

特种冶炼

冶金工业出版社

特 种 冶 炼

傅 杰 陈恩普
谢继莹 丁 勇 等编著

冶金工业出版社

特 种 冶 炼

傅 杰 陈恩普 等编著
谢继莹 丁 勇

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口 74 号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 14 1/2 字数 382 千字
1982年 8 月第一版 1982年 8 月第一次印刷
印数00,001~2,500册

统一书号: 15062·3851 定价1.85元

前 言

现代化工业技术的迅速发展，特别是随海洋开发、宇航事业及能源开发而出现的现代尖端技术的迅速发展，对特种金属材料（高级合金钢及合金）的品种、产量，尤其是质量提出了越来越高的要求。例如主要使用于航空发动机、舰艇燃气轮机及某些火箭发动机关键部件的高温合金，除要求承受一定的高温作用外，还要能够在氧化性气氛或燃气条件下长期工作，为此，它们必须具备较高的强度、塑性、韧性、持久性能、疲劳性能、蠕变性能、抗氧化性能、长期组织稳定性及其它力学、物理性能和良好的加工性能等等。

为了使合金钢及合金具有所需要的性能，必须保证其具有一定的合金组织结构。而要获得所需要的组织结构，又必须保证其具有一定的化学成分和合理的冶炼（包括浇注）、压力加工、热处理及机械加工工艺。冶炼工艺对合金钢及合金质量具有重要的影响，它决定合金钢及合金成分能否控制在最佳范围，决定合金钢及合金纯洁度的高低和铸态组织的好坏。对于一个从事特种金属材料研制工作的工程技术人员或生产工人来说，掌握有关合金钢及合金特种冶炼的知识是很必要的。

本书着重介绍特种冶炼的基本原理、操作工艺及工艺参数对合金钢和合金质量的影响，并简述特种冶炼的发展动向。全书共分十一章。第一章介绍合金钢及合金质量（包括性能及冶炼质量）评价指标；第二、三章集中论述了涉及到冶炼质量的一些基本原理，并对比不同冶炼条件下冶金过程进行的特点，以便更易于掌握不同冶炼方法的特点；第五章至第十章分别介绍感应炉、真空感应炉电渣炉、真空电弧炉、电子轰击炉及等离子炉熔炼工艺，着重介绍工艺对质量的影响，论述如何选择合适的工艺制度。还介绍了国内外一些工艺参数和操作经验，对某些冶炼质量问题进行了分

析讨论。关于设备,则着重于设备原理、简单构造及类型特点;考虑到真空冶炼在高级合金钢及合金生产中的重要地位及广泛使用,在介绍特冶工艺之前安排了第四章——真空技术;最后一章综合对比不同特冶方法的优缺点,概述了冶炼工艺路线的选择原则及特种冶炼的发展动向,希望使读者在了解了不同冶炼方法的原理及工艺之后,对整个特种冶炼有一个较为全面的了解。

本书是在大冶钢厂教育科的直接支持下编写的。参加编写的有大冶钢厂、长城钢厂三分厂及北京钢铁学院高温合金教研室从事特冶工作的工程技术人员和教师。各章负责编写人为:第一章,徐志超、王迪、傅杰;第二章,傅杰、陈思普、丁勇、陈崇禧、王涌;第三章,傅杰、陈思普;第四章,陈思普、梅洪生、丁勇;第五章,陈思普、梅洪生;第六章,王惠、陈思普;第七章,谢继莹;第八章,丁勇;第九章,胡荣、梅洪生、陈思普;第十章,傅杰;第十一章,谢继莹、傅杰、丁勇。全书由傅杰、谢继莹、陈思普、丁勇负责统编,最后由傅杰审定改稿。

我们在编著本书时力求结合我国具体情况,尽可能地总结国内在特种冶炼方面的经验及科研成果,深入浅出地介绍有关的冶炼原理和不同冶炼方法的工艺特点;在原理和工艺的关系上,力求理论与实践统一;在编排上,始终围绕冶炼质量这个关键问题进行讨论,突出了冶炼工艺对质量的影响。但是,由于水平所限,又缺乏经验,加上时间仓促,本书缺点错误在所难免,敬请读者批评指正。

限于条件,未能将本书借鉴的文献一一刊出,谨在此对诸位原作者致以深切的谢意,并请读者鉴谅!

