

● 张剑波 施 刚 丁 剑 编 阎 珽 审校

低温冷冻工艺应用文集



上海交通大学出版社

内容提要

本文集汇集介绍国内外低温深冷应用技术研究最新成果。内容涉及冷冻机理、低温机械加工、冷加工及低温深冷处理、低温机械零件等领域。内容新颖、全面、实用性强，可供有关专业技术人员和大专院校师生参考。

(沪)新登字 205 号

低温冷冻工艺应用文集

出版：上海交通大学出版社

(上海市华山路1954号·200030)

字数：166000

发行：新华书店上海发行所

版次：1993年9月 第1版

印刷：江苏太仓印刷厂

印次：1993年10月 第1次

开本：850×1168(毫米) 1/32

印数：1—1350

印张：6.5

科目：291—313

ISBN7-313-01158-X/TB·1

定价：12.00 元

序

工艺技术水平，通常是一个国家经济技术水平的标志。我国经济技术水平与发达国家相比，差距很大。工艺技术落后，无疑是一个重要原因。而这原因中的原因，还有一个对工艺技术不够重视的问题。

人们重视工艺技术，是因为它是一种最容易、最直接转化成生产力的科学技术；一项工艺技术手段，常常就是一笔很可观的经济效益。同时也因为它是产品成败的关键，一项工艺技术关键的攻克，一个产品发展的前途即展现在眼前。

当今，工艺技术的发展是惊人的。而且很重要的一个特点是在各个学科的交叉、综合中发展的。高技术又给工艺技术的发展注入了新的活力。传统的、常规的几乎与停滞、落伍成了同义语。新的工艺领域不断开拓，新的工艺成果层出不穷。它让我们更加关注，也让我们寄予期望，更让我们奋发去追上这个发展潮流。

由于工作任务的关系，我所的工程技术人员，在关注着国内外工艺技术发展的同时，也在某些领域里，开展自己的研究工作。低温技术的应用，即是其中之一。几位同志编辑了这本文集。它汇集了国内外、也包括自己的一些最新研究成果。相信它会对促进国内的低温深冷工艺技术的发展起着有益的作用。

从低温技术的应用发展中不难看出，它除了依靠各学科的交叉、综合发展外，还依靠了它自己的移植应用的流动发展。从偶然的发现，到随机的尝试；从实验探索到实践应用；从军用到民用；从航天到地面；从工具刀具到机械零件；从制造业到其他行业……。这项工艺技术的自身价值、应用潜力，流动着、滚动着

发展。同时，它也在曲折、反复中发展。它百余年的经历，像其他一些工艺技术一样，在神秘中诞生，又在迷惘中冷落，在理智中崛起，又在渴望中探索……。争论和认同，分歧与统一又时时伴生、共存。现在，当它的机理逐步被揭示，它的价值渐渐被认识，我们没有理由不对它寄予希望，也同样没有理由鄙薄工艺技术，以为不足道。这本文集，将代我们呼吁：要更重视工艺技术的开发研究！代我们呼唤：让更多的工艺研究成果，在这个经济建设的大潮中更多的涌现！

711研究所副总工程师

李维镜

1993年2月于上海

目 录

低温应用技术的今昔	(1)
低温深冷处理工艺应用和发展概况	(11)
利用低温深冷处理工艺提高柴油机关键部件	
可靠性	(21)
深冷处理提高GCr15、CrWMn及20Cr渗碳钢	
耐磨性的机理	(31)
深冷处理提高H62黄铜耐海水腐蚀性	(53)
钢丝的超低温形变强化	(59)
深冷冷缩装配在工业和铁路中的应用	(63)
深冷冷却控制磨削残余应力	(70)
深冷处理：一场关于冷的大辩论	(75)
深冷处理改善钻头和粉末金属零件性能	(84)
AISI-T8钢和C1045钢的深冷处理	(90)
高强度粉末金属零件	(99)
低温学如何运用于材料处理	(105)
提高金属制件耐磨性及其他特性的	
干式制冷新方法	(109)
深冷处理有效提高材料的耐蚀性	(114)
低温处理提高金属耐磨性	(119)
零部件中镶块的深冷硬化方法	(129)
低温处理改善镍钢的切削性能	(138)
低温下等温处理提高高合金工具钢耐用性的研究	(146)
热处理对莱氏体工具钢疲劳性能的影响	(152)
深冷处理改善材料的工艺性	(162)
美刊关于深冷处理的应用和发展的概述性文章	(179)
附：国外有关深冷处理的部分重要文章摘要	(183)

