

金属材料强度 研究与应用

(1978—1982)

科学技术文献出版社

科学

G14

4

社

金属材料强度研究与应用

(1978—1982)

西安交通大学编

科学技术文献出版社

1984

金属材料强度研究与应用

(1978—1982)

西安交通大学编

科学技术文献出版社出版

北京印刷三厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: 18.25 字数: 461千字

1985年3月北京第一版第一次印刷

印数: 12,000册

科技新书目: 89—53

统一书号: 15176·614 定价: 2.25元

目 录

1. 再论发挥金属材料强度潜力问题 ——强度、塑性、韧度的合理配合	(1)
2. 从材料强度观点论机器零件的失效分析及失效的防止	(19)
3. 几种钢和球墨铸铁中疲劳裂纹的萌生与扩张门坎值 ΔK_{th}	(30)
4. 合金结构钢疲劳裂纹的扩展	(37)
5. 中碳钢的马氏体形态与疲劳裂纹萌生及扩展的关系	(53)
6. 疲劳门坎值 ΔK_{th} 与疲劳极限和强度、塑性关系的探讨	(66)
7. 球墨铸铁疲劳裂纹的萌生和扩展	(78)
8. 结构钢的疲劳裂纹萌生与扩展的电子显微断口分析	(86)
9. 低合金结构钢疲劳断裂机制图的研讨	(96)
10. 喷丸强化对疲劳裂纹萌生和扩展的影响	(105)
11. 结构钢在低温下冲击断裂时的裂纹萌生与扩展	(112)
12. 低碳马氏体延迟断裂特性的研究	(121)
13. 石油钻井用吊环的断裂分析、寿命估算及强化途径	(134)
14. 中碳钢马氏体中存在铁素体时的强度与韧性	(141)
15. 马氏体贝氏体复合组织的强度与韧性	(151)
16. 高韧性低碳马氏体型超高强度钢的设计及典型钢种的组织结构与性能	(167)
17. 稀土镁球墨铸铁的组织和断裂韧性	(176)
18. 钢中粒状贝氏体的组织与性能	(185)
19. 论疲劳缺口敏感度指标 η 及对 Garwood 曲线的商榷	(195)
20. 中高碳钢深层加热浅层淬火时的材料强度	(202)
21. 表面强化处理件静动强度关系的研究	(210)
22. 表面形变强化对中碳钢疲劳强度的影响及强化机理	(220)
23. 碳氮共渗层的滚压强化	(230)
24. 碳氮共渗及热处理对 20 CrMnMo 钢机械性能的影响	(240)
25. 关于双面渗碳活塞销的试验和研究	(252)
26. 喷丸对脱碳板簧材料疲劳强度的影响和残余应力的作用	(263)
27. 提高石油钻机链条寿命的研究	(270)
28. 硼钢碳氮共渗的渗层淬透性	(277)

1. 再论发挥金属材料强度潜力问题

——强度、塑性、韧度的合理配合

周惠久 涂铭旌 邓增杰 朱维斗

摘要 本文初步总结了常用的钢铁材料在各种服役条件下断裂失效的表征参量与强度、塑性、韧度的关系。主要结论为：在一定服役条件下强度与塑性、韧度的适当配合可以得到这些参量的最佳值，而这个最佳值所要求的强度、塑性、韧度的配合又随服役条件的改变向一定的方向改变。这些变异规律指出了一个在保证安全的条件下充分发挥材料强度潜力以达到提高材料的承载能力和延长使用寿命的途径。

一、关于材料的强度塑性韧度的合理配合问题

一个零部件中最薄弱环节（危险断面）的实际有效强度，由于材料的内因和服役条件的外因，并不一定与材料本身的强度相一致。在这里，强度一般用标准试样在特定条件下测得的数据来表征。材料强度更确切的定义是材料在各种条件下宏观及微观范畴抵抗变形和断裂的能力。要保证高的材料强度充分发挥作用，就要求材料具备可保证安全所必要的塑性和韧度等性能。

强度、塑性可以看作材料的两个独立存在的力学性能，而韧度则是强度与塑性的综合表现，是一个能量概念。例如静载荷下的韧度即断裂前单位体积消耗的能量，以应力应变曲线包围的面积来衡量；缺口冲击韧度 a_k 、CVN 为标准带缺口试样一次冲断时所消耗的能量；断裂韧度 G_{Ic} 为平面应变状态裂纹张开单位面积所需的能量（ K_{Ic} 可由 G_{Ic} 换算得到）。这些韧度指标具有不同的含义，分别为相应条件下断裂的能量判据。不应把 G_{Ic} 、 K_{Ic} 等视为唯一的韧度指标。既然韧度是个能量判据，它必然既取决于强度又取决于塑性。在材料强度大致相同的情况下，塑性大的韧度必然也高。在强度与塑性互相矛盾、此消彼长的情况下（例如淬火钢随回火温度的变化），由于强度的变化范围往往远比塑性的变化范围为小，因此，仍然表现为塑性大的韧度也高。在塑性大致相同的情况下，强度高的韧度应当也高。由此可见，强度与韧度并非总是互相矛盾的，有些材料的某些组织状态的试验结果足以证明这一点（见后节），而强度与塑性的矛盾则是比较普遍的。

塑性（作为一般塑性变形容量的概念，既包括宏观尺度的也包括微观尺度的）的作用主要在于通过足够程度的塑性变形吸收变形功，削减应力集中处（包括裂纹尖端）的应力峰，使高应力重新分布，缺口及裂纹尖端钝化结合形变强化的作用，使局部继续变形或裂纹的扩张得到缓和以至停止，从而保证了强度作用的充分发挥。如果能使材料既有高强度又有大塑性，选材问题就不存在困难，这正是材料工作者长期以来奋斗的目标。可惜的是目前只有昂贵的高度合金化（例如高镍马氏体时效钢和 TRIP 钢等）或采用复杂而有局限性的强化工艺（例如某些钢的形变热处理）才能达到高强度大塑性大韧度的结合，显然还不能在一般民用机械制造中普遍推广应用。其实在大多数情况下，同时要求极高的强度与极大的塑性、韧

度是不必要的,甚至是浪费的。我们也开展了一般材料的强韧化处理的研究,其中低碳板条马氏体和中碳下贝氏体有良好的配合,已经在生产实践中得到考验和应用。其他所谓强韧化处理(见本文讨论部分)也可取得一定效果,尚需进一步试验研究发展。某些纤维(包括晶须)增强复合材料是有前途的发展方向。但从目前看来,在相当长时期内机械制造仍然必须主要依靠普通钢铁材料。对于一般钢铁材料的各种组织状态而言,强度与塑性往往存在着此消彼长的矛盾,二者不可兼得,这种矛盾在其他材料中也是常见的现象,也是需要解决的问题。

如何处理这对矛盾?我们认为应当根据不同情况,抓主要矛盾和矛盾的主要方面,促使矛盾转化。断裂力学的发展为我们提出了新的定量的选材依据,例如超高强度钢焊接的火箭壳体,由于难以避免焊接裂纹,为了绝对安全而必须追求足够的断裂韧度,这时稍稍降低屈服强度换取较大的断裂韧度是合理的,实际上是保证了材料强度的充分发挥。如果一味追求高强度就可能发生低应力下裂纹失稳扩展,造成突然断裂,反而失掉超高强度的作用。许多大铸锻件、焊接件(例如大电机转子、厚壁高压容器等)由于缺陷不可避免和特大断面在承载时裂纹前沿处于平面应变状态或在腐蚀介质中工作,同样存在低应力裂纹失稳扩张的危险。但这类服役条件的产品是为数不多的。另一方面,对于一般机械制造中量大面广只带有缓和应力集中的中小零件,大部分是经表面加工而很少有宏观缺陷其所用材料属于中低强度范围,应力设计是无限寿命或很长的有限寿命的水平,失效方式多属高周次疲劳断裂。在这类情况下,大量的试验研究表明,选材和制订工艺的原则应是在保证最高强度的前提下取得适当的塑性韧度的配合,一般要求不大的塑性、韧度就能保证充分发挥材料的强度潜力,取得减轻产品重量、延长使用寿命的效果。例如用高强度球墨铸铁制造柴油机曲轴[1],用高碳工具钢T10V轮廓淬火低温回火制造凿岩机活塞[2],用40MnB钢260~280℃回火制造汽车半轴[3]等都是这方面得到成功考验的事例。

