疲勞 · S-N 曲線 · 疲勞極限 · GOODMAN · 應力集中 · 技術參考文件 · 公開

疲勞 設計入門

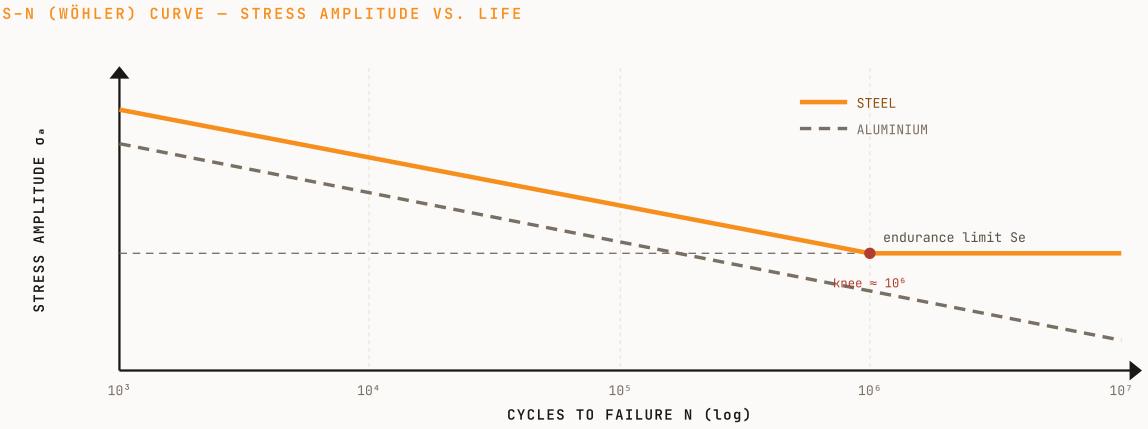
防止循環負荷破壞的設計方法——S-N 曲線與疲勞極限、使其打折扣的馬林修正係數、平均應力（Goodman）修正，以及裂紋真正萌生的缺口部位。

修訂	發行	負責	附件
1.0	June 2026	Ideambox 工程團隊	PDF 技術參考

摘要

實際使用中斷裂的機械零件，大多數是疲勞破壞——在遠低於靜態強度的循環應力下產生裂紋。疲勞由應力*振幅*（以及平均應力）驅動，從應力集中處成長，且對表面粗糙度極為敏感。本入門整理了高週疲勞的設計流程。

第 1 節說明什麼是疲勞。第 2 節為 S-N 曲線與疲勞極限。第 3 節為馬林修正係數，將實驗室疲勞極限換算為實際值。第 4 節為平均應力修正（Goodman / Gerber / Soderberg）。第 5 節為應力集中與缺口敏感度。第 6 節為設計原則與檢核清單。



S-N 曲線。鋼材具有疲勞極限——低於此應力即可無限次運轉；鋁及大多數非鐵合金的曲線持續下降，因此以有限循環次數來標示強度。表面狀態、尺寸與缺口都會降低實際極限。

目錄

1. 什麼是疲勞
2. S-N 曲線與疲勞極限
3. 疲勞極限修正（馬林修正係數）
4. 平均應力修正
5. 應力集中與缺口
6. 設計原則與檢核清單

1. 什麼是疲勞

承受反覆負荷的零件，可能在遠低於其降伏強度的應力下產生裂紋並破壞。裂紋從應力集中處萌生，每一次循環成長一點，最後剩餘斷面突然斷裂。驅動因素是**交變應力**，並受**平均應力**影響。

1.1 名詞

應力振幅 σ_a	應力範圍的一半——$(\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$——疲勞的主要驅動因素
平均應力 σ_m	$(\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$——拉伸平均應力會縮短壽命
應力比 R	$\sigma_{min} / \sigma_{max}$（R = −1 完全反覆，R = 0 脈動）
疲勞極限 Se	鋼材可無限次承受的應力振幅（$>10^6$–10^7 次循環）
S-N 曲線	應力振幅對破壞循環次數（雙對數），由旋轉樑試驗求得
Kt / Kf	缺口處的幾何 / 疲勞應力集中係數