低温应用技术的今昔

郭宇光 (海军装备部舰艇部)

阎 珽 张剑波 (上海 711 研究所)

施 刚 丁 剑

低温工程脱胎于制冷技术,但其研究和应用的范围更广。它既可以用于机械工程上,也可以用于医疗机械和生物工程上。人们认识和应用低温的历史,可以追溯到很久以前。早在数百年前,瑞士钟表匠就常常将加工好的钟表零件放在冰雪覆盖的山洞里,经过一段时间后取出装配使用,发现零件使用寿命很长。第二次世界大战期间,一位名叫乔弗雷·帕克里特的英国人发明了“冰层军舰”,它能抵挡住德国战舰上的鱼雷和炸弹的袭击。这种长60英尺,宽39英尺的“冰舰”,在近16℃的海水中航行数月不被融化。但在那个时期内,低温作为揭示物性的一种手段仅在为数不多的一些实验室里得到应用。50年代末,液氧、液氢作为火箭燃料先后成为现实。制冷技术日臻完善,低温工程便应运而生。

一、国外低温应用工程的发展概况

1959年,美国低温工程专家R.B.Scott(斯科特)著的《低温工程》一书出版。该书介绍了低温技术的基本原理和部分关键低温设备的结构及测量仪表的使用方法。其主要内容是如何得到低温的制冷技术,但未将其应用领域作进一步的阐述。日本低温工程专家岡本定次等著的《机械工程和低温应用》一书出版于1981年12月,揭示了低温技术各个领域里的应用研究,取得了一批新成果。

1. 低温制造及低温机械工程

第二次世界大战后，低温切削得到很大发展，从1953到1966年，国外曾在实验室中将低温技术应用于机械加工中，获得一定成功。它主要用冷冻液（汽）喷浇工件（用液氮、液态 CO_2 致冷），使切削性能得到改善，但因其实现困难而未被推广。

1959年益子等教授对低温切削效果在实验上、理论上首次作了明确解释，阐明了材料的低温脆性、难加工材料的加工、刀具寿命延长等理论问题，并从实验中得到证实。随后对冷刀技术进行开发研究。浇液、汽及通入刀体内喷射的冷刀、电子冷刀、通液冷刀等相继出现。

1982年美国有人用冷冻液和干冰对热塑性材料进行冷冻加工获得成功，但未能解决工艺复杂应用推广问题。

1986年初，前苏联《社会主义工业报》报导了“用冷冻法固定零件”一文。该文指出，机床工早就知道，固定质脆、形状复杂的扁平零件困难很大。瑞士专家提出用冷冻法固定零件。无论零件的大小如何（最大可达 $370 \times 50 \text{mm}$ ），都可以把它们冷冻到一个专门的支座上，十分简便地固定住，以便在机床上加工，而不产生变形和机械损伤。其解冻和冰冻时间由电子控制系统实现。此即电子冷冻切削加工方法。

半导体温差电制冷，简称为电堆、冷堆、热泵和电子冷冻。它具有制冷制热和温差发电等功能。目前正向两个方向发展。一方面向多级微型化方向发展，用于军事工业；另一方面向大型化方向发展，用于工业和民品开发。目前制冷器结构级联更多的级，可取得更低的温度。其中一、二级不需真空绝热，在空气、干氮和其他惰性气体中工作即可，而三级以上的冷堆需用真空绝热，使六级冷堆的制冷温度达 $-105^\circ \sim -195^\circ \text{C}$ 。

1981年由（日）山崎制作所研制的供刀具内部冷却切削实验用全自动机床（24小时无人看管），其中就采用了低温刀具系统。1986年10月号（日）《机械技术》杂志介绍了具有电子冷却装置