多年来我们从事金属材料多次冲击抗力的研究,其出发点是破除对冲击韧度的迷信,解除提高材料使用强度水平的顾虑,在获得的多冲抗力规律中也体现出不同服役条件下有不同的强度、塑性(韧度)的合理配合[4]、[5]、[6]。后来,我们又从一次加载断裂、稳定循环加载(疲劳)断裂等方面的试验研究中探索了这个问题,并从大量的生产实际事例中得到启发或验证。

值得一提的是,由于设计结构、形状尺寸或加工工艺以及复杂的工况都可能给工件造成某种薄弱环节,例如承受交变载荷零件上带有尖锐缺口造成高度应力集中,有可能足以使原来整个工件承受的低应力高周次疲劳载荷在那个局部为高应变塑性疲劳载荷。从设计的角度应当改进结构和形状,尽可能减少危险截面的载荷。针对这种情况,有两种方法处理这个问题:一种是按危险截面的实际服役条件选择相应的强度、塑性配合,例如采用较大塑性和较低强度的处理工艺;另一种方法是不改变整体材料和工艺,采取局部复合强化的方法克服薄弱环节,使薄弱环节的塑性应变减小以至消除,并引进有利的残余压应力,提高局部有效承载能力,使之接近等强度设计。我们认为,后一种方法是更为积极和更为有效的。例如我们在越野车发动机球铁曲轴[7]、台车式凿岩机钎尾[8]、石油钻井吊环[9]、矿用圆环链[10]等工件上均采用了整体热处理后再施加局部冷变形强化的工艺(如喷丸、滚压、预变形等),大幅度地提高了产品寿命,这也是充分发挥材料强度潜力的有效措施。

影响材料失效方式和失效抗力的因素很多,可分为外因和内因两大类,在具体机件的选材中提出对各种性能(包括强度、塑性、韧度)的要求时必须综合考虑这些因素的作用,区

别对待。这将在后节中加以论述。

二、不同服役条件下失效抗力与材料强度和塑性、韧度配合的关系

以下简单介绍所做的在常温、大气条件下对于不同加载情况，与材料实际承载能力有关的一些表征参量对材料强度、塑性、韧度配合要求的一些规律。

(一)一次加载断裂

1. 静拉伸缺口断裂强度 σ_{bn} 及静拉伸缺口敏感度 $\eta_n \left(= \frac{\sigma_{bn}}{\sigma_b} \right)$ 与强度、塑性配合的关系[11]： 选用 45Cr 钢，经淬火与不同温度回火以获得各种强度塑性的配合，加工成光滑拉伸试样和各种不同应力集中系数的缺口拉伸试样 ($K_t = 1.45 \sim 6.5$ 直到预制裂纹)，进行拉伸试验，得到主要结果，如图 1—1 所示。

1) 塑性对削减应力峰的作用是有限的，并不是塑性愈高愈好。随回火温度升高（塑性升高，强度降低）， σ_{bn} 降低， η_n 升高，表明塑性增加，材料削减应力峰的作用增加。但对一定 K_t ，当回火温度增高到一定值后， η_n 曲线趋于水平，此时塑性的作用达到饱和，可见塑性对削减应力峰的作用是有限的，并不是塑性愈高愈好。

2) 对不同 K_t ，所要求的削减应力峰的塑性饱和值是不同的。 K_t 愈小，所要求的塑性值也愈低。就本试验而言，当 $K_t < 1.45$ 时，满足削减应力峰所要求的塑性的相应回火温度 200℃即已足够，对 $K_t = 2 \sim 2.5$ ，约为 400℃，当 $K_t = 3.4 \sim 6.5$ ，约为 450℃，对预制裂纹试样，则相当于 500℃。

3) σ_{bn} 的绝对值对于任何一种 K_t 直至裂纹均在某一回火温度出现峰值，峰值的高低随 K_t 的增大而减小，所对应的回火温度随 K_t 的增加而向高温回火转移。

4) 在 K_t 不大的情况下， σ_{bn} 主要决定于强度，随 K_t 增加，塑性作用逐渐显著。回火温度愈低， σ_{bn} 愈高，显示了在光滑试样和应力集中不严重情况下，对 σ_{bn} 强度为主导因素的作用。从 200℃至 600℃回火均表现出几何强化，并都在 K_t 为 2 至 3 时出现 σ_{bn} 高峰。随 K_t 升高，低温回火的 σ_{bn} 急剧下降，而回火温度高的 σ_{bn} 下降平缓，表明塑性增高，削减应力峰效果显著。随 K_t 继续增加，一直到预制裂纹的最尖锐的情况， σ_{bn} 最高的回火温度只是 400~450℃，而 600~680℃回火状态的始终不能达到最高值。

5) 材料削减缺口应力峰的能力与材料宏观塑性指标无直接对应关系，而应与缺口尖端微区塑性相联系：断口宏观分析和电镜观察表明，断口外层暗区为以韧窝为主要特征的韧断区，中心亮区为以准解理为特征的脆断区（图 1—2）。与 K_t 值变化情况相同，随回火温度升高，韧断的外层区域增加， η_n 增加；当回火温度升高到一定程度，塑变达到试样心部，全部断口都呈韧断特征，中心脆断部分消失，这时 η_n 也达到水平，不再升高。可见当缺口顶端塑性足以使断口全部成韧性断口时，就达到削减应力峰的最大效用，塑性再高也就无用了。

2. 裂纹断裂韧度 K_{Ic} 与强、塑、韧配合关系

1) K_{Ic} 与材料基本机械性能强度和塑性有什么关系？目前流行一种看法，认为材料强度提高将导致断裂韧度降低。这种看法与一些钢的试验结果符合。我们做的中碳合金结构钢 40CrNiMo 的 K_{Ic} 随回火温度变化的规律得到了这样的结果（图 1—3）[12]。45Cr 的试

