

机械工程材料丛书

高强度及超高强度钢

万愉如 许昌淦 编

本书介绍了近代机械工程中有关高强度和高强度钢的设计原则、化学成分、处理状态、工艺和使用性能等有关问题。本书着重于材料的使用，以帮助工程技术人员选择高强度和超高强度钢为最佳材料和工艺方案，满足设计、加工和使用的要求。本书一般性地涉及钢的强韧化机理。

本书的适用范围及读者对象是，与机械工程有关的工程技术人员，也可供工科院校有关专业师生作为扩大知识领域的教学参考书之用。

高强度及超高强度钢

万儵如 许昌淦 编

*

责任编辑：张谔玲

封面设计：刘代

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄裕里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张7⁵/₈·字数166千字

1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷

印数 0,001—2,400 定价：2.80元

*

ISBN 7-111-00039-0/TG·22

前 言

目前我国从事能源、铁道、交通、机械、航空、宇航、造船、兵工、建筑、轻工、冶金、石油及地质等有关行业的大批科技人员、管理干部都经常遇到使用及选择材料的问题。本书向在上述领域内工作的同志介绍近代机械工程中有关高强度和超高强度钢的设计原则、化学成分、处理状态、工艺和使用性能等有关问题，以助于选择最佳材料和工艺方案，满足设计、加工、使用的要求。

本书的特点着重于材料的使用，以满足工程实际应用中选材的具体要求，仅一般地涉及金属材料的有关理论。所以，主要是向读者介绍各种高强度钢和超高强度钢的使用性能和工艺性能。考虑到不专门进行材料研究工作的工程技术人员并不特别需要金属的强韧化原理和钢的相变机制及组织结构学等理论，故这方面内容在本书中讨论较少。本书可供上述与机械工程有关行业中的工程技术人员及工科院校有关专业师生作为扩大知识领域和教学参考之用。

本书共分五章，即第一章：绪论；第二章：高强度和超高强度钢的设计；第三章：高强度和超高强度钢的使用性能；第四章：高强度和超高强度钢的加工性能；第五章：其他类型高强度钢。其中第一、四、五章由许昌淦编写，第二、三章由万修如编写。全书经北京机械工业管理学院陶岚琴同志审阅。为便于读者进一步了解有关的细节，每章末均列有主要参考文献目录。书中引用了兄弟单位发表的研究数据、图表，在编写过程中得到有关同志的帮助，谨在此表示衷心的感谢。

目 录

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 第一章 绪论..... | f |
| 参考文献..... | 8 |
| 第二章 高强度和超高强度钢的设计..... | 10 |
| § 2-1 钢的强韧化原理 | 10 |
| § 2-2 合金元素和组织对钢强韧化的影响 | 25 |
| § 2-3 高强度及超高强度钢的设计原则 | 33 |
| 参考文献..... | 39 |
| 第三章 高强度钢和超高强度钢的使用性能 | 41 |
| § 3-1 机械零件或构件的典型使用要求..... | 41 |
| § 3-2 工业上常用的高强度钢 | 49 |
| § 3-3 工业上常用的超高强度钢 | 64 |
| § 3-4 高强度和超高强度钢的疲劳性能 | 97 |
| § 3-5 高强度钢的缺口韧性、低温性能与冷脆性..... | 108 |
| § 3-6 超高强度钢的断裂性能..... | 116 |
| § 3-7 超高强度钢的疲劳裂纹扩展性能与断裂韧性 的关系..... | 131 |
| § 3-8 超高强度钢的应力腐蚀..... | 135 |
| § 3-9 氢脆..... | 144 |
| § 3-10 高温蠕变 | 152 |
| § 3-11 高强度钢丝 | 159 |
| 参考文献 | 160 |
| 第四章 高强度和超高强度钢的加工性能..... | 163 |
| § 4-1 高强度钢的加工过程与工艺性能..... | 163 |
| § 4-2 高强度钢的冶炼和铸造性能..... | 164 |
| § 4-3 高强度钢的压力加工性能..... | 174 |
| § 4-4 高强度钢的热处理工艺性能..... | 181 |

| | |
|------------------------|-----|
| § 4-5 高强度钢的焊接性能..... | 197 |
| § 4-6 高强度钢的切削加工性能..... | 206 |
| § 4-7 高强度钢的抗蚀处理性能..... | 211 |
| 参考文献..... | 213 |
| 第五章 其他类型高强度钢..... | 215 |
| § 5-1 硼钢..... | 215 |
| § 5-2 贝氏体钢..... | 220 |
| § 5-3 微合金化钢..... | 223 |
| § 5-4 双相钢..... | 224 |
| § 5-5 非晶态金属与微晶合金..... | 230 |
| 参考文献..... | 235 |

