



T/CECS G XXXX: 2019

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路隧道衬砌结构耐火设计及灾后修复技术 规程

Technical Specification for Fire Resistance of Highway Tunnel

Lining Structure

征求意见稿

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

(空白)

中国工程建设协会标准

公路隧道衬砌结构耐火设计及灾后修复技术规程

Technical Specification for Fire Resistance of Highway Tunnel

Lining Structure

(征求意见稿)

CECS XXX: 20XX

主编单位：广东华路交通科技有限公司

参编单位：重庆交通大学

招商局重庆交通科研设计院有限公司

同济大学

人民交通出版社股份有限公司

中国工程建设标准化协会公告

第 XX 号

关于发布《公路隧道衬砌结构耐火技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会批准[XXX]建标协字第 XX 号文《关于印发中国工程建设标准化协会 201X 年第 XX 批标准制、修订项目计划的通知》的要求，由广东华路交通科技有限公司等单位编制的《公路隧道衬砌结构耐火技术规程》，经本协会组织审查，现批准发布，编号为 CECSXXX: 201X，自 201X 年 XX 月 XX 日起施行。

目 录

1 总则.....	1
2 术语及主要符号.....	2
3 耐火设计.....	4
4 耐火保护措施.....	13
5 火灾损伤调查评价.....	23
6 结构火灾修复.....	37
附录 A：隧道内承重结构体的耐火极限试验升温曲线.....	42
A.0.1 RABT 和 HC 标准升温曲线	42
附录 B：隧道衬砌结构内温度求解方法.....	43
B.1 热传导基本方程与边界条件	43
B.2 结构热传导数值计算方法	45
附录 C：沉管隧道火灾高温结构承载力计算.....	48
C.1 隧道衬砌结构高温承载力的计算理论	48
C.2 隧道衬砌结构高温承载力计算方法	53
附录 D.....	61
附表 D.1 衬砌结构火灾调查表.....	61
附表 D.2 衬砌结构受损情况简单评估表.....	62

前 言

请各有关单位在审阅过程中，将发现的问题与意见，函告本规程编写组，联系人：张彦龙（地址：广州市白云区广丛八路1180号；邮编：510550；邮箱：36067844@qq.com；电话：13926207865），以便下次修订时研用。

主 编 单 位：广东华路交通科技有限公司

参 编 单 位：重庆交通大学

招商局重庆交通科研设计院有限公司

同济大学

主要起草人：田卿燕、林 志、胡学军、闫治国、张彦龙、张立媛

刘 帅、朱合华、李 清、徐 湃、刘 浩、靳红涛

林海山、张青青

主 审：程 勇

1 总则

1.0.1 为指导公路隧道结构耐火保护设计，规范火灾后公路隧道衬砌结构损伤检测与修复工作，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各级公路的山岭隧道、盾构隧道、明挖和沉管隧道。

1.0.3 隧道衬砌结构耐火保护应遵循“安全经济、耐久环保、适度设防”的原则。

1.0.4 应根据公路等级、隧道类型、隧道环境敏感性等划分隧道耐火设防类别，制定耐火设计目标，开展结构耐火保护设计。

1.0.5 应综合采用定性观察、调查与定量检测反推等方式，确定隧道内发生的火灾场景与规模、火灾峰值温度与持续时间，然后开展隧道结构火灾损伤评价。

1.0.6 隧道衬砌结构火灾加固措施，应按照安全、经济、快速、合理的原则，根据不同的火灾损伤等级进行多方案技术、经济比选确定。

1.0.7 应积极而慎重地采用新技术、新材料、新设备、新工艺。

1.0.8 公路隧道衬砌结构耐火保护工作除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准和规范的规定。

2 术语及主要符号

2.1 术语

2.1.1 火灾场景 Fire scenario

对一个火灾随时间变化的定性描述，识别体现火灾特性的关键事件，并与其它可能的火灾区分开。定量描述火灾场景的方法有热释放率法和温升曲线法。

【条文说明】热释放率法认为火灾造成的影响为隧道内某点的热释放量随时间变化，温升曲线法认为火灾的影响为隧道内的温度随时间按一定的规律变化。对于生命安全建议采用热释放率相关的火灾场景，对于结构安全采用温度-时间曲线相关的火灾场景。

2.1.2 耐火极限 Fire resistance rating

在标准耐火试验条件下，建筑构件、配件或结构从受到火的作用时起，至失去承载能力、完整性或隔热性时止所用时间，用小时表示。

【条文说明】本条术语解释中的“标准耐火试验条件”是指符合国家标准规定的耐火试验条件。对于升温条件，不同使用性质和功能的建筑，火灾类型可能不同，因而在建筑构配件的标准耐火性能测定过程中，受火条件也有所不同，需要根据实际的火灾类型确定不同标准的升温条件。目前，我国对于以纤维类火灾为主的建筑构件耐火试验主要参照 ISO 834 标准规定的时间-温度标准曲线进行试验；对于石油化工建筑、通行大型车辆的隧道等以烃类为主的场所，结构的耐火极限需采用碳氢时间-温度曲线等相适应的升温曲线进行试验测定。对于不同类型的建筑构件，耐火极限的判定标准也不一样，比如非承重墙体，其耐火极限测定主要考察该墙体在试验条件下的完整性能和隔热性能；而柱的耐火极限测定则主要考察其在试验条件下的承载力和稳定性能。因此，对于不同的建筑结构或构、配件，耐火极限的判定标准和所代表的含义也不完全一致，详见现行国家标准《建筑构件耐火试验方法》GB/T 9978.1~GB/T 9978.9。

2.1.3 耐火保护措施 Fire protection measures

为提高隧道衬砌结构耐火极限性能而采取的降低火灾对结构损伤程度的措施。

2.1.4 衬砌结构 Lining

为控制和防止围岩的变形和坍落，确保围岩稳定，或为处理涌水和渗漏水，或为隧道的内空整齐或美观等目的，将隧道周边围岩被覆起来的结构体。山岭钻爆法隧道中特指二次衬砌结构，盾构隧道中特指管片结构，沉管隧道中特指管节结构，明挖隧道中特指主体结构。

2.1.5 火灾损伤 Fire damage

由于火灾导致结构和结构材料性能降低的现象。例如：高温下混凝土材料的强度降低。

2.1.6 防火保护板 Fireproof board

固定安装在公路和城市交通隧道的衬砌结构表面，能提高隧道结构耐火能力的保护板。

2.1.7 防火涂料 Fireproof coating

喷涂在隧道结构混凝土表面，能形成防火隔热保护层的防火涂料。

2.2 主要符号

3 耐火设计

3.1 一般规定

3.1.1 结构耐火设计应在实际可能的火灾场景下，对结构内部温度和承载力进行计算，验算其是否满足耐火设计目标，确定合理的耐火保护措施。

3.1.2 结构耐火设计应符合以下规定。

- 1 避免引起结构重要部位丧失稳定性。
- 2 避免结构及接头丧失对水压力的防渗能力。
- 3 避免结构产生不可接受的永久变形。
- 4 确保火灾对结构的损伤在可接受范围内，以利于灾后修复。

3.1.3 隧道火灾场景的确定可由不同规模火灾试验得出，在缺少数据时，也可采用仿真模拟得出，或根据本规程建议的方法进行预设计。

3.1.4 隧道结构火灾承载力计算可采用二维、三维数值计算方法或传统的荷载-结构法，并宜采用火灾场景作为边界输入条件计算结构内温度分布以及由此引起的温度荷载。

3.1.5 温度荷载应与外荷载进行组合，计算正常使用状态和极限承载状态，有关计算方法参照附录 C。

3.1.6 公路隧道结构耐火保护应考虑到隧道所处的地理环境和用途，以及隧道的疏散救援，通风排烟等设计，综合经济环境等因素，形成综合设计，并符合以下规定。

- 1 当隧道远离市区，消防救援困难时，宜提高隧道衬砌结构的耐

火保护能力。

2 隧道结构的耐火性能应综合考虑通风排烟系统、火情监控系统等隧道其他系统的保护效果。

3 隧道的耐火防护措施的选择应考虑其经济适应性。

3.1.7 可从两个方面提高衬砌结构的耐火性能。

- 1 提高衬砌结构本身的耐火能力；
- 2 提供有效的隔热措施，降低施加到衬砌结构上的热荷载。

3.2 结构耐火极限标准

3.2.1 水下公路隧道按其封闭段长度及通行交通情况，其防火等级分类应符合表 3.2.1 的规定。

表 3.2.1 水下公路隧道结构耐火设计分类

用途	隧道封闭段长度 (L/m)			
	一类	二类	三类	四类
可通行危险化学品等机动车	$L > 1500$	$500 < L \leq 1500$	$L \leq 500$	—
仅限通行非危险化学品等机动车	$L > 3000$	$1500 < L \leq 3000$	$500 < L \leq 1500$	$L \leq 500$

【条文说明】本表的制定系参考《建筑设计防火规范》(GB50016)的有关规定。

3.2.2 水下公路隧道承重结构体的耐火极限应符合下列规定。

1 一、二类隧道和通行机动车的三类隧道，其承重结构体耐火极限的测定应符合第 3.2.3 条的规定；对于一、二类隧道，火灾升温曲线应采用本规范附录 A 第 A.0.1 条规定的 RABT 标准升温曲线，耐火极限分别不应低于 2.00h 和 1.50h；对于通行机动车的三类隧道，火灾升温曲线应采用本规范附录 A 第 A.0.1 条规定的 HC 标准升温曲线，耐火极限不应低于 2.00h。

2 其他类别隧道承重结构体耐火极限的测定应符合现行国家标准《建筑构件耐火试验方法 第 1 部分：通用要求》GB/T9978.1 的

规定；对于三类隧道，耐火极限不应低于 2.00h；对于四类隧道，耐火极限不限。

3.2.3 水下公路隧道衬砌结构及各种接缝或接头的耐火极限应符合以下规定：

1 当采用 HC 标准升温曲线测试时，其耐火极限的判定标准为：受火后，当距离混凝土底表面 25mm 处钢筋的温度超过 250℃，或者混凝土表面的温度超过 380℃时，或者接头橡胶表面温度超过 70℃，则判定为达到耐火极限。

2 当采用 RABT 标准升温曲线测试时，其耐火极限的判定标准为：受火后，当距离混凝土底表面 25mm 处钢筋的温度超过 300℃，或者混凝土表面的温度超过 380℃时，或者接头橡胶表面温度超过 70℃，则判定为达到耐火极限。

3.2.4 非水下公路隧道按其公路等级、结构复杂程度及其破坏后果，其耐火设计等级分类应符合表 3.2.4 的规定。

表 3.2.4 非水下公路隧道结构耐火设计分类

安全等级	类型/破坏后果	示 例
一级	重要结构 破坏后果严重	(1) 高速公路隧道与一级公路隧道； (2) 连拱隧道； (3) 三车道及以上跨度的公路隧道； (4) 特长公路隧道； (5) 地下风机房；
二级	一般结构 破坏后果一般	(1) 双车道的二级公路隧道； (2) 双车道的三级公路隧道； (3) 四级公路以上的 $L > 1000\text{m}$ 的隧道； (4) 斜井、竖井及联络风道等通风结构物；
三级	次要结构 破坏后果不严重	(1) 四级公路上 $L \leq 1000\text{m}$ 的中短隧道； (2) 斜井、竖井及平行导坑等施工辅助通道；

3.2.5 非水下公路隧道承重结构体的耐火极限应符合表 3.2.5 的规定。

3.2.4 隧道内的地下设备用房、风井和消防救援出入口的耐火等级应为一級（见国标），地面的重要设备用房、运营管理中心及其他地面附属用房的耐火等级不应低于二级（见国标）。

3.3 火灾场景设计

3.3.1 一个完整的火灾场景应包括以下内容：

- 1 确定隧道内火源处最高温度随时间的变化规律。
- 2 确定隧道横断面上温度分布规律。
- 3 确定沿隧道纵向温度分布规律。

3.3.2 公路隧道横截面上升温曲线应根据隧道公路隧道结构耐火设计目标进行选取。特别重要的隧道可通过火灾试验或者设防火灾规模进行确定。

3.3.3 不同火灾热释放率所对应的标准火灾场景曲线宜按照表 3.3.3 进行确定。

表 3.3.3 常见火灾类型热释放率

交通类型	热释放率（MW）	持续时间（min）	火灾曲线
小汽车	5~10	30~60	HC
小型货车/巴士	10~20	60~120	HC
货车（载有燃烧物）	20~30	120~180	HC
油罐车	200~300	120~240	RABT

3.3.3 在设计火灾场景时，可以根据实际情况选择相应的隧道横断面温度分布公式。

1 线性分布

表 3.2.5 非水下公路隧道结构耐火极限

1	结构安全等级	主体结构				次要结构 ⁴			
		位于地面结构下方 的隧道	处于不稳定地 层中的隧道	处于稳定地 层中的隧道	明挖法 隧道	通风道 ⁵	逃生口	横通道	避难所 ⁶
1	一级	RABT 2 h	RABT 2 h	2	2	HC 2 h	HC 0.5h	RABT 2 h	RABT 2 h ⁷
2	二级	RABT 1 h ¹	RABT 1 h ¹	3	3	HC 1.5 h	HC 0.5h	RABT 2 h	RABT 2 h
3	三级	HC 1h	HC 1h	—	—	HC 1h	HC 0.5h	HC 1h	HC 1h

注：

¹ 如果装载易燃品的卡车交通量非常大时需将耐火时间提高到 3.0h。

² 不需要考虑结构的火灾安全性，也不需要结构采取耐火保护措施（除非要避免结构的渐进性垮塌）。当因为其他因素，需要考虑耐火保护措施时：

- ☐ ●出于保护其他结构的需要（如隧道位于建筑物下方），或者隧道结构垮塌会对整个公路网产生重大影响时采用 RABT 2.0h；
- ☐ ●一般情况下可采用 HC 2.0h；
- ☐ ●与灾后修复相比，如果采取耐火保护成本太高时，则不对结构进行保护。

³ 不需要考虑结构的火灾安全性，也不需要结构采取耐火保护措施（除非要避免结构的渐进性垮塌）。当因为其他因素，需要考虑耐火保护措施时：

- ☐ ●一般情况下采用 HC 1.0h；
- ☐ ●与灾后修复相比，如果采取耐火保护成本太高时，则不对结构进行保护。

⁴ 其他次要结构的防火要求根据工程标准确定。

⁵ 适用于横向通风时的风道保护。

⁶ 避难所需要与外部相连。

⁷ 当装载易燃物的卡车交通量非常大，并且在 2.0h 内人员不能从避难所完全疏散时，需要延长耐火时间。

$$\begin{cases} T_y = T_R + \frac{y}{H}(T_H - T_R) \\ T_R = 0.2T_H \end{cases} \quad (3.3.3-1)$$

式中, H ——隧道断面高度, m;

y ——断面上任一点距路面的距离, m;

T_y ——断面上距路面 y 处的温度, °C;

T_H ——断面拱顶的温度, °C;

T_R ——断面路面附近的温度, °C。

2 均匀分布

$$T_y = T_H \quad (3.3.3-2)$$

3.3.4 因隧道纵向上各位置发生火灾的概率相同, 本规程不再单独规定其分布形式。

3.4 隧道结构火灾承载力计算

3.4.1 隧道结构的力学计算可以通过热-力耦合模型, 首先进行隧道衬砌结构的热边界加载计算出衬砌结构的温度场, 然后通过加载温度场后实现衬砌结构的热-力转换计算。