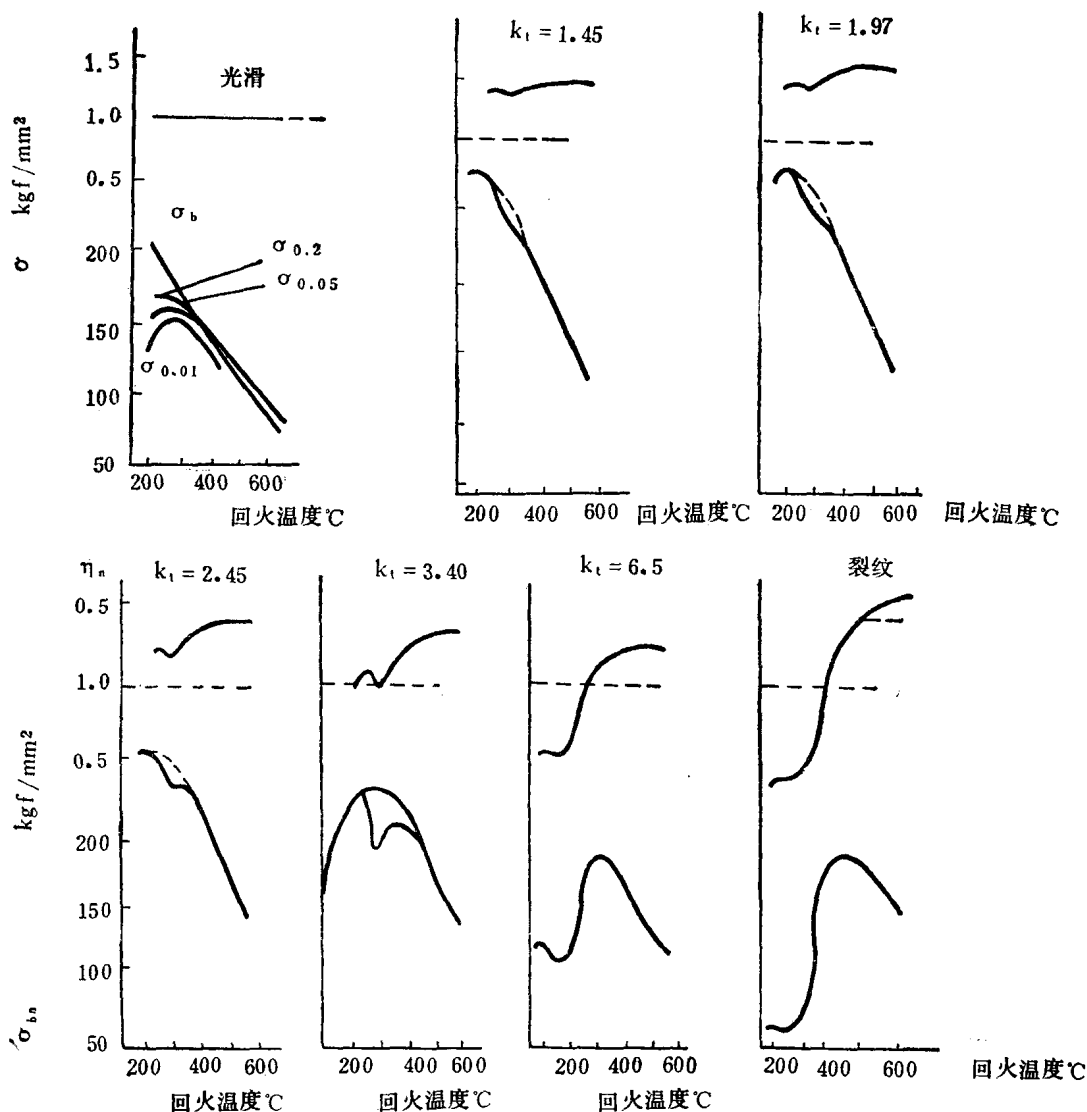


图 1—1 45Cr 不同回火温度, 不同应力集中系数情况下缺口强度 σ_b 和缺口敏感系数 η_n 。

验也有类似结果[13]。

2) 高强度低碳马氏体合金结构钢可以在得到高强度的同时, 得到高的断裂韧性, 说明上边讲到的规律并不是绝对的。对于另外类型的钢有可能得到既有高强度又有高 K_{Ic} 的理想状态。我们做的几种合金低碳马氏体钢 20SiMn2MoV、22CrMnSiMoV、25SiMn2MoV 的试验表明, 这类钢在低温回火态时有高的强度和高的断裂韧性, 并且随回火温度变化, 强度和断裂韧性有同样的变化趋势 (图 1—4) [14]。

我们与宝鸡石油机械厂合作研制轻型石油钻机用吊环、吊卡, 以高强度低碳马氏体钢 20SiMn2MoV 代替原用 35 钢和 35CrMo, 大幅度减轻了重量, 并保证了产品具有高的抗脆断安全性[9]。

3) 对中碳合金结构钢, 即使 K_{Ic} 随塑性指标升高而升高, 随强度指标升高而降低。但值得注意的是, 这种变化并不是直线关系, 而呈现出一定的阶段性。(图 1—5) [14] 所示