的高速主轴。由此可以看出低温加工技术正逐步走向实用化。

冷冻铸造始于70年代后期。冷冻造型是用 -196°C 的液态氮作为冷却介质冻结型砂中的水分，使砂粒间的水膜相互冻结在一起，从而形成一个坚硬的冷冻铸型。此法又称“Offset”法造型，是1977年由英国W·H·Booth公司铸造厂发明的。它用液态二氧化碳或液氮吹入砂型中进行冻结，曾浇注出重30kg的铸件，还用冷冻铸型浇注过球墨铸铁、铸钢、铅、铜等铸件。铸件质量好，尺寸精确，造型和浇注时无烟气和其他有毒气体放出。英国已建成了一条冷冻造型自动生产线，就是把脱箱后的铸型型腔表面朝上，再置于铝板上送入冷冻通道中，当冷冻到所需温度时进行组装、浇注，这种方法适于浇注100kg以下的铸件，其生产率为15箱/小时。自此法问世以来，引起不少国家铸造业的极大关注。从美国、德国、英国、日本和前苏联等国的为数不多的资料和报导来看，这些国家已经做了不少理论和实验研究，确定了冷冻造型的一些主要参数，并准备采用此法进行生产。日本把铸型浸渍在液氮中冷冻，其工业技术院名古屋研究所采用压入液氮法，1979年日本通产省拨出了五亿日元预算来开展冷冻铸造的研究工作，随后开始了“冷砂”的研究工作，前苏联则开展了真空冷冻造型的研究。

英国人在奥斯港用刨花、锯末加水冷冻，形成比重极轻的浮动式冰冻混凝土码头，已投入使用。他们还着手在北部海岸建造冷冻层钻井平台的研制工作。而美国则着手研究无轮冰层汽车工作，零件的冰冷处理、低温处理及反处理。

冰，特别是用热水结冰，可修筑各种工程填筑物——堤、坝、码头、路基等。在军事上，冰和雪被广泛用来修筑防蔽工事——防护障垒、反坦克障碍物、隐蔽体和其他筑城工事等。美国人曾用海水修筑过漂浮的平台作为浮动飞机场，爱斯基摩人用沼泽地冻成的冰块盖房，冬暖夏凉。这种冰块不易融化，如果用它来制造抗洪冰坝，不但省工省事，而且工期短，可就地解决，等洪水

一退即可就地消融，不留痕迹。国外在流砂施工中，用冷冻法紧固流砂，防止塌方，在修路、挖地基、挖战壕中得到应用，可大大节省工时、工期。

由于低温技术的进步，各种蓄冷材料开始问世，已制成各种在高于室温条件下不液化、具有一定强度和形状的固态蓄冷材料及各种在低温下仍有柔软性和粘稠状新材料。

低温轴承、低温减速器、低温（冰层）导轨等一批新的结构设计开始装备新产品，出现了低温粉碎等新技术，这样就解决了废钢铁、塑料、橡胶、植物花瓣等的粉碎问题，又减少了气味、噪声和粉尘，可作为“无污染工业”。例如，在澳大利亚，有人开始用低温粉碎子午线钢筋橡胶轮胎，使长期困扰人们的这一问题得到解决。

2. 低温宇航及国防工程

第二次世界大战中，由于战争主要在寒冷地带进行，冰天雪地，严寒异常，带来了寒带武器装备的新进展。人类摸索出在冰天严寒气候条件下作战的新规律，如军需物资的运输、炮弹对冰层的相互作用等。这期间，如前所述在英国出现了“冰层军舰”。

战后人类对冰的研究开始淡薄。70年代以后，随着人类登月成功，遨游太空问题开始受到重视。宇宙茫茫，人生苦短，人们开始借助低温生物学来延长人类的寿命。

人们发现许多动物（尤其是冷血动物）都具有在低温下保存生命的本领。在接近绝对零度（ -273.15°C ）时，生命赖以生存的化学反应停止，生命活动中止，从而为生命的长期保留提供了依据。德国科学家从一处两亿年前干涸的古海底冰层中挖出了一些晶体，把它放入营养液中，结果培养出40种微生物，大都是从未见过的。“封冻”了两亿年的生命苏醒了。法国科学家用28尾淡水鱼进行冰封实验，两个月后，经升温只有三尾死亡，其余均复活了。这些事例使人们认识到低温延寿的威力。人体速冻保存及

复活技术应运而生了。这一技术能否实现将看美国1967年速冻15具冷藏人的情况。一旦此项技术获得成功，人类遨游太空的愿望就得以尽早实现。

在国防上，有广泛应用的低温电子学在近二十年来得到迅速发展。在很低温度下，某些物质具有与正常环境温度下完全不同的物理性质。需要低温制冷的电子学装置主要有以下几种：(1)红外探测器；(2)量子放大器；(3)参数放大器；(4)激光器；(5)航空雷达微波部件的温度控制；(6)反射镜的冷却；(7)光学显微镜的冷却；(8)微波部件的温度控制；(9)自动零接点装置，等等。