对帮助我们审稿的诸同志也在此致谢。

编 著 者

1980年6月

目 录

前言

第一章	合金钢及合金质量评价指标	1
第一节	合金钢及合金性能评价指标	1
第二节	合金钢及合金的物理性能	14
第三节	合金钢及合金冶炼质量评价指标	20
第二章	特种冶炼的物理化学过程	29
第一节	元素的氧化与还原	29
第二节	元素的挥发	48
第三节	去气	62
第四节	合金的脱硫与脱磷	79
第五节	非金属夹杂物的去除	92
第三章	合金钢及合金的结晶和铸态组织	109
第一节	钢液结晶过程的一般规律	109
第二节	特种冶炼金属的结晶特点	115
第三节	金属的凝固与收缩	119
第四节	结晶与偏析	123
第五节	温度分布对电渣锭表面质量的影响	131
第四章	真空技术	133
第一节	关于真空的一般概念	133
第二节	真空测量	135
第三节	真空的获得	140
第四节	真空检漏	151
第五节	真空冶炼的优越性	154
第五章	感应炉冶炼	157
第一节	感应炉的工作原理	157
第二节	感应炉坩埚	167
第三节	原材料	184
第四节	感应炉冶炼的配料计算	186

第五节	感应炉冶炼工艺	195
第六章	真空感应炉冶炼	205
第一节	真空感应炉设备概述	205
第二节	真空感应炉冶炼工艺	206
第三节	供电与温度控制	216
第四节	精铸工艺特点	225
第五节	精铸工艺与铸件质量	232
第七章	电渣熔炼	245
第一节	电渣重熔的冶金特点	245
第二节	电渣重熔工艺参数	255
第三节	电渣重熔的自耗电极及渣制度	267
第四节	电渣炉设备	278
第五节	电渣熔铸与有衬电渣炉熔炼	294
第六节	电渣重熔的某些冶炼质量问题	303
第八章	真空电弧重熔	328
第一节	真空电弧重熔的原理、设备结构特点及分类	328
第二节	真空电弧重熔过程中的电弧特性	333
第三节	金属熔滴在弧区中的过渡	343
第四节	真空电弧重熔工艺参数的选择原则	347
第五节	真空电弧重熔操作	361
第六节	真空电弧重熔的安全操作	368
第七节	真空电弧重熔常见的冶炼质量问题	370
第八节	真空电弧重熔的优缺点	377
第九章	电子束炉熔炼	382
第一节	电子束炉的发展及优缺点	382
第二节	电子枪	387
第三节	电子束炉熔炼工艺	394
第四节	电子束炉重熔金属的精炼效果	399
第五节	电子束炉的元素控制与钢锭表面质量	402
第十章	等离子熔炼	404
第一节	等离子电弧炉 (PAF)	404
第二节	等离子感应炉 (PIF)	412

第三节	等离子电弧重熔 (PAR)	414
第四节	等离子电子束重熔 (PEB)	417
第五节	等离子熔炼技术的发展及安全防护	420
第十一章	冶炼工艺路线的选择及特种冶炼的发展动向	421
第一节	合金钢及合金冶炼工艺路线	421
第二节	不同冶炼工艺路线对合金钢及合金组织性能的影响	424
第三节	不同冶炼方法的优缺点对比	436
第四节	冶炼工艺路线选择原则	438
第五节	特种冶炼的发展动向	441

第一章 合金钢及合金质量评价指标

合金钢及合金质量的好坏，最终看它们能否经受住使用条件的考验。但是，材料使用前，用户要求材料达到一定的指标，即技术标准，它们的试验条件须与使用条件相近。因为任何金属材料的性能都是金属材料的成分—工艺—组织结构相互关联的最后反映，对于冶炼工作者来说，了解影响材料性能的冶炼质量评价指标，显然具有十分重要的意义。冶炼质量取决于冶炼方法及工艺过程，因此，掌握冶炼质量评价指标，乃是正确选择冶炼工艺路线，判定合理的工艺过程以保证材料性能的必要条件。本章主要介绍合金钢及合金的使用要求及性能（力学性能、抗氧化性能及其它物理性能）评价指标和冶炼质量评价指标。