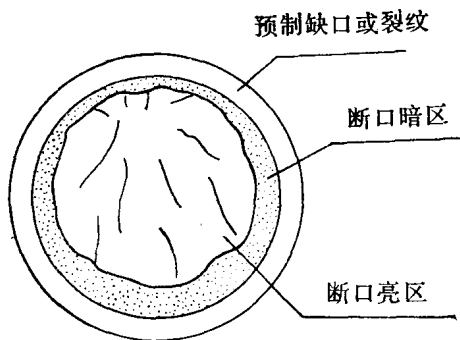


图 1—2 缺口拉伸试样断口示意图

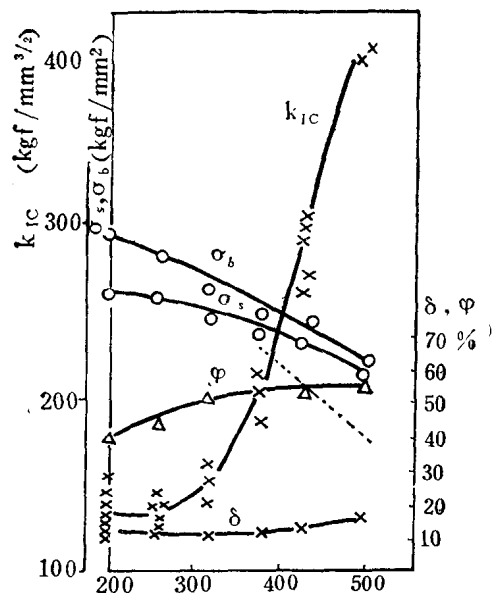


图 1—3 40CrNiMo 不同温度回火后的断裂韧性及其它机械性能

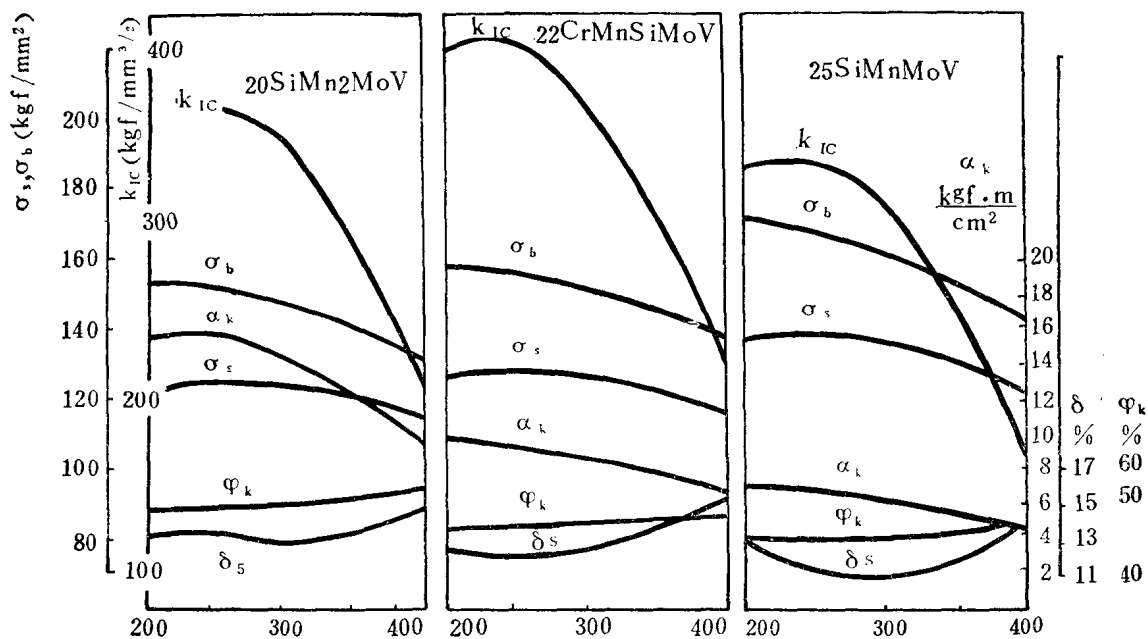


图 1—4 几种低碳马氏体钢 K_{IC} 及其它机械性能关系

40CrNiMo 不同温度回火 K_{IC} 与 σ_b 、 σ_s 关系曲线可以看出，在高强度范围 (σ_b 150kgf/mm² 以上) 强度增加， K_{IC} 下降并不显著；在中等强度范围 (σ_b = 150kgf/mm² 以下)，强度稍有降低， K_{IC} 则急剧增加，亦即在高强度范围，强度大大提高， K_{IC} 变化不大；在中强度范围， K_{IC} 大大提高，而强度损失不大。这样的试验结果表明，根据零件服役条件的需要，可以在韧性损失不大的情况下充分使用材料的强度；或在强度损失不大的情况下可大幅度提高材料的韧性，以充分发挥材料的性能。

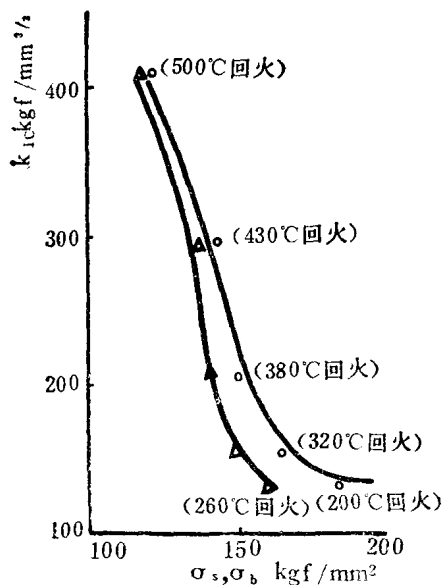


图 1—5 40CrNiMoA 的 $K_1\sigma$ 与 σ_b 、 σ_s 关系曲线

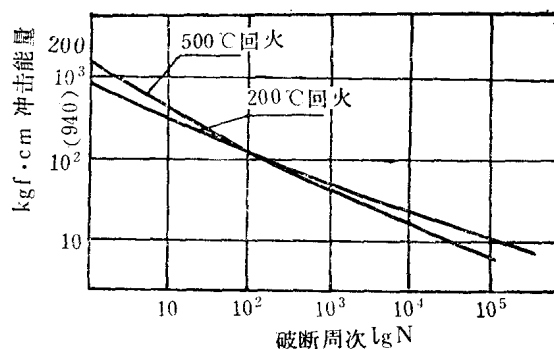


图 1—6 35 钢 200°C 回火与 500°C 回火两种状态的 A-N 曲线

(二)多次冲击加载断裂

各种类型的机械中，即使那些通常认为承受剧烈冲击负荷的机件，也很少有只经受一次或很少几次冲击就断裂的，多数都是承受较小能量的多次冲击才断裂的。大能量一次冲击与小能量多次冲击比较，加载方式不同，被冲击体的应力、应变状态不同，导致损坏的原因、过程不同，外在与内在因素对这两种失效抗力的影响也不同。因而，对材料的强、塑、韧配合的要求也不同。材料的多次冲击抗力有以下一些规律：

1. 设计寿命（冲击破断周次）对强塑配合的要求 强度、塑性、韧度互为消长的两种材料，在多次冲击的 A-N（冲击能量—破断周次）曲线上有交点。在交点上方的较高能量区域（破断周次较低），强度低、塑性高的材料寿命长。在交点以下的较低能量区域（破断周次较长），强度高、塑性低的材料寿命长〔15〕。交点所对应的破断周次与材料有关。一般约在几百次到几万次之间，见图 1—6〔16〕。柴油机曲轴一般设计寿命为无限寿命，即使承受冲击，单位体积承受的冲击能量也较低，球墨铸铁在此低能量冲击范围，表现优于正火 45 钢，如图 1—7〔17〕。对于承受多次冲击载荷的机件，应依据其寿命所对应的破断周次

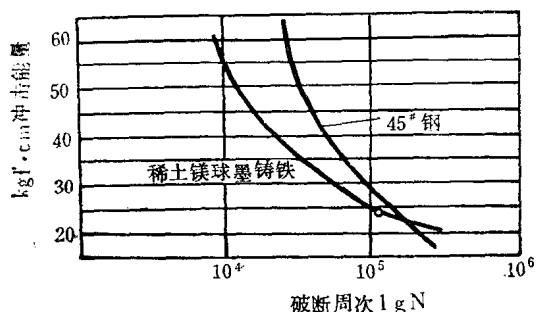


图 1—7 稀土镁球墨铸铁与 45 钢多冲抗力对比曲线

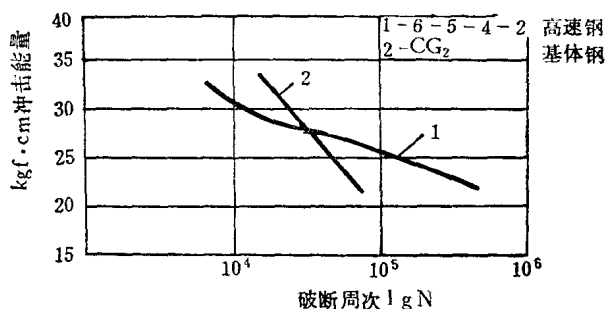


图 1—8 两种强韧性不同模具钢的 A-N 曲线

在交点的上方（较高能量区域）或下方（较低能量区域）来合理地确定对材料的强、塑配合的要求。例如一些冷变形模具，使用寿命在几万次以下，仍属于在交点以上的能量范围服役，这时还是以较高塑性的材料的寿命为长，见图 1—8 [18]。

2. 不同冲击能量要求不同的强塑配合

冲击能量的高低不同，相应于该冲击能量下的多冲抗力最佳状态所要求的强塑配合也不同。以中碳钢淬火回火为例，随冲击能量的降低（即相应的冲击破断周次较长），多冲抗力高峰向低中温回火状态（高强度低塑性）转移。

图1—9 [19] 示出40钢强度、塑性、韧性及不同能量下多次冲击破断次数与回火温度的关系。从该图还可看出，500℃以上的高温回火状态，多冲抗力总是很低的。张家口煤矿机械厂一吨模锻锤锤杆，原用 45Cr 钢淬油，650℃高温回火，硬度低，冲击值 a_k 很高，使用中常常折断，寿命很低。我们与该厂协作 [20]，根据多冲抗力的规律，采用淬盐水（或流动清水）加中温回火的新工艺，强度提高， a_k 值降低，而使用寿命就由原来的半个月至一个月提高到10个月至1年。

我们后来又与洛阳拖拉机厂合作提高 5 吨、10吨大截面模锻锤锤杆的寿命 [21]，同样获得良好的效果。

3. 不同应力集中系数 K_t （缺口尖锐度）下，多冲抗力对强塑配合的要求不同。

在无缺口或钝缺口情况下，亦即 K_t 较小的情况下，多冲抗力对材料的塑性要求较低，而在尖锐缺口乃至裂纹的高应力集中情况下，对材料的塑性要求较高。即使在 K_t 高达 4.6 的情况下，中碳钢和中碳合金钢的最佳多冲抗力仍在中温回火而不在高温回火状态，见图 1—10 [4]。

