

01 失效概念

所谓**失效**，是指机械零件在使用过程中，由于尺寸、形状或材料的组织与性能的变化而失去预定功能的现象。



失效的表现

完全丧失功能

功能衰退

失去可靠性
与安全性

由于机械零件的失效，会使机床失去加工精度、输气管道发生泄漏、飞机出现故障等，严重地威胁人身生命和生产的安全，造成巨大的经济损失。

因此，分析机械零件的失效原因、研究失效机理、提出失效的预防措施具有十分重要的意义。

失效发生

加工环节

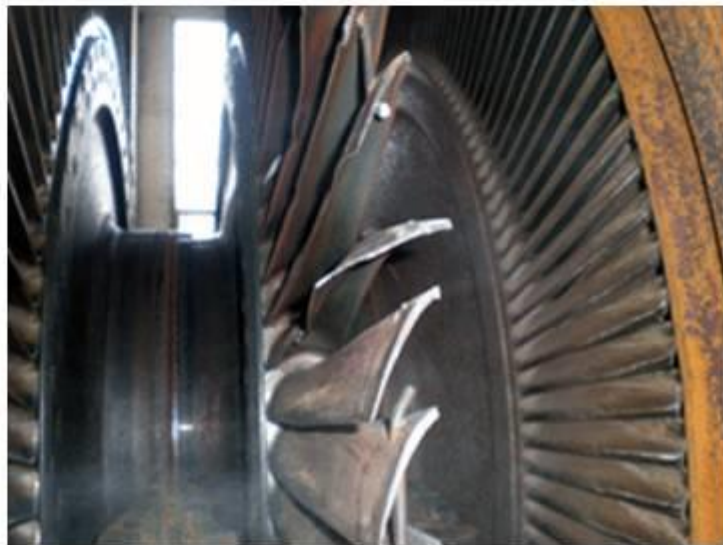
冶炼、合成、浇注、锻造、热轧、冷轧、热处理、焊接、切割、机加工等。

使用过程

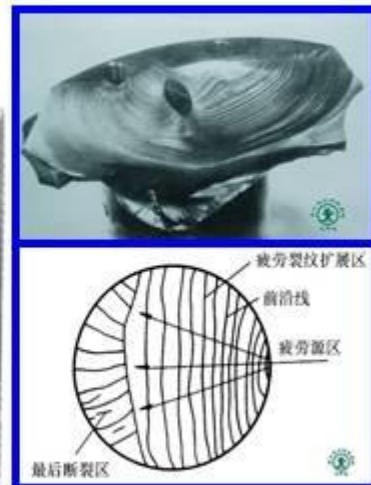
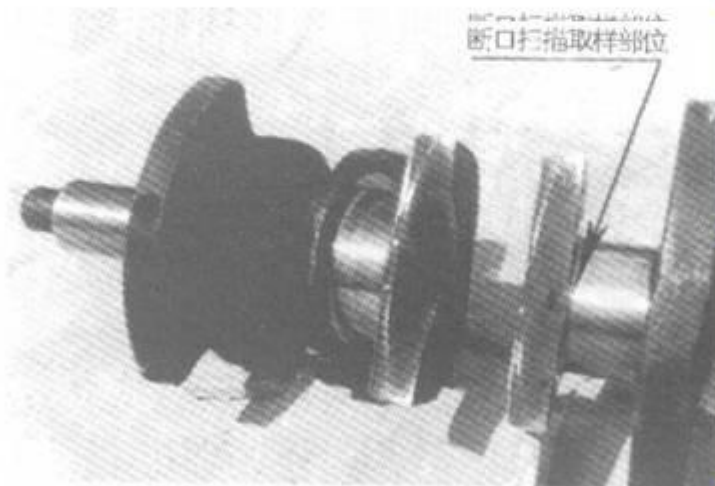
过载载荷、恶劣环境、正常使用。



