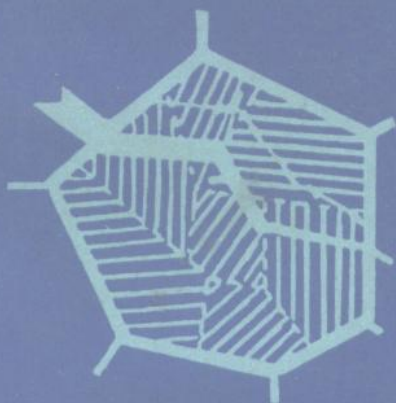


机械工程材料丛书

低温材料

西安交通大学《低温材料》编写组 编著



机械工业出版社

机械工程材料丛书

低 温 材 料

西安交通大学《低温材料》编写组 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书是《机械工程材料》丛书之一，是为机械类非材料专业的学生课外阅读和机械工程技术人员知识更新而编写的。

本书从机器零件和工程构件所发生的低温低应力脆断的典型事例出发，简要介绍低温脆断的规律和机制，较全面地阐述了材料的低温性能指标及其评定方法，着重介绍了常用的几类低温金属材料的成分、组织、性能特点及其应用场合，并对各类低温材料的发展方向和可供借鉴的国外较成熟的牌号作了适当介绍，最后还概述了金属材料低温性能的测试设备及技术，以使读者较系统地了解低温下服役件选材和用材的基本知识，并为正确选择和合理使用各类低温金属材料提供必要的依据。

低 温 材 料

西安交通大学《低温材料》编写组 编著

责任编辑：张蔼玲 责任校对：刘思砦
封面设计：刘代 版式设计：乔玲

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 ·印张 7 ·字数 151 千字
1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷
印数 0,001—3,500 ·定价：1.80 元

ISBN 7-111-00138-9/TG·48

《机械工程材料丛书》出版说明

国民经济及科学技术的飞速发展，机械工业产品正向大型化、高速化、高性能、高精度及高效率方向发展。因而对材料科学提出愈来愈高的要求；新的材料不断出现。为了帮助在机械工程行业工作的中、高级工程技术人员开拓工程材料的知识领域，进行知识更新，以便正确选择和使用材料，充分发挥材料的性能潜力，以使机械工业产品的水平得到进一步提高。同时考虑到高等工业学校非材料专业本科生及研究生的“机械工程材料”教学时数有限，而课程涉及的内容广泛。为使学生在学习“机械工程材料”的同时，有一套教学参考用书加以配合，我们组织编写了这套“机械工程材料丛书”。拟陆续出版十分册。这十分册是：工程陶瓷材料、模具材料、工程塑料、低温材料、耐热钢及耐热合金、复合材料、胶接与密封材料、高强度及超高强度钢、耐磨及减摩材料、铝合金及钛合金等。

这套丛书的读者对象是：机械工程行业的中、高级技术人员；同时适用于高等工业学校非材料专业的本科生及研究生。

丛书的内容以机械工程结构材料为主，适当介绍一些功能材料。内容的重点在于应用和选材，一般性谈及机理，但不以机理作为重点。阐述工程材料性能时，以使用性能为主，适当介绍其他性能。同时力求文字简洁，通俗易懂，便于自学。

由于条件和水平限制，特别是编审小组缺乏组织丛书编

写的经验，因此丛书内容难免有不妥之处。希望读者和各高等工业学校从事“机械工程材料”教学的教师提出宝贵意见，帮助我们改进提高。

《机械工程材料及物理化学》教材

编审小组 1985. 2.

前 言

随着能源和资源的开发利用及现代工业和科学技术的发展，近年来对低温用结构材料的需求有了飞速的增长，特别是在机械、冶金、石油、化工、宇航和超导等工业部门，由于能源结构的变化，越来越普遍地使用液化天然气、液化石油气、液氮和液氧等液化气体，为了生产、贮存、运输和使用这些液化气体以及防止机件在低温下发生脆性断裂，对材料在低温下的强度和韧性提出了更高的要求，同时也促进了低温用材料的研制和发展。近30多年来，世界各国在开发和低温金属材料方面有了很大的进展，从普通低合金钢、镍钢、奥氏体系铁合金到低温用的钛合金和铝合金等有色金属材料，已广泛应用于低温领域的各个方面。