3.4.2 宜按照以下基本程序进行隧道结构热传导的有限元方法计算分析。

- 1 定义结构分析单元的类型, 并设定随温度变化的热物理参数。
- 2 建立隧道热传导模型并划分有限元网格。
- 3 定义结构模型的初始温度。
- 4 定义隧道内壁热烟气流的温度以及结构受火表面与火灾热烟气流之间的综合换热系数。

- 5 设定荷载步选项。
- 6 定义瞬态热传导求解方式并递交运行。
- 7 分析完成后，对得到的结果进行后处理。

3.4.3 为简化计算，结构内的温度确定宜遵循以下假设条件：

- 1 衬砌结构混凝土为各向同性的均质、连续材料。
- 2 可考虑或忽略衬砌结构内钢筋对热传导过程的影响。
- 3 衬砌结构混凝土与岩土体之间为理想接触。
- 4 一般情况隧道较厚，可不考虑岩土体中可能的地下水的影响。
- 5 热传导过程开始时刻，物体内部温度均匀，且等于环境温度。
- 6 衬砌结构热传导计算时间域内，混凝土受火表面不出现较大裂缝。
- 7 不考虑衬砌结构混凝土内水分蒸发对热传导过程的影响。

3.4.4 混凝土结构材料的导热系数可按照下式计算：

$$\lambda_c = 1.6 - \frac{0.6}{850} T \quad (\text{W/m} \cdot \text{K}) \quad (3.4.4)$$

【条文说明】衬砌混凝土的导热系数跟骨料的种类，配合比，含水量，混凝土的强度等级有着密切的关系，由于影响因素较多，且不同的实验所用的实验条件也相差很大，因此导热系数的结果具有较大的离散性，不同的文献给出的结果也不近相同。

总体来说混凝土的导热系数随着温度的升高而降低，大致变化范围在 2.0-0.5 W/m.K。陆洲导和朱伯龙（1997）通过试验研究，给出了混凝土导热系数的计算式 3.4.4。

3.4.5 混凝土材料的比热容可按照下式计算：

$$c_c = 836.8 + \frac{418.4}{850} T \quad (\text{J/Kg} \cdot \text{K}) \quad (3.4.5)$$

【条文说明】与混凝土的导热系数相似，混凝土的比热容的影响因素也很多，比热容的变化范围大致在 800-1400 J/Kg.K（国际隧道协会 ITA，2005），且随着温度的升高，比热容增大。陆洲导和朱伯龙（1997）通过试验研究，给出了混凝土比热容的计算式 3.4.5。

3.4.6 热烟气流与混凝土之间的对流换热系数可按照下式计算：

$$h=7.05\times e^{\left(\frac{T}{372.55}\right)}+0.84 \tag{3.4.6}$$

【条文说明】衬砌混凝土的对流换热系数与热烟气流之间的对流换热系数的影响因素主要有：热烟气流的流动速度，热烟气流的温度，混凝土材料及表面形状等，混凝土表面的对流换热系数的大致范围在 20-180 W/(m².K)。

3.4.7 结构周边岩土体的热工参数热可按照表 3.4.7 选取。

表 3.4.7 岩土体材料的热参数

常温时	密度 ρ (kg/m ³)	比热容 c (J/kg.K)	导热系数 λ (W/m.K)
粘土	1850	1840	1.41
砂土	1420	1510	0.59
黄土	880	1170	0.94
岩体	C _p =360 MJ/m ² .K		10

3.4.8 混凝土的高温强度及弹性模量的变化可按照图 3.4.8 选取。

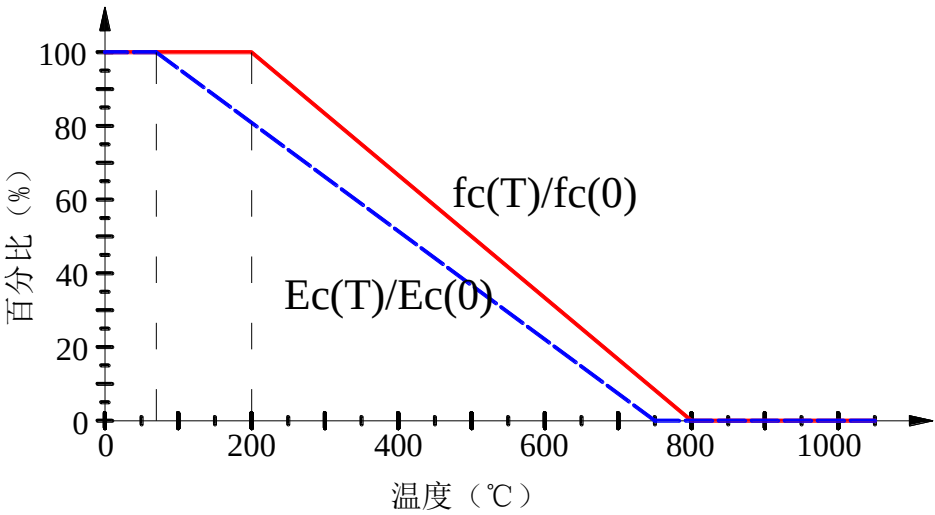


图 3.4.8 混凝土高温强度及弹性模量图

【条文说明】混凝土的高温强度开始劣化的温度点在 200℃左右，强度基本丧失完全的温度点在 800℃左右，其劣化的趋势可以近似的认为成线性变化。对于混凝土的高温弹性模量，其起始的劣化温度在 70℃左右，在 750℃左右弹性模量基本为零。

3.4.9 钢筋的高温弹性模量及屈服强度变化可按照图 3.4.9 选取。

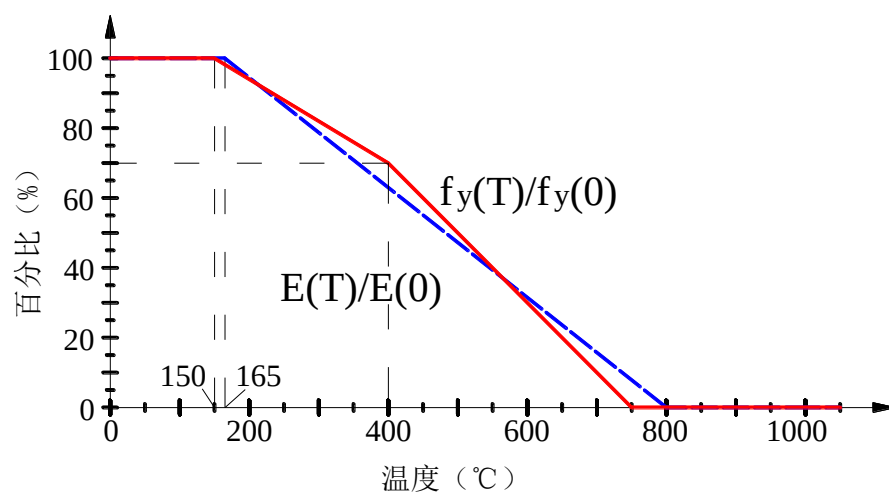


图 3.4.9 钢筋的高温强度及弹性模量图

4 耐火保护措施

4.1 一般规定

4.1.1 公路隧道衬砌结构耐火保护宜综合采用主动防火与被动耐火措施，可按表 4.1.1 选用相应的防火和耐火措施。

表 4.1.1 常见的隧道防火耐火措施

主动防火措施	火灾主动通风排烟系统	
	火灾应急预警系统	
	水喷淋系统	
被动耐火措施	改善材料性质方法	使用耐高温混凝土
		衬砌中添加有机纤维
	提高保护层耐火性能	加大保护层厚度
		在保护层安装围护金属网
	表面隔热防护方法	喷射无机纤维
		防火涂料
		防火板材

【条文说明】本条列举了常见的主动防火措施与被动耐火措施。在实际结构抗灾设计时，应首先从主动防火方面降低隧道结构表面的温度，如采用主动排烟和水喷淋系统，可有效降低火灾时火源位置处的最高温度，从而保护衬砌结构。而采用耐火隔热措施可进一步改善结构受热温度，减少早已承载受力的衬砌表面的混凝土爆裂、烧溃、强度变化等损伤现象。

隧道结构耐火保护措施有很多，每种方法都有着自身的使用范围和环境，有着不同的优势和缺点，如表 4-1 所示。

表 4-1 常见耐火保护措施技术经济比较

耐火保护措施	主要特点（优缺点）
喷淋系统	反应迅速，可以控制初期火灾，能有效的降低隧道衬砌表面温度；能够抑制火情发展，为救援疏散赢得时间。 使隧道内烟气下沉，降低能见度，恶化逃生救援环境；对于油类火灾效果不大，同时喷出的水蒸气可能会损害隧道内的设备；造价和维护费用较高，需要有充足的水源。
喷射无机纤维	质量轻，与结构的粘接性好，火灾时不容易脱落；不含有机物，火灾高温下不产生有毒物质；无开裂、脱落等老化问题，耐久性与防火性较好。 增加开挖面积，增加工期；喷射无机纤维防火护层材料的制造工艺及

	设备较为复杂，喷射设备造价昂贵，阻碍推广。
加大保护层厚度	保护衬砌本体不受高温破坏；衬砌火灾承载力能够得到保证。 增加工程量和工程造价；容易砸伤逃生及救援人员，阻塞疏散线路。
保护层安装围护金属网	能够形成拉结力，能很好的保护混凝土层爆裂；不需要加大保护层的厚度，对结构的火灾后性能影响较小。 金属网需特殊定制；金属网的安装和固定有比较特殊的要求。
衬砌中添加纤维	不增加开挖面积和工期，造价较低，防火效果好，有效减少衬砌混凝土的爆裂；在混凝土中直接添加即可，施工方便；成本较低，耐久性好，不需更换和维修，无污染，不影响隧道内设备铺设；对于施工过程中发生的火灾起到防护作用；不影响隧道结构运营后的裂缝观测和强度检测等。 火灾后残留的孔道降低了混凝土高温后的抗渗性能；大量使用聚丙烯纤维会增加造价，同时目前使用的聚丙烯纤维燃烧后会产生有毒性的气体；并且对添加钢纤维的效果，目前有不同的看法。
使用耐高温混凝土	长期在高温条件下能够保持物理机及力学性能。
防火涂料	技术成熟，防火涂料的种类众多；施工方便。 受施工因素影响较大，喷涂要达到一定的厚度；防火涂料易老化，易开裂脱落；火灾下会产生有毒气体，影响人员逃生和救援。
防火板材	技术成熟，防火效果较好；施工方便。 不能够及时发现隧道的病害位置；若覆盖不全面，存在施工问题时会造成失效；影响风机等其他设备的安装和维修；易老化，需要维护更换；存在材料防水以及曲率无法标准化问题。

4.1.3 主动防火宜从隧道内部空间布局、照明系统、通风系统、消防设备布置、火灾探测、报警、灭火系统，以及隧道的运营管理和灾情发生时的应急方案等进行总体设计。

【条文说明】 鉴于相关标准规范对此有详细规定，对主动防火措施本规程不再做规定。

4.1.4 被动耐火措施应确保隧道结构及其接缝或接头在火灾灾后只需进行简单的修护而不影响隧道的正常使用，可采用提高衬砌混凝土材料的耐火性能、喷涂防火涂料、安装防火板材等。

4.1.5 隧道耐火措施应具备一定的耐久性，对于容易失效的耐火措施，应加强其后期维护，定期检查维修。

【条文说明】目前市场上常用的隧道用防火涂料和防火板等产品，均有其服务年限，低于公路隧道100年或者120年的设计使用寿命。实际使用过程中，应加强其后期维护，定期检查维修。

4.1.6 对于施工复杂的耐火措施，应采取措施保证施工质量。

【条文说明】在结构表面采用防火涂料时，需要多次刷涂，或挂网刷涂，施工工艺较复杂，并需控制环境湿度。部分防火板材是事先作为模板使用，应控制好变形；其他还有是事后张贴的，需要控制结构表面的平整度。此外，板材之间接缝处的填缝处理也需要进行施工控制。

4.2 结构耐火保护措施

4.2.1 采用耐高温混凝土时，混凝土胶结料可选用硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硫酸盐、氯化物、溶胶类及有机物结合防火耐热混凝土等。

【条文说明】

耐高温混凝土是指能长期在高温（200-900℃）作用下保持所要求的物理和力学性能的一种特种混凝土。根据耐高温混凝土胶结料的不同可分为硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硫酸盐、氯化物、溶胶类及有机物结合耐高温混凝土。

硅酸盐防火耐高温混凝土最高使用温度可达到 700-800℃，其耐高温的主要机理是硅酸盐系列水泥熟料的水化产物氢氧化钙在高温下脱水，生成的氧化钙与矿渣及掺合料中的活性氧化硅和三氧化二铝又反应生成具有较强耐热性的无水硅酸钙和无水铝酸钙，使混凝土确有一定的耐热性。其他盐类耐热原理基本类似。

4.2.2 添加纤维材料提高混凝土耐火性能时，可选用聚丙烯纤维、尼龙纤维与钢纤维等。纤维混凝土的设计施工可以参考《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 和《纤维混凝土结构技术规程》（CECS38）。

【条文说明】

添加纤维是为了减弱混凝土的高温爆裂。目前使用较多的是聚丙烯纤维、尼龙纤维与钢纤维等。聚丙烯纤维抗爆裂的机理是：当混凝土遭受高温时，一旦温度超过聚丙烯纤维的熔点 160℃，混凝土内分散的聚丙烯纤维就会熔化并顺着孔道逸出，在混凝土中留下相当于纤维所占体积的孔隙，并且相互连通，使混凝土内部的渗透性明显增大，进而减缓了内部蒸汽压的积聚，避免了衬砌混凝土的爆裂。

虽然混凝土中掺加聚丙烯能够有效的避免混凝土的高温爆裂，但是同时也严重降低了混凝土高温后的抗渗耐久性；此外，聚丙烯纤维的造价相对较高，大量的使用聚丙烯纤维会较多的增加工程造价。

4.2.3 采用附加的混凝土层作为主体结构表面的牺牲层时，应符合以下规定：

1 骨料选择

- 1) 选用热稳定性好的骨料，以改善混凝土的抗爆裂性能。

- 2) 选用热膨胀小的骨料，以减弱骨料与水泥基体间的热不相容性。
- 3) 选用表面粗糙、多棱角的骨料，以提高骨料与水泥基体间的结合力。
- 4) 选用含活性硅的骨料，以改善骨料与水泥基体间的化学粘结力。
- 5) 减小骨料的尺寸。

2 水泥拌合料

- 1) 可在混凝土中加入一定量的粉煤灰和高炉炉渣或硅灰来提高高温性能，掺入量为掺入 30%粉煤灰和 40%高炉炉渣。
- 2) 可使用高铝水泥来提高混凝土的耐火能力。