水泥罐车
罐体断裂

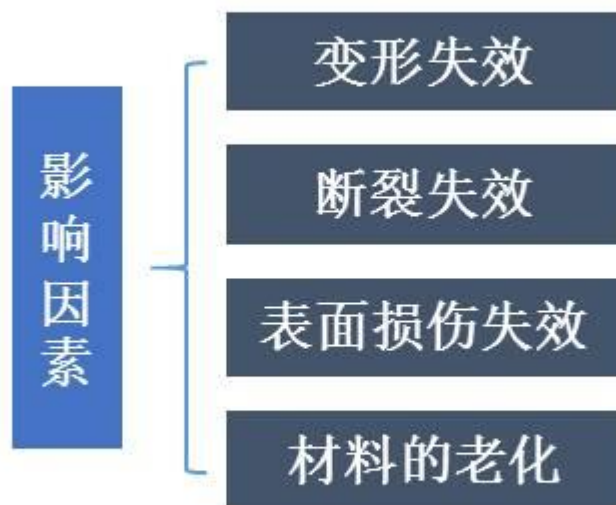


涡轮机叶片突然断裂



汽车曲轴断裂

02 失效形式



一、变形失效

变形失效包括**扭曲、拉长、涨大、蠕变**等，引发的主要原因是零件在一定载荷条件下发生过量变形。

主要分为**弹性变形失效**和**塑性变形失效**。

- **弹性变形失效** 变形量是在弹性范围内变化，主要原因是材料的刚度不足。杆、柱、轴类零件，靠摩擦力传动的零件等弹性变形会带来失效的问题。**影响因素**：零件形状、尺寸、材料的弹性模量、零件工作温度和载荷的大小。
- **塑性变形失效** 外加应力超过材料的屈服强度时发生明显的塑性变形。**影响因素**：除弹性变形中因素外，还有材料缺陷、使用不当、设计失误等，其中热处理不良尤为突出。

