

钢材层状撕裂及抗层状撕裂焊接接头的设计

史永吉¹, 王 辉¹, 方 兴¹, 白 玲²

(1. 铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 铁道科学研究院 铁道科学技术研究发展中心, 北京 100081)

摘 要: 钢材层状撕裂是焊接钢桥中一种非常危险的缺陷, 通常发生在角焊接头处。钢材中夹杂物的数量、分布和形态以及基体金属的塑性和韧性是影响层状撕裂的钢材因素。钢材中含硫量越多, 夹杂物以片状形态大量密集于同一平面, 发生层状撕裂的倾向就越大。钢材的刚度越大、板越厚, 越容易产生层状撕裂。相同板厚、相同焊接方法条件下, 焊缝断面越大, 越易产生层状撕裂。角焊缝接头中选择贯通板, T型或十字型焊接接头中选择不熔透或部分熔透角焊缝, 热加工时避开蓝脆温度和红脆温度, 冷加工时确保一定的曲率半径 (大于15倍板厚), 改善隅角焊的坡口形式, 用小线能量焊接取代大能量焊接, 采用低强度焊道打底、焊前预热等, 均可抑制层状撕裂的发生。同时, 给出日本和 Eurocode3 的层状撕裂评定方法和 Z向钢的选材标准, 以便设计和制造人士准确把握。

关键词: 钢桥; 钢材; 层状撕裂; Z向钢; 焊接; 抗层状撕裂控制

中图分类号: TG457.11; U445.583 **文献标识码:** A

大型焊接结构中, 当在板厚方向作用拉应力, 特别是外荷载引起循环拉应力作用时, 焊缝冷却收缩引起近缝区母材上的层状撕裂是一种非常危险的缺陷。原因是: 层状撕裂很难发现, 也难以修复; 在循环拉应力作用下, 断续的单个层状撕裂很快扩展、聚合、形成一个大裂纹, 再扩展, 直至结构破坏, 整个过程发生时间很短, 破坏突然。

如何避免层状撕裂及由此造成的严重危害, 现已成为焊接结构设计中的重要问题。它涉及钢材的选择, 焊接接头的设计及焊接工艺。

抗层状撕裂钢, 又称 Z向钢, 是指板厚方向的延性 (或塑性) 应达到一定指标的钢^[1]。它的价格比普通钢材贵许多。

不当的选材将无端增大桥梁建设投资。因为一座桥梁, 不是所有构件都要求板厚方向达到一定的延性标准, 其中绝大部分构件不要求钢材具有 Z向延性, 但是有 Z向延性要求的构件, 又必须选用 Z向钢。

1 层状撕裂产生机理

层状撕裂不同于通常发生在焊缝上的热裂纹和

冷裂纹, 它是发生在热影响区和靠近热影响区母材上的一种特殊裂纹。

层状撕裂通常发生在角焊接头中 (如 T型接头、十字型接头和隅角焊接头等), 见图1所示。

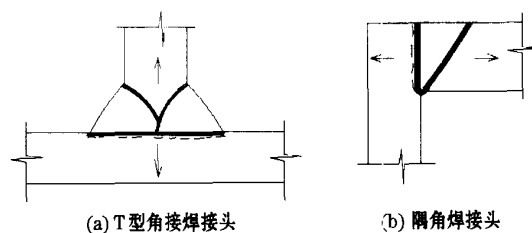


图1 典型焊接接头的层状撕裂

产生层状撕裂的主要原因是钢材中含有微量非金属夹杂物, 特别是硫化物, 如 MnS, 其次是 SiO₂, Al₂O₃ 等氧化物。轧制钢材时, 这些夹杂物受到延压, 呈片状分布在平行于钢板表面的板材中。焊接时, 焊缝金属由液相冷却而凝结成固相, 伴随发生收缩。当收缩力顺板厚方向的拉应力达到一定程度后, 夹杂物与基体金属沿弱结合面脱开而产生开裂, 严重时, 会造成相邻夹杂物之间基体金属的晶界断裂、穿晶断裂或韧窝断裂, 形成层状撕裂^[2]。层状撕裂的形成和微观示意图见图2所示。

收稿日期: 2005-04-27

作者简介: 史永吉 (1941—), 男, 江苏南京人, 研究员。

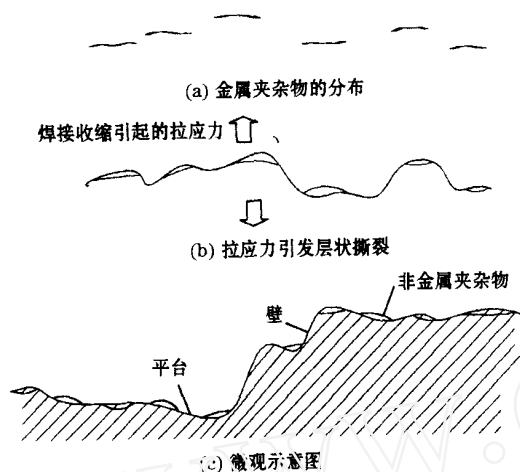


图2 层状撕裂的形成及微观图

层状撕裂裂缝长度可能是夹杂物长度的几倍，甚至数十倍、数百倍，所以，层状撕裂绝不仅仅是非金属夹杂物的裂开。当外荷载引起顺板厚方向的拉应力循环作用时，单个层状撕裂将很快扩展，聚合成较大的疲劳裂纹，直至结构破坏。层状撕裂引发的裂纹很难修复。

2 影响层状撕裂的因素

2.1 钢材因素

2.1.1 钢材中的非金属夹杂物

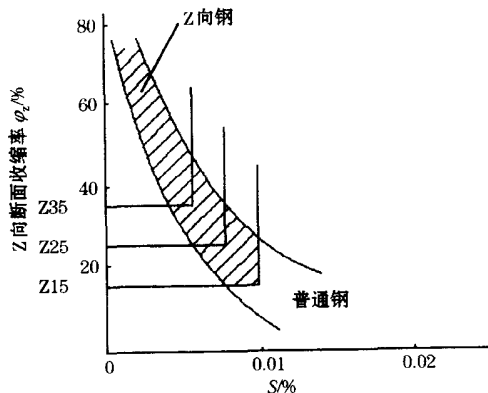
钢材中都含有一定的不同类型的非金属夹杂物，最常见的是硫化物、硅酸盐、氧化铝等。不论是哪一种夹杂物，它与基体金属的结合力均低于基体金属本身的强度，任何一种非金属夹杂物都可能导致产生层状撕裂。关键是夹杂物的数量、分布及形态，如果夹杂物以片状形态大量密集于同一平面时，就比较容易产生层状撕裂；如果是单个夹杂物，即使长度较大，其端部的曲率半径大于数量多又密集的片状夹杂物，也不一定会引发层状撕裂。

现已明确，钢中含硫量越多，顺板厚方向拉伸的塑性（用断面收缩率 ψ_z 表示，计算方法见式(1)）越低，发生层状撕裂的倾向就越大。图3给出了钢中含硫量与Z方向断面收缩率 ψ_z 之间的关系。由此可用钢材Z向断面收缩率来评定钢材抗层状撕裂的性能^[3]。以此定义具有良好抗层状撕裂性能的钢材为Z向钢。

$$\psi_z = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \quad (1)$$

式中： A_1 为圆试样断面面积； A_2 为试样拉断处断面

积。

图3 钢中含硫量与Z方向断面收缩率 ψ_z 之间的关系

2.1.2 母材的基体性能

从层状撕裂的形成过程可知，层状撕裂与非金属夹杂物的分布、密集程度有直接关系，且层状撕裂裂纹中，是形成同一平面内相邻夹杂物的“平台”部分还是形成不同平面内相邻夹杂物的“壁”部分，与钢材基体金属的塑性和韧性有关。

影响基体金属塑性和韧性的因素很多，如晶粒细化程度、金相组织状态、应变时效脆化和氢脆等。因此，在钢材冶炼和轧制中，除降低非金属含量外，细化晶粒、增加铁素体和珠光体组织的比例，钢材的冷热加工中减少应变时效等，都有利于避免层状撕裂的发生。

2.2 设计和焊接工艺因素

2.2.1 合理选材

从经济性看，Z向钢比普通钢贵很多，盲目地选用Z向钢会增大桥梁建设的投资；相反，复杂焊接结构中，当顺板厚方向作用拉应力时，特别是外荷载引起的拉应力循环作用时，就应考虑采用Z向钢，否则将产生层状撕裂影响结构的安全。

选用Z向钢，需进行抗层状撕裂敏感性评定试验。通常采用十字型全熔透角焊缝接头，顺板厚方向取园棒试样（如图4所示）进行拉伸试验，测定其断面收缩率，然后按表1进行Z向钢分级。

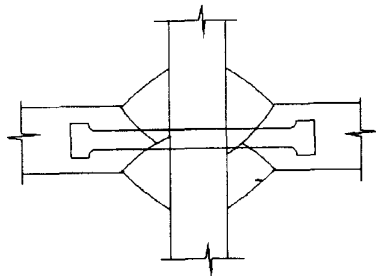


图4 Z向拉伸试样的准备及取样

表 1 Z 向钢分级

| 代号 | 含硫量 | σ _s | | 用途 |
|-----|-------------|----------------|------------|------------------------|
| | | 6 个试样 平均值 | 单试样 最小值 | |
| Z15 | 约 < 0.01 % | > 15 % | > 10 % | 担心可能产生层状撕裂的焊接结构 |
| Z25 | 约 < 0.008 % | > 25 % | > 15 % | 层状撕裂危险性很大的焊接结构 |
| Z35 | 约 < 0.006 % | > 35 % | > 25 % | 层状撕裂危险性很大、安全度要求很高的焊接结构 |

2.2.2 焊接接头设计

由层状撕裂产生的原因可知，焊接时，焊缝收缩受到约束容易产生层状撕裂，而且约束度越大越容易产生。所以在结构设计时应注意：

- 1) 刚度越大、板越厚越容易产生层状撕裂；
- 2) 在相同板厚、相同焊接方法条件下，焊缝断面越大，越易产生层状撕裂；
- 3) 不同设计形式的角焊缝接头对层状撕裂的影响不同（见图 5 所示）。贯通板比不贯通板好，

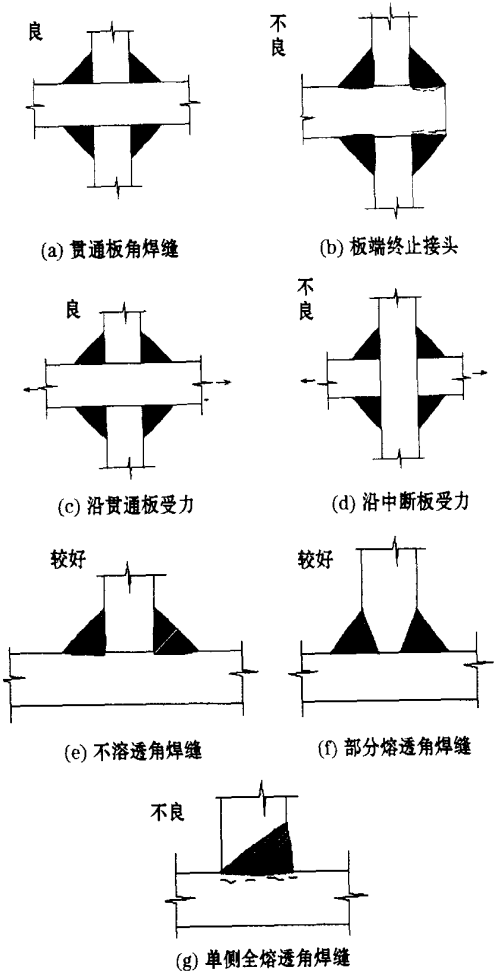


图 5 不同设计形式的角焊缝接头

沿贯通板受力比沿中断板受力好。T 型或十字型焊接接头中，不熔透或部分熔透角焊缝比全熔透角焊缝好，单侧全熔透角焊缝最不利。

2.2.3 加工及焊接工艺

钢材加工时应注意以下几点。

- 1) 热加工时，避开蓝脆温度（200 ~ 300 °C）和红脆温度（900 ~ 950 °C），以避免钢材塑性和韧性的降低。
- 2) 冷加工时，确保一定的曲率半径（ $R > 15t$ ），以利于减少应变时效脆化倾向和塑性、韧性的降低。
- 3) 不同的焊接工艺对层状撕裂的影响不同（见图 6—图 9 所示）。改善隅角焊的坡口形式，用小线能量焊接取代大能量焊接，采用低强度焊道打底、焊前预热等，均可抑制层状撕裂的发生。

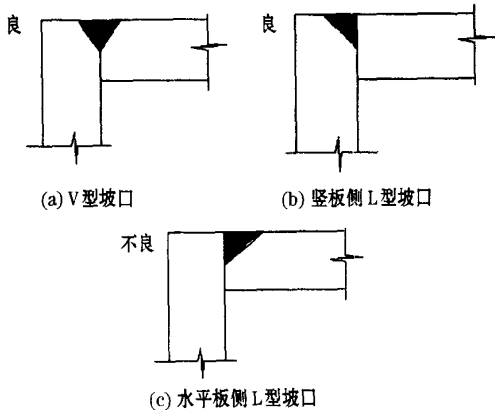


图 6 隅角焊接中坡口形式对层状撕裂的影响

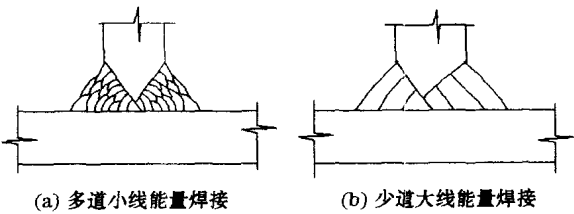


图 7 多道小线能量焊接优于大线能量焊接（需预热避免冷裂纹）

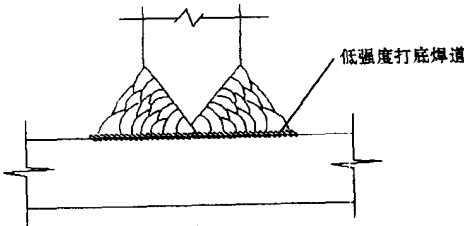


图 8 低强度打底焊道有利于抑制层状撕裂

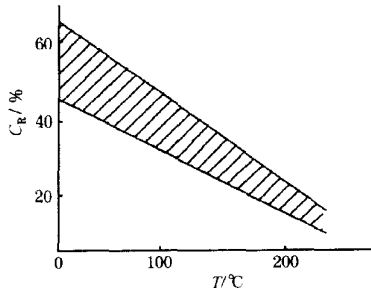


图 9 预热对层状撕裂的影响

3 层状撕裂的评定标准

由于我国还没有相关的标准，这里列出两则层状撕裂的评定方法和 Z 向钢的选材标准，供相关设计和制造人员参考。

3.1 日本土木协会结构委员会钢材规格小委员会的规定^[4]

选择抗层状撕裂钢材时，应根据经济性和施工方法，在构件组成设计上下功夫，避免重要构件在

板厚方向产生拉应力。不得使用 Z 向钢，因为多数情况下，钢材有足够的抗层状撕裂性能，或即使出现层状撕裂，但不影响结构的安全性。

结构重要部分的焊接连接，在板厚大于 15 mm 时，应避免在板厚方向产生拉应力，不得已时，才使用抗层状撕裂钢材。

焊角尺寸、接头形状、弯曲约束度和受拉约束度对层状撕裂的发生影响很大，其影响用层状撕裂敏感性指数 Z 体现，按下式计算：

$$Z = Z_a + Z_b + Z_c + Z_d \tag{2}$$

式中：Z_a 为焊脚尺寸因素；Z_b 为接头形式因素；Z_c 为弯曲约束度因素；Z_d 为拉伸约束度因素。

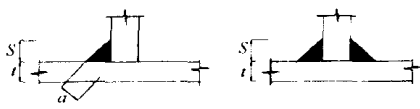
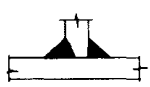


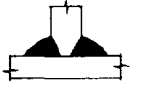

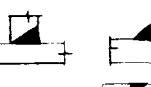
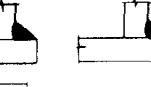