【条文说明】高铝水泥加热后的物理和化学变化与硅酸盐水泥不同，即不生成氢氧化钙，因此其体积稳定性较好，加热脱水所引起的破坏应力也较小。

4.2.4 采用混凝土保护层安装金属网时，为避免由于钢丝网与混凝土间的热不相容性而导致增加混凝土的爆裂，宜选用较细的钢丝网，或拉结金属网，或同时添加聚丙烯纤维。

【条文说明】从以往比较严重的火灾案例来看，混凝土衬砌的破坏大多数都是从衬砌爆裂开始，混凝土由于其抗拉强度很低，在水汽压力作用下，混凝土产生很大的拉力破坏，产生爆裂。在保护层安装围护金属网，当火情发展不是特别严重的时候，爆裂发展到钢筋网处的时候，钢筋能够提供一定的拉结力，能够限制爆裂的扩展，减轻爆裂的损伤。

4.2.5 采用喷涂无机纤维作为耐火保护层时，可选用硅酸铝棉、矿棉、岩棉和玻璃棉等。喷涂无机纤维应采用专用喷涂机。施工前应对待喷涂的隧道表面进行处理，喷涂完成后应对喷涂过后的衬砌表面进行修正罩面，最后对喷涂质量进行检测验收。

【条文说明】

喷射无机纤维法是通过特殊的喷射机械将无机纤维喷射在隧道衬砌表面使之有一定的耐火时间的隧道衬砌防火防护方法。无机纤维喷涂是用专用纤维喷涂机，将特殊工艺加工的无机纤维棉和专用水基粘结剂，瞬间均匀混合后喷射在被喷物的表面上，形成具有一定强度的三维状保温、吸音纤维层的制品。

人造无机纤维有硅酸铝棉、矿棉、岩棉和玻璃棉等。硅酸铝棉是石英和氧化铝混合熔化喷丝成

型的产物；矿棉、岩棉是玄武岩或辉绿岩熔化喷丝成型的产物；玻璃纤维是生产玻璃的原料在高温下熔化喷丝成型的产物。喷射无机纤维材料的选择需要熔点高、耐高温、不燃、不产烟、耐候、性能稳定等。

4.2.6 公路隧道防火涂料的选择应遵循以下原则：

- 1 涂层厚度应保证结构达到耐火极限设计目标。
- 2 火灾时涂料应无有毒气体产生，以便于隧道火灾的扑救及隧道的修复。
- 3 应考虑涂料的耐久性、粘接性及耐水性等。
- 4 宜选用非膨胀型防火涂料。

【条文说明】

有关隧道防火涂料的技术要求可参照《混凝土结构防火涂料》GB 28375 执行。

隧道防火涂料是喷涂在隧道内拱顶与侧壁表面，起防火隔热保护作用的一种防火保护材料，隧道内喷涂防火涂料后，可防止钢筋混凝土在火灾中迅速升温而导致强度降低，避免混凝土炸裂、衬砌钢筋混凝土破坏失去支撑能力进而导致隧道垮塌的危险。可保护隧道中钢筋混凝土结构稳定及材料强度在耐火极限内不被破坏，减少维修费用，缩短工程修复时间。

目前对于防火涂料的厚度并没有特殊要求，只需满足在规定的火灾升温曲线下能达到预定的耐火功能即可，见本规程第 3.2 节的规定。

公路隧道宜选择环保型防火涂料。目前市面上有膨胀型防火涂料（属发泡型）和非膨胀型防火涂料，隧道宜选用非膨胀型防火涂料。非膨胀型防火涂料是由难燃性树脂、阻燃剂、防火填料等配制而成的。这类涂料在火焰和高温的作用下，根据配方不同可以具有不同的阻火隔热的效果。此类有机涂料在火灾高温的作用下，吸收热量而逐渐烧蚀，由固态变成气态混合物，从而防止被防护基体吸收热量而遭受破坏。

4.2.7 公路隧道防火涂料的施工应符合以下要求：

- 1 涂层粘接强度需要保证，要保证涂层和衬砌之间的粘接良好，为了达到良好的粘接强度和质量要求，应进行多遍喷涂。
- 2 防火涂料应既可以人工涂抹，又可以机械喷涂。
- 3 当采用防火涂料进行耐火保护且有下列情形之一时，涂层内应设置与主体结构相连接的钢丝网，其构造见图 4.2.7。
 - 1) 承受冲击、振动荷载的构件；
 - 2) 涂层厚度大于 10mm 的构件；

3) 粘结强度不大于 0.05MPa 的防火涂料。

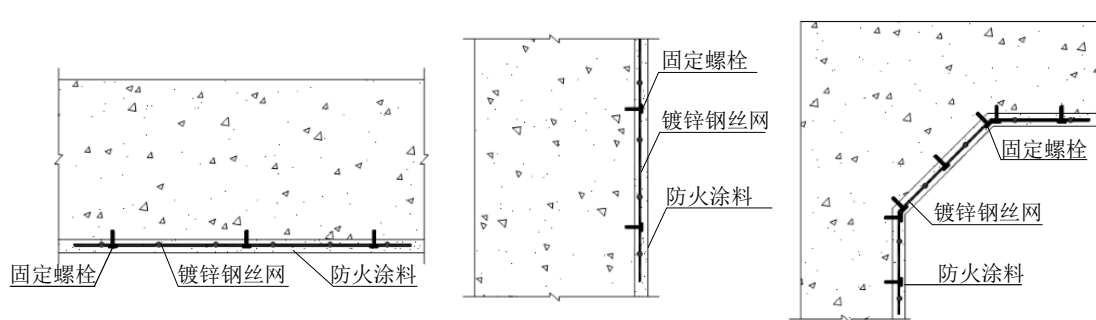


图 4.2.7 采用钢丝网+防火涂料的防火保护构造

4.2.8 公路隧道防火保护板的选择应遵循以下原则：

- 1 衬砌结构表面防火板应保证结构达到耐火极限设计目标。
- 2 可选用单一隧道防火保护板或复合隧道防火保护板。
- 3 不仅要考虑防火保护板的耐火性能，还应考虑板材的吸湿变形率、耐水性、耐湿热性等指标。

【条文说明】

与防火涂料一样，防火板属于一种表面隔热技术。早期防火保护板材有蛭石混凝土板、石膏板、石棉水泥板和珍珠岩板，还有采用预制混凝土定型套管。随着环保技术发展，目前，市场上的防火板类型有：

- 1) 矿棉板、玻璃棉板
- 2) 水泥板
- 3) 珍珠岩板、漂珠板、蛭石板
- 4) 防火石膏板材
- 5) 硅酸钙纤维板
- 6) 玻镁防火板

在上述板材中，一般用于普通工业与民用建筑，适用于隧道的防火板少，国内隧道用防火板一般是玻镁板和硅酸钙板。

4.2.9 防火保护板的施工应符合以下要求：

- 1 采用防火板保护时，防火板宜采用单层或双层错缝安装。
- 2 防火板固定方式可采用不锈钢龙骨固定或耐火膨胀螺栓直接固定。
- 3 板材之间的接缝宜采用防火胶。

【条文说明】沉管隧道管节结构防火板的构造方式如图 4-1 所示。

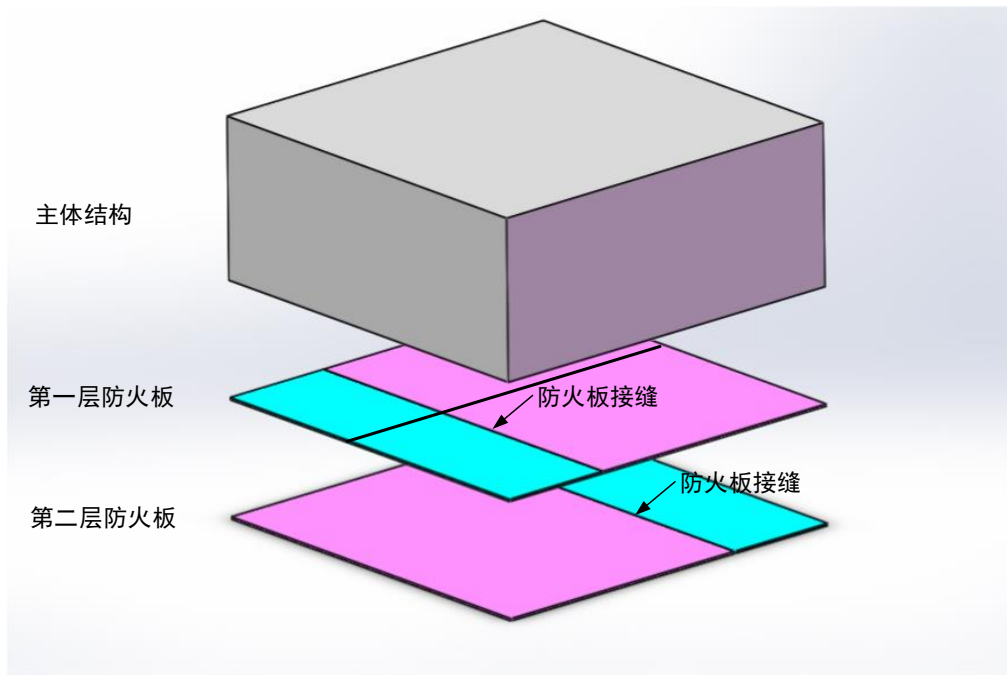


图 4-1 衬砌结构防火板保护构造

4.2.10 应定期检测防火涂料与防火保护板的实际使用情况和性能，定期进行防火性能维护。失效后应重新喷涂或安装。

【条文说明】有关防火涂料的检测可按照《混凝土结构防火涂料》GB 28375 执行，有关防火保护板的检测可按照《隧道防火保护板》GB 28376 执行。

4.3 盾构隧道管片与接头耐火保护

4.3.1 盾构隧道管片结构的拱顶和边墙及其接头螺栓和橡胶止水带是耐火保护的重点部位。

4.3.2 管片结构可以采用混凝土中添加纤维材料、抗爆裂复合耐火二衬、耐火保护层、防火涂料和防火保护板等耐火保护措施，耐火保护层厚度应根据隧道火灾场景、防火材料耐火性能及隧道保护部位等耐火极限设计目标综合确定。

【条文说明】掺聚丙烯纤维的混凝土耐火保护层的构造见图 4-2。

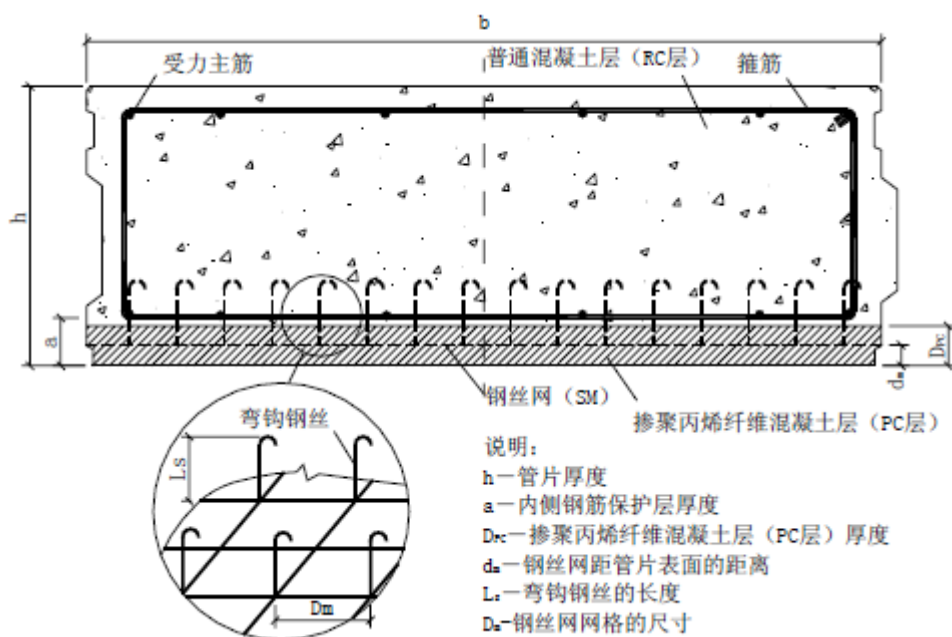


图 4-2 掺聚丙烯纤维混凝土耐火保护层的详细构造

4.3.3 管片接头螺栓孔位可采用两层耐火方案，外层为耐火层，内层为耐火隔断。

4.4 沉管隧道管节与接头耐火保护

4.4.1 沉管隧道管节结构顶板和底板、接头 Ω 止水带和 GINA 止水带是耐火保护的重点部位。

4.4.2 管节结构可采用外贴式的防火保护技术方案，防火层厚度应根据隧道火灾场景、防火材料耐火性能及隧道保护部位等耐火极限设计目标综合确定。

4.4.3 管节接头构件耐火保护构造宜采用内、外双层隔热方案，外层为防火板，内层为防火隔断，其构造见图 4.4.3-1 所示。

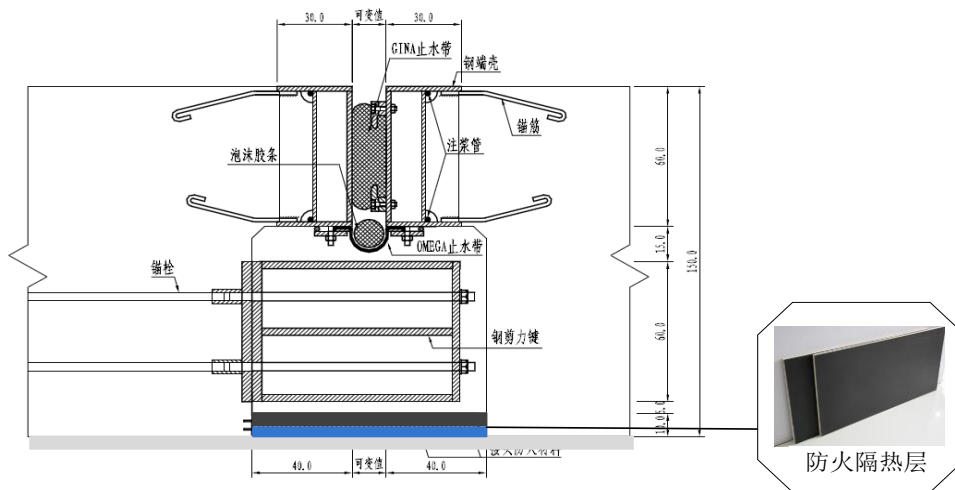


图 4.4-3 管节接头耐火保护构造

【条文说明】

经国家科技支撑计划项目“跨境隧-岛-桥集群工程的建设管理、防灾减灾及节能环保关键技术”之子题四“离岸特长沉管隧道防灾减灾关键技术研究”的试验，提出了两种管节接头防火构造。

管节接头防火构造方案（一）如图 4-3 所示，防火隔断从上到下依次由 3cm 玻镁防火板、2cm 硅酸铝耐火棉、1cm 玻镁防火板构成，并通过连接螺栓固定在轻钢龙骨上。底面防火板为 2cm 后玻镁防火板，通过膨胀螺栓固定在接头两侧管节主体结构上，并采用螺栓将底层防火板与防火隔断铆固为一体。