二、断裂失效

断裂失效是机械零件失效的主要形式，可以分为**韧性断裂失效**和**脆性断裂失效**。

韧性断裂

材料断裂前及断裂过程中产生明显宏观塑性变形的断裂。

脆性断裂

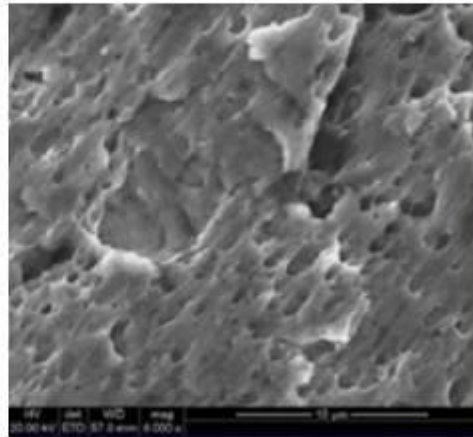
材料断裂前基本不产生明显宏观塑性变形，表现为突然发生的断裂。

一般来说，材料断面收缩率**大于5%**为韧性断裂，**小于5%**为脆性断裂。

韧性断裂断口特征



宏观特征

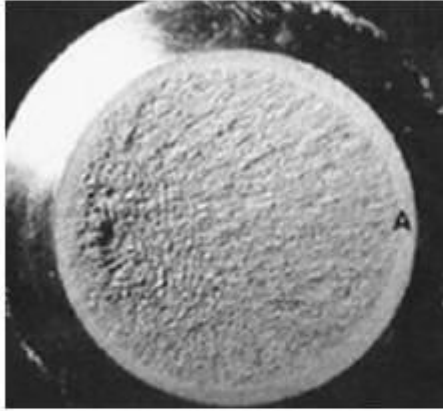


微观特征（多呈韧窝状） 材易通

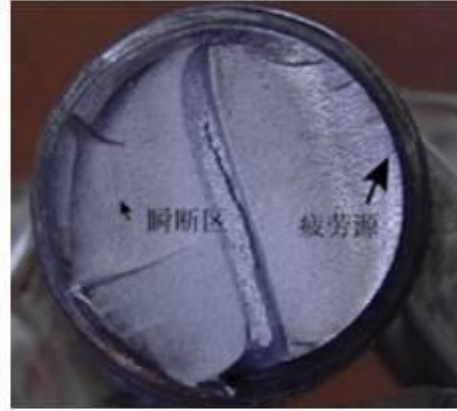
脆性断裂断口特征

疲劳断裂、应力腐蚀断裂、腐蚀疲劳断裂和蠕变断裂均属于脆性断裂。

宏观特征

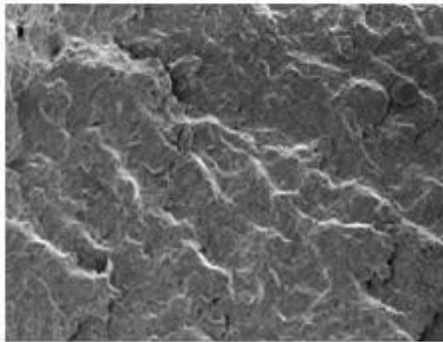


一般宏观特征

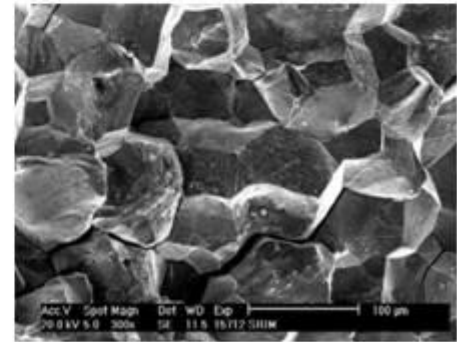


疲劳断口

微观特征



解理断口



沿晶断口  材易通

三、表面损伤失效

由于**磨损**、**疲劳**、**腐蚀**等原因，使机械零件表面失去正常工作所必需的形状、尺寸和表面粗糙度造成的失效，称为表面损伤失效。

磨损失效

磨损是由于机械作用、化学反应(包括热化学、电化学和力化学等反应)，



材料表面物质不断损失或产生残余变形和断裂的现象。

提高材料耐磨性的主要途径是进行表面强化。

腐蚀失效

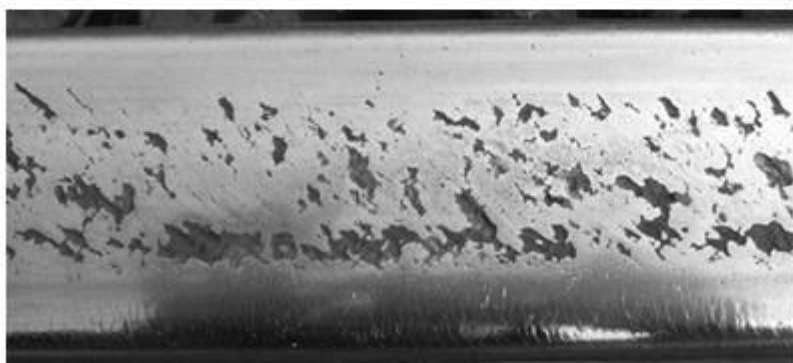
腐蚀失效是由于化学或电化学腐蚀而造成机械零件尺寸和性能的改变而导致的。



合理地选用耐腐蚀材料，在材料表面涂覆防护层，采用电化学保护及采用缓蚀剂可以有效提高材料的抗腐蚀能力。

表面疲劳失效

表面疲劳失效是指两个相互接触的机械零件相对运动时，在交变接触应力作用下，机械零件表面层材料发生疲劳而脱落所造成的失效。



钢轨轨头
表面疲劳

四、材料的老化

高分子材料在储存和使用过程中发生变脆、变硬或变软、变黏等现象，从而失去原有性能指标的现象，称为材料的老化。

老化是高分子材料不可避免的

03 失效原因

设计不
合理

选材错
误

加工工
艺不当

装配使
用不当

设计不合理

机械零件设计不合理主要表现在**机械零件尺寸**和**结构设计**上。例如过渡圆角太小、尖锐的缺口、尖角等会造成较大的应力集中而导致失效；另外，对机械零件的**工作条件**及**过载情况**估计不足，设计承载能力不够，忽略或低估温度、介质等因素的影响，也会造成零件失效。

选材错误

选材所依据的性能指标，**不能反映材料对实际失效形式的抗力**，不能满足工作条件的要求，错误地选择了材料。另外，材料的**冶金质量太差**，如存在夹杂物、偏析等缺陷，也是失效的源头。