本书从机器零件和工程构件所发生的低温低应力脆性断裂的典型事例出发，简要介绍了低温脆断的规律和机制，比较全面地阐述了材料的低温性能指标及其评定方法，着重介绍了常用的几类低温金属材料的成分、组织、性能特点及其应用场合，并对各类低温材料的发展方向和可供借鉴的国外较成熟的牌号作了适当介绍，最后还概述了金属材料低温性能的测试设备及技术，以使读者较系统地了解低温下服役机件选材和用材的基本知识，并为正确选择和合理使用各类低温金属材料提供必要的依据。本书是为高等工业学校机械类各专业的师生和机械工程技术人员而编写的，突出阐明一般规律，力求避免过深的理论分析，以便于自学。

本书第一章和第三章由鄢文彬编写，第二章由王永兰编

写，第四章和第五章由邵潭华编写，第六章由富振成编写。本书编写过程中，得到西安交通大学饶启昌副教授的指导和帮助，在此致谢。

由于我们的学识水平有限，加之编写时间仓促，缺乏经验，书中一定存在不少缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

西安交通大学低温材料编写组

1987. 3.

目 录

前言

第一章 低温脆性断裂事例和脆断的机制	1
§ 1-1 金属结构和机械设备的低温脆性断裂事故 及低温脆断的特点	1
§ 1-2 脆性断裂的断口分析	7
§ 1-3 脆性断裂时裂纹的萌生与扩展	13
参考文献	18
第二章 材料的低温性能指标及评定	20
§ 2-1 低温下材料的机械性能	20
§ 2-2 低温下材料的物理性能	48
§ 2-3 低温下材料的焊接性能	57
§ 2-4 影响材料低温性能的因素	60
参考文献	67
第三章 低合金钢及其低温性能	69
§ 3-1 概述	69
§ 3-2 低合金钢成分、组织和性能的关系	71
§ 3-3 低合金钢的选用	88
§ 3-4 几种专业用钢的发展概况	100
参考文献	114
第四章 镍钢和奥氏体系铁合金	116
§ 4-1 镍钢	116
§ 4-2 因瓦合金	127
§ 4-3 析出型镍基合金	129
§ 4-4 奥氏体不锈钢	134

参考文献	151
第五章 低温下使用的有色金属及其合金	154
§ 5-1 钛及其合金	154
§ 5-2 铝及其合金	169
§ 5-3 铜及其合金	183
参考文献	194
第六章 金属材料低温性能试验	195
§ 6-1 引言	195
§ 6-2 金属材料低温性能试验	204
§ 6-3 低温试验的安全常识	213
参考文献	214

第一章 低温脆性断裂事例 和脆断的机制

§ 1-1 金属结构和机械设备的低温脆性断裂事故 及低温脆断的特点

断裂、表面损伤和过量塑性变形是工程结构和机械设备的三种主要失效形式。断裂失效较为普遍，其中以脆性断裂的危害性最大。由于脆断的突然发生，往往带来巨大的经济损失和人身伤亡，因而引起人们广泛的重视。

一、船舶的低温脆断事故

在第二次世界大战中，美国的焊接结构船舶多次发生脆性断裂事故。美国海军设立的调查局于1947年公布了调查报告，报告中说，这些事故造成238艘船完全报废，19艘船沉没。其中最严重的事例是：有24艘船舶的甲板完全横断，有一艘船舶的船底完全断裂，八艘油轮断成两半。图 1-1 是 T-2 油轮船体脆断时的照片。这艘油轮于1943年1月停泊在海港时脆断成两半，当时受到的应力仅为70MPa，远低于船体钢板的屈服强度。事故发生时的气温为 -5°C ，可以认为不是太寒冷。

