疲劳 · S-N 曲线 · 疲劳极限 · GOODMAN · 应力集中 · 技术参考文档 · 公开

疲劳设计 入门

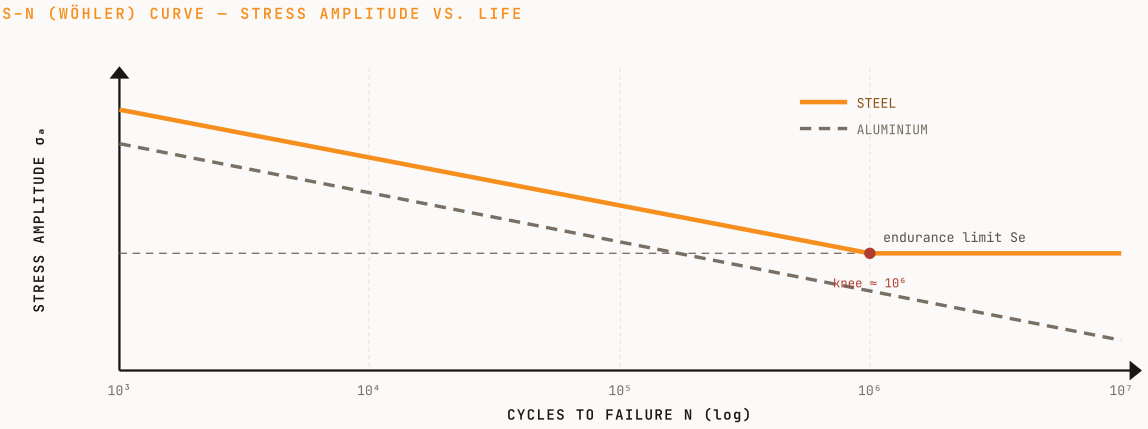
防止循环载荷下失效的设计方法——S-N 曲线与疲劳极限、使疲劳极限降低的马林修正系数、平均应力（Goodman）修正，以及裂纹真正萌生的缺口部位。

修订	发布	负责	附件
1.0	June 2026	Ideambox 工程团队	PDF 参考资料

摘要

机械零件在使用中的断裂，大多数属于疲劳断裂——在远低于静强度的循环应力作用下产生裂纹。疲劳由应力*幅*（以及平均应力）驱动，从应力集中处扩展，并对表面粗糙度极为敏感。本入门资料给出高周疲劳的设计流程。

第 1 节介绍什么是疲劳。第 2 节为 S-N 曲线与疲劳极限。第 3 节为马林修正系数，用于将试验室疲劳极限折减为实际零件的疲劳极限。第 4 节为平均应力修正（Goodman / Gerber / Soderberg）。第 5 节为应力集中与缺口敏感度。第 6 节为设计准则与检查清单。



S-N 曲线。钢存在疲劳极限——低于该应力即可无限次运转；铝和大多数有色合金的曲线持续下降，因此只能按有限循环次数标定。表面状态、尺寸和缺口都会降低实际的疲劳极限。

目录

1. 什么是疲劳
2. S-N 曲线与疲劳极限
3. 疲劳极限修正系数（马林修正系数）
4. 平均应力修正
5. 应力集中与缺口
6. 设计准则与检查清单

1. 什么是疲劳

承受反复载荷的零件，可能在远低于屈服强度的应力下开裂并失效。裂纹在应力集中处萌生，每个循环扩展一点，最终剩余截面突然断裂。驱动因素是**交变应力**，并受**平均应力**的影响。

1.1 术语

应力幅 σ_a	应力范围的一半——$(\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$——疲劳的主要驱动因素
平均应力 σ_m	$(\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$——拉伸平均应力会缩短寿命
应力比 R	$\sigma_{min} / \sigma_{max}$（R = −1 为对称循环，R = 0 为脉动循环）
疲劳极限 Se	钢能无限次承受的应力幅（$>10^6$–10^7 次循环）
S-N 曲线	应力幅与失效循环次数的关系（双对数坐标），由旋转弯曲试验得到
Kt / Kf	缺口处的理论 / 有效应力集中系数