加工工艺不当

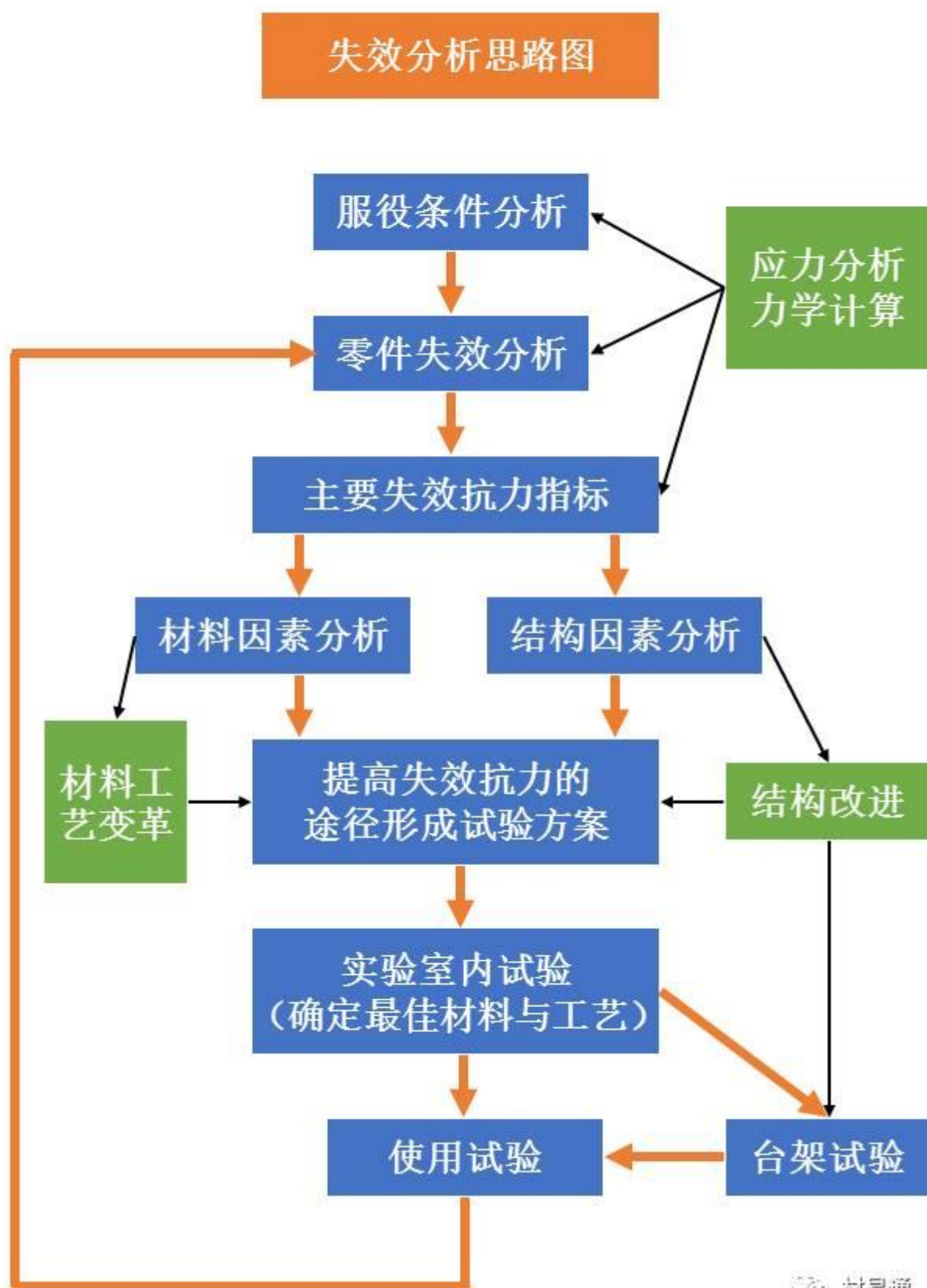
在加工或加工过程中，由于采用的**工艺不当**而产生的这种质量缺陷，例如较深的**切削刀痕**、**磨削裂纹**等，都可能引发失效。热处理时，**冷却速率不够**、**表现脱碳**、**淬火变形和开裂**，也是引发失效的重要原因。

装配使用不当

在装配成机器或装置的过程中，由于**装配不当**、**对中不好**、**过紧或过松**都会使零件产生附近应力或振动，造成失效。**使用维护不良**，**不按工艺规程操作**，也会造成失效。

04 失效分析方法

失效分析思路图



分析思路要点

- 对具体服役条件下的零件作具体分析，从中找出主要的分析方式及主要失效抗力指标；
- 运用金属学、材料强度学和断裂物理、化学、力学的研究成果，深入分析各种失效现象的本质：主要失效抗力指标与材料成分、组织和状态的关系，提出改进措施；
- 根据“不同服役条件要求材料强度与塑性、韧性的合理配合”这一原则，分析研究失效零件现行的选材、用材技术条件是否合理；
- 用局部复合强化，克服零件上的薄弱环节，争取达到材料的等强度设计。
- 在进行失效分析和提出改进措施时应注意几个结合：
 - 设计、材料与工艺相结合；
 - 结构强度与材料强度相结合；
 - 宏观规律与微观机理相结合，断口宏观分析与微观分析相结合。