4. 不同加载应力状态（弯曲、拉伸、侧压等）情况下多冲抗力对强塑配合的要求不

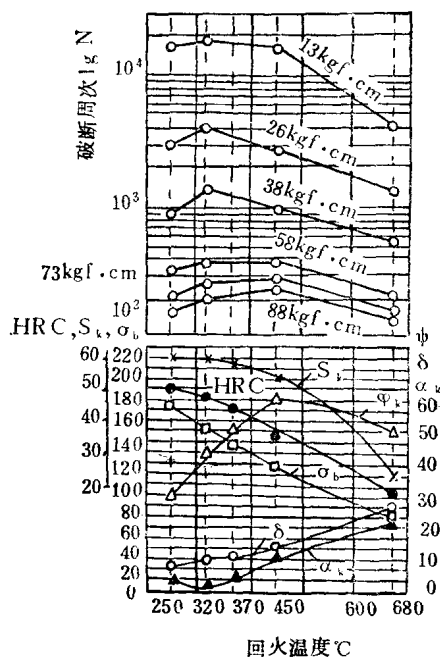


图 1—9 40钢的强度、塑性、韧性及不同能量下多次冲击破断次数与回火强度的关系*

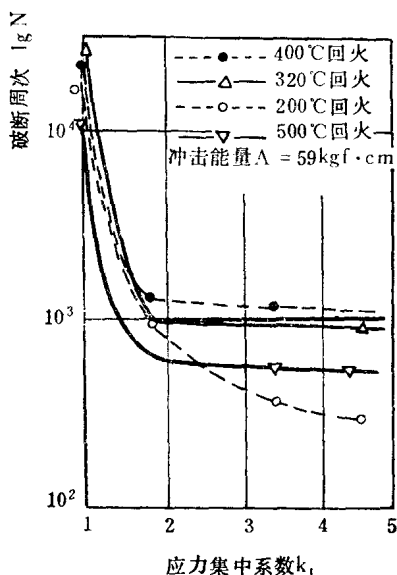


图 1—10 40MnB钢淬火不同温度回火多冲抗力与应力集中系数的关系

同。对于多次冲击拉伸载荷下多冲抗力，即使在破断周次不超过 100 次的高能量情况下，以至每次冲击后引起塑性伸长时，塑性伸长的速度随强度的增高而减小，虽然其极限伸长较小，仍表现出较高的寿命，说明这时仍然要求适当的强塑配合。图1—11〔5〕示出 40Cr600℃回火（强度低，塑性高）和 20Cr200℃回火（强度高，塑性低）试样冲击拉伸试验的延伸值与冲击次数关系。其中 1、3、5、7、9 为 20Cr200℃回火，不同冲击能量的试验结果，2、4、6、8、10 为 40Cr600℃回火不同冲击能量的试验结果。可见极限伸长值主要决定于其塑性大小，而每次冲击的塑性伸长速度则主要决定于材料的强度。

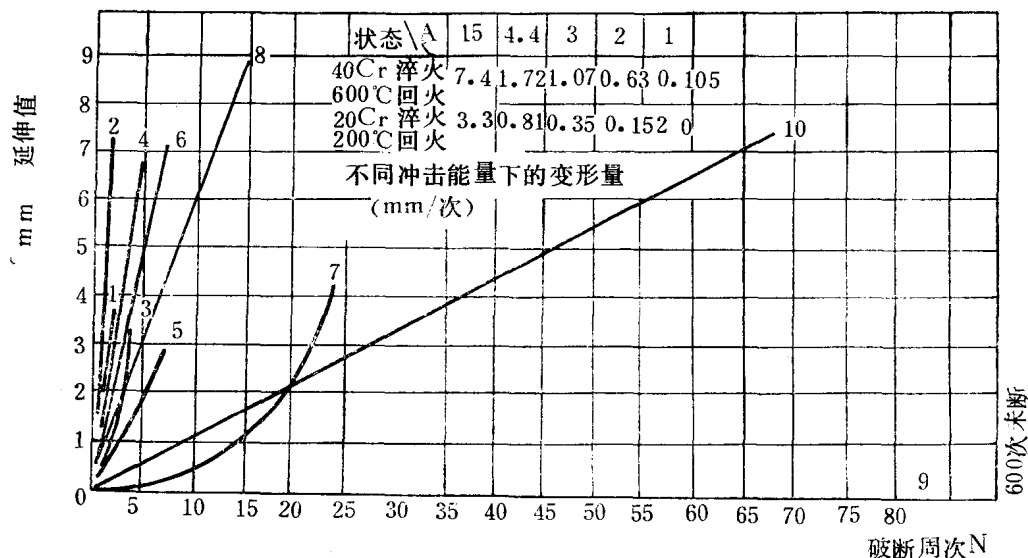


图 1—11 延伸值与冲击次数的关系

曲线

1, 2 在 15kgfm 作用下 3, 4 在 4.4kgfm 作用下 5, 6 在 3kgfm 作用下
7, 8 在 2 kgfm 作用下 9, 10 在 1 kgfm 作用下 (9 冲击 600 次未断)

宝鸡石油机械厂生产在高压冲击条件下服役的油井射孔器损坏方式是多次射孔筒体径向胀大超过一定值后不能再使用或弹孔变成椭圆以至开裂。射孔器 原用 PCrNi3Mo860℃淬火 400℃回火， σ_b 127.5 kgf/mm²， δ_5 10.5%左右， ψ_k 47%左右，只射孔 14 炮即损坏；后改用高强度高塑性低碳马氏体钢 20Cr MnSiMo900℃淬火，220℃回火， σ_b 162kgf/mm²、 δ_5 10.5%、 ψ_k 52.5%左右，射孔寿命达 25 炮〔5〕。

多冲侧向压缩加载情况下，失效方式是压痕下凹深度超过一定限度或压痕的径向、环向开裂。图1—12 示出几种碳素钢渗碳试件当渗层相同时，不同心部碳含量的多次冲击侧压曲线，表明心部碳含量以 0.25% C 多冲侧压抗力最好〔6〕。渗碳后，等温淬火比通常渗碳后淬火回火有更好的性能，图1—13 是 30SiMnMoV 渗碳后不同温度等温淬火处理与渗碳后淬火回火的多冲侧压曲线。图上表明，渗碳后 170~210℃等温淬火有比通常渗碳后淬火回火好得多的多冲侧压抗力〔22〕。

在与天水风动工具研究所、天水燎原风动工具厂等单位合作研究提高 YG—80 重型导轨式凿岩机钎尾使用寿命的工作中，对所用材料 30SiMnMoVA 采用了碳氮共渗后 210℃等温处理以及其它工艺措施，使钎尾使用寿命从进尺 100 米左右提高到平均 880 米，大大提高了钎尾抗冲击侧压的能力〔8〕。

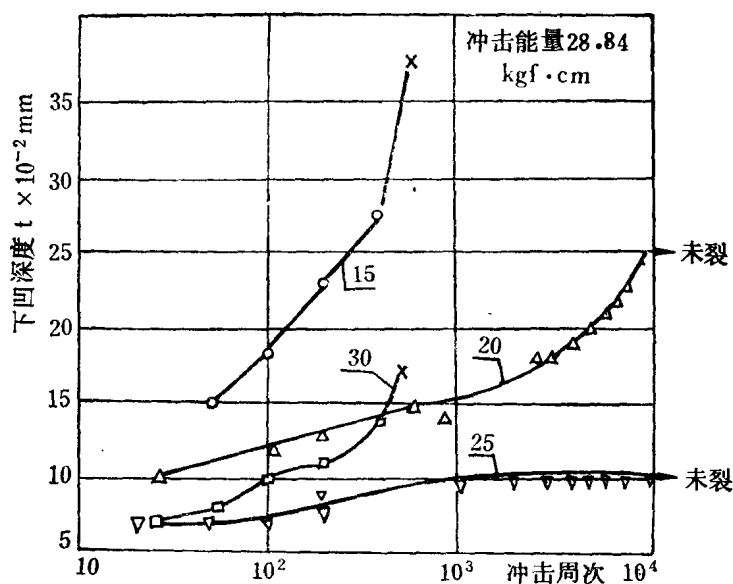


图 1—12 几种碳素渗碳钢多次冲击侧压曲线
(渗层深0.8~1.0mm, 表层碳浓度0.8%表层硬度 HRC59—62)