人造卫星和宇宙飞船的发射离不开火箭。而液氧在化学火箭中可以用作氧化剂，液氢既是化学火箭的重要燃料，也是核动力火箭以及未来的太阳能火箭中的推进剂工质，液氮则可以用来预冷和清洗低温推进剂火箭等。

卫星和飞船长时间在大气层外的宇宙空间运行，那里是一个深低温（ $\sim 3\text{K}$ ）、高真空（ $10^{-12} \sim 10^{-16}$ 托）的环境，易出现冷焊，分子污染及金属机械性能的变化等，人们必须在地面上对卫星和飞船进行高空环境模拟试验，这一切都离不开现代低温应用工程。

3. 低温生物学及低温医疗工程

低温生物学是研究生物组织细胞在低温下生存特性的科学。如人的血液、皮肤、各种组织器官、疫苗等在低温下长期储存的方法及机理的研究，人体冻伤机理等，需提供制冷装置及其特殊的制冷技术。

美国的人体冷冻公司，是把人的躯体或人体的部分器官，放入 -195°C 的液氮里保存，使其处于“冬眠”状态，有朝一日会重新解冻，供临床应用。使对一些绝症患者的治疗成为可能。由此可见，低温技术与生命科学的联系日益密切，低温医学在实践中得到进一步发展，人们利用低温对生物细胞的两种完全相反

的作用，发展了一系列先进的低温医疗设备（用以破坏病灶细胞）和低温贮藏设备（用以长期保存生物体）。

所谓低温治疗，主要就是利用低温杀死病灶细胞，使肌体康复。但冷冻本身并不能杀死细胞，而是由于冷冻温度、速率，改变着细胞中溶液的浓度，使细胞生存环境改变而死亡。由此产生一系列低温医疗机械。前苏联已将冷冻外科应用于临床治疗上。目前广泛应用于临床的有电子冰箱、电子冷冻枪、电子低温制冷器、电子恒温箱、冷冻做手术摘除白内障、培育试管婴儿、冷热针、冷冻切片、冷刀、冷疗、低温止血、降温帽、冷冻医疗等。

国际上已在制冷学会中成立C₁专业委员会，其内容包括：冷冻医疗、低温生物学、小型制冷器械等。-100℃以上及以下的冷冻治疗机、治肿瘤的低温超导装置均已问世。

4. 低温其他工程

在农业上，有种子的低温处理技术，活鱼冷冻保鲜复活技术，动植物原种的保存技术，蔬菜的低温栽培技术，家畜精液的冷冻、储存和运输等。

在科研仪器上，有零点仪、露点仪、冷阱、石英振荡器的频率稳定、标准黑体放射源、标准电器（电容、电阻、电感、电池等）的标定测量、重要电子设备上的恒温装置，等等。

此外，化工冶金工业气氛含水量测定，石油工业中凝点、浊点的分析和测定、半导体材料工艺的硅外延生长及扩散工艺控制SiCl₄、BCl₃等液态流，航空电器的地面模拟试验，印刷工业定温蚀板，照片及X光底片的定温显影，公害分析用的电子除湿器等无一不与低温技术有关。

值得一提的是便携式冷热袋（箱、器、杯、鞋、手套、帽、衣、枕、被、垫）——即手提式电冰箱，同时具有冷冻、加热两种功能，可算得上是一种万能冷热袋，既可冷用又可热用。

总之，可以说，低温应用工程已覆盖几乎所有工程领域，正在走向每一个技术领域和家庭。随着时间的推移和技术的进步，

它必将发挥更大的作用。

二、国内低温应用工程的发展概况

我国人民早在古代就知道利用冷冻技术了。但近代电致冷技术则始于1958年。之后，逐步建立了一批专业生产厂家，并在一些高校开设了低温制冷专业。

70年代初，我国开始探索将低温技术应用于机械加工上，到1984年基本上完成了“电子冷冻车削、电子冷冻铣削、电子冷冻磨削、液膜冰液”的研究任务。同年研制成功了冷热针、白内障摘除器等一批新医疗器械。之后各种低温医疗器械不断研制成功。低温滑动（冰层）轴承的研究进展已在全国航空学会动力专业委员会1986年年会上进行交流并刊登在1987年第3期《润滑与密封》杂志上。1988年6月低温热作模具的研究通过部级鉴定。与此同时，低温深冷处理工艺也在借鉴国外资料的基础上开展起来，并在提高零件及工装夹具的可靠性、耐磨性等方面取得较显著的效果。