零件的各种服役条件

零件的服役条件——载荷

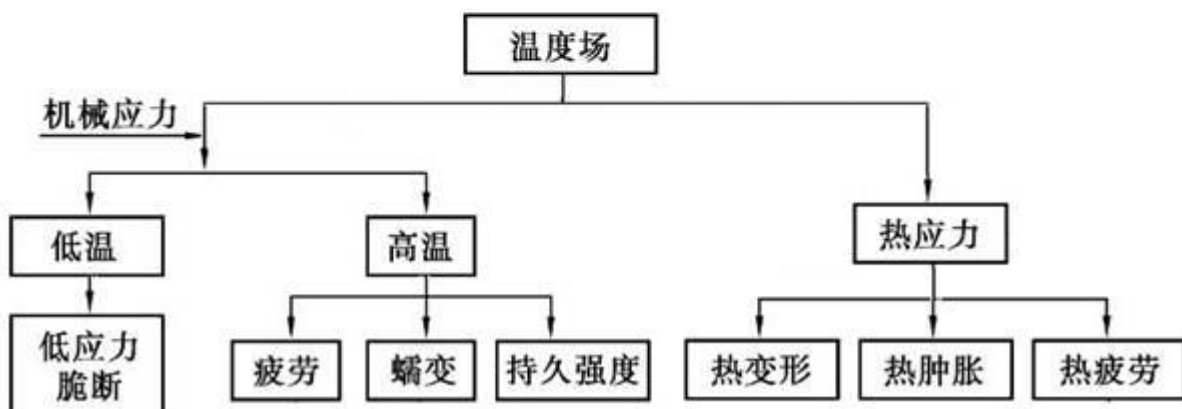
载荷基本类型

	应力分布情况	载荷类型
(a)	<p>拉伸</p> <p>压缩</p>	轴向载荷
(b)	<p>悬臂</p> <p>简单弯曲</p> <p>中性轴</p> <p>中性轴</p>	弯曲载荷
(c)	<p>中性轴</p>	扭转载荷
(d)		剪切载荷
(e)		接触载荷