第一节 合金钢及合金性能评价指标

由于任何合金钢或合金都是在一定应力、温度和气氛（或介质）条件下使用，因此它们的性能评价指标基本上包括两类，即力学性能指标和抗氧化（或介质腐蚀）性能指标。不同的合金钢或合金由于具体使用条件的差异，对这些指标的要求是不同的。鉴于温度的作用会使合金钢及合金的使用条件恶化，又提出了高温性能、常温性能和超低温性能指标，而在高温下使用的钢或合金由于使用期限要求不同，又有高温长时性能和高温短时性能之分。

显然，不同的合金钢及合金所处的使用条件不同，因此对它们提出的成分范围、冶炼方法、冶炼工艺、加工工艺、热处理工艺及性能指标都有差异，不同的材料有不同的技术条件。

本节主要介绍普遍的综合的评价指标，分常温力学性能指标，高温力学性能指标和抗氧化性能指标。

一、常温力学性能指标

1. 抗拉强度和塑性

拉力试验是对合金钢或合金通常进行的一种普遍的、基本的试验。这种试验可以描述金属材料在短时间内外加应力在单方向上不断增加时材料的强度和变形性能。工程设计和材料的使用在很多情况下是直接以拉力试验结果为依据的，在其它场合也往往作为重要参数以及钢或合金生产检验中的判定依据。

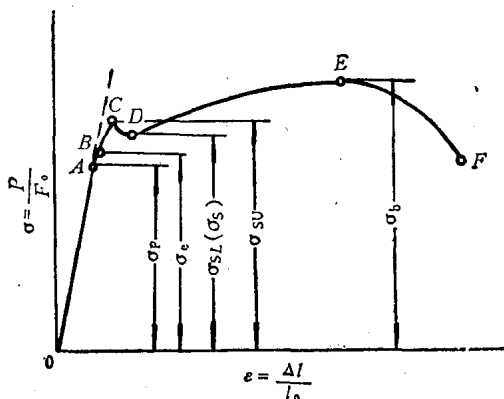


图 1-1 典型拉伸曲线

F_0 —试样原横截面积； l_0 —试样原标距长度

从合金钢及合金的典型拉伸曲线（图1-1）上可以看到拉力试验的基本意义和在工程设计上的实际应用。拉伸曲线可分为五个阶段：

OA：比例阶段。此时拉力与变形成正比，变形完全呈弹性，负荷卸除后，试样可恢复原状；

AB：弹性阶段。此时拉力与变形不成正比，变形是弹性的；

CD：屈服阶段。此时拉力不增或增的很少或降低，却产生了不能恢复的塑性变形；

DE：强化阶段。随应力 σ 的不断增大，变形 ϵ 不断增大，是均匀塑性变形阶段；

EF：颈缩阶段（断裂阶段）。此时试样所承受的总负荷 P 不

断减小, $\sigma = \frac{p}{F_0}$ 也不断减小, 不均匀变形产生并导致断裂。

由此可得出下述拉伸性能指标:

比例极限 σ_p : 表示拉力与变形成正比的最大应力点, 超过此点, 力与变形不成正比。

弹性极限 σ_e : 表示拉力与变形成弹性关系的最后一点, 超过此点变形不能恢复将成为塑性变形。

屈服极限 σ_s : 这是表示材料塑性变形开始时的抗力指标, 又称屈服点。 σ_{su} 叫上屈服点, σ_{sl} 叫下屈服点。通常以下屈服点代表 σ_s 。

抗拉强度 σ_b : 它表示材料对最大均匀塑性变形的抗力, 超过此点便产生大量的局部集中塑性变形而导致断裂。

延伸率 δ : 表示材料在静负荷下沿拉应力方向产生塑性变形能力的大小。

断面收缩率 ψ : 表示材料在静负荷下垂直拉伸方向产生的塑性收缩能力的大小。

不同的钢或合金, 在不同的使用条件下对这些指标的要求是不同的。显然象弹簧钢, 其弹性极限就成为重要的指标; 而对大多数钢或合金而言, 抗拉强度成为重要评价指标的原因就在于它是抵抗塑性变形的能力, 真正表示了材料的强度。这一指标的高低往往和材料是否容易断裂联系到一起, 许多超高强度材料的发展正是针对这一指标而来的。当某些材料要求在不发生塑性变形条件下使用时, 显然屈服点就是重要的评价指标。如航空喷气发动机为了提高其工作效率, 要求涡轮壳体和涡轮之间的间隙越小越好, 为此要求其涡轮盘在使用过程中不产生塑性变形, 即不胀大, 这就要求从发动机启动到发动机处于正常转速时的拉伸应力不超过屈服点, 显然 σ_s 就成为这种材料的重要评价指标之一。

