

基于欧标的焊缝承载力校核

筑信达 张志国

目前，IDEA 支持基于美标 AISC、欧标 EN、加拿大规范 CISC 以及澳大利亚规范 AS 的钢结构节点校核，具体包括：螺栓或锚栓校核、焊缝校核、柱脚节点的混凝土校核。为了让广大用户深入学习和理解关于钢结构节点校核的更多细节，本文着重介绍基于欧标 EN 1993-1-8 的焊缝承载力校核。至于其它组件（如锚栓、螺栓、混凝土等）或其它规范（如 AISC、CISC、AS 等）的钢结构节点校核，我们将在后续文章中向大家一一介绍，敬请关注！

1 焊缝的数值模拟方法

关于焊缝在有限元模型中的模拟方法，部分有限元软件采用 MPC 约束，即：Multi-Point Constraint（多点约束）。该方法基于拉格朗日算法通过力与变形之间的约束方程在板件之间传递荷载，其优点在于利用板件间有限元节点的绑定可以匹配不同密度的有限元网格，具有一定的灵活性和适用性。但是，MPC 法由于无法考虑焊缝的刚度和弹塑性，往往导致明显的应力集中现象。因此，板件端部、拐角或凹槽处的应力峰值往往控制着整条焊缝的承载力，即使采用平均化或插值处理来削减应力峰值，焊缝整体的应力分布仍偏于保守。

为了避免上述应力峰值对焊缝承载力的不利影响，IDEA 在相邻板件间添加一种特殊的弹塑性单元来模拟焊缝。该弹塑性单元采用基于 Von Mises 屈服准则的率无关的理想塑性模型（极限塑性应变为 5%），忽略施焊过程中造成的残余应力和焊缝变形。同时，该弹塑性单元可以准确考虑焊缝的计算厚度、位置和方向，焊缝应力沿轴向的塑性重分布也可以有效避免应力集中现象。

综上，IDEA 采用的弹塑性焊缝单元可以根据焊缝的刚度及弹塑性属性计算焊缝应力，无需进行应力插值或平均化处理。因此，采用该方法计算的最大焊缝应力可直接用于焊缝的承载力校核。

2 角焊缝的承载力校核

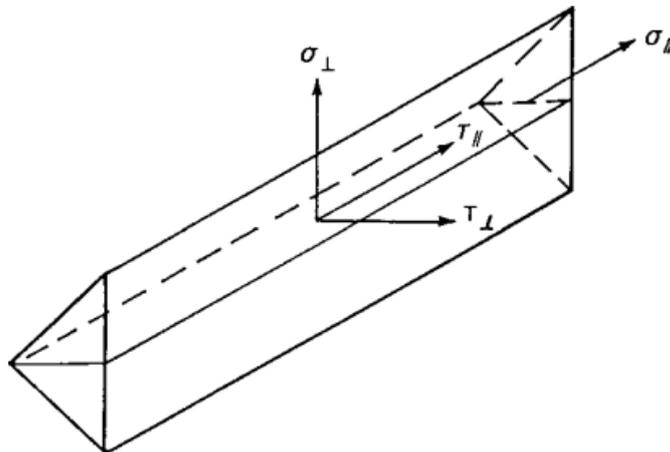


图 1 角焊缝有效截面的应力分量

如图 1 所示，焊缝有效截面的应力分量包括垂直于有效截面的正应力 σ_{\perp} 、平行于焊缝纵向的正应力 σ_{\parallel} 、垂直于焊缝纵向的剪应力 τ_{\perp} 和平行于焊缝纵向的剪应力 τ_{\parallel} 。通常情况下，焊缝的承载力校核无需考虑正应力 σ_{\parallel} 。因此，根据第四强度理论（形状改变能密度理论）计算的折算应力如下所示：

$$\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

根据欧标 EN 1993-1-8: 2005 第 4.5.3 条规定，角焊缝的承载力校核应同时考虑折算应力 $\sigma_{w,Ed}$ 和正应力 σ_{\perp} 。具体如下：



$$\sigma_{w,Ed} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{0.9f_u}{\gamma_{M2}}$$

其中， f_u 为板件的极限强度（取较小值），与钢材牌号有关。如：S 355 钢材的极限强度 $f_u=490\text{MPa}$ 。
 β_w 为相关系数（取较大值），与钢材牌号有关，详见欧标 EC 1993-1-8 表 4.1（如图 2 所示）。
 γ_{M2} 为焊缝承载力的分项安全系数，详见欧标 EC 1993-1-8 表 2.1，推荐取值 1.25。

Table 4.1: Correlation factor β_w for fillet welds

Standard and steel grade			Correlation factor β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