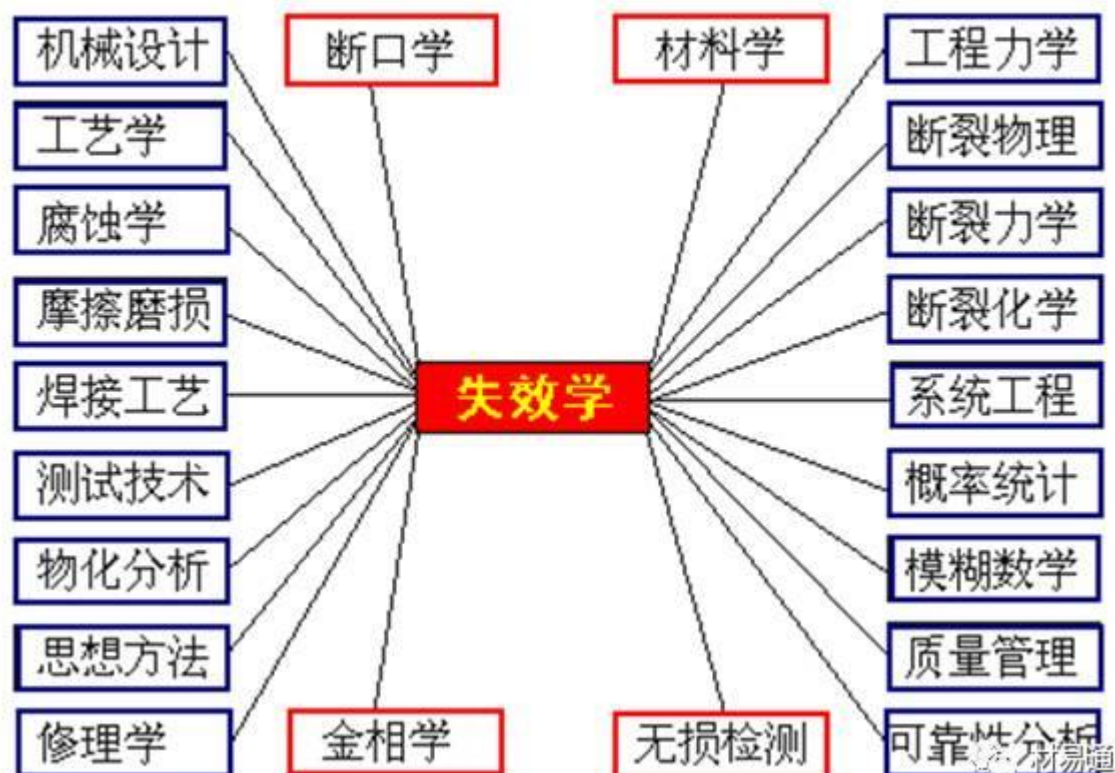
零件的服役条件——介质

介质	可能引起的失效
气体：大气、盐雾气氛、水蒸气、气液二相流（CO，CO ₂ ）、含H ₂ S气氛	氧化、腐蚀、氢脆、腐蚀疲劳、气液流冲蚀
液体：Cl ⁻ 、OH ⁻ 、NaOH、NO ₂ 、H ₂ S、水-固（砂石）	腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、气蚀和泥沙磨损
液体金属：Hg-Cu合金、Cd、Sn、Zn-钢、Pb-钢、Nb、K-不锈钢	液体汞脆、液体金属脆化、合金中的Ni、Cr元素在液体Pb中发生选择性溶解，冶金金属腐蚀
中子辐射，紫外线照射	造成材料脆化、高分子材料老化
磨料：矿石、煤、岩石、泥浆、水溶液	磨粒磨损、腐蚀磨损综合作用

零件的服役条件——温度



材料失效分析学是多个专业知识的组合



05 失效分析程序和步骤

失效分析的程序可以简化为“问”、“望”、“闻”、“切”、“模”、“结”六个方面。

程序	内容
“问”（调查）	详细调查破坏现场，了解背景资料和失效经过，收集国内外相关资料
“望”（观察）	失效零件的直观检验； 断口的宏观、微观分析，裂纹分析
“闻”（探测）	无损探伤检验； 金相检验（组织、异常组织）； 成分分析（常规的、局部的、表面的和微区分析）； X射线分析
“切”（测试）	力学性能测试（包括硬度）； 断裂力学分析
“模”（模拟）	损坏机理确定； 模拟服役条件的测试（再现实验、确认实验）
“结” “结论”	全部信息的分析与结论； 写出失效分析报告并提出预防失效的建议、措施

失效分析步骤

1、保护失效现场

- 保护失效现场的一切证据，维持原状、完整无缺和确保真实，是保证失效分析得以顺利有效进行的先决条件。
- 失效现场的保护范围视设备类型及其失效发生的范围而定。

2、失效现场取证和收集背景资料

- 失效现场取证和收集背景资料应由授权的失效分析人员进行。

失效现场取证包括：

- ① 失效零件及碎片的名称、尺寸大小、形状和散落方位；
- ② 失效零件和碎片的变形、裂纹、断口、腐蚀、磨损的外观、位置和起始点，表面的材料特征，如烧伤色泽、附着物、氧化物和腐蚀产物等；
- ③ 失效零件周围散落的金属屑或粉末、氧化皮、润滑残留物及其他可疑物等；
- ④ 失效设备或部件的结构和制造特征；
- ⑤ 环境条件：失效设备的周围景物、环境温度、湿度、大气和水质等；
- ⑥ 听取操作人员及旁证介绍事故发生时的情况。

背景资料包括

- ① 零件功能、要求及设计依据，包括材料选择；
- ② 使用经历，包括使用寿命、操作温度、环境条件、负荷情况、加载速度、拉力或压力、超载情况；
- ③ 原材料，处理工艺和性能情况；
- ④ 制造工艺；
- ⑤ 相关技术规范、标准和法规。

3、进行试验研究

- 大多数失效案例需要根据综合分析结果来制定失效分析计划，确定进一步分析试验的目的、内容、方法和实施方式。

■ 材料成分分析及宏观与微观组织分析：

检查材料成分是否符合标准，组织是否正常（包括晶粒度，缺陷，非金属夹杂物，相的形态、大小、数量、分布，裂纹及腐蚀情况）。

■ 宏观和微观的断口分析：

确定裂纹源及断裂形式（脆性or韧性断裂，穿晶or沿晶断裂，疲劳or非疲劳断裂）。

■ 力学性能分析：

测定与失效形式有关的各项力学性能指标。

■ 机械零件受力及环境条件分析：

分析机械零件在装配和使用中所承受的正常与非正常应力，是否超温运行，是否与腐蚀介质接触等。

■ 模拟实验：

对一些重大失效事故，在可能和必要的情况下，应做模拟实验，以验证上述分析得出的结论。

4、得出结论

- 综合各方面的分析资料，最终确定失效原因，并提出改正和预防措施，形成失效分析报告。

06 失效分析案例

案例：水冷壁管爆管



- 取了爆管位置、距离爆管上下各两米外的管段，紧挨着爆管旁边的管段共计4根管子。

材质

20G

服役条件

管内为温度 $320^{\circ}\text{C}+11.3\text{MPa}$ 锅水，已服役25年，期间无更换

化学成分分析

炉管化学成分 (wt%)