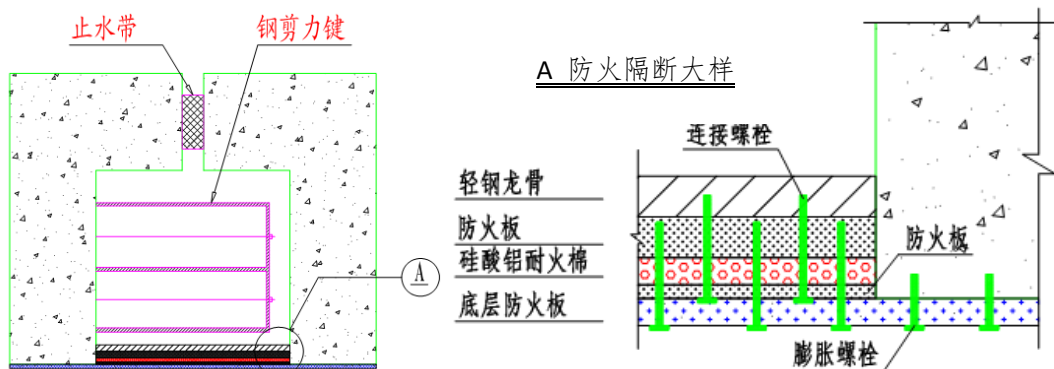


图 4-3 管节接头防火保护方案（一）构造图

管节接头防火构造方案（二）如图 4-4 所示，具体为：防火隔断为 30mm 耐火棉+不锈钢方钢龙骨+27.5cm 单层保全防火板，底层防火板为 27.5mm 单层保全防火板，底层防火板与防火隔断通过螺栓同时铆固在不锈钢龙骨上。此外，该方案还在方案（一）的基础上做了两点优化，一是采用了强度更高同时耐腐蚀的不锈钢方钢龙骨，二是在龙骨两侧加装了防火板和固定钢板，增强了龙骨的固定强度，同时较好保护接头侧壁，防止高温烟气窜流。

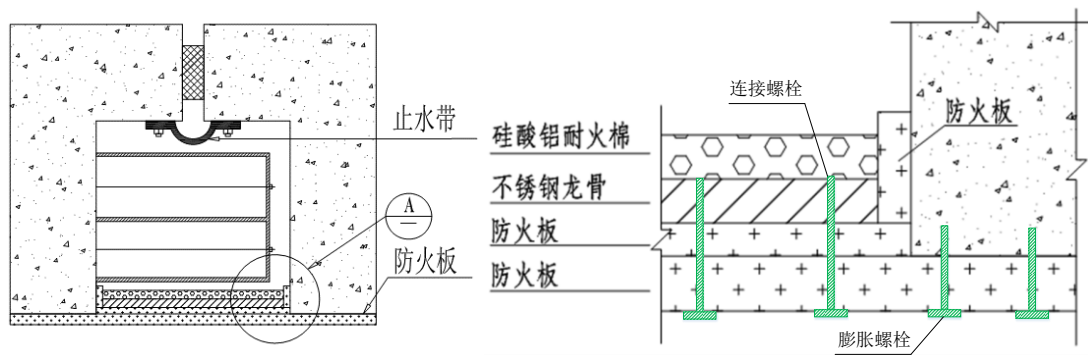


图 4-4 管节接头防火保护方案（二）构造图

经试验，上述两种方案均满足 Ω 止水带在 RABT 温度曲线下的正常工作，进而也妥善保护了位置在 Ω 止水带之上的 GINA 止水带，保障了管节接头的防水体系在火灾工况下不失效。

4.4.4 沉管节段接头的防火保护构造与管节接头一致，其构造见图 4.4.4 所示。

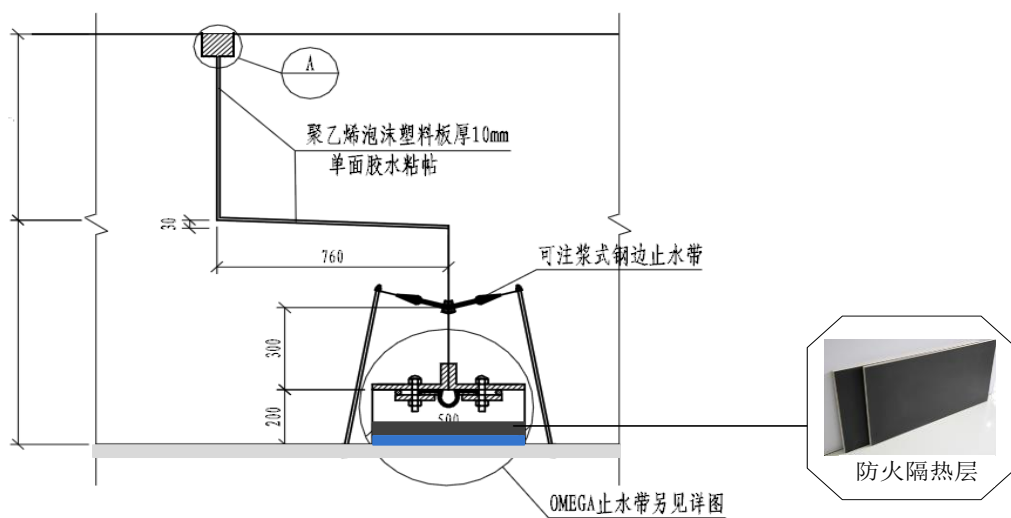


图 4.4.4 节段接头耐火保护构造

5 火灾损伤调查评价

5.1 一般规定

5.1.1 应综合采用定性观察、调查与定量检测反推等方式，确定隧道内发生的火灾场景与规模、火灾峰值温度与持续时间，为衬砌火灾损伤评估与修复提供关键参数。

【条文说明】

隧道衬砌及其材料的损伤形式如表 5-1 所示。

表 5-1 公路隧道衬砌火灾损伤形式

火灾损伤	表观形式	内部形式	损伤后果
混凝土	● 高温爆裂 ● 烧酥 ● 松弛剥落 ● 密度降低 ● 变色 ● 开裂 ● 蒸汽脱水 ● 体积增大	● 化学变化 ● 晶体结构改变 ● 胶凝材料改性 ● 孔隙度增大 ● 渗透性增大 ● 强度降低 ● 弹性模量降低	1)力学性能劣化 2)承载力下降 3)耐久性降低
钢筋	● 高温软化 ● 晶体结构变化 ● 屈服强度降低 ● 弹性模量降低 ● 极限强度降低		
衬砌结构	● 剥落掉块 ● 结构变形 ● 结构失稳垮塌 ● 结构酥松 ● 结构开裂		

5.1.2 隧道结构混凝土材料的损伤评价与检测，应满足以下要求：

- 1 根据现场火灾可燃物与残余物调研，以及检测后获取的混凝土强度、回弹值、声波值等综合指标，可反演火灾场景。
- 2 衬砌结构损伤程度的表征量可采用混凝土表观颜色、硬度、脆性、爆裂深度、承载力、变形特性等物理力学指标。

3 为达到快速评定隧道衬砌结构安全状况，宜在现场表观特征观测法的基础上，优先选用回弹法与超声法等无损检测技术。

4 为避免对已经受到火灾危害的衬砌造成二次损伤，在 V 级围岩、条件较差的 IV 级围岩地段慎用钻芯取样、钻芯切片、冲击钻入等半损伤检测技术。仅在 III 级围岩以上地段，且条件许可时，可采用钻芯取样等半损伤技术。

5 由于各地区隧道衬砌混凝土配比及养护条件的差异，可根据地区经验建立专用的衬砌混凝土回弹值-火损强度、声波值-火损强度检测专用曲线。无相关条件时，可参考本规程规定的回弹值-火损强度、声波值-火损强度检测专用曲线。

5.1.3 衬砌损伤评价工作应符合以下规定。

1 迅速开展评价工作，避免衬砌结构进一步因环境因素恶化、失稳或跨塌，确保救援工作能够安全开展。

2 给出损伤等级，确定修复技术方案，快速恢复交通畅通，减少经济损失。

3 避免衬砌结构的耐久性、抗渗性能等。

4 避免衬砌结构产生不可接受的变形，确保临近隧道的地上、地下结构物的安全。

5.2 衬砌混凝土火灾损伤调查评估

5.2.1 隧道衬砌火损调查可分为初步勘察与详细勘察两个阶段，评估也相应地划分为定性评估与定量评估两个阶段，见图 5.2.1，并应符合以下规定。

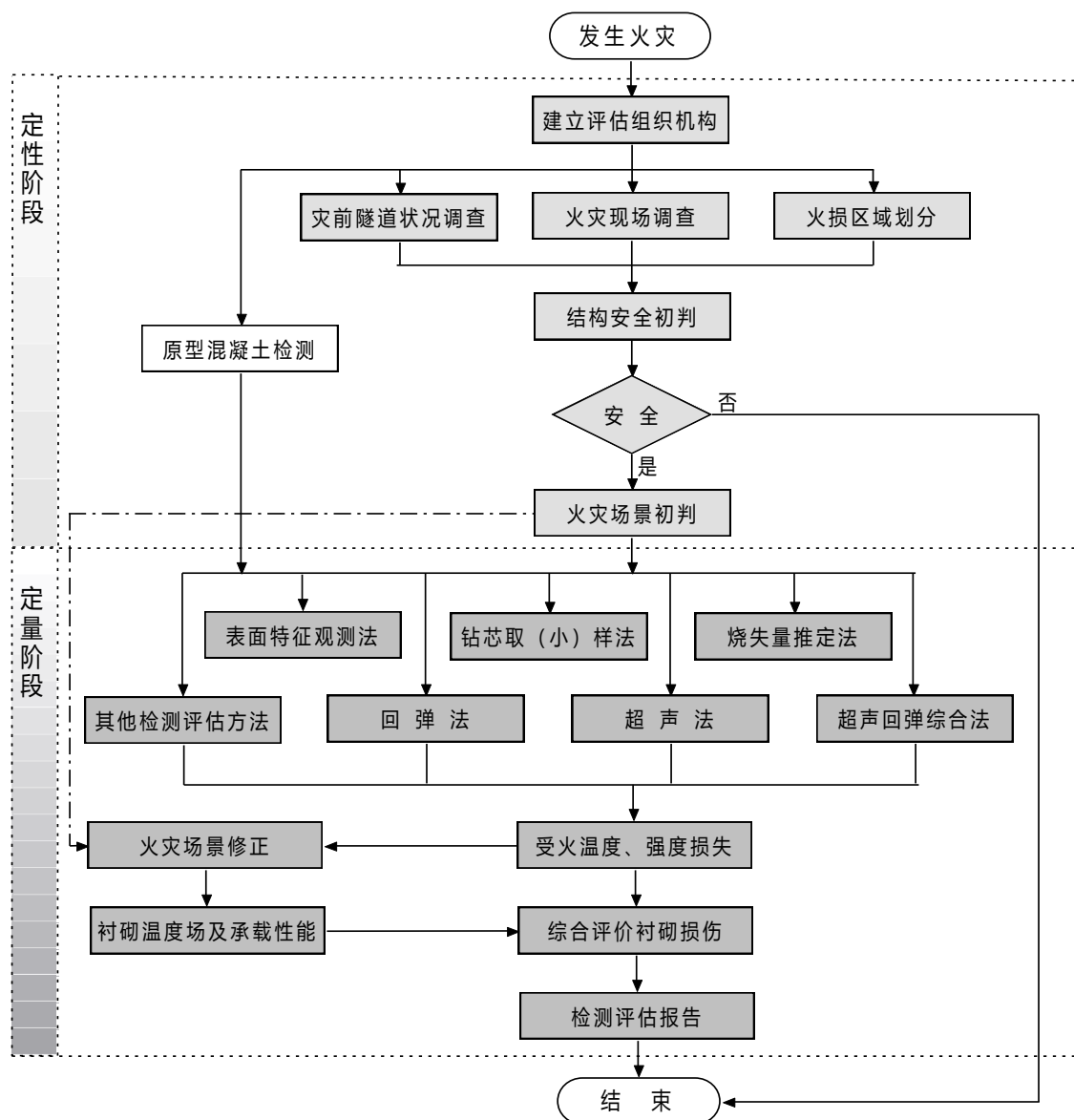


图 5.2.1 衬砌结构火灾损伤调查评估程序

1 初步勘查阶段，主要了解火灾发生及灭火过程，对火灾后现场进行目测观察和摄影记录，填写附录 D 衬砌结构火灾调查表和衬砌结构受损情况简单评估表。

2 详细勘察阶段，主要是采用红外扫描、回弹、超声等物理方法对衬砌钢筋混凝土材料的烧损厚度、强度等进行详细勘察。

3 定性评估阶段应调查火灾概况、对火损的衬砌结构的安全性作出初步鉴定，可使用外观特征观察法、现场火损现象以及火损简单分级表，初步划分火损区域和损伤程度。

4 定量评估阶段应在不同损伤区域实施非破损或微破损试验，根据各检测方法的反演推定最高温度及混凝土残余强度，建立荷载-结构模型，定量地计算评价不同火损区域衬砌结构的安全状态。

5.2.2 衬砌火灾损伤初步勘察及定性评估工作内容应符合下列规定：

1 火灾前隧道状况调查。应收集隧道存档资料和运营记录，包括隧道水文地质状况、设计图纸、设备情况、设备运行记录、通风状况、车辆运行情况和位置等。

2 火灾现场观察记录。对火灾后现场进行表面观察和摄影记录，观察记录内容包括混凝土颜色、裂纹裂缝、爆裂、疏松、钢筋外露以及小金属棒敲击现象等；此外，还应观察现场照明灯具、燃烧残留物等烧损情况，为评判温度场分布提供一手数据。

3 基础火灾证据收集。组织受灾单位或个人、火灾发现者及灭火人员座谈，了解隧道内火灾发生及灭火过程，收集消防部门的火灾灾情鉴定报告，了解起火的时间、起火点位置、起火原因初步判断、火的走向、主要燃烧物、火灾持续时间、火灾的燃烧程度、灭火方式、灾后残留物状态、过火区域、火灾时通风状况等。

4 火损区域划分。在火灾现场初步调查时，采用表面特征观测法、混凝土损伤等级划分表（见图 5.2.2），结合衬砌结构混凝土颜色、裂纹裂缝、爆裂剥落、疏松、钢筋外露、结构变形以及小锤敲击现象等损坏状况，划

分火损区域。

表 5.2.2 混凝土损伤等级划分

损伤程度	级别	损伤指标							
		温度 /°C	混凝土剥落深度/mm	剩余抗压强度 /%	混凝土组织结构	喷涂层	混凝土表面颜色	钢筋暴露	裂缝现象
无损伤	1 度	<300	0	>95	无变化	无脱落	青色 灰白色	无	无
轻损伤	2 度	300~600	0	50~95	基本原状	有些脱落	青色 灰白色	无	轻微
中损伤	3 度	600~750	2~5	20~50	部分改变	部分脱落	微红色 灰白色	10%—25%， 无挫曲	局部
重损伤	4 度	750~900	5~15	20	大部分改变	全部脱落	浅黄色	25%~50%，至 少一根挫曲	扩大延伸
极损伤	5 度	>900	15	10	完全改变	全部脱落	均匀白色	50%以上，超 过一根挫曲	扩大延伸

5 结构安全性初步鉴定。对火损严重的区域的衬砌结构进行初步安全鉴定，判别其是否仍处于破坏变形阶段，初步估计火损结构能否满足承载力要求，是否会发生大块混凝土掉落甚至结构坍塌，作出是否暂时封闭现场以确保人员安全的决定。在确认现场人员的安全有保障后，方可对灾后现场进行详细勘查。