Shank 等人对船舶脆断事故作过详细调查，认为造成破坏的主要原因是钢的缺口敏感性。当时美国的船舶技术标准中没有列出对船舶钢板缺口敏感性和低温韧性的要求。

第二次世界大战之后，英国建造的船舶中有一艘叫做“世界协和”号的油轮于1954年11月破裂成两半。当时海上

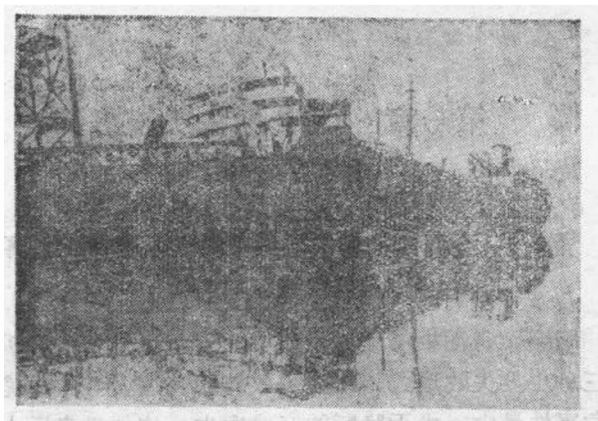


图1-1 T-2油轮脆断时的情形^[3]。

气温为 10.5°C 。一个联合技术调查组的报告证实，船上使用的钢板技术条件中没有包括缺口韧性的要求，而发生脆断的钢板在当时工作条件下都具有缺口敏感性。

二、桥梁的低温脆断事故

第二次世界大战爆发前几年，比利时的阿尔伯特运河 (Albert Canal) 上建造了大约50座桥梁，所用钢材为St42钢，所有连接均是焊接。气候寒冷时，有几座桥梁出现了严重的裂纹。其中最严重的是跨度为74.5m的哈塞尔特 (Hasselt) 桥的断裂，这座桥建成仅14个月后，在一辆电车和一些行人的载荷作用下便断成三段坠入河中 (图1-2)，当时的气温是 -20°C 。过了两年之后，1940年1月，跨越阿尔伯特运河的另外两座桥梁，也相继发生破坏，那时的气温为 -14°C 。据统计，在1947~1950年间，比利时还有14起桥梁构件的脆性破坏事故，其中有6起是由于低温引起的。

1947年在加拿大魁北克河上建立的一座桥梁，通车27个

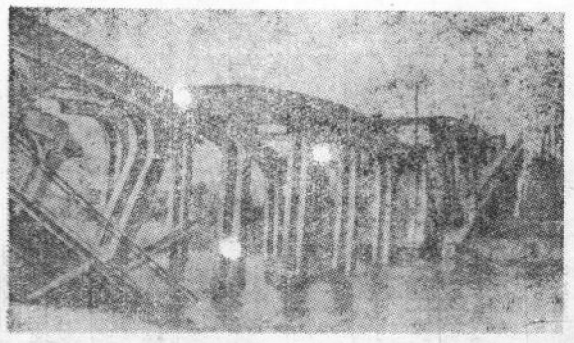


图1-2 比利时的Hasselt桥于1938年3月脆性断裂

月之后,于1950年2月发现有严重裂纹,虽然严密地监视着桥梁的状态,且及时更换了局部损坏的构件,但该桥仍在1951年1月完全破坏,有三个跨度坠入河中,当时气温为 -35°C 。随后的调查发现,折断的翼缘板是质量低劣的沸腾钢,钢中有严重的碳和硫的偏析,并含有大量夹杂物,钢材的冲击韧性很低。

三、海上石油钻机的低温脆断事故

“海宝”号是北海气田所用的海洋钻机,1965年12月27日(气温 3°C),发生井架倒塌和下沉,船上82人中有19人丧生。法庭在调查中发现“此不幸事故是由于连接杆在低于屈服应力的载荷作用下发生脆断所引起”,劳氏船级协会的检查 and 试验表明,连接杆所用钢材的晶粒粗大,冲击值很低,在 0°C 时的CVN值为 $11\sim 32\text{ J}$ 。

四、工程机械、交通运输车辆等的脆断

这类机械设备一般在露天作业,工作时冲击载荷较大,在严寒季节容易发生低温脆断。表1-1是工程机械零部件低温脆断情况统计。另据黑龙江省某露天煤矿的资料,挖掘机(又名电铲)的机械事故在冬季发生的占全年的 $30\sim 40\%$ 。该

表1-1 工程机械零部件低温脆断情况统计

序号	机械名称	作业环境			破坏情况		
		施工地点	最低使用温度	土壤或岩石等级	破坏部位或零件名称	破坏性质	破坏情况或原因
1	C3-3挖掘机 (仿苏)	大孤山铁矿 南芬铁矿	-30~-40℃	铁矿石	靠斗斗端	冷脆	由于冲击载荷严重,过去采用A3、16Mn钢,破坏量很大
2	同上	抚顺露天矿	-20~-30℃	风化岩	动臂折断 拉杆折断 固定轴承断	冷脆 冷脆 冷脆	铲斗不高掌面回转
3	同上	同上	同上	同上	立轴断 小齿轮掉牙	冷脆 冷脆	"顶电"(反接制动)
4	同上	同上	同上	同上	方轴断 下机座裂 履带断 履带架裂	冷脆 冷脆 冷脆 冷脆	地面不平而挖掘过猛 冬季在不平地面上行走 时易发生
5	推土机C-100 T-100	赤峰、通辽 和大兴安岭	-20℃	冻土	刀片(沿连接 螺栓折断) 螺母折断 连接螺栓断	冷脆和 强度不足	超载使用
6	同上	同上	-15~-20℃	同上	悬挂部件 板簧折断	冷脆	
7	同上	同上	同上	同上	传动装置 轴断 转向离合器半 轴断	冷脆和 强度不足	
8	7-9自行式 铲运机	青海省风火山			牵引架 象鼻架断 (铸钢)	冷脆	

矿在1979年有挖掘机15台，因挖掘机零部件低温脆断一项，造成的经济损失折合人民币21万多元。其中，挖掘机动臂、斗杆等的低温脆断问题，至今仍未得到解决。

1984年1月4日，在新疆发生一起工程起重机吊臂脆断事故，造成一人死亡。作业环境气温为-15~-6℃。一个联合调查组的报告指出，从断臂上取样作冲击试验，-15℃时 a_k 约为12.7~17.4J/cm²。显然，钢材在使用温度下的冲击韧性太低。同时在吊臂焊缝区原先存在较长裂纹，加上使用时过载，从而导致了这次重大事故。

我国大型露天煤矿霍林河煤矿1978年从国外引进75B重型卡车57台，短期使用之后即连续发生车架开裂现象。通过失效分析，发现75B卡车车架钢板的却贝V型缺口冲击转变温度为-20℃，而霍林河地区冬季最低气温可达-40℃以下。

哈尔滨铁路局加格达奇车辆段所管辖地区，全年平均最低气温在-10.22℃至-11.98℃之间，零

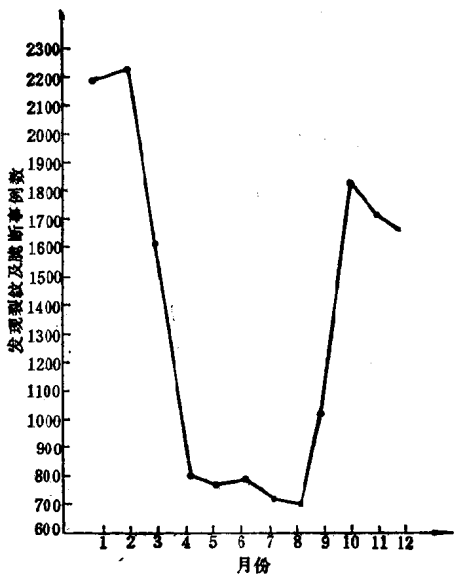


图1-3 加格达奇车辆段1980年间发现裂纹或断裂情况统计

摄氏度以下的气温长达七个月，最低气温可达-54℃。图1-3

是该段在1980年间检修 118 万辆货车中发现裂纹或断裂情况的统计，说明一年之中 1, 2, 11, 12 这四个月中产生裂纹和脆断的情况比较集中。

五、液体贮罐和气体压力容器的爆炸事故

1947年12月，苏联曾发生几起石油贮罐的破坏事故，均是由于当时气温低（ -43°C ）所引起。40年代美国俄亥俄州的克利夫兰，双层壳体的球形液化天然气贮罐，在操作压力为 0.034MPa ，操作温度为 -162°C 时发生爆炸，死亡128人，损失达680万美元。类似的压力容器爆炸事故在我国也有过。

六、低温低应力脆断的特点

国内外所发生的上述低温脆断事例，以及尚未提到的更多的脆断事例，有的曾经加以彻底研究，有的研究得并不充分。分析各种金属结构和机械设备的低温脆断，可以看出它们具有下列特点：

1. 断裂时的名义应力都较低，一般低于材料的屈服强度，往往低于设计许用应力，因此称作低温低应力脆断；
2. 机件在破坏之前没有或者只有局部塑性变形；
3. 断裂总是从缺陷（尤其是焊缝缺陷）或几何形状突变处开始的，裂纹源也有的是由于疲劳损伤或应力腐蚀引起的；
4. 破坏一旦开始，便以极高的速度发展；
5. 宏观断口是平直的，断口平面与拉应力方向垂直，有时在断口上有人字纹路，其尖端指向裂纹源；
6. 从被破坏的零件或构件上切取试样作试验，光滑试样拉伸强度和延性并不一定差，但低温下缺口敏感性较大，尤其韧性差。中、低强度钢的韧-脆转变温度一般在 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 以下。高强度钢没明显的温度效应，一般在较高温度下就可能发生脆断。

从大量低温脆断事故分析中可以认为，低温低应力脆断主要与下述因素有关：

1. 存在缺陷（或疲劳裂纹），或者有几何形状突变引起的应力集中；
2. 一定有应力的作用，某些情况下附加有残余内应力作用（如焊接构件）；
3. 温度低到一定程度；
4. 材料本身的低温韧性差。

应该指出，上述诸因素中只有一个因素存在时并不足以发生低温低应力脆断，只有当其中某几个因素同时作用时方可引起低温低应力脆断。

§ 1-2 脆性断裂的断口分析

为了保证工程结构或机械设备的安全并延长它们的使用寿命，人们总是设法防止断裂的发生或延缓断裂的过程。断裂分析工作对此具有非常重要的意义。无论是设计工作者，或者是材料工作者、工艺工作者，在材料强度与断裂方面都可以找到共同的语言，他们都应当掌握断裂分析的基本概念。为了进行断裂分析和控制断裂失效，则必须了解断裂的理论及断裂的微观机制。

工程结构及机械设备的一系列脆断事故的发生，促进了断裂学科的发展。断裂学科是一门新兴的边缘学科，它是综合运用力学、物理学和化学的成就而发展起来的。断裂学科的知识帮助人们较全面、深入地认识断裂现象的各个方面，为解决断裂问题提供多种思路和途径。其中，断裂力学主要是从宏观上对裂纹体进行力学分析。断裂物理研究裂纹的形成和扩展的途径，要求从材料的微观组织、晶体缺陷等微观

尺度上进行研究。断裂化学则研究化学介质对断裂过程的影响。

描述断裂的宏观过程，通常采用“方式”、“性态”和“形貌”这三个术语。“方式”是指多晶材料中断裂所取的途径：沿晶界的（晶间的）或穿晶的。穿晶的断裂方式又可分为沿解理面、滑移面、孪晶界或沿非晶体学面的分离。“性态”涉及在完全断裂之前的变形量，“脆性的性态”是指极小的塑性变形，而“延性的性态”是指有较大的塑性变形。形容词“脆性的”和“延性的”是指宏观断裂性态。这种划分断裂性质的方法，只具有相对的意义，并不能说明任何特殊的断裂机制在起作用，因为在断开之前，延性程度（塑性变形程度）可能不同，但并不意味着断裂机制本身的改变。例如，解理断裂时既可以出现较大量的变形，也可能只出现极微量的变形，这要视温度而定。所以，不能把解理与脆性断裂二者完全等同看待。另外，宏观脆性的断裂，也不排除在材料的微小区域内出现强烈的塑性变形。所谓“形貌”是指肉眼或用10~20倍的放大镜在断口上观察到的特征。在大多数情况下，用这一方法可以确定断裂的方式。在描述形貌时，常用“结晶状”、“纤维状”、“具有刻面的”、“人字纹”等术语。

断裂的过程大致可以分成三个阶段，除去首先产生不均匀的局部屈服外，即是微裂纹的形核、长大和裂纹扩展导致最后断裂的过程。金属断口分析则是一种揭示金属断裂过程的十分重要的方法之一，它有可能使我们找出联系断裂的宏观与微观过程的途径，甚至给出定量的结果。为了深入研究断裂的本质，也需要对断口进行微观分析，借助于光学显微镜、电子显微镜和微区成分分析仪器（如电子探针、俄歇谱仪等），可以研究断裂的微观机制，分析断裂的起源和裂纹