近年来，我国的超导研究也紧跟世界发展步伐，取得了为世人瞩目的进步。

三、低温应用工程研究的主要内容

低温工程基本上交叉覆盖了所有应用领域。有些项目已被开发，有的正在被开发，还有多数尚未开发。主要包括：冷冻机理，冷源、机械加工、冷热加工及处理、机械零件、国防工业、工程结构及机械、民用开发、农业、微机在低温工程上的应用、冷磁结合技术等。

1. 冷冻机理

从环境温度到123K（-150℃）称为普冷区。属于制冷技术研究领域。

从123K到0K（-273℃）称为深冷区。属于低温技术（深冷

技术)研究领域。

对上述两区域冷冻机理的研究包括以下内容:人造冰层的晶体结构、种类、性质、结晶过程、反溶过程、化学成分及各种添加剂对冰层的影响;热冰。

冰层的力学性质:物性及传热性。

冷冻对金属材料、塑料、非金属材料、复合材料性质的影响。

液膜冰液、冷冻脱膜剂等的特性、传热、表面摩擦力,与冷冻温度的关系。

冷阻、冷冻结合力,冷冻参数的选择。

液膜冰液配比、组成、破坏机理。

液膜冰的物理性质、力学性质,与各种接触表面的关系。

为了实现上述研究,要研究新的试验仪器和可调的低温试验设备,要研究新的测试手段和新的试验方法,这本身就是科研。

2. 冷源

冷源分电子冷源、物理冷源和化学冷源三类。电子冷源主要指温差电偶对,在宇航上有重要应用。物理冷源主要指机械致冷技术,也包括磁冷却,即利用等温磁化与绝热去磁致冷。化学致冷是利用吸热反应致冷。

3. 机械加工

包括电子冷冻加工、机械式冷冻加工和化学式冷冻加工。低温加工及混冷加工;深冷加工;低温断屑及低温粒子断屑;低温刀具及机械夹固可转位群体刀具系统;低温(冰冻)夹具;低温切削机床(机床的恒温控制);特种零件的加工技术等等。

4. 冷热加工及处理

各种低温方法在热加工和热处理上的应用如下。

电子冷冻铸造,机械制冷式冷冻铸造,各种不同的致冷介质对冷冻铸造质量的影响,冷冻造型机,低温连续铸造,冷冻铸造生产线。

化学致冷式冷砂，物理致冷式冷砂，复膜冷砂大型铸件的冷冻铸造，精密铸造模具的电子冷却，热冰模精铸技术，金属型铸造模具的冷却，电子冷铁，冷泵冷铁，大型铸件的低温冷却，冷芯、无炉衬低温冲天炉，低温除湿送风，电子式定向结晶装置，电致冷金属的非晶态。

低温焊接、低温焊机。

低温模具锻造、冲压、拔丝。

冷冻处理、低温深冷处理改进零部件及工装夹具的使用寿命和机械性能，以及各种反处理。

5. 机械零件

低温滑动轴承——冰层润滑；传动件的冰层润滑；整机、减速器、变速箱的无油冰层润滑；冰层导轨、低温主轴等等。

6. 国防工业

弹体的冷模热锻；弹体的冷延伸模；低温炮管；低温发动机组；无杀伤阵地技术，低温头盔；伤口快速愈合术；冰层军舰、潜艇；冰冻“混凝土”星际站；低温电子器件，如冷参量放大器，固体量子放大器，光量子放大器等；红外探测器和光子探测器；低温高真空技术；低温通讯技术。