6 火灾场景初步判断。应根据起火时间、起火位置、起火时隧道运营状况以及灾后残留物状态等确定火灾原因、持续时间和蔓延机理等，并根据燃烧物情况计算火灾载荷，判断初步的火灾场景。

5.2.3 衬砌火灾损伤详细勘察及定量评估工作内容应符合下列规定：

1 表面特征观测法评估受火温度。根据衬砌混凝土表面颜色、裂纹、爆裂疏松、小锤敲击等观测手段快速推定火损区域受火温度，初步得到火灾温度场分布。公路隧道常用混凝土标号 C20~C35 混凝土的损伤特征可按照表 5.2.3-1 和表 5.2.3-2 进行评估。

表 5.2.3-1 C20~C35 混凝土外观损伤特征

温度指标		表面特征	
火灾温度 (°C)	受火时间 (h)	混凝土表面 颜色	特点描述
300	1	青灰色	完好
300	2	青灰色	完好
300	4	浅青灰色	基本完好, 表面有几道极浅裂纹
600	1	青灰略显浅 粉色	有少量的微小裂缝出现
600	2	浅粉红色	有少量的微小裂缝
600	4	浅紫色	有大量的微小裂缝
750	1	线紫色略显 浅黄色	碎石裸露, 单面大约 1/8 面积破坏
750	2	浅灰白略显 浅黄色	碎石裸露, 碎石为灰白色, 单面大约 1/4 面积破坏
750	4	灰白略显浅 黄色	碎石裸露, 碎石灰白色, 有些砂子为赤红色, 有少量水泥混合物变成白色块状物, 单面大约 1/2 面积破坏
900	1	浅灰白色	碎石裸露, 碎石为灰白色, 有些砂子为赤红色, 有少量水泥混合物变成白色块状物, 表面全部脱落
900	2	灰白色	碎石裸露, 碎石为灰白色, 有些砂子为赤红色, 有少量水泥混合物变成白色块状物, 表面全部脱落较严重
900	4	灰白色	碎石裸露, 碎石为灰白色, 有些砂子为赤红色, 有少量水泥混合物变成白色块状物, 表面全部脱落严重

表 5.2.3-2 表面特征观测—颜色和外观特征法评估受火温度

火灾温度 (°C)	混凝土颜色	表面开裂情况	疏松脱落情况	露筋情况	锤子敲击声 音变化
200 以下	灰青色与常 温无大变化	无	无	无	响亮
300~600	微显粉红色	无	无	无	响亮
700~800	灰白为主呈 浅黄色	表面有贯通裂缝	角部剥落表面起鼓 混凝土有疏松状	板底、角部混凝土 爆裂现露筋	闷声

火灾温度 (°C)	混凝土颜色	表面开裂情况	疏松脱落情况	露筋情况	锤子敲击声音变化
900~1000	浅黄并现白色	裂缝多	表面疏松大块剥落	严重露筋	声哑
1000~1100	浅黄呈白色	裂缝极多	表面疏松大块剥落	钢筋全部外露	声哑

2 回弹法检测混凝土强度损失和评估受火温度。根据火损区域划分和火灾场景的初步判断，确定合理的回弹测试点分布，进行回弹法检测。根据试验归纳的火损混凝土表面硬度与回弹值的关系、回弹值（回弹比）与强度损失（强度比）的直接关系、回弹值（回弹比）与受火温度的间接关系，对检测数据进行分析，判断火损区域衬砌混凝土的强度损失，推定各部位最高受火温度。

3 钻芯取（小）样法检测混凝土强度损失和评估受火温度。根据火灾损伤现场情况和衬砌结构体系受力特征，确定合理的芯样钻取点分布图，采用专门的钻芯机钻取圆柱形芯样，适当加工后在试验机上测定火损后残余抗压强度，并通过强度（强度比）与受火温度的关系，推断芯样钻取点处的最高受火温度。

4 超声法检测混凝土强度损失、火损深度和评估受火温度。选择能反映火损规律的测试点以及钻芯取样法钻取的芯样，根据试验归纳的超声波速（声速比）与强度（强度比）、受火温度的关系，采用对测法检测衬砌混凝土的强度损失和评估受火温度。利用超声法的损伤层检测原理，采用平测法检测代表部位的混凝土火损深度。

5 混凝土烧失量推定法评估受火温度。在火灾现场拣取合适的混凝土剥落块或在代表性部位钻取小块混凝土，进行体积、质量的测试，根据混

凝土密度（密度比）与受火温度的关系，推定衬砌混凝土的受火温度。

6 超声法、回弹法检测混凝土强度损失和评估受火温度。采用超声对测法和回弹法在相同部位的检测数据，利用试验结果分析的超声波速（声速比）、回弹值（回弹比）与强度损失（强度比）、受火温度的关系进行衬砌混凝土强度、最高经历温度的判断。

7 综合分析各方法的检测结果，给出火损衬砌混凝土的强度损失、损伤深度和受火温度的结论。

8 根据检测结果修正火灾场景，利用修正后的火灾场景进行衬砌温度场数值模拟和高温残余承载力计算，给出衬砌结构火损情况的计算结果。

9 根据强度损失检测结果和计算结果综合评定不同火损区域衬砌结构的受损程度。

10 作出灾后检测评估报告。

5.2.4 没有直接测定火灾后衬砌混凝土力学参数时，可以根据受火温度按照图 5.2.4 选取混凝土的高温下强度和弹性模量。

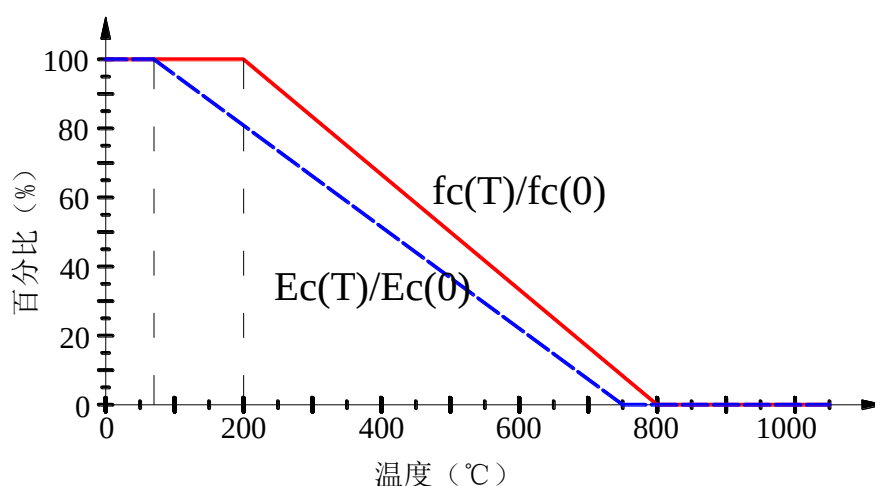


图 5.2.4 混凝土高温强度及弹性模量与温度关系图

5.2.5 没有直接测定火灾后钢筋及螺栓力学参数时，可以根据受火温度按照图 5.2.5 选取钢筋及螺栓的高温强度和弹性模量。

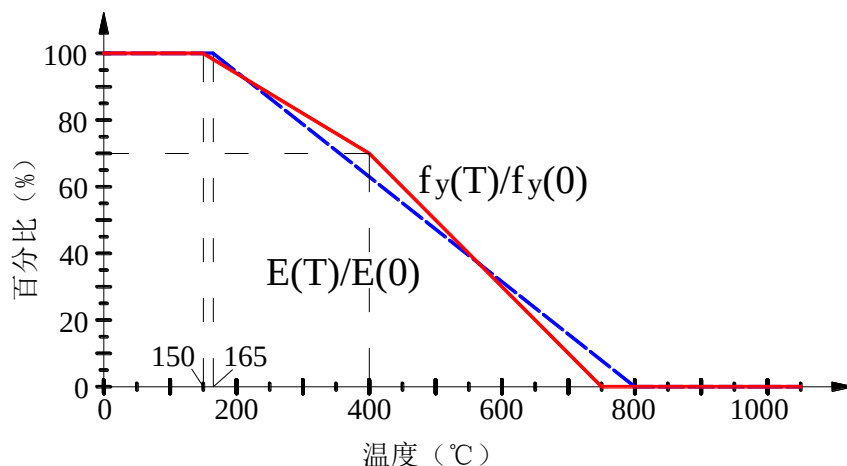


图 5.2.5 钢筋高温屈服强度及弹性模量与温度关系图

5.3 衬砌结构火灾损伤评估

5.3.1 衬砌结构火灾损伤评估应根据对衬砌混凝土火灾损伤调查评估结果，建立衬砌结构体系的损伤评价模型，采取定性与定量相结合的方式，对其剩余承载力进行安全性评估。

【条文说明】 公路隧道衬砌结构是一个无限多次超静定宏观结构，不能根据局部检测区的技术指标如颜色、残余强度值直接评价大尺度的衬砌结构体系损伤与破坏状况。

5.3.2 采用荷载-结构法对衬砌结构承载力进行定量评估，评估数值模型应满足以下规定。

1 将传统荷载-结构法所采用的弹簧-梁单元系统改进为弹簧-平面单元，保持力边界与位移边界不变，同时按照热传导理论对其热力学边界进行调整。

2 应根据实际衬砌损坏检测情况进行衬砌结构的设定与计算，包括爆裂与损伤深度，考虑强度随厚度的损失等。

3 应能反映温度沿衬砌厚度方向的变化、沿厚度方向上温度分布不均而导致的物理力学和热工参数的变化。

5.3.3 衬砌结构承载力火灾评估模型中，衬砌混凝土应视为热的隔离层，

围岩仍可视作具有弹性约束的连杆系统，服从温克尔局部变形假定，其弹性抗力参数与常温下无异。

5.3.4 衬砌结构实体单位应沿衬砌厚度方向均匀的划分为若干层，如图 5.3.4 所示。

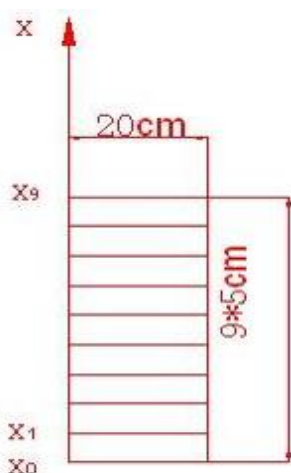


图 5.3.4 衬砌沿着厚度方向均匀划分

5.3.5 火灾场景参数的选取应满足以下规定。

1 受火最高温度 T_{max} 、火灾持续时间 t_d 应依据火灾损伤调查评估结果确定。衬砌表面温度随时间的变化可以按照公式 5.3.5-1 计算。

$$\begin{cases} T = T_0 + T(t) = T_0 + T_{max} (1 - 0.325e^{\alpha t} - 0.675e^{\beta t}) & (0 \leq t \leq t_d) \\ \frac{T - T_0}{T_{max} - T_0} = 0.816e^{-6.27 \frac{t-t_d}{t_{max}-t_d}} + 0.857e^{-0.217 \frac{t-t_d}{t_{max}-t_d}} - 0.689 & (t_d \leq t \leq t_{max}) \end{cases} \quad (5.3.5-1)$$

式中： T_0 —常温，20℃； α —常数，取值“-0.167”； β —常数，取值“-2.5”； t_{max} —为火灾结束，温度降为常温的时间。

2 无现场调查数据时，可以将公路隧道火灾的基准持续时间设定为 2 小时。具体案例中应根据具体情况对受火持续时间进行相应调整。火灾持续时间的确定可参照式 5.3.5-2 进行计算：

$$t_d = \psi_1 \psi_2 \psi_3 t_{standard} \quad (5.3.5-2)$$

式中： t_{standard} 为公路隧道火灾的基准持续时间；

ψ_1 ， ψ_2 ， ψ_3 分别为隧道长度影响系数、主动消防措施影响系数和隧道结构重要性影响系数，可按照表 5.3.5-1、表 5.3.5-2 和表 5.3.5-3 分别取定。

表5.3.5-1 隧道长度影响系数 ψ_1 的取值

隧道类型	隧道长度	
	$L < 10000 \text{ m}$	$L \geq 10000 \text{ m}$
公路隧道	1.0	$(0.7421 + 0.00103L^1) / t_{\text{standard}}$

¹ 由于目前10 km以上公路隧道火灾案例较少，因此表中隧道长度与火灾持续时间的关系式不够完善，当计算出的 ψ_1 值偏大时，需酌情下调。

表5.3.5-2 主动消防措施影响系数 ψ_2 的取值¹

隧道类型	主动消防措施状况	
	城市隧道	山区隧道
公路隧道	1.0	1.2

¹ 考虑到城市隧道一般容易及时采取主动消防措施，故不考虑火灾时间上的延长；而对于山区隧道，由于远离消防救援力量，因此，考虑了火灾持续时间的延长。

表5.3.5-3 隧道结构重要性系数 ψ_3 的取值

隧道结构重要性系数	越江、跨海隧道	高速公路、一级公路隧道	二、三、四级公路隧道
ψ_3	1.2	1.1	1.0

3 衬砌断面温度的横向分布可以按照第 3.3.3 条的规定取定。

4 温度沿隧道的纵向分布可以用式 5.3.5-2 进行计算。

$$\frac{T - T_0}{T_{\text{max}} - T_0} = 0.573e^{-9.846 \frac{x}{L_{\text{tot}}}} + 0.518e^{-1.672 \frac{x}{L_{\text{tot}}}} - 0.089 \quad (5.3.5-2)$$

式中： T —距火源 x 处的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_{max} —火源处的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

x —距火源的距离， m ；

L_{tot} —温度降低到常温，距火源的距离， m 。

5.3.6 衬砌截面内任意时刻的温度可以按照公式 5.3.6 计算。

$$T(x,t) = T_{\max} \times \left(1 - \frac{T_{\max}}{\frac{0.9}{x+0.3}t + T_{\max}}\right) \quad (5.3.6)$$

式中：x—与衬砌内表面的距离，m。

5.3.7 混凝土热工参数选取应符合以下规定

1 硅质骨料混凝土的导热系数 λ_c 可按照式 5.3.7-1 计算，钙质骨料混凝土的导热系数 λ_c 可按照式 5.3.7-2 计算。

$$\lambda_c = 2 - 0.24(T/120) + 0.012(T/120)^2 \quad (5.3.7-1)$$

$$\lambda_c = 1.6 - 0.16(T/120) + 0.008(T/120)^2 \quad (5.3.7-2)$$

式中： λ_c —混凝土的导热系数，W/(m·°C)；

T —受火温度，°C。

2 硅质骨料混凝土的热膨胀系数 α_c 可按照式 5.3.7-3 计算，钙质骨料混凝土的热膨胀系数 α_c 可按照式 5.3.7-4 计算。

$$\alpha_c = (-1.8 \times 10^{-4}) + (9 \times 10^{-6}T) + (2.3 \times 10^{-11}T^3) \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C}$$

$$\alpha_c = 1.4 \times 10^{-3} \quad 700^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.3.7-3)$$

$$\alpha_c = (1.2 \times 10^{-4}) + (6 \times 10^{-6}T) + (1.4 \times 10^{-11}T^3) \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 805^\circ\text{C}$$

$$\alpha_c = 12 \times 10^{-3} \quad 805^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.3.7-4)$$

式中： α_c —混凝土的热膨胀系数，mm/m；

T —受火温度，°C。

3 混凝土的比热 C_p 可按照式 5.3.7-5 计算。

$$C_p = 900 + 80(T/120) - 4(T/120)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 805^\circ\text{C} \quad (5.3.7-5)$$

式中： C_p —混凝土的比热，kcal/(kg·°C)；

T —受火温度，°C。

4 混凝土弹性模量可以按照第 5.2.4 条进行取定,也可以按照式 5.3.7-6 进行计算。

$$E_c^T = \frac{E_c}{1 + 2.60 \cdot (T - 20)^{2.60} \times 10^{-7}} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C} \quad (5.3.7-6)$$

5 混凝土容重 $\rho(T)$ 随温度的变化可以按照式 5.3.7-7 计算。

$$\rho(T) = 2400 - 0.56T \quad (5.3.7-7)$$

式中: $\rho(T)$ —受火后混凝土容重, kg/m^3 。

6 混凝土导温系数 $\lambda/\rho c$ 可以按照式 5.3.7-8 计算。

$$\frac{\lambda}{\rho c} = \frac{1.4 - 1.5 \times 10^{-3}T + 6 \times 10^{-7}T^2}{528 - 0.1232T} \times \frac{1}{3600} \quad (5.3.7-8)$$

式中: $\lambda/\rho c$ —混凝土导温系数, m^2/s 。

7 衬砌爆裂或剥落的厚度应根据火灾场景按照表 5.3.7 进行设定。

表 5.3.7 二衬混凝土爆裂与剥落厚度 (cm)

受火条件	常 温	小汽车			公交车			重型货车			油罐车		
		1h	2h	4h	1h	2h	4h	1h	2h	4h	1h	2h	4h
剥落厚度	0	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5~10	5~10	5~10

5.3.8 一般情况下根据火灾受损情况将混凝土结构的损伤定为四级。

1 一级损伤: 亦称轻度损伤, 只是表面装饰部分遭受破坏, 或表面损伤轻微, 结构本身完好。

2 二级损伤: 亦称中度损伤, 损伤程度达到保护层, 使保护层部分剥落, 但受拉主筋未受伤, 构件整体性好, 变形不超过规范规定值。

3 三级损伤: 亦称严重损伤, 混凝土保护层大面积剥落, 主筋外露, 粘结力破坏, 构件明显变形。火灾后构件承载力有不同程度的降低。

4 四级损伤：亦称重度破坏，混凝土构件表面大面积损伤剥落，严重开裂，结构变形很大，构件遭到严重破坏，已成为危及结构。

5.3.8 有条件获取衬砌混凝土火灾损伤调查成果时，应根据荷载-结构模型进行衬砌结构体系承载力评估。不能获取现场调查数据时可以按照表 5.3.8 进行衬砌结构火灾损伤评价。

表 5.3.8 公路隧道衬砌结构火灾损伤评价表

受火时间	层数	拱顶	拱脚	边墙	损伤评价
1h	小汽车	×	×	×	×
	公交车	×	×	×	轻度
	重货	爆裂（0~5cm） 拉破坏（5~10cm）	×	×	中度
	油罐车	爆裂（0~5cm） 拉破坏（5~10cm）	爆裂（0~5cm）	爆裂（0~5cm）	严重
2h	小汽车	×	×	×	轻度
	公交车	拉破坏（0~5cm）	×	×	轻度
	重货	爆裂（0~5cm） 拉破坏（5~10cm）	爆裂（0~5cm）	爆裂（0~5cm）	中度
	油罐车	爆裂（0~5cm） 拉破坏（5~15cm）	爆裂（0~5cm）	爆裂（0~5cm）	严重
4h	小汽车	×	×	×	轻度
	公交车	爆裂（0~5cm）	爆裂（0~5cm） 压溃（5~10cm）	爆裂（0~5cm）	中度
	重货	爆裂（0~5cm） 拉破坏（5~15cm）	爆裂（0~5cm） 压溃（5~15cm）	爆裂（0~5cm） 压溃（5~10cm）	严重
	油罐车	爆裂（0~10cm） 拉破坏（10~20cm）	爆裂（0~5cm） 压溃（5~20cm）	爆裂（0~5cm） 压溃（5~15cm）	重度

注：“×”表示“未破坏”，以下各表与此同。

6 结构火灾修复

6.1 一般规定

6.1.1 结构火灾修复方法的选择应结合结构特点，当地具体条件，新的功能要求等因素，并按加固效果可靠，施工简便，经济合理等原则综合分析确定。

6.1.2 结构火灾修复时应满足以下规定。

- 1 应在分析致火原因的基础上有针对性的开展修复设计与施工。
- 2 应不影响或尽量少影响隧道原有使用功能。
- 3 修复方法应安全可靠、简单可行、经济实用，尽量缩短工期，应开展多种方案的技术经济比选。

- 4 修复材料应是无毒的不燃或难燃材料，燃烧时不产生有害气体。

6.1.3 一般情况下应根据衬砌火灾受损等级采取下列对应的修复方法。

- 1 一级损伤，可采用表面粉刷或将表面污物清理干净、重新进行装修粉刷，局部轻微损伤处采用砂浆抹面修补即可。
- 2 二级损伤，一般先清除烧松散的混凝土，然后进行砂浆抹面或喷射混凝土修复；对混凝土表面裂缝，可采取水泥浆、聚合物砂浆或环氧树脂进行灌缝修复。
- 3 三级损伤，应根据剩余承载力计算结果，按照等强原则进行加固。一般采用挂网锚喷射（纤维）混凝土、粘贴钢板（带）、套拱等方式进行加固。
- 4 四级损伤，一般应将烧损衬砌予以拆除、重新浇筑混凝土衬砌或者套拱等方式进行加固。

6.2 混凝土修复

6.2.1 无明显损伤或者一级损伤的火灾后较为完好的混凝土表面，应采用喷水进行养护。

【条文说明】对火灾后混凝土的喷水养护试验表明，经养护后强度可有一定程度的恢复。养护 56 天后，火灾温度为 600℃的高强混凝土，可恢复 66~93%，普通混凝土 61~85%；火灾温度为 800℃的高强混凝土，可恢复 34~79%，普通混凝土 31~56%。

6.2.2 混凝土表面缺陷可采用混凝土砂浆、聚合物水泥混凝土砂浆、改性环氧混凝土砂浆等材料进行修补，并满足下列技术要求。

1 混凝土表面修补所用材料的性能、品种、规格和质量应符合有关规范和设计的要求，严格按照规定进行施工。

2 修补用材料的强度和其它质量指标应不低于原结构材料，修补用的混凝土强度等级应比原强度提高一级。

3 混凝土表面缺陷修补时原结构表面处理应符合设计要求，与原混凝土结合良好，具有足够的耐久性。

4 缺陷修补完成后表面应无裂缝、起鼓等现象，宜进行表面修饰处理。

6.2.3 混凝土表面裂缝可采用表面封闭法或者注射法进行修补，并满足下列技术要求。

1 表面封闭法适用于小于 0.3mm 宽度的静止裂缝，封闭材料应为低黏度、渗透性良好的胶液。

2 注射法适用于宽度大于 0.3mm 的裂缝。注射材料应为低黏度、可注性好的的胶液。注射孔可采用骑缝或斜缝布置方式。

3 当裂缝宽度大于 0.5mm 时，应开槽填充封闭，再注射胶液。填充材料宜为改性环氧树脂类、聚合物砂浆等。

4 裂缝修补材料的性能指标应满足有关规范和设计的要求，严格按规

定进行施工。

5 裂缝修补完成后，宜进行表观修饰处理。

6.3 结构加固

6.3.1 混凝土有爆裂的衬砌结构可采用喷射混凝土法进行加固，并满足下列规定。

1 喷射混凝土强度不应低于原衬砌混凝土强度，且不低于 C25。

2 可采用合成纤维混凝土、钢纤维混凝土提高其抗裂性能，纤维掺量应根据试验确定。

3 裂损严重时喷射混凝土应与钢筋网、锚杆等配合使用，补强锚杆宜采用预应力锚杆。

6.3.2 衬砌混凝土有潜在掉块风险或强度不足，隧道净空富余量小时宜采用粘贴钢板（带）进行加固，并满足下列规定。

1 锚栓锚固处的原衬砌混凝土强度等级应不低于 C20。

2 应根据火灾损伤情况，计算确定钢板厚度、宽度、间距，钢板厚度不小于 5mm，宜全断布置。

3 钢板（带）表面应进行防腐蚀、防锈蚀表面处理，处理材料应对钢板及胶黏剂无害。

4 钢板粘结应采用锚栓锚固压力注胶的方法，胶黏剂平均厚度宜为 3~5mm。

5 钢板（带）材料应进行耐火防护，满足耐火等级及耐火极限要求。

6 应采用有机械锁键效应的后扩底锚栓或适应开裂混凝土性能的新型化学锚栓连接钢板与衬砌。

7 应对锚栓钢材承载力进行验算，不得采用膨胀型锚栓作为连接件。

6.3.3 衬砌结构严重受损、衬砌大面积爆裂（ 10m^2 以上），可采用套拱进行加固，并满足下列规定。

- 1 根据隧道病害程度，计算确定套拱形式、厚度、加固范围。
- 2 套拱形式宜采用钢拱架混凝土套拱或者钢筋混凝土套拱。
- 3 套拱混凝土强度应较原混凝土构件强度高一个等级，且不低于 C25。
- 4 钢拱架混凝土套拱可采用工字钢、H 型钢、钢格栅等，钢拱架间距宜为 $0.5\text{m}\sim 1.20\text{m}$ 。
- 5 隧道渗漏水严重时，应在套拱和原衬砌间增设防排水措施。
- 6 套拱应全断面布置，设置锁脚锚杆（管）稳固基础，必要时可增设仰拱。
- 7 叠合式套拱可采用植筋、铺设钢筋网等措施确保新旧结构连接。
- 8 分离式套拱宜采用钢筋混凝土结构。

6.3.4 衬砌混凝土损伤严重、强度已完全丧失、不具备加固条件时应采用换拱加固以置换原衬砌，恢复使用功能。换拱应满足下列规定。

- 1 换拱加固可选用整体换拱和局部衬砌更换。
- 2 根据衬砌病害情况、地质条件、施工环境，计算确定衬砌换拱范围、结构型式、支护参数。
- 3 换拱加固应包括拆除方案，拆除方案设计应包括围岩扩挖及加固、施工临时防护、拆除方法及工艺、监控量测等内容。
- 4 换拱加固设计应制定新旧衬砌结构及防排水系统的衔接措施。
- 5 换拱处衬砌内轮廓宜与原内轮廓保持一致，当原内轮廓断面不能满

足使用需要时，应重新确定断面型式。

6 换拱混凝土应较原结构混凝土强度提高一级，并不低于 C30，局部衬砌更换混凝土材料中应掺入微膨胀剂。

附录 A：隧道内承重结构体的耐火极限试验升温曲线

A.0.1 RABT 和 HC 标准升温曲线

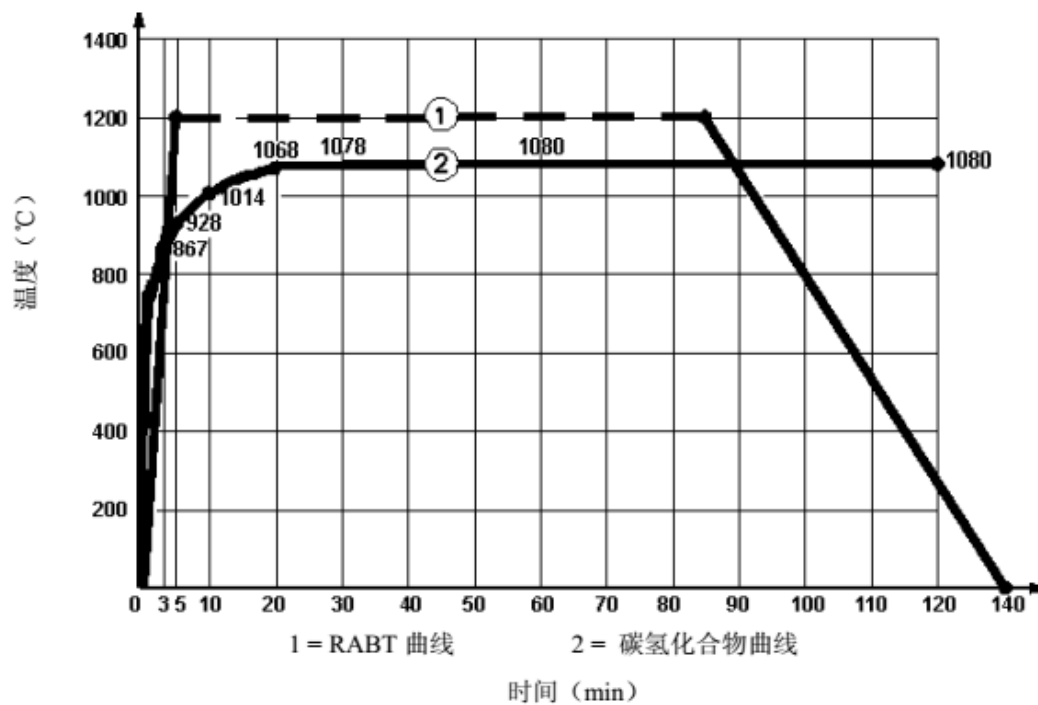


图 A.0.1 RABT 和 HC 标准升温曲线

附录 B：隧道衬砌结构内温度求解方法

B.1 热传导基本方程与边界条件

1) 导热的基本方程

热量的传递有三种方式，对流，传导，热辐射，在隧道火灾分析中，热辐射可以忽略，涉及的温度热量传递主要是对流和热传导，隧道衬砌结构内部的热量来源隧道内火灾产生的高温烟气流，高温烟气流与隧道衬砌之间的热对流使隧道结构的温度逐渐升高，在衬砌内部，热量通过衬砌结构内部的热传导来将热量由内向外进行传递，衬砌结构内部温度分布的计算建立在两个传热学及本方程的基础上。

热烟气流于衬砌结构表面的热量传递需要满足牛顿对流方程：

$$q = \alpha(T_w - T_f) \quad (\text{B-1})$$

式中， q —法线方向上对流密度，定义为单位面积上传递的热能；

T_w 、 T_f —壁面温度与流体温度（℃）；

α —表面的对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]。

温度在衬砌中的传递需要满足傅里叶导热定律：

$$q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{B-2})$$

式中， q_n —法线方向上的热流密度，定义为单位时间通过单位面积的热能；

λ —热导率，又称导热系数， [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] 反映了物质的导热能力的大小。

根据以上的基本方程可以得到衬砌结构内部的热传导微分方程为：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{B-3})$$

式中， t —时间；

x , y , z —空间坐标；

$T=T(x, y, z, t)$ —表示构件内部的温度场；

ρ c 和 λ —构件的容重，比热和热传导系数。

2) 边界条件

边界条件是反映衬砌结构热传导过程与周围环境相互作用的条件。根据衬砌结构周

围环境以及与周围介质的热交换条件的不同，边界条件可分为三类：

- (1) 已知衬砌结构边界上的温度函数 $T|_s$ ；
- (2) 已知衬砌结构边界上的热流密度 q ；
- (3) 已知与衬砌结构相接触的隧道内热烟气流的温度 T_f 以及衬砌内表面与烟气流间的对流换热系数 h 。