图 2 角焊缝的相关系数

需要注意的是，IDEA 计算每一个焊缝单元的折算应力 $\sigma_{w,Ed}$ 和正应力 σ_{\perp} 并校核其承载力，承载比 U_t 的计算公式如下所示。不过，IDEA 在数据表格和计算报告中只输出对当前焊缝起**控制作用**（即最大承载力比 U_t ）的焊缝单元的计算过程和校核结果，如图 3 所示。

$$U_t = \max \left(\frac{\sigma_{w,Ed}}{\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}}, \frac{|\sigma_{\perp}|}{\frac{0.9f_u}{\gamma_{M2}}} \right)$$

Weld resistance check (EN 1993-1-8 4.5.3.2)

$\sigma_{w,Rd} = f_u / (\beta_w \gamma_{M2}) = 435.6 \text{ MPa} \geq \sigma_{w,Ed} = [\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0.5} = 405.6 \text{ MPa}$

$\sigma_{\perp,Rd} = 0.9f_u / \gamma_{M2} = 352.8 \text{ MPa} \geq |\sigma_{\perp}| = 173.5 \text{ MPa}$

where:

- $f_u = 490.0 \text{ MPa}$ – Ultimate strength
- $\beta_w = 0.90$ – appropriate correlation factor taken from Table 4.1
- $\gamma_{M2} = 1.25$ – Safety factor

Stress utilization

$U_t = \max \left(\frac{\sigma_{w,Ed}}{\sigma_{w,Rd}}, \frac{|\sigma_{\perp}|}{\sigma_{\perp,Rd}} \right) = 93.1 \%$

图 3 角焊缝的承载力校核



焊缝的承载力利用率 U_{tc} 用于描述整条焊缝总承载力的利用程度。如图 4 所示，对于梁的上翼缘与柱翼缘之间的角焊缝，折算应力的承载力为 435.6MPa，整条焊缝的承载力为焊缝长度与 435.6MPa 的乘积，即图中整个黄色矩形区域的面积 A_{tot} 。该角焊缝承受的总荷载为各个焊缝单元的折算应力与单元长度的乘积之和，即图中“参差不齐”的多个绿色矩形面积之和 A_1 。

因此，焊缝的承载力利用率 $U_{tc} = A_1 / A_{tot}$ 代表整条焊缝承载力的利用率。该值越接近 1，代表焊缝的承载力利用率越高；相反，该值越接近 0，代表焊缝中的应力集中现象越明显，其承载力利用率也就越低。

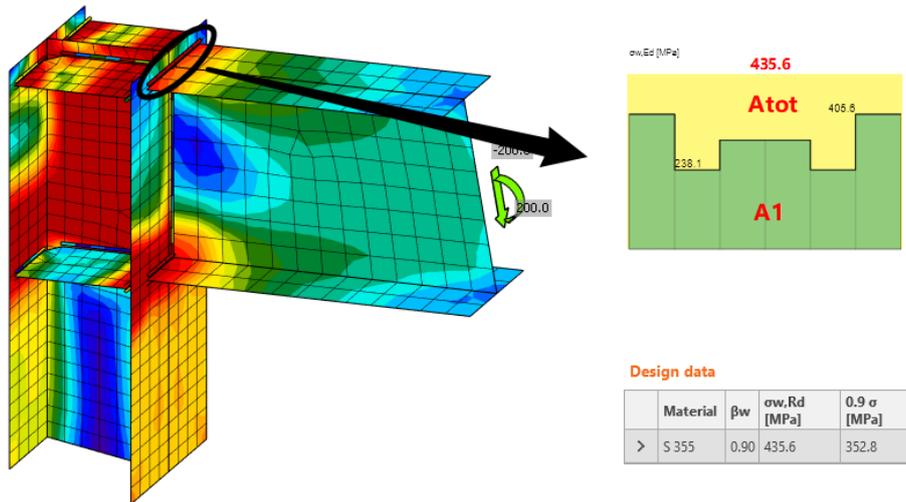


图 4 等效应力云图与角焊缝的承载力利用率

3 对接焊缝的承载力校核

IDEA 中的对接焊缝均为全熔透对接焊缝，故无需进行承载力校核。

4 小结

本文详细介绍了 IDEA 中基于欧标的角焊缝承载力校核，具体包括：焊缝单元的应力分量、折算应力、焊缝承载比以及焊缝承载力利用率。希望以上内容可以帮助众多的 IDEA 用户或爱好者更加深入地理解和应用此软件，以期解决实际工程中遇到的有关欧标的钢结构节点设计与校核问题。