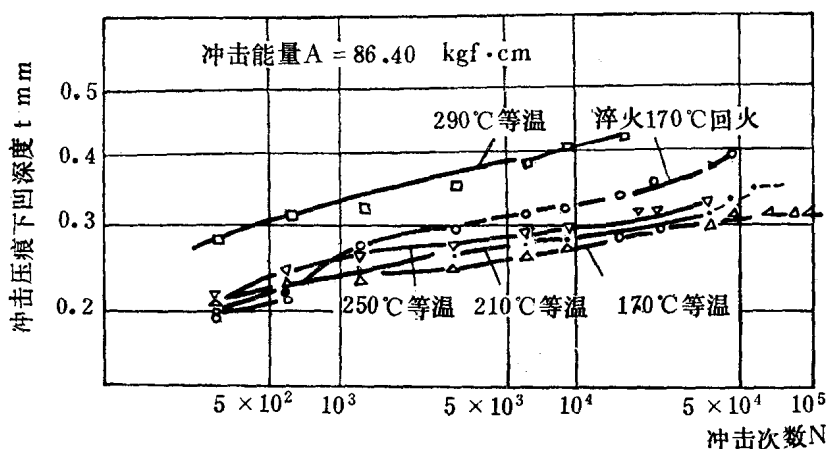


图 1—13 30SiMnMoV 钢多冲侧向压缩压痕下凹深度与冲击次数的关系曲线

5. 淬火回火状态钢中含碳量与多冲抗力高峰关系

当含碳量小于0.45%时, 每种含碳量钢的最佳多冲抗力的回火温度随冲击能量降低, 向低温回火状态转移。而当含碳量大于0.45%时, 最佳多冲抗力的回火温度约在 400°C左右, 见图1—14 [16]。

6. 在高强度及超高强度钢中, 塑性及韧度对提高多冲抗力有较大的作用: 在等强度条件下, a_k 对多冲抗力的作用, 随着强度的不同而异。在低强度水平时, 如 $\sigma_b < 100 \text{ kgf/mm}^2$, 这时因塑性韧度已较高, 所以再增加塑性、韧度对多冲抗力的提高影响甚微。而当强度水平较高时, 如 $\sigma_b > 150 \text{ kgf/mm}^2$, 因这时塑性韧度已比较低, 所以适当提高塑性、韧度对提高多冲抗力的影响甚为显著。图1—15 [16] 和图1—16 [23] 分别为碳素结构钢和合金结构钢各种相同强度水平下, 一次冲击韧度 a_k 与多冲破断次数 N 的关系。

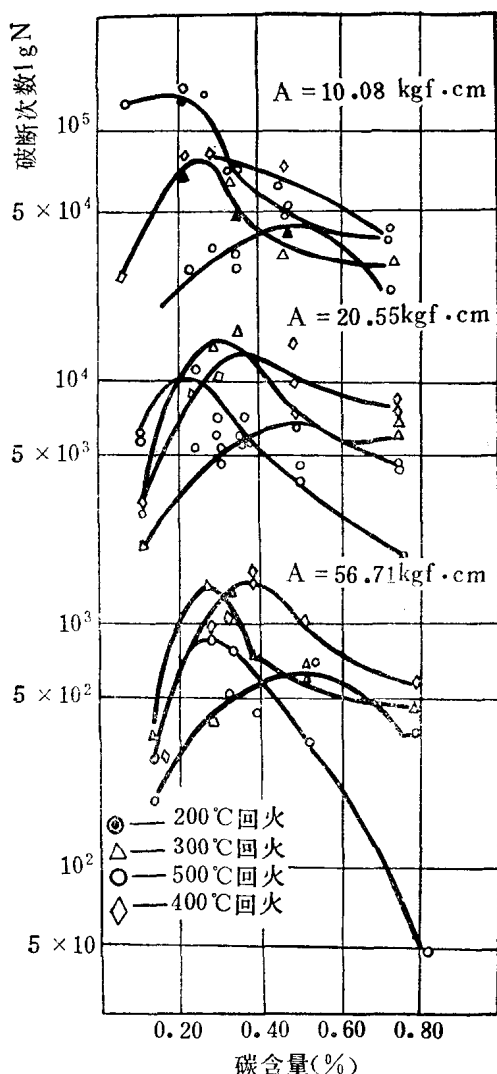


图 1—14 各回火温度的多次冲击
抗力与含碳量的关系

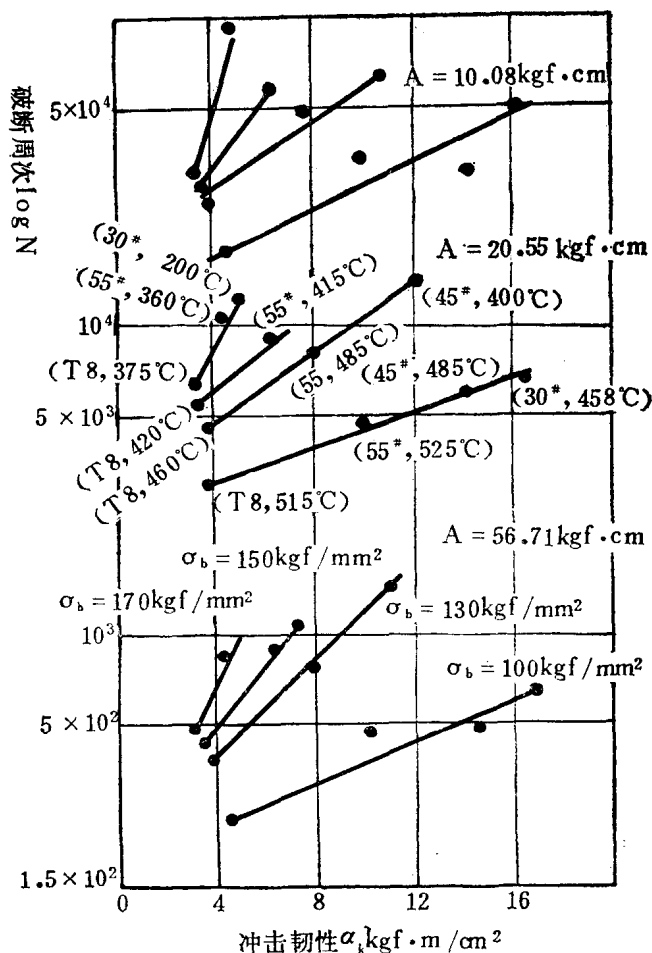


图 1—15 碳素结构钢在同强度水平条件下，一
次冲击值 α_k 与多冲破断次数关系

我们与燎原风动工具厂合作，进行了提高 YT—24 型 凿 岩机 活塞寿命的研究。活塞材料是高碳钒钢 T10V，通过整体淬火薄层硬化以满足多次冲击和表面耐磨的要求。考虑到高碳钢淬火、低温回火，强度的要求较易满足，应在不降低材料切断抗力的条件下，尽可能改善材料的塑性，以进一步提高材料的多冲抗力。因此，采用盐浴短时加热淬火工艺降低马氏体中的含碳量，在淬硬层中获得板条马氏体，并适当提高回火温度，加之采用其它工艺措施，使凿岩机活塞寿命提高了数倍〔2〕。试验表明，获得板条马氏体，可在保持高强度的同时改进材料的塑性，从而提高了高强度钢的多次冲击抗力。