元素	C	Si	Mn	P	S
测定值	0.182	0.225	0.56	0.031	0.012
20G标准值	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	≤ 0.035	≤ 0.035

分析宏观断口特征



宏观特征：
有明显塑性变形，
呈喇叭口状

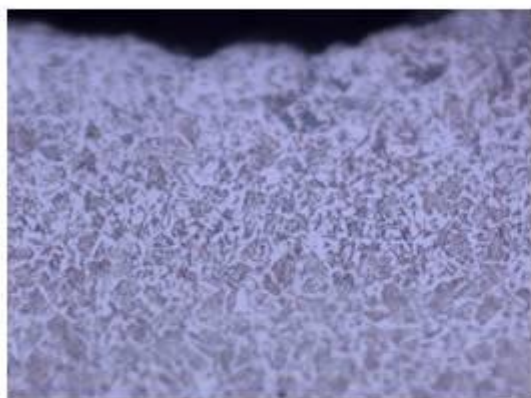


宏观特征：

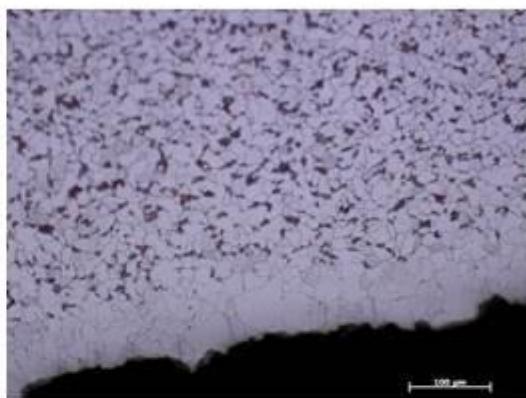
爆管前内外表面均发生较严重氧化，氧化层在爆管变形过程中开裂。说明该位置发生局部短时间超温。



断口微观组织比较



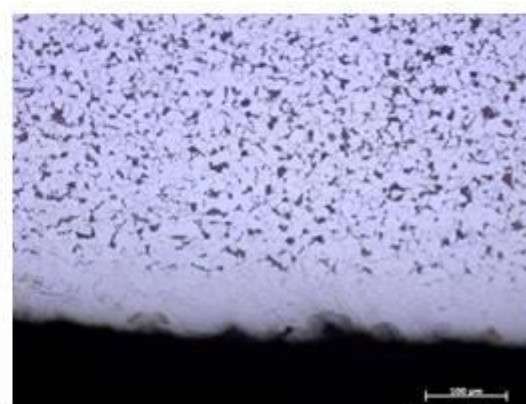
爆口外壁组织 (500X)



离开爆口20cm处迎风面处组织 (200X)



第21根管上段迎风面处组织 (200X)



相邻管段迎风面处组织 (200X)

力学性能分析

水冷壁管爆开位置附近常温机械性能

第21根水冷壁管爆开位置附近	屈服强度 σ_s (MPa)		抗拉强度 σ_b (MPa)		断后伸长率 δ (%)	
	测试值	平均值	测试值	平均值	测试值	平均值
迎风面	367	354	527	511	28.4	28.3
	341		495		28.2	
背风面	298	294	461	465	28.9	29.4
	289		469		29.9	
参考值	≥ 245		412~549		≥ 24	

水冷壁管爆开位置附近320°C机械性能

第21根管中段（爆管段）		抗拉强度 σ_b (MPa)		断后伸长率 δ (%)	
		测试值	平均值	测试值	平均值
320°C测量值	迎风面	535	525	21.2	22.7
		516		24.1	
	背风面	440	443	25.7	23.5
		446		21.3	
350°C参考值	(参考值)	474		32.7 材易通	

