的硬度、强度和耐磨性，并且会导致零件尺寸不稳定[1]。

正如A.P.古利亚耶夫于1937年首次提出的，可以通过将工件冷却至室温以下的温度，即采用“冷处理”，使钢中的残余奥氏体转变为马氏体。

冷处理的效果取决于淬火钢中残余奥氏体的含量，而残余奥氏体含量随钢中碳含量的增加而增加。因此，冷处理对碳含量高于0.4%的钢最为有效。

文献[2]认为，将钢冷却至−80 °C以下没有意义，因为这不会引起额外的马氏体转变，而对大多数钢而言，马氏体转变在达到该温度之前即已完成（图1）。与此同时，近年来的研究发现[2]，将马氏体继续冷却至钢的M_f温度以下（例如冷却至液氮温度−196 °C）并长时间保温，可促进钢在随后回火时形成大量极细小的碳化物颗粒，即所谓的η碳化物。其结果是材料的耐磨性和韧性提高，而硬度无明显增加。这种对钢的处理方式被称为“深冷处理”。

[图1 — 见原始PDF第3页] 图1. Fe–C系合金中马氏体转变开始温度（M_s）和终了温度（M_f）与碳含量的关系

深冷处理过程中所发生过程的机理尚未得到充分研究。可能的情况是，持续冷却至低温会增加马氏体的不稳定性并改变其位错结构；马氏体中的碳原子发生迁移并聚集成团。该过程进行缓慢，因此需要长时间保温（24—72小时）。在随后于室温下放置或在回火加热过程中，这些碳浓度较高的区域成为细小碳化物颗粒形成的晶核[2]。

深冷处理对组织中残余奥氏体含量最低（马氏体含量最高）的钢效果最为显著，这表明该处理作用的对象正是马氏体，而非残余奥氏体。其效果取决于深冷温度及在该温度下的保温时间：温度越低、保温时间越长，η碳化物颗粒越细小，材料耐磨性的提高幅度越大。

[图2 — 见原始PDF第4页] 图2. 冷处理及随后的低温回火对工具钢X12MΦ硬度的影响（坐标：硬度HRC—奥氏体化温度，°C；曲线：经冷处理与未经冷处理）

淬火钢中残余奥氏体向马氏体的转变伴随着应力的增加，因此在冷处理时工件必须缓慢冷却，并在处理后立即进行回火[3]。由于淬火后的钢在常温下放置超过3—6小时会使奥氏体稳定化，因此冷处理和深冷处理必须在淬火后立即进行。由此，冷处理和深冷处理应按以下方式进行：将试样均匀冷却至所需温度，在该温度下保温1—3昼夜，然后均匀加热至室温[4]。

含有大量残余奥氏体的淬火钢组织是不稳定的。即使在室温下，在较低的环境（气候）温度下更是如此，残余奥氏体会逐渐转变为马氏体。这一转变伴随着体积的增大，从而导致工件尺寸发生变化。冷处理使残余奥氏体转变为马氏体，从而稳定工件尺寸。在许多情况下甚至不需要冷却至零度以下很低的温度，只需将淬火零件在+0至+10 °C的水中冷却即可[1]。

冷处理对钢硬度的影响随奥氏体化温度的变化如图2所示。在高温下奥氏体化的钢，其淬火状态下的残余奥氏体量多于在低温下奥氏体化的钢，因此冷处理的影响更为显著。

在不同温度下奥氏体化的淬火钢的韧性与冷处理及深冷处理温度的关系如图3a所示。

由图3a可见，无论奥氏体化温度如何，对淬火钢进行冷处理（至−70 °C）都会使夏比试样的断裂功比淬火后在200 °C下两次回火的同类试样降低约40%。在更低的温度下进行处理可使钢的韧性有所改善。同时，深冷处理后钢的最高韧性出现在较低温度（970 °C）下奥氏体化、因而组织中马氏体含量最高的试样中。这一现象被归因于[5]马氏体中的显微组织变化，这些变化导致钢在随后回火时析出最大数量的细小（<5 μm）η碳化物颗粒（图3b）。

[图3 — 见原始PDF第5页] 图3. 低温回火后工具钢X12МФ的韧性（a）及其组织中碳化物的数量（b）随处理温度的变化（坐标：(a) 断裂功，J；(b) 碳化物数量，1000/mm²；横轴：深冷温度，°C）

关于上述处理对钢耐磨性影响的试验结果（未说明试验方法）列于表中[6]。

钢号		冷处理，温度至−79 °C	深冷处理，温度至−190 °C
AISI	GOST	耐磨性提高幅度，%	
D2	Х12МФ	316	817
S7	6Х4М2ФС	241	503
52100	Х	195	420
O1	9ХВГ	221	418
A10	–	230	264
M1	Р2АМ9К5	145	225
H13	4Х5МФ1С	164	209
M2	Р6М5	117	203
T1	Р18	141	176
P20	38ХМ	123	130
440C	95Х18	128	121

表1

根据这些数据，冷处理可使钢的耐磨性提高至3倍，深冷处理可提高至8倍。

可以得出结论：冷处理与深冷处理一样，可作为附加的热处理工序，用于提高中碳钢和高碳钢的耐磨性，这些钢用于制造液压破碎锤的工作工具以及在磨料磨损和较大冲击载荷条件下工作的其他矿山设备。

参考文献

1. И. И. Новиков, Теория термической обработки металлов, М. Металлургия, 1978.
2. D. N. Collins, Deep cryogenic treatment of tool steels- A review, Ж. Heat treatment of metals, 1996.2, с. 40-42.
3. Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева, Материаловедение, М. Машиностроение, 1990, с. 215.

4. P. I. Patil, R. G. Tated, Comparison of effects of cryogenic treatment on different types of steels- A review, Ж. IJCA, 2012.
5. D. N. Collins, J. Dormer, Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel, Ж. Heat treatment of metals, 1997.3, с. 71-74.
6. Pete Paulin, Technological gear, Ж. Gear manufacturing, 1993.3-4, с. 26-29.