在实际的隧道火灾情况下，衬砌结构内侧（边界 S_1 ）为受火面，可知热流温度 T_f 以及衬砌结构内表面与热烟气流间的对流换热系数 h ，属于第三类边界条件；对于衬砌结构外侧（边界 S_2 ），由于被周围岩土体包围，并且衬砌混凝土材料具有热惰性，其外侧界面温度一般不会太高，与岩土体温差不大，可假定衬砌结构混凝土与岩土体之间为理想接触，即不考虑二者间的接触热阻。则边界条件可表达如下

$$\begin{cases} -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{S_1} = h(T_f - T|_{S_1}) \\ T|_{S_2-C} = T|_{S_2-G} \end{cases} \quad (B-4)$$

式中， $\lambda(T)$ ——衬砌结构混凝土的导热系数，W/（m.K）；

T ——衬砌结构内任意点的温度，K；

x ——衬砌结构面法向坐标。

S_1 ——衬砌结构内表面边界；

S_2 ——衬砌结构外表面边界；

h ——衬砌结构混凝土与热烟气流间的对流换热系数，W/（m².K）；

T_f ——热烟气流的温度，K；

$T|_{S_1}$ ——衬砌结构内表面 S_1 边界温度，K；

$T|_{S_2-C}$ —— S_2 边界衬砌结构外表表面温度，K；

$T|_{S_2-G}$ —— S_2 边界处岩土体温度，K；

3) 初始条件

初始条件也称时间条件，是指在时间上热传导过程的特点。对于衬砌结构热传导这种瞬态热传导过程，主要是指过程开始时刻物体内的温度分布。火灾开始之前，衬砌结

构处于正常的环境温度之中，可假设整个结构物的温度均匀，且等于环境温度（ $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ），则初始条件可以写作

$$T(x, t = 0) = T_0 \quad (\text{B-5})$$

4) 几何条件

几何条件主要指参与衬砌结构热传导过程的物体的几何形状和大小。由于衬砌受热形式是单面受热，这里几何条件主要是指衬砌结构的厚度和周围岩土体厚度的取值。

5) 物理条件

物理条件主要指参与衬砌结构热传导过程的物体的热物理参数。在衬砌结构温度场计算中，涉及的热物理参数主要有混凝土和岩土体的导热系数、比热容、密度等。

B.2 结构热传导数值计算方法

1) 空间域上的瞬态热传导有限元方程

将衬砌结构瞬态热传导微分方程式变换为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}) - \rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{B-6})$$

从此类二阶偏微分方程导出有限元方程的方法有泛函求极值法和加权余量法等。这里采用加权余量法中的 Galerkin 方法。

用有限单元将衬砌热传导的连续空间区域离散后，每个单元内的温度分布可表示成如下的插值函数

$$T(x, y, t) = [N(x, y)] \{T(t)\}^e \quad (\text{B-7})$$

式中

$[N(x, y)]$ 为描述温度在单元内变化的形函数矩阵

$$[N(x, y)] = [N_1(x, y) \ N_2(x, y) \ \cdots \ N_n(x, y)]$$

$\{T(t)\}^e$ 为依赖于时间的单元节点温度向量

$$\{T(t)\}^e = [T_1(t) \ T_2(t) \ \cdots \ T_n(t)]^T$$

由于用式（4.7）近似描述的温度通常不能精确满足热传导微分方程式（4.6），代入后，方程右端通常非零，等于残差 R 。

$$R = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda(T) \frac{\partial([N(x,y)]\{T(t)\}^e)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda(T) \frac{\partial([N(x,y)]\{T(t)\}^e)}{\partial y}) - \rho(T)c(T) \frac{\partial([N(x,y)]\{T(t)\}^e)}{\partial t} \quad (B-8)$$

根据加权余量法的 Galerkin 方法, 用形函数矩阵 N_i 作为权函数, 使残差 R 的加权积分为零, 即

$$\int_{A^e} N_i R dA = 0 \quad (B-9)$$

式中 A^e 为单元面积。

对热传导的连续区域内的每个单元都采用上述的加权残差处理后, 积分合成后, 可得到热传导有限元方程

$$[C] \frac{\partial}{\partial t} \{T(t)\} + [K] \{T(t)\} = \{P\} \quad (B-10)$$

式中, $[C]$ 为总质量热容矩阵, $[C] = \sum_e \int_{A^e} \rho(t)c(t)[N]^T [N] dA$

$T(t)$ 为节点温度向量

$$[K] = [K_T] + [K_h]$$

$$[K] \text{ 为热传导矩阵, } = \sum_e \int_{A^e} \lambda(T) [B]^T [B] dA + \sum_e \int_{A^e} h_r [N]^T [N] dA$$

$$\text{其中, } [B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} \end{bmatrix}, \{P\} \text{ 为节点热流向量, } \{P\} = \sum_e \int_{l_3^e} h_r T_f [N]^T dl$$

2) 瞬态热传导方程的时间域差分法

热传导有限元方程式是关于时间的一阶微分方程, 将时间域划分为若干个时间单元, 采用向后差分格式

$$\frac{\partial}{\partial t} \{T(t)\} = \frac{\{T(t)\}_t - \{T(t)\}_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (B-11)$$

式中, $\{T(t)\}_t$ 和 $\{T(t)\}_{t-\Delta t}$ 分别为 t 和 $t-\Delta t$ 时刻的节点温度向量, Δt 为时间步长。

将式 (4.10) 代入热传导有限元方程式 (4.11), 有

$$\left[\frac{[C]}{\Delta t} + [K] \right] \{T(t)\}_t = \frac{[C]}{\Delta t} \{T(t)\}_{t-\Delta t} + \{P\} \quad (B-12)$$

对于混凝土衬砌温度场计算这种非线性热传导问题，参与热传导过程的材料的热物理参数依赖于温度，其向后差分的温度递推格式为

$$\left[\frac{[C(T^*)]}{\Delta t} + [K(T^*)] \right] \{T(t)\}_k = \frac{[C(T^*)]}{\Delta t} \{T(t)\}_{k-1} + \{P(T^*)\} \quad (\text{B-13})$$

式中， T^* 为时间增量步 Δt 内温度的平均值， $T_i^* = \frac{1}{2}(\{T(t)\}_k - \{T(t)\}_{k-1})$

递推迭代终止的条件为 $\|T_i^* - T_{i-1}^*\|$ 小于等于给定的最到容许温度误差。

附录 C：沉管隧道火灾高温结构承载力计算

C.1 隧道衬砌结构高温承载力的计算理论

C.1.1 基本假设

根据既有的试验研究成果和理论分析可知，钢筋混凝土构件在高温时（后）的破坏形态、截面应变等都与常温构件的相类似，故常温下钢筋混凝土构件的计算原则和方法都适用于高温构件。

- 1) 平截面假设，截面的应变沿截面高度保持线性分布，如图 C.1-1 示；
- 2) 钢筋和混凝土之间没有相对滑移；
- 3) 不考虑混凝土的抗拉强度；
- 4) 钢筋的截面小，热传导系数大，可假设受力钢筋的温度沿其截面分布均匀，并与周围混凝土平均温度相同。

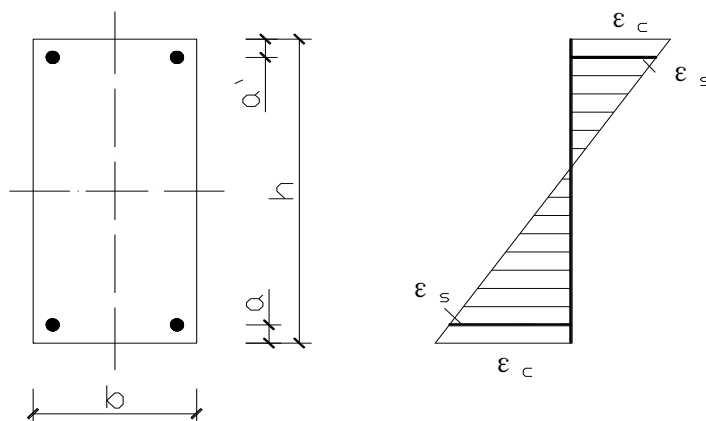


图 C.1-1 平截面假设示意图

C.1.2 高温极限 N_{uT} — M_{uT} 相关曲线

将衬砌结构截面的高温受压承载力记为 N_{uT} ，高温受弯承载力记为 M_{uT} 。对于给定截面尺寸、配筋和材料强度计算模型的钢筋混凝土构件，可以在无数组不同的 N_{uT} 和 M_{uT} 的组合下达到承载力极限状态。在承载力极限状态时，给定 M_{uT} 时就有唯一的 N_{uT} 。因而，一般采用 N_{uT} — M_{uT} 相关曲线来描述偏压构件截面的极限承载力。

当偏心受压的钢筋混凝土构件承受单面受火高温作用时，其极限 $N_{uT} - M_{uT}$ 相关曲线与纵坐标 N 轴不对称，如图 C.1-2 示。其不对称的主要原因是：当偏心受压构件承受单面受火这种不对称高温作用后，极大受压承载力作用点未与截面形心重合，而是在偏向低温区的位置。此时的偏心距 e_A 称为极强偏心距。图 C.1-2 中符号的规定： N_{uT} 以受压为正， M_{uT} 以拉区高温、压区低温时弯矩为正，反之为负。

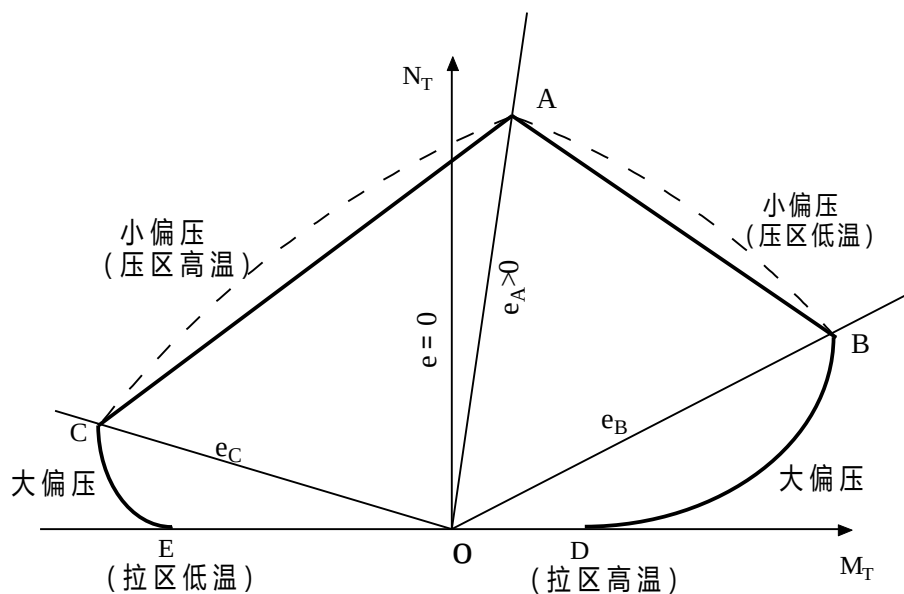


图 C.1-2 高温偏心受压构件极限 $N_{uT} - M_{uT}$ 相关曲线

相关曲线图上有 5 个不对称特征点。如图示，A 点对应着截面的极大轴向承载力；B 点、C 点分别对应着轴向合力偏向低温侧和高温侧时，各有的一个大、小偏心受压界限点（偏心受压界限破坏状态，如图 C.1-4 示），此时对应的偏心距 e_B 、 e_C 称为界限偏心距；D 点、E 点分别对应着轴向合力为 0、纯弯曲状态时，拉区高温和压区高温的极限弯矩值。各特征点对应的承载力状态简图见图 C.1-3。

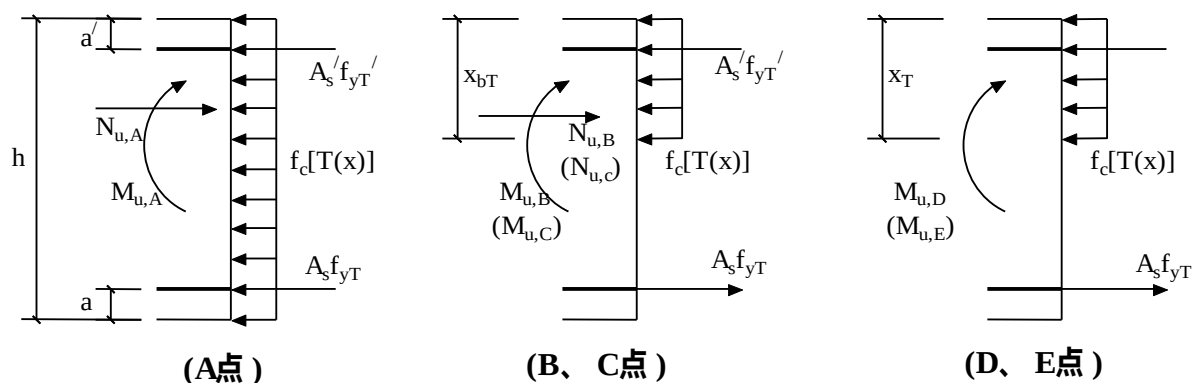


图 C.1-3 特征点的截面承载力状态

根据力的平衡条件及力矩平衡条件可得各承载力状态的平衡方程：

(1) 极大轴向承载力状态 A 点

$$\begin{cases} N_{uT,A} = f_{yT} A_s + f'_{yT} A'_s + f_c[T(x)]bh \\ M_{uT,A} = f_c[T(x)]bh[x(f_{cT}) - \frac{h}{2}] \mp A_s f'_{yT} (\frac{h}{2} - a) \pm A'_s f_{yT} (\frac{h}{2} - a') \end{cases} \quad (C.1)$$

(2) 偏心受压界限状态 B 点 (C 点)

$$\begin{cases} N_{uT,B(C)} = f_c[T(x)]bx_{bT} + A'_s f'_{yT} - A_s f_{yT} \\ M_{uT,B(C)} = f_c[T(x)]bx_{bT}[x(f_{cT}) - a] + A'_s f'_{yT} (h - a - a') \end{cases} \quad (C.2)$$

(3) 纯弯曲状态 D 点 (E 点)

$$\begin{cases} N_{uT,D(E)} = f_c[T(x)]bx_T + A'_s f'_{yT} - A_s f_{yT} = 0 \\ M_{uT,D(E)} = f_c[T(x)]bx_T[x(f_{cT}) - a] + A'_s f'_{yT} (h - a - a') \end{cases} \quad (C.3)$$