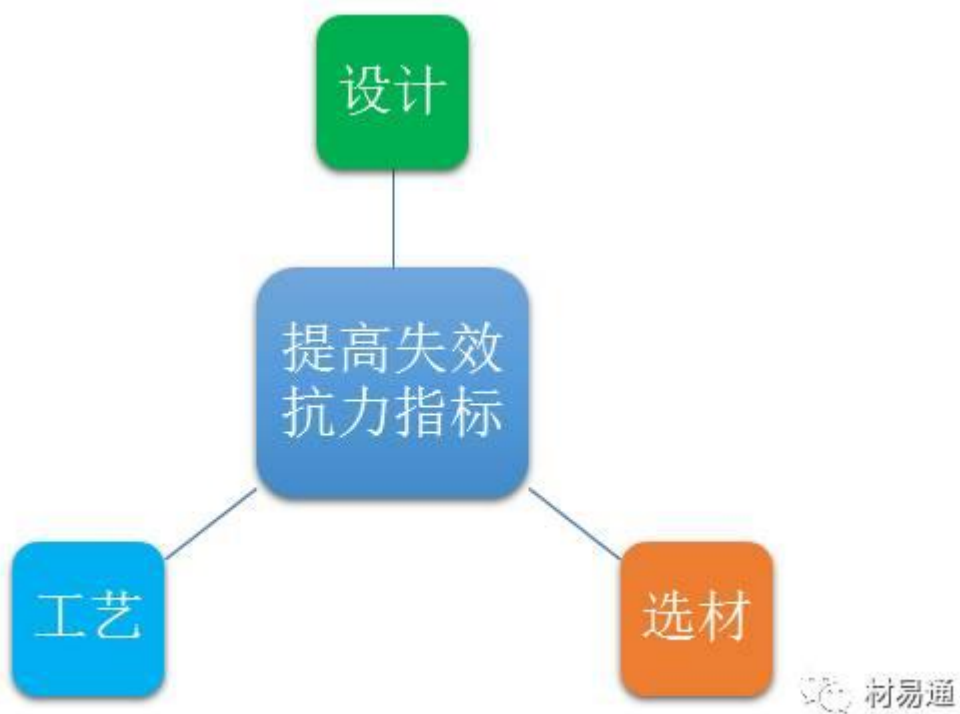
爆裂为短时超温所致，超温范围仅局限于爆裂处。

可能原因：

- 1 由于管段两端或者一端或者管中某段被外来物堵塞，导致管内介质流动不畅甚至完全堵死后介质静止。堵管的外来物可能是安装时混入的块状或者片状杂物，可能是长期运行管内壁腐蚀后沉积下来的腐蚀产物；
- 2 管子内壁附着物（如氧化皮、垢层）较厚，导致传热受阻；
- 3 管内气液分相，由于气相导热较差导致与气相侧的管壁过热。

07 失效的防止

失效防止的关键就是要提高零件的失效抗力指标，主要措施有**设计**、**选材**、**工艺**三个方面。



1、设计

■ 选择合适的零件尺寸，不能盲目加大。

往往在失效抗力数据选择不当或材料的使用强度水平低时，增大零件尺寸，会增加零件重量，浪费材料，使热处理效率降低，还会使冶金缺陷增加，安全性反而下降，疲劳强度降低。

■ 结构上应尽量等强度设计，尽力避免或降低应力集中。

在不可能避免的应力集中处，可用局部强度措施来克服零件的薄弱环节。

如：柴油机曲轴圆角过渡处，采用局部滚压强化可以使曲轴疲劳强度显著提高。

■ 考虑组合设计，发挥材料强度潜力。

如：凿岩台车驱动轴，原为整体结构，40Cr调质后花键部分再高频淬火强化，但过渡区经常早期疲劳断裂；后改为组合构件，即花键与轴分开制造，花键采用中频淬火，用法兰与轴连接，寿命提高了两倍。

2、选材

■ 强度、塑性和韧性合理配合。

根据零件受载、工作应力、环境介质及工作温度的不同，以及零件尺寸、结构形状的不同，对材料的强、塑、韧和合理配合要求也不同。

如：按无限寿命设计的柴油机曲轴、连杆，可多用冲抗力、扭-弯复合疲劳强度较高的球磨铸铁代替45#钢；对于冷变形模具钢，在较高冲击能量下，宜选用塑性、韧性较高的弹簧钢。

■ 表面残余应力对疲劳断裂抗力有利，故薄壳淬火零件的疲劳强度反而比全淬透的高。

■ 充分利用合金钢，采用恰当的强化处理工艺，会极大提高零件的失效抗力。

■ 有害微量元素的偏聚，对钢韧性危害甚大。

如Sn、Sb、As、Bi、Pb等微量杂质会增加钢的第二类回火脆性，往往危害大锻件的质量。

3、工艺

■ 采用合理的强化工艺，如：

- a. 中碳钢渗碳或碳氮共渗，应用在凿岩机大钎杆、尾杆；
- b. 高碳钢或渗碳件短时加热淬火，应用在凿岩机活塞、牙轮钻牙爪；
- c. 中碳钢薄壳淬火，应用在铲运机功率输出轴上。

■ 采用复合强化，即热处理加表面冷变形强化：

局部强化克服薄弱环节，大幅度提高零件疲劳强度；滚压强化提高零件的表面失效抗力。