高周疲劳（$>10^3$ 次循环，弹性范围）采用下文的 S-N / 疲劳极限方法处理。极低周的塑性疲劳需要采用应变-寿命法（不在本资料范围内）。

2. S-N 曲线与疲劳极限

以应力幅对失效循环次数作图，得到 S-N（Wöhler）曲线：

- **钢**具有**疲劳极限**——在约 10^6 次循环处出现拐点，低于该应力时寿命实际上为无限。试验室估算值为 `Se' ≈ 0.5 · Sut`（Sut > ~1400 MPa 时上限取 ~700 MPa）。
- **铝和大多数有色合金**没有**真正的疲劳极限**——曲线持续下降，因此按有限寿命标定（例如 5×10^8 次循环下的疲劳强度）。
- 约 10^3 至 10^6 次循环之间的有限寿命区近似为对数线性；针对目标寿命可在此区间内插值。

`Se'` 对应的是抛光的试验室试样。实际零件总是更弱——这正是马林修正系数的用途。

3. 疲劳极限修正系数（马林修正系数）

将试验室疲劳极限折减为设计值：`Se = ka · kb · kc · kd · ke · Se′`。

系数	考虑因素	典型值
ka — 表面	表面加工状态（裂纹从表面萌生）	磨削 ~0.9，机加工 ~0.7–0.8，热轧 ~0.5–0.7，锻造原表面 ~0.3–0.5
kb — 尺寸	截面越大越早失效（弯曲/扭转）	~1.0（d ⩽ 8 mm）降至 ~0.75（大尺寸）；轴向载荷 = 1.0
kc — 载荷类型	弯曲、轴向与扭转的差别	弯曲 1.0，轴向 0.85，扭转 0.59
kd — 温度	强度随温度的变化	室温附近 ~1.0
ke — 可靠度	更高存活率对应的分散性	50% 1.00，90% 0.90，99% 0.81，99.9% 0.75

表面状态（ka）通常是单项折减最大的因素——锻造或腐蚀后的表面可使疲劳极限减半。因此疲劳关键零件要进行磨削、抛光或喷丸处理。标准表面系数公式为 `ka = a · Sut^b`（a、b 按表面加工方式取值；Sut 单位为 MPa）。

4. 平均应力修正

拉伸平均应力会降低许用应力幅。用以下准则之一合成 σ_a 与 σ_m：

准则	公式	适用
Goodman（修正）	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sut = 1/n$	偏脆材料 / 保守设计的默认选择
Gerber	$\sigma_a/Se + (\sigma_m/Sut)^2 = 1/n$	塑性钢，较不保守（与试验数据吻合）
Soderberg	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sy = 1/n$	最保守；同时防止屈服

式中 **n** 为疲劳安全系数。Goodman 是常用的默认准则。还必须在峰值应力处校核静屈服（σ_max ⩽ Sy/n）。

5. 应力集中与缺口

疲劳裂纹从**应力集中处**萌生——圆角、孔、键槽、螺纹、轴肩、刀痕。理论应力集中系数 **Kt** 乘以名义应力；其*疲劳*效应为 `Kf = 1 + q(Kt - 1)`，其中 **q**（缺口敏感度，0–1）随材料强度和缺口半径增大而增大。

- 在 Goodman 校核中，对*交变*应力（通常也对平均应力）乘以 Kf。
- 加大**圆角半径**是成本最低的疲劳改进措施——尖锐的内角就是裂纹的“制造厂”。
- 螺纹、键槽和压装配合边缘是典型的裂纹萌生部位——应避开最高应力区，或精心设计其细节（滚压螺纹、退刀槽圆角）。

6. 设计准则与检查清单

- **所有内角倒圆**——轴肩和截面变化处的圆角半径尽量取大。
- **在高应力处改善表面**——精加工，并通过喷丸 / 表面滚压引入残余压应力（可显著提高疲劳强度）。
- **避免应力集中叠加**——不要在高应力区的圆角上开孔。
- **降低平均应力**——预紧、残余压应力和对称加载都有帮助。
- **焊缝采用合适的细节**——焊趾是严重的缺口；对焊趾进行打磨/锤击，并采用有疲劳等级划分的接头细节。
- **设计检查清单：**求危险截面的 σ_a 和 σ_m → 乘以 Kf → 估算 Se = ka·kb·kc·kd·ke·Se′ → 用 Goodman 求疲劳安全系数 n → 在 σ_max 处校核静屈服 → 若裕度不足，优先改善表面状态、圆角和残余应力。

可配合 Ideambox 弹簧和螺栓连接工具使用，其疲劳安全系数正是采用此 Goodman 方法计算的。

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/zh-hans/downloads/fatigue-design-primer/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact