

基于美标的焊缝承载力计算

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、澳大利亚规范 AS、俄罗斯规范 SP 以及国标 GB 的钢结构节点校核，具体包括：板件校核、焊缝校核、螺栓或锚栓校核以及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，本文将重点介绍基于美标 AISC 360-16 的焊缝承载力在 IDEA 中的具体计算方法。关于其它组件（如螺栓、锚栓、混凝土等）或规范（如 EN、CISC、AS 等）的钢结构节点校核，请读者参阅《筑信达技术通讯》中刊载的往期文章或关注本期刊的后续文章。

美标 AISC 360-16 支持分项系数设计法（LRFD）和允许应力设计法（ASD）两种设计方法，前者的承载力设计值 ϕR_n 中包含分项系数 ϕ ，后者的允许承载力 R_n/Ω 中包含安全系数 Ω ，用户可根据需要选择具体采用的设计方法，也可以在 IDEA 的设置选项中修改上述分项系数和安全系数的默认值。本文将在后续内容中分别介绍上述两种设计方法在基于美标的焊缝承载力计算中的具体应用。

1 焊缝应力

关于焊缝在有限元模型中的模拟方法，某些有限元软件采用 MPC 约束，即：多点约束（Multi-Point Constraint）。该方法基于拉格朗日算法，利用力与变形之间的约束方程在板件之间传递荷载。MPC 法的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，往往导致显著的应力集中现象。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%），忽略施焊过程中产生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

$$\phi=0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.00 \text{ (ASD)}$$

$$R_n = F_{mw} A_{we} \quad \text{(AISC 360-16 J2-4)}$$

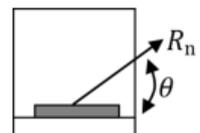
$$F_{mw} = 0.60 F_{EXX} (1.0 + 0.5 \sin^{1.5} \theta) \quad \text{(AISC 360-16 J2-4)}$$

其中， A_{we} —焊缝有效面积，即：焊缝单元的长度与计算厚度的乘积，计算厚度等于 0.7 倍的焊脚尺寸。

F_{nw} —焊缝强度，具体取值与焊条强度 F_{EXX} 以及焊缝单元的内力方向 θ 有关。

F_{EXX} —焊条强度，具体取值可查阅 AWS（American Welding Society）规范。

θ —焊缝单元的内力与焊缝纵轴之间的夹角，如右图所示。



可以看出，美标 AISC 采用焊缝单元的内力进行承载力校核，同时根据内力方向调整焊缝强度的取值。焊缝单元的长度和数量与相邻板件的网格划分密度有关，IDEA 以承载比最大的焊缝单元作为整条焊缝失效的判断标准。这一点与欧标 EN 和国标 GB 有所不同，后两者均采用焊缝有效截面的折算应力 $\sigma_{w,Ed}$ 和正应力 σ_{\perp} 进行承载力校核。虽然美标 AISC 并未严格区分焊缝有效截面的各种应力分量（如 σ_{\perp} 、 τ_{\perp} 、 τ_{\parallel} ），但上述 θ 角与焊缝单元的内力分量（如拉力、压力、剪力）密切相关，同样可以考虑复杂的空间受力状态。典型的角焊缝承载力校核如下所示：

Weld resistance check (AISC 360-16: J2-4)

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nw} \cdot A_{we} = 81.6 \text{ kN} \geq F_n = 58.8 \text{ kN}$$

Where:

$F_{nw} = 424.0 \text{ MPa}$ – nominal stress of weld material:

- $F_{nw} = 0.6 \cdot F_{EXX} \cdot (1 + 0.5 \cdot \sin^{1.5}\theta)$, where:
 - $F_{EXX} = 482.6 \text{ MPa}$ – electrode classification number, i.e. minimum specified tensile strength
 - $\theta = 72.2^\circ$ – angle of loading measured from the weld longitudinal axis

$A_{we} = 257 \text{ mm}^2$ – effective area of weld critical element

$\phi = 0.75$ – resistance factor for welded connections

除焊缝自身的承载力校核之外，美标 AISC 还可以考虑母材熔合面的受拉或受剪破坏，以焊缝承载力和母材承载力的较小者计算控制承载比。默认情况下，IDEA 不考虑母材的承载力校核；如有需要，用户可在设置选项中勾选【熔合面的母材承载力】复选框。如下所示，母材承载力的计算无需考虑焊缝强度，但与钢材强度密切相关。

$$R_n = F_{nBM} A_{BM} \quad (\text{AISC 360-16 J2-2})$$

其中， A_{BM} —母材与焊缝之间熔合面的面积，即：焊缝单元的长度与 $\sqrt{2}$ 倍计算厚度的乘积， $A_{BM} = \sqrt{2} A_{we}$ 。

$F_{nBM} = 0.6 F_u$ —母材的熔合面强度，具体取值与钢材牌号有关，用户可在 IDEA 的材料列表中查看钢材的抗拉强度 F_u 。

Base metal capacity check (AISC 360-16: J2-2)

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nBM} \cdot A_{BM} = 65.3 \text{ kN} \geq F_n = 58.8 \text{ kN}$$

Where:

$F_{nBM} = 240.0 \text{ MPa}$ – nominal stress of the base metal:

- $F_{nBM} = 0.6 \cdot F_u$, where:
 - $F_u = 400.0 \text{ MPa}$ – tensile strength of the connected material

$A_{BM} = 363 \text{ mm}^2$ – cross-sectional area of base metal:

- $A_{BM} = A_{we} \cdot \sqrt{2}$, where:
 - $A_{we} = 257 \text{ mm}^2$ – effective area of weld critical element

$\phi = 0.75$ – resistance factor for welded connections

3 对接焊缝的承载力

IDEA 中的对接焊缝均为全熔透对接焊缝，承载力与母材相同，故无需进行承载力校核。

4 小结

本文详细介绍了 IDEA 中基于美标 AISC 的角焊缝承载力校核，具体包括：焊缝应力、角焊缝承载力计算、母材熔合面承载力计算。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美标的钢结构节点设计与校核问题。