然而一味追求强度指标而忽视塑性指标 (δ 、 ψ) 有时并不能达到预期的目的, 当一种材料的塑性指标很低时, 即使强度指标很高, 也会导致过早的断裂而成为脆性材料, 一般称这种现象为

强度和塑性不配合，也就是说在拉伸过程中裂纹的产生和发展，直至裂纹的连接到材料断裂都不能通过塑性变形来松弛。因此在评价一个材料的性能时既要看它的强度指标又要看其塑性指标，有时为了获得良好的综合性能甚至还要牺牲部分强度指标而获得较好的塑性指标。从拉伸性能来看通常注意的是 σ_b 、 σ_s 、 δ 及 ψ 等四个指标。

2. 冲击性能

最一般的冲击现象如打桩，重锤从某一高度落到桩子的顶端，锤几乎在瞬间就停止运动。又如锻锤、冲床、铆钉枪等都是用产生冲击载荷进行加工的机械。可见冲击在生产实践活动中乃是很常见的加工方式。

冲击载荷是一种动载荷，冲击载荷与静载荷之间的差别主要是加荷速度不同。而加荷速度的差别会造成材料变形速度的差别和材料塑性指标变化的不同。在工程上所用的材料和构件，大部分要承受冲击陡震的作用，因此单用静力试验已不能满足工程的需要，从而提出以冲击性能作为材料或构件的补充性能。

一般材料的冲击韧性用相对韧度来表示，把试样所吸收的功 A_K 除以试样切口处横断面积 F ，即可求出冲击韧性 a_K ，以公斤·米/厘米²为单位。即：

$$a_K = A_K / F$$

冲击韧性既然是利用冲击机上读到的冲击功 A_K 除以截面积 F 而得到的，冲击韧性 a_K 本身的物理意义就非常不明确，因为试样所吸收的功，并不是为冲击试样这一断面所吸收。实际上，冲击功 A_K 是为试样缺口附近参加变形的体积所吸收，而参加变形的体积是无法测量的。另外就是在参加变形的同一断面上，每部分的变形也不一致，所以实际上冲击韧性 a_K 本身并没有物理意义。仅仅由于开始时人们象对待强度指标那样看待它，以后成了习惯，现在的冲击韧性仍以冲击功除以面积。由于冲击功 A_K 是在一定的条件下即在一定几何形状下试样所吸收的功，因此，目前有一种趋势，就是注明条件，记下冲击功 A_K 。

长期使用中发现,冲击试验在检验材料的内部缺陷、脆性转化趋势和工艺质量方面具有比其它试验方法更为敏感的优点。对一般钢冲击试验常用来检验晶粒大小、内部裂纹、白点、夹杂、特别是回火脆性、过热、过烧等。而回火脆性只能用这种方法来检验,任何静力试验是不能显示出回火脆性的。对合金钢说来,例如对耐热钢或高温合金,冲击试验还可用来反映材料在长时使用后内部组织结构的变化,是否有脆性相产生,材料是否有脆化倾向等。对船舶用钢、桥梁用钢、制冷设备及石油化工设备用钢或在野外露天工作的材料,都必须考虑低温条件的冷脆情况,这也需要用冲击性能来鉴定。而对有可能一次承载即破坏的零件如炮弹、防弹装甲、高压容器等,冲击值显然是一个极重要的性能指标。

3. 硬度

硬度试验是最简单、最方便、使用最多的一种力学性能试验。硬度作为材料的一种性能,是表示固体表面上,在一个小的或很小的范围内抵抗弹性变形、塑性变形及破裂等的能力,实际是表征材料性能的一个综合的物理量。通常进行的压入法硬度试验就是表征材料抵抗某一特定的外来压入物的塑性变形能力。显然,材料的塑性变形抗力越高,则它在抵抗外来压入物时所产生的塑性变形就越小。

硬度与合金的化学成分、组织结构有很大关系。虽然硬度不能表示材料的其它机械性能,但硬度与其它机械性能(例如强度)之间有一定的关系,可通过这样的关系来获得和比较其它性能。这在普通合金钢中已获得普遍的应用。