高週疲勞（$>10^3$ 次循環，彈性範圍）以下述 S-N / 疲勞極限法處理。極低週的塑性疲勞則需要應變壽命法（不在本文範圍內）。

2. S-N 曲線與疲勞極限

將應力振幅對破壞循環次數作圖，即得到 S-N（Wöhler）曲線：

- **鋼材**具有**疲勞極限**——約在 10^6 次循環處出現轉折點，低於此應力壽命實質上為無限。實驗室估算值為 `Se' ≈ 0.5 · Sut`（Sut > ~1400 MPa 時上限約 700 MPa）。
- **鋁及大多數非鐵合金**並**沒有真正的疲勞極限**——曲線持續下降，因此以有限壽命標示（例如 5×10^8 次循環下的疲勞強度）。
- 約 10^3 至 10^6 次循環之間的有限壽命區大致呈對數線性；可在此區間內內插求得目標壽命。

`Se'` 是拋光的實驗室試片。實際零件一定更弱——這正是馬林修正係數的用途。

3. 疲勞極限修正（馬林修正係數）

將實驗室極限折減為設計值：`Se = ka · kb · kc · kd · ke · Se'`。

係數	考量因素	典型值
ka — 表面	表面加工（裂紋從表面萌生）	研磨 ~0.9、切削 ~0.7–0.8、熱軋 ~0.5–0.7、鍛造黑皮 ~0.3–0.5
kb — 尺寸	斷面越大越早破壞（彎曲 / 扭轉）	~1.0（d ≤ 8 mm）降至 ~0.75（大尺寸）；軸向 = 1.0
kc — 負荷型式	彎曲、軸向或扭轉	彎曲 1.0、軸向 0.85、扭轉 0.59
kd — 溫度	強度隨溫度變化	室溫附近 ~1.0
ke — 可靠度	提高存活率所需的離散折減	50% 1.00、90% 0.90、99% 0.81、99.9% 0.75

表面加工（ka）通常是單項折減最大的因素——鍛造黑皮或腐蝕的表面可使疲勞極限減半。這就是疲勞關鍵零件要研磨、拋光或珠擊（shot peening）的原因。標準表面係數為 `ka = a · Sut^b`（a、b 依表面加工而定；Sut 單位 MPa）。

4. 平均應力修正

拉伸平均應力會降低容許振幅。以下列其中一種準則合併 σ_a 與 σ_m：

準則	公式	適用
Goodman（修正）	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sut = 1/n$	偏脆材料 / 保守設計的預設選擇
Gerber	$\sigma_a/Se + (\sigma_m/Sut)^2 = 1/n$	延性鋼材，較不保守（與數據吻合）
Soderberg	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sy = 1/n$	最保守；同時防止降伏

此處 **n** 為疲勞安全係數。Goodman 是一般的預設選擇。務必同時檢核峰值應力下的靜態降伏（σ_max ≤ Sy/n）。

5. 應力集中與缺口

疲勞裂紋從**應力集中處**萌生——圓角、孔、鍵槽、螺紋、軸肩、刀痕。幾何係數 **Kt** 乘以名目應力；*疲勞*效應則為 `Kf = 1 + q(Kt - 1)`，其中 **q**（缺口敏感度，0–1）隨材料強度與缺口半徑增加而上升。

- 在 Goodman 檢核中，將 Kf 套用於*交變*應力（通常也套用於平均應力）。
- 加大**圓角半徑**是成本最低的疲勞改善方式——尖銳內角就是裂紋製造機。
- 螺紋、鍵槽與壓入配合的邊緣是典型的裂紋萌生處——應避開最高應力區，或仔細處理細部（滾牙螺紋、退刀槽圓角）。

6. 設計原則與檢核清單

- **所有內角都要倒圓**——軸肩與斷面變化處的圓角半徑盡量加大。
- **改善高應力處的表面**——精細加工，以及珠擊 / 表面滾壓以導入殘留壓應力（可顯著提高疲勞強度）。
- **避免應力集中疊加**——不要在高應力區的圓角上開孔。
- **壓低平均應力**——預緊、殘留壓應力與對稱負荷都有幫助。
- **焊接採用合適的細部設計**——焊趾是嚴重的缺口；研磨 / 錘擊焊趾，並採用具疲勞等級的接頭細部。
- **設計檢核清單：** 求出危險斷面的 σ_a 與 σ_m → 套用 Kf → 估算 Se = ka·kb·kc·kd·ke·Se′ → 以 Goodman 求疲勞安全係數 n → 檢核 σ_max 下的靜態降伏 → 若餘裕不足，優先改善表面加工、圓角與殘留應力。

可搭配 Ideambox 的彈簧與螺栓接合工具使用，其疲勞係數正是採用這套 Goodman 方法。

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

Designing something that needs this? ideambox.com/contact