第一章 绪 论

钢铁是国民经济建设的物质基础，全世界每年消耗量已达7亿吨以上^[1]。大量的房屋建筑、桥梁、铁道、机械设备、动力装置、交通工具、生活用品等，都离不开钢铁材料。随着现代科学技术的迅速发展，要求钢材的承载能力不断地提高，即要求具有更高强度的钢种。许多新设计的高效能设备和装置，只有在减轻重量的条件下能够找到具有最大承载能力的材料，才可能变为现实。研究比强度和比刚度高的钢种是解决现代科技发展问题的关键。例如各种交通工具都需要动力装置驱动；因此，近代研制的高速汽车、火车、鱼雷快艇、气垫船、巨型旅客机、航天飞机等，都要求尽可能地减轻自重以增加有效负荷，提高运行速度，节省燃料消耗。这就必须采用比强度、比刚度高的材料。高强度钢在这种形势下应运而生。显然，在比强度与比刚度提高的同时，生产成本会随之而增高，生产工艺也更复杂。这就要在使用高强度钢减轻结构件重量时，综合考虑生产成本及由此而带来其他的效益。例如英国航空工业在1947年以前使用的钢材，其最高抗拉强度在1450MPa以下；而在1970年所选用的钢材，其抗拉强度则提高至2150MPa^[2]。又如近代航空发动机的发展，已使得JT9D型涡喷发动机完全取代了20多年前的JT3D型发动机，使燃油消耗率降低一半以上，推重比明显地提高，迎风面积增加，最高工作温度增至1465K；而发动机的返修时间由100h延长至12000h以上，发动机寿命提高至30000h。这些效果与新发动机中80%的零部件已换用新型更高性能的材料

料，其中也包括应用了新型的高强度钢有关⁽³⁾。

这种趋势不仅反映在新兴的航空和宇航工业中，在其他工业中也是如此。例如建筑构件广泛使用的高强度低合金钢，采用了各种形变热处理的方法提高其强韧性。另外，控制轧制、预应变时效、冷作硬化等新工艺也在广泛推广应用，使得高强度钢的应用范围正在日益扩大。

高强度钢顾名思义，是指强度较普通碳钢要高的一类钢；但仔细斟酌起来，其定义范围是相当含糊的。就碳钢而言，不仅含碳量影响到钢的强度。例如，低碳钢的屈服强度可以达到100MPa；而高、中碳钢则达到500~600MPa；而且，热处理状态不同，钢的屈服强度变化的范围更广。在机械制造用的钢中，有人将屈服强度达到1000MPa以上的钢称为高强度钢，达到1380MPa以上的钢称为超高强度钢。这种人为划分的界限是很不精确的，也不可能照顾到用途不同的各个钢种。例如，不经热处理强化使用的建筑构件钢，屈服强度低于1000MPa，达到500~600MPa时，即是高强度钢了。屈服强度完全不能与经热处理强化的机械制造钢相比较。所以，一般而言，根据不同的应用条件，在其原有的基础上，经过调整化学成分或采用强化处理工艺，使强度有显著提高的钢种，在广义上都可以称之为高强度钢⁽⁴⁾。不同类型和不同使用条件下的高强度钢，其强度值可以有相当大的差别，需要具体情况具体分析。

根据不同的需要，钢有各种不同的分类方法，其中不少是互相重复的。例如，对于各个工业部门，习惯采用按产品对象分类，或称之为专业用钢⁽⁵⁾。即分为汽车、拖拉机及农用柴油机用钢，锅炉用钢，汽轮机、柴油机用钢，电机与水轮机用钢，重型及矿山机械用钢，化工设备用钢，铁道用

钢，农机具用钢，金属切削机床用钢，滚动轴承用钢，工具用钢等。显然，不同的使用对象，当其使用要求相同时，完全可以选用同一钢种。专业用钢分类法对具体工作有较强的指导性，但同时也将不同的产品隔离开来，不利于互相引用和借鉴。

更一般的分类方法是按以下三个方面区分。

1. 按钢的化学成分分类：大致可分为碳钢及合金钢两大类。碳钢还可分为低碳钢、中碳钢和高碳钢；合金钢则按其中包含的主要合金组元分为镍钢、铬钢、锰钢、铬钼钢等。

2. 按钢的成型方法分类：按钢的半成品最终成型方法分为热轧、冷轧（冷拉）钢。也有的追溯到钢的熔炼浇注方法，按冶炼炉型分为平炉钢、转炉钢、电炉钢（电弧炉、电渣炉、真空感应炉、真空自耗炉）等。也有考虑钢脱氧方法不同而区分为沸腾钢、压盖沸腾钢、半镇静钢、镇静钢等。

3. 按钢的产品形状分类：可区分为棒材、板材、带材、箔材、管材、型材等。这种分类法适用于钢材的选择和供应。

总之，可以从不同的角度将种类繁多、性能各异的钢进行分类。但从结构设计的角度来看，分类中最重要的指标是各种机械性能。从钢的强韧性方面，可以将其区分为普通钢、高强度钢和超高强度钢。下面讨论后两者。

1. 高强度钢 这是一类应用广泛的钢种，强度值在较大范围内变化。美国金属手册^[6]甚至将普通碳钢、建筑用的高强度低合金钢都包括在高强度钢范围之内。为了适应我国历史情况，以下限于讨论屈服强度在1000MPa附近的高强度钢（其他钢种仅在部分篇幅内提及）。

这类钢的含碳量在(0.08~0.65)%之间，含合金元素总量不超过5%，属低合金钢。少数钢中合金元素含量达到

(5~10)%, 属中合金钢。从使用范围来看, 高强度钢包括调质钢、低碳马氏体钢、渗碳钢、氮化钢、弹簧钢等。

2. 超高强度钢 这是在高强度钢的基础上, 进一步调整合金元素和改进工艺, 增加钢中碳和合金元素的含量, 使屈服强度达到1380MPa以上的一类钢。根据合金元素含量的多少, 又可分为中碳低合金钢[含(0.30~0.50)%C, 5%以下的合金元素]、中合金空淬钢[含(0.25~0.55)%C, (5~10)%的合金元素]和高合金超高强度钢(合金元素含量在10%以上)。

选择高强度钢、超高强度钢的判据首先是强度的大小。结构材料主要要求在使用条件下承载能力强。但是各种构件和零件的工作条件是各不相同的, 因此对强度的要求不仅是指室温下静载的屈服强度、抗拉强度、塑性以及冲击韧性, 同时还要求各种条件下的疲劳强度、蠕变性能、持久强度、缺口强度等各种综合的机械性能。在许多使用环境中, 物理性能与化学性能也是不可忽视的。为了实现大规模生产, 稳定地供应原材料, 还要求良好的加工工艺性能和经济性。为了进行工业性的稳定生产, 选择一种最佳的高强度钢或超高强度钢, 大致要考虑以下五个方面:

1. 结合使用条件选择综合机械性能良好的钢种。一般钢厂生产和提供的半成品或毛坯, 都附有钢的成分和室温常规机械性能的检验数据, 这只是提供了最基本的技术资料。对于具体的构件或零件, 选材时还必须分析其使用条件对有关机械性能的要求。例如选择用做齿轮的材料, 除考虑齿部要传递弯矩和扭矩, 应有较高的抗弯和抗剪的强度极限、屈服强度、塑性外, 考虑到齿轮负荷的冲击性, 则要求一定的韧性; 考虑到齿轮负荷的周期性变化, 应要求较高的疲劳强度。对于低周疲劳失稳的齿轮, 重点要提高钢的韧性。当采

用渗碳齿轮时，可以用将渗碳表层硬度降至HRC55以下的方法，利用表层淬火时得到(15~30)%残留奥氏体来提高韧性；也可利用含镍量较高的钢种代替含镍量较低的渗碳钢。美国多次使用SAE4320或SAE9310（含镍量分别为3.3%和1.8%）来代替SAE8625（含镍0.5%），成功地解决了齿轮部件因韧性不足而早期断裂失效的问题。此外，齿轮啮合时，轮齿齿面互相接触、挤压和滑动，表面可能磨损和接触疲劳损伤。因而，齿部表层应有较高的硬度和抗磨损、抗接触疲劳的组织。齿轮类零件要求表层硬度高而中心韧性好，能有效地防止接触疲劳所产生的麻点磨耗。加工这类零件的两种典型方案是：

(1) 选用中碳钢或低淬透性钢，应用局部表面淬火（高、中频感应淬火，火焰淬火）。

(2) 选用低碳钢或低碳合金钢，采用化学热处理（渗碳、氰化、氮化）方法进行表面硬化。

不同使用条件下的零件，其综合机械性能也有不同的内容。不能用简单的室温常规机械性能来代替复杂的使用条件下的机械性能。

2. 考虑到零件或构件一般需要大量、成批地生产，同时，实际生产现场条件比研究实验室要差得多。因此，要考虑钢种的各种加工性能，即加工的难易程度，也要研究加工过程对组织和性能的影响。例如大型建筑及桥梁用钢，大多是由半成品钢材焊接而成，不进行任何焊前或焊后热处理。这种情况下使用的高强度低合金钢，含碳量超过0.20%，或加入的合金元素量较多时，则焊接热影响区空冷至室温即可能形成部分马氏体，使材料明显脆化，极易产生焊接裂纹。发生这种情况即因材料的工艺性能太差而造成的。例如生产一种

焊接组合件，将直径为31.7mm的加硫中碳易削钢45Mn (AISI 1144)的螺栓焊接到低碳钢管上，产生了很严重的焊接内裂纹。经分析是螺栓钢中碳高及硫、锰量过多所造成的。改用低碳合金钢SAE8620后，此螺栓经水淬回火处理后，焊接时即不再出现焊接裂纹了^[1]。

3. 要核算产品在经济上的合理性。提高钢的比刚度和比强度，最一般的方法是提高钢中碳及合金元素的含量。这除了提高钢的原材料成本以外，同时还使钢的工艺性能恶化，增加冶炼、浇注、加工等各个工艺环节的消耗，提高钢材的总成本。在这种情况下，要计算由于提高比强度所带来的减轻结构、节省能源的好处，是否被原材料和加工费增加所抵消，即必须进行产品的全面成本核算，才能确定这种提高性能的措施是否得当，是否值得采用。虽然这种工作是很复杂的，但在计算技术发达的今天，可以用计算机去完成。例如，西欧联合生产的大型旅客机“空中列车”上，对起落架用钢种进行选择和改进，经济核算的结果，如表1-1所示。^[2]

表1-1 制作“空中列车”起落架用的两种钢经济指标对比

| 钢 种 | 熔炼工艺 | 钢 坯 每 0.45kg 售 价 | 锻件每 件售价 | 起落架每 件重量 | 每架成本 |
|--------------------|--------------|------------------------|------------|-------------|---------|
| 原来使用S132 | 常压熔炼 | 8辨士 | 25英镑 | 1732kg | 285.0英镑 |
| 改用35NCD16 或300M | 自耗电极 真空熔炼 | 29辨士 | 70英镑 | 154 kg | 33000英镑 |

从表1-1中可知，当起落架用钢由S132改为35NCD16 (即300M) 时，每架飞机上起落架可减轻187kg，占原重的

10.8%；当改用35NCD16时，半成品售价提高4500英磅，相当于增价15.8%。制造飞机的成本价格提高了，但从飞机航行时因自重减轻而增加负荷能力及节省动力能源等方面来考虑，采用新钢种是合理的。

4. 考虑使用时的环境条件，要求材料有相应的化学稳定性，即防止使用时因各种锈蚀或氧化而失效。实际上，没有一种材料在抗蚀性是万能的。在不同的介质环境中，选择不同的材料来适应抗蚀性的要求是现实可行的。例如以铁素体为基的钢，在一般介质中的抗蚀性低于奥氏体钢，但在含有氯离子的介质中，则奥氏体钢更容易受到点蚀，应避免选用。又如合成氨生产设备，以及与氢、氮、氨等各种介质接触的各种设备，都受到强烈的侵蚀，极易产生严重的脆性破坏事故。为此发展一类在高温下抵抗氢、氮侵蚀的微碳纯铁和10MoWVNb钢。