但是硬度更为重要的作用乃是用来检查材料的成分、组织结构是否正常。一般合金钢或合金在热处理后进行硬度检验,就是为了检验淬火、回火工艺是否正常,也就是检验是否获得了正常的组织结构。对耐热钢或高温合金通常也用硬度作为成分和组织转变是否正常的判定依据。

常用的硬度试验方法有洛氏(RC、RB)、布氏(HB)和维

氏 (HV) 三种, 一般合金钢因其硬度较高多用洛氏硬度; 而某些合金则因其硬度较低多用 HB 或 HV。然而这种分法并没有严格的界限。

4. 疲劳性能

工程实践证明, 结构和零部件所受载荷不可能是完全静止的, 绝大部分载荷随时间而变化。随时间不同方向变化的载荷称为交变载荷。一个转动轴在交变载荷的作用下 (因轴在转动时应力反复变化具有周期性, 有时受拉有时受压), 轴本身并没有发生很大的塑性变形即发生断裂, 这种现象一般称为疲劳断裂。

疲劳可定义为在交变应力作用下, 材料 (零部件或结构) 的失效行为。机械零部件的早期断裂多属疲劳断裂。

疲劳断裂的特点是断裂时最大疲劳应力均低于强度极限, 甚至有时还低于弹性极限。疲劳断裂既然发生在应力 (或应变) 反复了一定次数之后, 这样, 材料发生疲劳断裂需要一定的时间, 或者说材料具有一定的疲劳寿命。因此疲劳实际上是一个疲劳裂纹发生和发展的过程。疲劳断裂在宏观上表现为无明显塑性变形的脆性断裂。

在研究金属的疲劳曲线时得知, 疲劳极限有两种类型。一种如图1-2所示, 从图1-2中曲线可以看出, 随着疲劳应力 σ_{-1} 的降低, 破断寿命 N 增大, 当应力降至一定程度后, $\sigma_{-1}-N$ 曲线上出现水平段, 此水平段所对应的应力称为材料的疲劳极限 (或称自然疲劳极限)。大多数碳钢、合金结构钢等的疲劳曲线在 $N=10^7$ 之后都变为水平段, 只是随钢种不同, 水平段对应的应力值不同。因此就把 $N=10^7$ 循环而不断裂的最大应力定为疲劳极限, 在对称循环下记为 σ_{-1} 。第二种疲劳曲线如图1-3所示。有色金属、超高强度钢或高温合金以及在腐蚀介质中工作的几乎所有材料, 其疲劳曲线即 $\sigma_{-1}-N$ 曲线上不出现水平段, 而是随循环次数的增加应力不断降低, 因此, 取一定的循环次数所对应的应力值为疲劳极限, 它称为条件疲劳极限。根据实际使用情况, 一般取 $N=10^7$ 对应的应力值为疲劳极限。

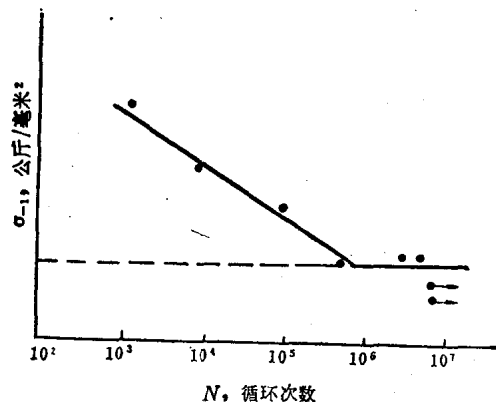


图 1-2 具有自然疲劳极限的疲劳曲线

●—未断试样

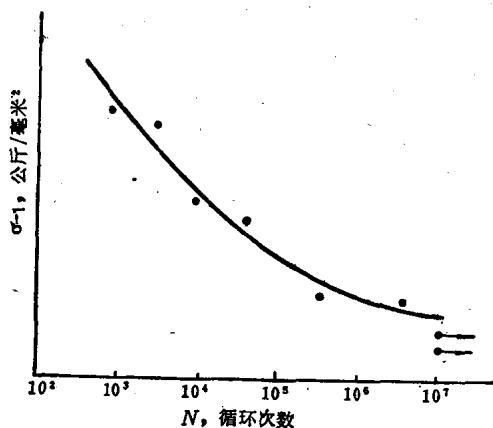


图 1-3 没有自然疲劳极限的疲劳曲线

●—未断试样

上述疲劳极限属于旋转变曲疲劳极限。实际工程中构件或零部件不仅有旋转变曲，同时还受扭转和拉压应力，因而有复合疲劳。此外，由于温度及 N 的不同，有室温和高温疲劳、热疲劳以及高周和低周大应力疲劳。显然这些不同的疲劳对应着不同的零部件工作条件，因此其评价指标是不同的。例如，由于同一零件各处温度不同引起各处膨胀数值不同而产生内应力，这种内应力