7. 工程结构及机械

两极用冷冻“混凝土”房屋，冰坝，冰冻“混凝土”码头，冰冻钻井平台，冰层无轮汽车等。

中小船舶的船体下水技术（低温导轨），橡胶的低温粉碎技术，冷装技术，矿石冷冻磨片技术，建筑材料的低温试验设备，水的冷冻淡化等。

8. 民品开发

低温医疗器械：万能低温磁场治疗仪、冷针、磁针、冷刀。

冷冻医疗：冷疗、冷藏人体器官技术。

冷冻外科：冻死病灶细胞，冷敷消肿止痛。

低温制药技术。

冷热袋（套、帽、鞋、衣、杯、器、盒等）。

9. 农业

种子的低温处理，鱼冷冻复活技术，动植物原种的保存技术，蔬菜的低温栽培技术，人参、蔬菜的活化处理等。

10. 微机在低温工程上的应用

实现低温工程上各种技术参数的控制、优化和自动控制。

11. 冷磁结合技术

冷冻强力永磁吸盘；冷磁场热处理及反处理；冷磁刀；冷磁无噪声齿轮传动；冷磁流体技术；冷磁场悬浮溶炼；冷磁处理；超导技术等等。

低温深冷处理工艺应用和发展概况

阎 珽 张剑波 施 刚

(上海 711 研究所)

一、低温深冷处理工艺概述

低温是一项十分新奇而具有探索价值的工程。近年来对它的研究已导致了許多重大发现,如超导现象物质第四态等。由于温度接近绝对零度时材料表现出的一种由无序向有序转变的奇特现象,促使科学家们对物质的基本结构做进一步的研究。世界各主要国家近年来竞相展开的有关液氮温度范围超导材料的研究已取得举世瞩目的成就。尽管对这类现象进行解释的理论尚未形成,低温对材料性能的影响尚未完全认识,但却吸引着越来越多的工程师进行不断的应用探索研究,如何运用这些已发现的物理现象改进产品质量、降低成本。可以说,低温科学正在逐步从实验室进入工厂,低温深冷处理工艺就是一个实例。

低温深冷处理工艺是一种将零部件置于 $-130^{\circ}\text{C}\sim-196^{\circ}\text{C}$ 的低温下,按一定的工艺过程进行处理的方法;它是近年来低温工程技术发展应用的产物。

其实,严格地讲,低温能改善材料的性能并不是近年来的新发现。瑞士的制表匠将手表零件放在高山岩洞中零下几十度的严寒中来提高零件的稳定性和耐磨性,这已有上百年的历史。

本世纪30年代,国际上开始出现材料冷冻处理工艺理论并进行试验,当时的最低工作温度不低于 -60°C ,处理的效果也不明显。

50年代末60年代初,受当时欧美国家空间计划热所掀起的低

温研究热潮的影响，一些机械制造厂和工具制造商纷纷开展刀具和工件的低温处理工艺的研究试验，从中发展产生了 -70°C ~ -80°C 温度范围人们所熟知的冷处理工艺。

70年代初，随着低温技术的迅速发展，特别是人们对零部件可靠性要求和材料摩擦磨损的研究开始重视，深冷处理工艺技术得到迅速的研究开发和应用。低温深冷处理工艺既是冷处理技术的深入发展，又与冷处理技术有实质性的区别。低温深冷处理工艺突破了传统冷处理工艺的应用局限，不仅可用于处理金属材料，还能用于非金属材料，如尼龙、聚四氟乙烯、塑料镜片等。低温深冷处理将冷处理所能达到的 -80°C 降低到 -196°C ，并具有比普通冷处理更明显的效果。

低温深冷处理效果独特，主要有以下三个方面：

(1) 提高零部件的耐磨性，延长使用寿命。金属零部件经深冷处理后耐磨性与寿命普遍提高0.5~6.6倍。

(2) 改善材料与零部件工艺尺寸的稳定性。铝、铝合金、铜、钛、300系列不锈钢等材料制成的精密零件经深冷处理后尺寸稳定性大为改善，Cummins内燃机公司生产的内燃机关键部件之间的间隙计量单位从原来常规的1/1000吋改为1/10⁶吋。

(3) 改善材料的性能。经深冷处理后，材料的强度可提高30%~300%，抗疲劳、耐腐蚀等性能也得到明显改善。

因此，美国、日本、德国、前苏联、法国、英国、澳大利亚等国相继开展了这一领域的研究和开发，并在军用及民用工业生产中显示了良好的经济性和优越的性能。美国的NASA是最早开展该工艺研究的单位之一。

值得一提的是，深冷处理后的有些效果达到了令人难以置信的地步，以致美国Material Improvement公司总经理E. Busch在谈到深冷处理的一些优点时曾风趣地比喻说，高尔夫球“可以滚得更远更准”，电灯泡“更经久耐用”、“再也不会松脱”，提琴琴弦不仅更耐用而且声音“更悦耳”。有人还将深冷处理描