5. 根据零件或构件的工作条件，考虑所选钢种的物理性能是否符合要求。结构材料虽然与功能材料不同，主要要求的着眼点不在物理性能，但在一定的条件下，物理性能却是不能不考虑的。例如电机用钢中的定子铁心和转子铁心，既是结构材料，需要有一定的机械性能，同时又是电能转换的部件，必须有良好的导磁性能和低的磁滞损耗。又如铁素体钢的导热系数大于奥氏体钢，而热膨胀系数又小于奥氏体钢。因此，在急冷急热的环境下工作的零件或构件，选用铁素体钢在使用时产生的热应力远小于奥氏体钢，这是汽轮机和内燃机中广泛使用1Cr13型耐热钢的原因。

显然，选材时对这几方面的要求并不是均等地看待的。一般要根据零件或构件实际使用条件的要求，具体地分析各种性能的要求，找出主次关系，据此选用最恰当的材

料。常常要经过初选、核算、精选、再核算，最后确定，这样反复比较、计算的过程。国外已建立类似的程序，通过计算机完成这些工作^[1]。

对于某些有特殊要求的零件和构件，则材料性能要求超出以上范围。例如原子能装置用的结构材料，除了应满足一般结构材料的要求以外，还需要材料在长期辐照作用下脆化的倾向小，俘获热中子的能力小等特殊性能。制造宇宙飞行航空器的结构材料，则要求能抵抗宇宙射线的辐射，耐宇宙尘的磨损，并且穿过大气层时要有足够的隔热能力。这些要求，往往单纯靠金属（或钢）本身是很难达到的，常常要采取表面保护或特殊防护的措施，有时要借助于复合材料。

高强度钢和超高强度钢是正在迅速发展的一类工程材料。目前世界各国正在生产和研制成千上万种不同牌号、不同规格的高强度钢，以满足日益发展的科学技术所提出的多方面的要求。世界市场上经常有新的高强度和超高强度钢以商品形式大量供应给使用者。实验室内也在大量设计和试验各种性能的新钢种，并采用各种新工艺来提高原有钢种的性能。机械设计师、制造工程师以及各方面的使用者，只有根据高强度和超高强度钢强韧化的基本原理，透彻分析零件和构件的工作条件，不断掌握各种新钢种发展动向，才能选择好最适用的钢种。随着新技术革命的发展，不久将会应用电子计算机作为选择钢种的工具。

参 考 文 献

- [1] Kern, R. F.: *Steel Selection; A Guide for Improving Performance and Profits*, A Wiley-Interscience Pub., 1979 .

- [2] Imrie, W.M.: *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society* 2 1971.
- [3] Bradley, E.F. and Donachie, M. J., *M.E.Q.*, V.15, N.2, 5, P55~59, 1975.
- [4] 冶金工业部钢铁研究院、一机部机械研究院机电研究所, 合金钢手册, 下册第三分册, 冶金工业出版社, 1979.
- [5] *Metal Handbook I*, Ninth Ed., ASM, 1981.
- [6] Johnson, J. and Shelton, C. H.: *Progress Report on Nickel Carbide Steels*, *Metal Progress*, 104, N.7, 37, 1973.
- [7] Ericsson, T. , *Computers in Material Technology*, Pergamon Press, P 83~182, 1981.

第二章 高强度和超高强度钢的设计

§ 2 - 1 钢的强韧化原理

工业上使用的金属材料中要算钢铁应用最广，品种最多和数量最大。用作结构材料的高强度钢要求既有高的强度又有较好的韧性。强度指的是材料对塑性变形和断裂的抗力，它是使材料变形或断裂所需应力的度量。产生塑性变形所需要的应力越高，强度也越高。韧性是指材料对断裂的抗力，或者说是材料断裂时所需能量的度量。在强度相等的情况下，塑性材料断裂时所需要的能量比脆性材料高，因此它的韧性也比脆性材料高。一般来说，使材料强度（主要是屈服强度）提高的过程为强化；使材料韧性提高或在强度提高的同时韧性不降低或降低较少的过程叫韧化。由于种种原因，人们对韧化的研究远比强化要少得多，加之钢材合金化的主要作用是强化，所以本节首先介绍强化，然后再讨论韧化。