因温度循环变化而积累引起零件破坏，称热疲劳或冷热疲劳，以切口试样上出现规定的裂纹长度所对应的循环次数为指标。又如按载荷的循环次数来分， $N > 10^4 \sim 10^5$ 时人们认为这是高周疲劳（旋转疲劳），而 $N < 10^4 \sim 10^5$ 时认为是低周疲劳。实际上这种区分并不是十分严格的。虽然如此，但两者的概念是完全不同的，高周疲劳对应的是材料的强度，而低周大应力疲劳对应的是材料的塑性。显然，其评价指标是有差异的。

5. 缺口敏感性

带有圆孔、齿槽、拐角等缺口的机器部件是相当多的。由于缺口的存在给材料的强度带来了影响。对高强度钢或高温合金来说，表面质量对使用强度有重要影响，即使是一条划痕，也可能成为裂缝的发源地，并由此导致材料的破坏。这是因为在缺口处有应力集中造成的。不同材料或同种材料在不同的热处理状态下对应力集中的敏感性是不同的，为确保材料的安全使用，必须对带断口的试样进行试验，即进行缺口敏感试验。这也说明为什么对拉伸、疲劳试样等的表面要有一定的光洁度要求。

图1-4为平板上的一个椭圆孔所造成的应力集中。由图可见，缺口附近的应力突然升高并集中在一个局部地区。根据弹性力学

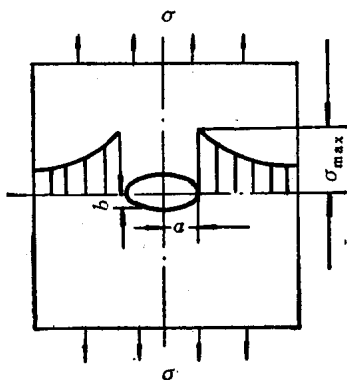


图 1-4 在平板上的椭圆孔所产生的应力集中

计算的结果，在缺口处最大应力

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right)$$

式中 σ ——外加应力；
 b ——孔的短半轴；
 a ——孔的长半轴。

对圆孔来说 $a = b = R$ 则 $\sigma_{\max} = 3\sigma$ ，即圆孔附近的最大应力为外加应力的 3 倍。如果这个孔很扁（如一条裂纹）即 $a/b \rightarrow \infty$ ，则 $\sigma_{\max}$ 就很大了。显然，此时应力集中非常严重，是促成裂纹形成和发展的重要原因。

对疲劳强度的缺口敏感度

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

式中 q ——材料的疲劳缺口敏感度；

K_f ——有效应力集中系数， $K_f = \frac{\sigma - 1}{\sigma_{-1}^H}$ ，其中 σ_{-1} 为光滑试样疲劳极限， σ_{-1}^H 为材料缺口试样的疲劳极限；

K_t ——理论应力集中系数（可查表）。

对持久强度，其缺口敏感系数为

$$R = \tau_{\text{缺}} / \tau_{\text{光}}$$

式中 R ——持久强度缺口敏感系数；

$\tau_{\text{缺}}$ ——缺口持久试样断裂时间；

$\tau_{\text{光}}$ ——光滑持久试样的断裂时间。

当 $R > 1$ 时说明材料没有缺口敏感性。

对塑性良好的材料，即使有较大的应力集中也不一定造成危害，因局部的应力集中会由于局部变形使应力重新分布，将集中的应力松弛下来。对脆性材料来说应力集中如不能由变形来松弛，便会产生裂纹并使其不断扩大以至断裂，所以高强度材料必须做缺口敏感试验。而对疲劳来说不管是塑性还是脆性材料应力集中的危害总是很大的，缺口疲劳的数值总是低于光滑疲劳。