7. 表面形变强化改变材料对强塑配合的要求

运用表面冷变形强化（如滚压、喷丸等），可大幅度地提高材料的多冲抗力，并使多冲抗力的最佳强塑配合改变。例如经过滚压，可使 40Cr 缺口试样的多冲抗力高峰由 400°C 回火移至 200°C 回火，而且提高的幅度很大。见图 1—17〔24〕。

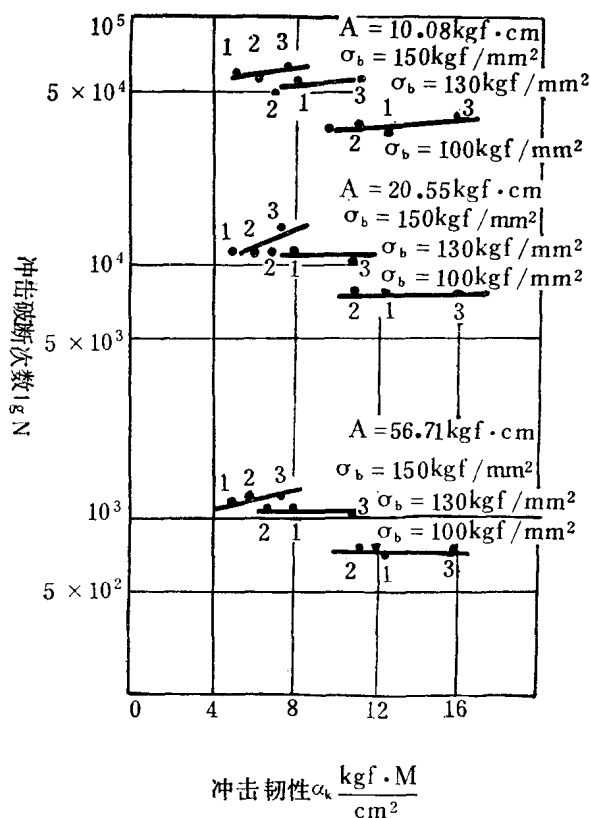


图 1—16 合金结构钢在同强度水平条件下，一次冲击值 α_k 与多冲破断次数关系

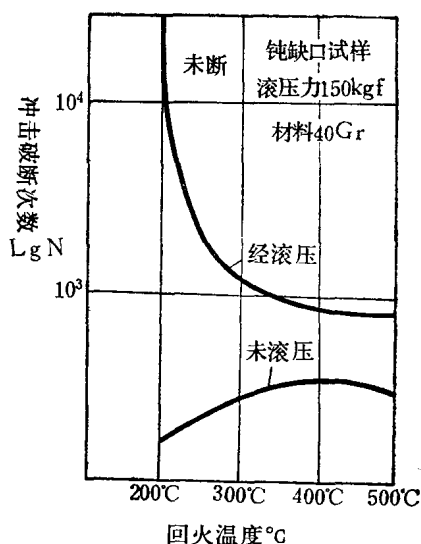


图 1—17 不同回火温度下滚压对提高多冲寿命的效果

(三) 循环载荷作用下的疲劳断裂

1. 疲劳极限 σ_{-1} 和 σ_{-1n} 与强度和塑性的关系

实验表明，疲劳极限 σ_{-1} (σ_{-1n}) 与强度极限 σ_b 或硬度 HRC 是亦步亦趋的，在各种有关疲劳资料上可以找到大量的 σ_{-1} (σ_{-1n}) 与 σ_b 的关系曲线。表明 σ_{-1}/σ_b 约为 0.35—0.5，图 1—18 是我室有关试验资料的一部分 [25] [26] 我们还做了 30CrMnSi 等温淬火与淬火回火在相同的 HRC 情况下， σ_{-1} (σ_{-1n}) 的比较 [27]，绘成图 1—19，可见 σ_{-1} (σ_{-1n}) 与 σ_b 基本是直线，但是，这种关系并不是自始至终一直保持的，当 σ_b 大于一定值时， σ_{-1} 不再增加而开始降低。而 σ_{-1n} 即缺口疲劳极限却是随着 σ_b 的升高而一直升高的。研究表明，与 σ_{-1} 开始降低相对应的 σ_b 值的高低，主要决定于相同强度情况下钢的塑性大小。强度相同、塑性愈高的，则保持直线关系的 σ_b 值愈高。现代高强度材料普遍采用纯净化处理冶炼工艺主要也就是为了在追求具有高强度的同时，能有较好的塑性韧性。

2. 缺口尖锐度对疲劳极限的影响，缺口作用所要求的强塑配合

缺口造成应用集中，降低疲劳强度。图 1—20 [28] 为 40Cr 钢在低、中、高三种回火温度下，疲劳极限与应力集中系数的关系（试样均为先热处理后开缺口）。由图可见：（1）由于应力集中系数的增加，疲劳极限的绝对值显著下降。（2）高强度、低塑性状态，比低强度高塑性状态的下降幅度稍大一些。但即使在应力集中系数达到 3.5 时，仍是高强度的 200°C 回火状态的 σ_{-1n} 高于低强度的 550°C 回火状态的 σ_{-1n} 。这就说明，在机械制造中常见的较

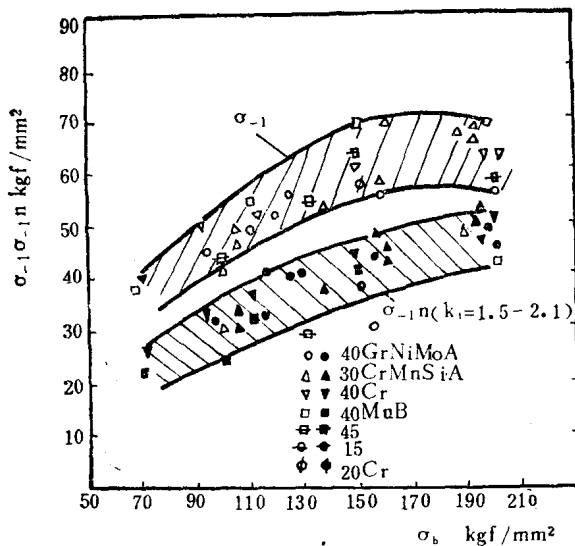


图 1—18 一些材料的 σ_{-1} (σ_{-1n}) 与 σ_b 的关系

钝的缺口情况下，其缺口疲劳极限仍然主要取决于材料的强度，当然也需要适当的塑性、韧性相配合。至于先开缺口后热处理的情况，问题就更为复杂，这里面存在着淬火后的复杂的残余应力以及在不同回火温度时，这些残余应力的重新分布，还有淬火加热过程中造成表面脱贫碳的影响等问题。这就要通过改变热处理工艺，克服工艺过程中带来的不利影响。我们在研究用 40MnB 代 35CrMnSi 生产北京牌吉普半轴的工作中[3]，40MnB 200℃ 回火的半轴实物疲劳试验，疲劳寿命仅及 35CrMnSi 原产品疲劳寿命之半，后将回火温度略微升高到 260—280℃，其疲劳寿命就达到了老产品的水平图 1—21 可见 40MnB 200℃ 回火的半轴，其疲劳寿命不高，是因为半轴花键形状复杂，淬火应力很大，采用低温回火，淬火应力未能充分消除所致。