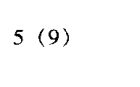

各单项因素的层状撕裂敏感性指数列于表 2。

抗层状撕裂钢材的选择，应先按式（2）计算层状撕裂敏感性指数 Z，然后根据表 3 选择相应的 Z 向钢。

3.2 Euro Code3 的规定

一构件与另一构件焊接连接时，判断发生层状

表 2 层状撕裂敏感性指标 Z_a，Z_b，Z_c，Z_d

| 影响因素 | 条件 | Z _n |
|-------------------------------------|---|----------------|
| Z _a 焊角尺寸/mm | s≤10 | 3 |
| | 10<s≤20 | 6 |
| | 20<s≤30 | 9 |
| | 30<s≤40 | 12 |
| | 40<s≤50 | 15 |
| |  | 0 (4) |
| Z _b 接头形式 (括号内为十字接头形式) |  | 3 (7) |
| |  | |
| |  | |
| |  | 5 (9) |
| Z _c 弯曲约束度 (板厚/mm) |  | 8 (12) |
| |  | |
| |  | |
| |  | |
| |  | |
| |  | 8 (12) |
| Z _d 约束度 | t≤10 | 2 |
| | 10<t≤20 | 4 |
| | 20<t≤30 | 6 |
| | 30<t≤40 | 8 |
| | 40<t≤50 | 10 |
| | 50<t≤60 | 12 |
| Z _d 约束度 | 十字型接头中 t≤25 时 | 8 |
| | 约束度小 | 0 |
| | 约束度中 | 3 |
| Z _d 约束度 | 约束度大 | 5 |

注：1) t 为板厚，s 为焊角尺寸，a 为焊缝喉高；2) Z_n 中的 n 代表 a，b，c，d。

表 3 用层状撕裂敏感性指数 Z 选择 Z 向钢

| Z | 板厚方向断面收缩率/ % | | Z 向钢等级 (WES3008) |
|-----------|--------------|-----|---------------------|
| | 平均值 | 最小值 | |
| Z 10 | — | — | — |
| 10 < Z 20 | 15 | 10 | Z15 |
| 20 < Z 30 | 25 | 15 | Z25 |
| Z > 30 | 35 | 25 | Z35 |

撕裂的可能性应考虑以下因素。

- 1) 金属撕裂的敏感性。
- 2) 在板厚方向因焊接连接而产生的拉应变因焊缝金属冷却收缩而产生应变，当水平板的自由位移受到结构其他部件的约束，该应变将极大增

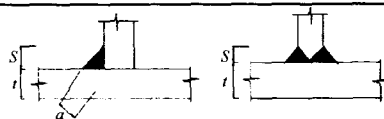
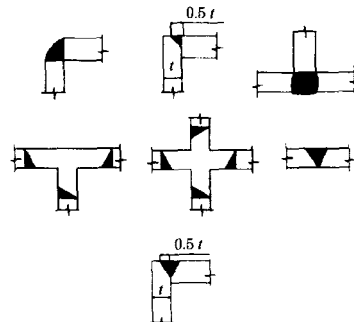


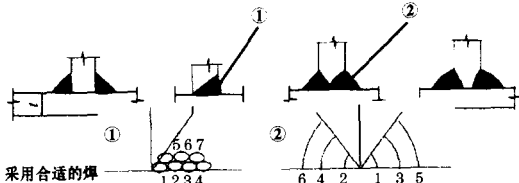
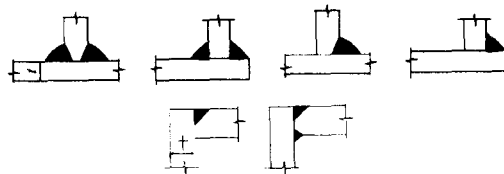
加。

3) 焊缝的方向性 如果焊缝处的收缩应变平行于轧制方向，或许不至于产生层状撕裂；如果焊缝熔合面大体平行于金属表面，并且收缩应变垂直于轧制方向可能产生层状撕裂。

4) 加载形式 仅有荷载引起的应力，对层状撕裂的影响是次要的，当该荷载为循环加载和冲击加载时，将会增大层状撕裂的敏感性。

上述因素中 1) 主要是金属材料本身，因素 2) 和 3) 主要受制造工艺的影响，因素 4) 受设计控制。

表 4 Z 值判据

| | | | |
|---|--------------|---|---|
| a | 焊角尺寸 |  | 焊喉尺寸 $a \leq 50\text{mm}$ 时 $Z_a = 0.3s$ |
| | |  | $Z_b = -25$ $Z_b = -10$ |
| | |  | $Z_b = -5$ |
| b | 焊缝形状及位置 |  | $Z_b = 0$ |
| | |  | $Z_b = 3$ |
| | |  | $Z_b = 5$ $Z_b = 8$ |
| c | 板厚使收缩受约束 | 低约束：可自由收缩（如 T 型接头） $Z_c = 0.2t$ | |
| d | 结构其他部件对收缩的约束 | 中约束：自由收缩被约束（如箱梁横隔板） $Z_d = 0$ | |
| | | 强约束：不能自由收缩（如正交异性板的纵梁） $Z_d = 3$ | |
| | | 不预热 $Z_d = 5$ | |
| e | 施焊 | 预热温度 $> 100^\circ\text{C}$ $Z_e = 0$ | |
| | | | |

注：是指在板厚方向，仅是静荷载或仅是受压引起的应力， Z_c 值可降低 50%（如底板）。

据此,该规范制订了影响 Z 值 (Z 方向断面收缩率 ψ_z) 的判据 (见表 4) 及 Z 向钢等级的选择 (见表 5)。

表 5 Z 向钢等级及其选择

| Z 计算值 | Z 向钢等级 (EN 10164) |
|------------------|---------------------|
| $Z \leq 10$ | — |
| $10 < Z \leq 20$ | Z15 |
| $20 < Z \leq 30$ | Z25 |
| $30 < Z$ | Z35 |

钢材 Z 值按下式计算:

$$Z = Z_a + Z_b + Z_c + Z_d + Z_e \quad (3)$$

如果 $Z \leq 10$ 可不选用 Z 向钢,而选用普通钢。

4 结术语

钢材层状撕裂是焊接钢桥中的一种非常危险的缺陷,慎重选材、合理的焊接接头设计和施焊工艺,可以避免层状撕裂的发生或由 此造成的危害。

参 考 文 献

- [1] 日本焊接协会. 耐 ラメラテア钢材 の特性 [J]. 溶接技术, 1982, (2).
- [2] 陈伯鑫. 焊接冶金原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [3] 深沢诚. 机能钢材 [J]. 桥梁 と基础, 1995, (12).
- [4] 日本土木学会钢构造委员会钢材规格小委员会. 耐 ラメラテア钢 の土木结构造物适用特性 [J]. 土木学会誌, 1985, (8).
- [5] Euro Code3. Design Steel Structures, Part 2: Steel Bridges, Annex D, Guidance on the Choice of Through Thickness Grade [S]. 1997.

Lamellar Tearing of Steel and the Welding Joint Design to Avoid Lamellar Tearing

SHI Yong-ji¹, WANG Hui¹, FANG Xing¹, BAI Ling²

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Railway Science and Technology Research and Development Center, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract : Lamellar tearing of steel is a kind of very dangerous defect of the welding steel bridge and normally takes place at the fillet welding joint. The amount, distribution and configuration of the inclusions and the plasticity and toughness of the metal matrix are all the factors that can influence the lamellar tearing. If there is more sulfur in the steel and the steel contains many inclusions with flake configuration in the same plane with high density, lamellar tearing tends to happen with high probability. The lamellar tearing is easier to occur if the steel plate has higher stiffness and greater thickness. And with the same plate thickness and weld technology, lamellar tearing is easier to occur if the weld section has larger size. Measures to restrain lamellar tearing are as follows: selecting integrity plate in the fillet weld joint, selecting fillet weld without penetration or with partial penetration in T type or + type weld joint, avoiding blue brittleness and red brittleness temperature during heat machining, keeping curvature radius which must be greater than 15 times plate thickness during cold machining, improving groove type of the fillet weld, replacing large energy welding with low energy welding, using low strength weld bead, pre-heating before welding, and etc. . Japanese and Euro Code3 methods for evaluating lamellar tearing and the standards for selecting Z direction steel are presented for designers and manufacturers as references.

Key words : Steel bridge; Steels; Lamellar tearing; Z direction steel; Welding; Lamellar tearing control

(责任编辑 吴 彬)