一、钢的强化

众所周知，金属材料的强化可以通过两个基本途径来实现：一是制成无缺陷的完整晶体（例如晶须），使金属的强度接近理论强度；二是在有缺陷的金属晶体中设法阻止位错运动。由于晶须的强度极不稳定，当有一定数量位错存在时，强度就急剧下降，故工程上多采用第二种强化途径，即通过在晶体中引入大量缺陷及阻止位错运动来提高强度。由于实际晶体中的缺陷同时破坏了原子键合强度的发挥，因此目前工业材料的强度水平远未达到金属可能有的最大强度。

为了使钢材强化，工业上除采用合金化和热处理等手段

以外，应变强化也是常用的一种强化方法。对于不经热处理并且使用温度远低于材料再结晶温度的金属材料，常采用冷加工手段使材料通过应变强化来提高强度。典型例子是高强度冷拉钢丝，它是工业上强度最高的钢铁制品(σ_s 可达近4000MPa)。此外形变热处理也是很重要的一种强化手段。图2-1表明形变热处理和冷拔高碳钢丝的强度已接近晶须的强度。

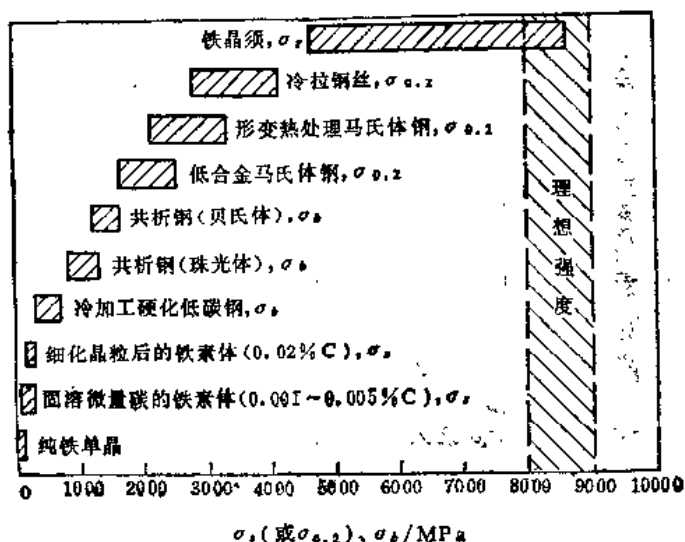


图2-1 纯铁和钢的强度与理想强度的比较

不论钢铁材料采用哪种方式强化，其微观强化机制包括位错强化；细晶强化（晶界强化）；固溶强化；第二相强化（沉淀或弥散强化）；相变强化等。一般钢的强化不由单一的强化机制来决定。钢的强度是几种强化机制共同作用的结果。尽管几十年来人们做了大量艰苦的工作，但是到目前为

止，大部分钢种的强化增量尚不能定量计算，因此仅限于定性的分析。

关于钢的强化机制已在不少文献中有过论述^[1-3]，本文仅就几种最基本的强化机制略加讨论，这就是位错强化；细晶强化；固溶强化；第二相强化。

(一) 位错强化

塑性变形主要是由位错的滑移运动造成的。一根在滑移面上滑移运动的位错碰上与滑移面相交的其他位错，与其交割，位错运动受阻，因而产生强化。也就是说，若能设法增大位错运动的阻力，就等于增加了塑性变形的抗力，则导致强化。

在一定的应变条件下，维持塑性变形所需的应力即流变应力 τ_f （宏观的意义是单晶体开始滑移所需的应力，或多晶体开始塑变的应力）与位错密度 ρ 之间服从Bailey-Hirsch关系式：

$$\tau_f = \tau_0 + \alpha \mu b \rho^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

式中 τ_0 ——位错密度为零时的流变应力；

α ——常量；

μ ——切变模量；

b ——柏氏矢量。

因此， $\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_0 = \alpha \mu b \rho^{\frac{1}{2}}$ 表示位错密度引起的流变应力增量。不难看出，位错所产生的强化增量 $\Delta\tau_f$ 与位错密度有关。晶体中的位错密度越高，强化的程度越大。例如把共析高碳钢热处理成细的珠光体组织，然后冷加工成高强度钢丝，强度极限可达到3000~4000MPa，其重要原因之一就是冷拉过程中位错密度大大提高了。随着加工程度的增大，