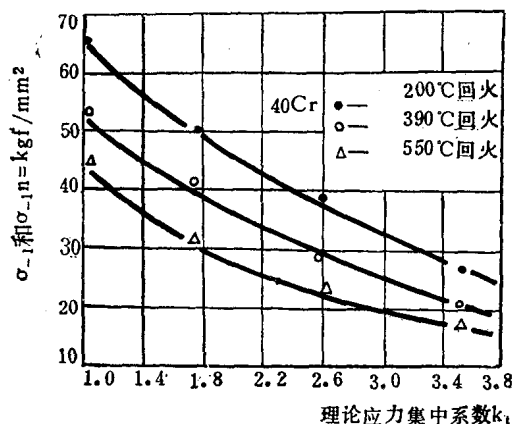


图 1—20 缺口应力集中对疲劳极限的影响

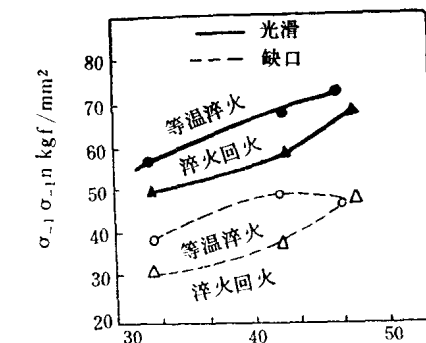


图 1—19 30CrMnSi 等温淬火 σ_{-1} 、 σ_{-1n} 与 HRC 的关系

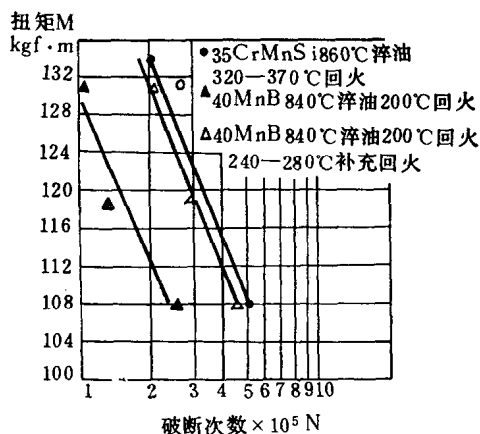


图 1—21 北京吉普半轴扭转疲劳试验曲线

对先开缺口后热处理的高强度零件，在缺口处实行滚压或喷丸强化，可根本上改变缺口处应力分布，大大减轻缺口的危害。

3. 材料抗疲劳过载能力与强、塑、韧关系

对要求有限寿命的机件，就不能按材料疲劳极限来确定机件的许用应力，而要按规定寿

命来找相应的材料疲劳过载持久值。对要求无限寿命的机件，工作过程中也不可避免地要有偶然超载，在超载应力循环下材料的疲劳过载持久值也是必须考虑的。

我们以 40Cr 不同 K_t 情况下的旋转弯曲疲劳试验为例，如图1—22可见在试验所用各种 K_t (缺口半径 R 0.1、0.34、1 mm 情况下，疲劳极限都是以强度次序排队 (回火温度从低到高)；但对过载持久值部分，则缺口影响随应力集中程度的增加而变显著。对缓和缺口 (R 1mm)，在过载应力从低到高的全部过载范围内，过载持久值大小都是依强度排队，显示了在过载持久值中强度的主导作用。在 R 0.34mm 情况下，过载持久值仍然基本上依强度排队，但是在 R 0.1 mm 时持久值曲线出现了交点，表示对持久值，随应力集中程度的增加，塑性的作用增加。对于任一交点，交点以上，塑性起较大的作用；交点以下，强度起较大的作用[28]，对缺口半径 R 0.1mm 的试验结果，依不同应力水平，绘成破断循环周次 N 与回火温度关系曲线，图 1—23，可见在高过载水平 ($\sigma = 40, 30 \text{ kgf/mm}^2$)，最佳强、塑配合在 390°C 回火；过载水平降到 28 kgf/mm^2 ，则 200°C 回火的就居于最佳位置，而 550°C 回火的在所试应力集中范围内，一直到很高应力水平，都没有达到最佳位置的趋势。

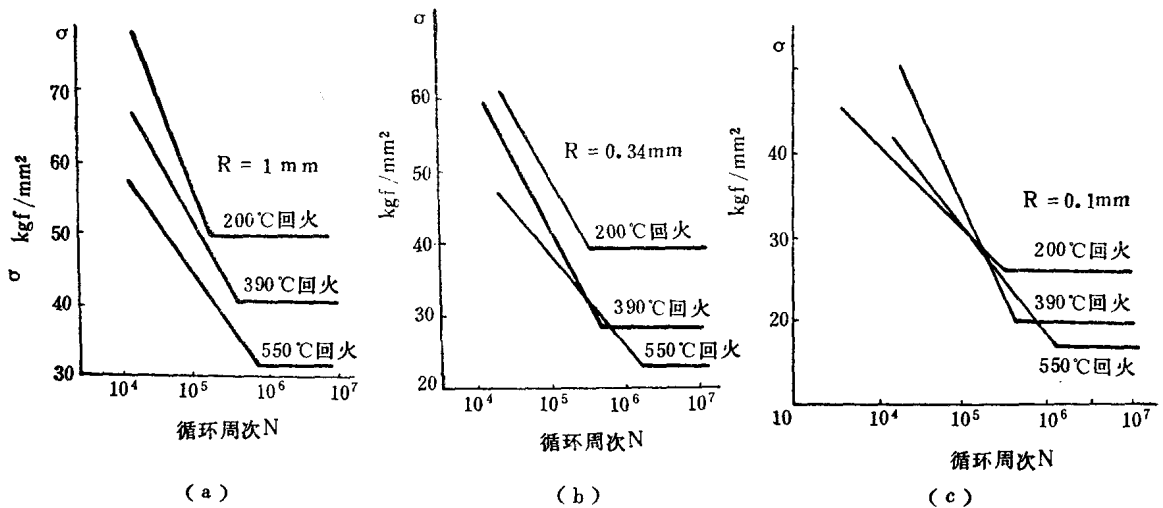


图1—22 40Cr 不同处理状态，不同应力集中情况下旋转弯曲疲劳曲线

(四) 多次冲击和疲劳载荷作用下，裂纹萌生、发展与强度和塑性的关系

在疲劳和多冲这样的循环重复载荷作用下的断裂问题，实质上都是裂纹的产生与发展的问題。描述裂纹的产生和发展可以用这样几个参数：裂纹孕育期 N_0 (裂纹萌生期)，裂纹发展期 N_1 ，裂纹发展速率 $\frac{da}{dN}$ ，极限裂纹深度 a_c ，总寿命 N_t 。

研究疲劳和多冲裂纹发生与发展的规律，是了解断裂实质、寻找提高多冲疲劳断裂抗力措施的根本途径。其主要试验结果如下：

1. 裂纹孕育期 N_0

对应力水平只在疲劳极限附近运转的机件， N_0 在总寿命中占有很大的比例，特别是对高强度材料， N_0 占了总寿命的绝大部分，裂纹一经产生，发展就很快，因此，应当尽可能推迟裂纹的产生。我们用 45Cr 不同温度回火，开不同曲率半径 R 的缺口试样进行多冲弯曲试验，得出如图1—24所示的结果。表明在缓和缺口的情况下， N_0 的大小主要决定于材料的强度，但是在应力集中程度较高的尖缺口情况下，在某一回火温度出现了 N_0 的高峰，表示有