以上各式中，

N_{uT} —高温受压承载力；

M_{uT} —高温受弯承载力；

f_{yT} —纵向钢筋的高温抗拉强度；

f'_{yT} —纵向钢筋的高温抗压强度；

$f_c[T(x)]$ —混凝土的高温抗压强度；

x_{bT} —界限破坏的压区高度；

x_T —纯弯曲状态时的压区高度；

$x(f_{ct})$ —混凝土受压合力点至截面受拉边缘的竖向距离；

A_s —纵向受拉钢筋截面积；

A'_s —纵向受压钢筋截面积；

b —构件截面宽度；

h —构件截面高度；

a —纵向受拉钢筋合力点至截面受拉边缘的竖向距离；

a' —纵向受压钢筋合力点至截面受压边缘的竖向距离。

(4) 界限偏心距及高温界限压区高度

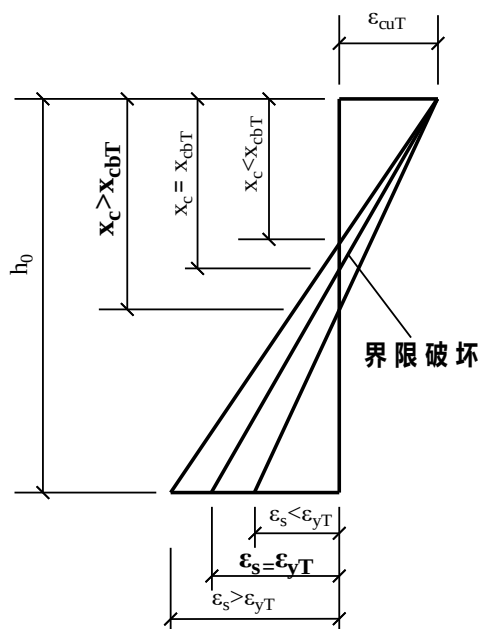


图 C.1-4 界限破坏时应变图

所谓界限破坏是指受弯构件在钢筋应力到达屈服强度的同时受压区边缘纤维也恰好到达混凝土受弯时极限压应变值，如图 C.1-4 示。此时的偏心距称为界限偏心距，混凝土受压区的高度称为界限压区高度。

界限偏心距：

$$e_{u,B(C)} = e_{B(C)} = M_{uT,B(C)} / N_{uT,B(C)} \quad (C.4)$$

设界限破坏时截面中和轴高度为 x_{cbT} ，则有：

$$\frac{x_{cbT}}{h_0} = \frac{\varepsilon_{cuT}}{\varepsilon_{cuT} + \varepsilon_{yT}}$$

把 $x_{bT} = \beta_1 \cdot x_{cbT}$ 代入上式，则可得高温界限压区高度 x_{bT} 为：

$$x_{bT} = \frac{\beta_1 \cdot \varepsilon_{cuT}}{\varepsilon_{cuT} + \varepsilon_{yT}} \cdot h_0 = \xi_{bT} h_0 \quad (C.5)$$

式中， β_1 —混凝土受压区等效矩形应力图系数，为矩形应力图高度 x_T 与中和轴高度 x_{cT} 的比值，按规范 GB50010 取值；

ε_{cuT} —混凝土高温极限压应变，可由高温试验获得；

ε_{yT} —钢筋的高温屈服应变，可由高温试验获得；

h_0 —截面有效高度；

ξ_{bT} —混凝土高温界限相对受压区高度， $\xi_{bT} = x_{bT} / h_0$ 。

C.1.3 大偏心受压时极限承载力

拉区高温偏心距 $e > e_B$ 、拉区低温偏心距 $e < e_C$ 时，截面上受拉钢筋首先屈服，之后受压区的混凝土和钢筋才到达各自的抗压强度，从而发生大偏心受压破坏状态。大偏心受压破坏的截面计算简图如图 C.1-5 示。

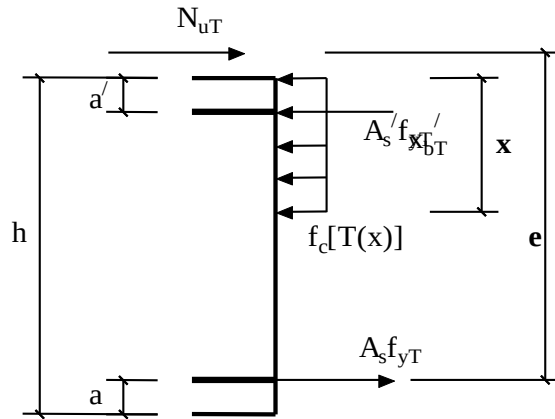


图 C.1-5 大偏心受压破坏截面计算简图

由力的平衡条件及各点对受拉钢筋合力点取矩的力矩平衡条件，可以得到截面的平衡方程：

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{uT} = f_c[T(x)]bx + f'_{yT}A'_s - f_{yT}A_s \\ N_{uT}e = N_{uT}(\eta e_i + \frac{h}{2} - a) \\ \quad = M_{uT} + N_{uT}(\frac{h}{2} - a) \\ \quad = f_c[T(x)]bx(h - a' - \frac{x}{2}) + f'_{yT}A'_s(h - a - a') \end{array} \right. \quad (C.6)$$

通过上面两个平衡方程即可求解大偏心受压时的极限承载力，两个平衡方程联立描述了图 C.1-1 中 BD 曲线段和 CE 曲线段。

C.1.4 小偏心受压时极限承载力

当偏心距 $e_B < e < e_C$ 时，截面上受压区混凝土首先达到抗压强度，受压钢筋的应力达到屈服强度，而远侧的钢筋可能受拉也可能受压但都不屈服，这种状态称为小偏心受压破坏状态。此时，截面上大部分的面积的混凝土和钢筋的应力值未知，很难利用截面的平衡方程的求解准确的极限承载力。

由图 C.1-1 所示，在小偏心破坏范围内，AB 曲线段和 AC 曲线段都是外凸线，且弧度很小。以直线 $\overline{AB}$ 和 $\overline{AC}$ 代替实际的 $N_{uT} - M_{uT}$ 相关曲线。根据图 C.1-1 示几何关系，可以得到直线 $\overline{AB}$ 和 $\overline{AC}$ 的方程式。

直线 $\overline{AB}$ ：

$$(M_{uT,B} - M_{uT,A})N_{uT} + (N_{uT,A} - N_{uT,B})M_{uT} + M_{uT,A}N_{uT,B} - M_{uT,B}N_{uT,A} = 0 \quad (C.7)$$

直线 $\overline{AC}$ ：

$$(M_{uT,C} - M_{uT,A})N_{uT} + (N_{uT,A} - N_{uT,C})M_{uT} + M_{uT,A}N_{uT,C} - M_{uT,C}N_{uT,A} = 0 \quad (C.8)$$

若已知破坏状态时的偏心距 e_u ，即 $M_u = N_u e_u$ ，即可由式 (C.11) 或式 (C.12) 计算小偏心受压的极限承载力。

C.2 隧道衬砌结构高温承载力计算方法

火灾高温时（后），构件截面温度场发生改变，材料的力学性能随经历温度发生不可逆的变化。正如式 (C.5) - (C.7) 描述，要想获得不同状态下截面的高温承载力，需研究混凝土、钢筋等材料的高温承载力对截面承载能力的贡献。由于钢筋的截面面积相对较小，在截面承载力计算中钢筋的作用面积一般简化为

点计算，处理起来比较方便。对于占据截面面积绝大部分的混凝土材料，在计算截面承载力时必须考虑混凝土高温强度沿截面分布的影响。

上节里给出的各计算式里的混凝土高温抗压强度 $f_c[T(x)]$ 以及对应的混凝土受压合力点至截面受拉边缘的竖向距离 $x(f_{cT})$ 等参数均受混凝土高温强度截面分布的影响。如何在计算中考虑混凝土高温强度分布，关系到截面高温承载力计算的可行性和准确性，是高温承载力计算中的重要环节。

以钢筋混凝土衬砌为例说明混凝土高温强度截面分布。如图 C.2-1 示，当衬砌结构承受火灾高温后，衬砌截面温度场发生改变，混凝土强度随温度的增高而下降。

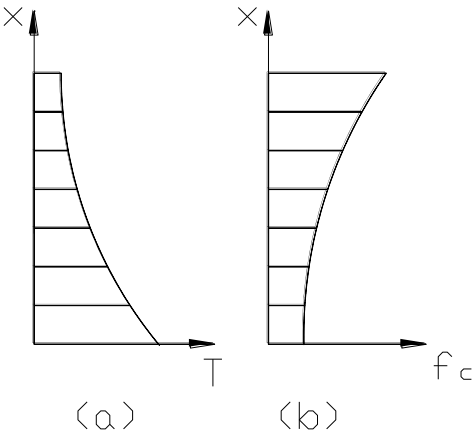


图 C.2-1 衬砌截面温度分布和混凝土高温强度分布简图

C.2.1 积分法

假设构件截面宽度为 b ，高度为 h ，截面内沿截面高度 x 方向的温度分布表示为 $T(x)$ ，混凝土高温强度与温度的计算模型为 $f_c(T)$ ，则可以得到混凝土强度沿 x 的分布为 $f_c[T(x)]$ ，也即 $f_c = f_c[T(x)]$ 是以 x 为自变量的函数，定义域为 $[0, h]$ ，如图 C.2-2 示。

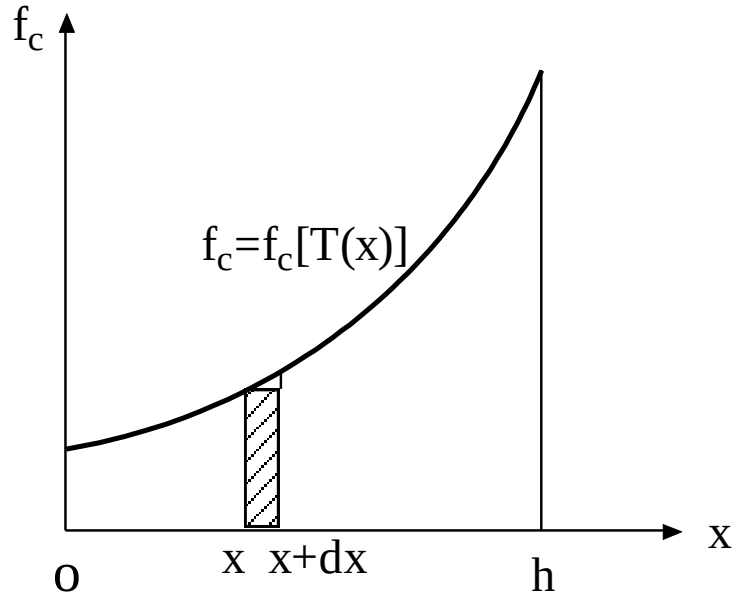


图 C.2-2 积分法示意图

基于定积分的原理，可以得到全截面受压时的构件混凝土受压承载力、受压承载力与 o 点的力矩为：

$$N_{u,T} = \int_0^h b \cdot f_c[T(x)] dx$$

$$M_{o,T} = \int_0^h b \cdot f_c[T(x)] \cdot x dx$$

这样，基于积分法的极限 $N_{uT} - M_{uT}$ 相关曲线上特征点承载力状态的平衡方程可表述如下：

(1) 极大轴向承载力状态 A 点

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{uT,A} = f_y[T(x=a)]A_s + f_y'[T(x=h-a')]A_s' + \int_0^h b \cdot f_c[T(x)] dx \\ M_{uT,A} = \int_a^h b \cdot f_c[T(x)] \cdot (x - \frac{h}{2}) dx \\ \quad \mp f_y'[T(x=a)]A_s(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) \pm f_y'[T(x=h-a')]A_s'(\frac{h}{2} - \frac{a'}{2}) \end{array} \right. \quad (C.9)$$

(2) 偏心受压界限状态 B 点 (C 点)

$$\begin{cases} N_{uT,B(C)} = \int_{h-x_{bT}}^h b \cdot f_c[T(x)] dx + f'_y[T(x=h-a')A'_s - f_y[T(x=a)]A_s \\ M_{uT,B(C)} = \int_{h-x_{bT}}^h b \cdot f_c[T(x)] \cdot (x-a) dx + f'_y[T(x=h-a')]A'_s(h-a-a') \end{cases} \quad (C.10)$$

(3) 纯弯曲状态 D 点 (E 点)

$$\begin{cases} N_{uT,D(E)} = \int_{h-x_T}^h b \cdot f_c[T(x)] dx + f'_y[T(x=h-a')]A'_s - f_y[T(x=a)]A_s = 0 \\ M_{uT,D(E)} = \int_{h-x_T}^h b \cdot f_c[T(x)] \cdot (x-a) dx + f'_y[T(x=h-a')]A'_s(h-a-a') \end{cases} \quad (C.11)$$

积分法的优点是保证了数学计算上的精度。但是，需要注意到，被积函数描述的混凝土高温强度 $f_c[T(x)]$ ，是由温度分布函数 $T(x)$ 与混凝土高温强度—温度函数 $f_c(T)$ 复合而成。 $T(x)$ 受火灾热流最高温度为 T_{fmax} 、火灾延烧时间 t 等多种因素影响。由试验获得的 $f_c(T)$ 影响因素也较为复杂，描述 $f_c(T)$ 的模型多为分段式函数。因而，在实际计算中， $f_c[T(x)]$ 往往为不可积函数或者积分计算过程非常复杂。

C.2.2 条分法

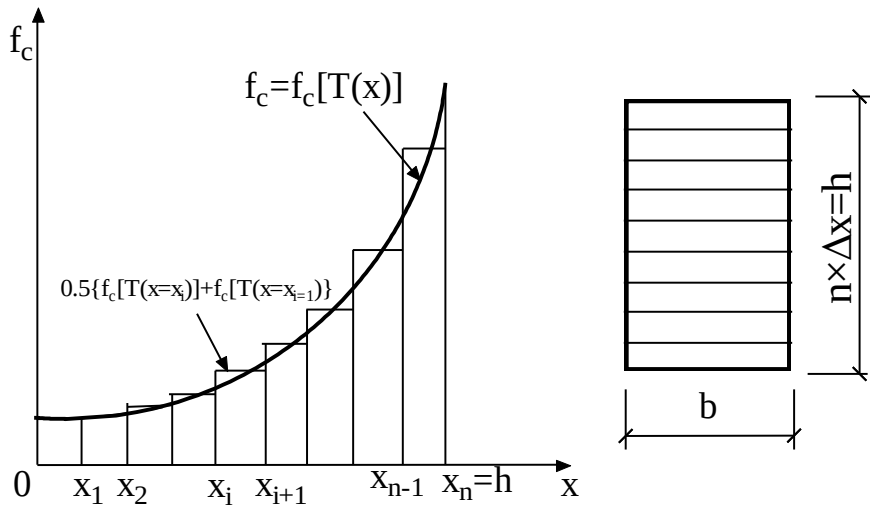


图 C.2-3 条分法示意图

条分法是沿截面高度 x 划分 n 个高为 Δx 、面积相等的条形区域，并假设各个条形区域内温度均匀，从而简化高温承载力计算的一种方法，如图 C.2-3 示。

在 $x_i - x_{i+1}$ 区域内, 强度按 $\frac{1}{2}\{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\}$ 取值。使用条分法可以方便的得到全截面受压时的构件混凝土受压承载力、受压承载力与 o 点的力矩为:

$$N_{u,T} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x$$

$$M_{o,T} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x \cdot (i + \frac{1}{2}) \Delta x$$

采用条分法, 极限 $N_{uT} - M_{uT}$ 相关曲线上特征点承载力状态的平衡方程如下:

(1) 极大轴向承载力状态 A 点

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{uT,A} = f_y[T(x=a)]A_s + f_y'[T(x=h-a')]A_s' \\ \quad + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x \\ M_{uT,A} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x \cdot [(i + \frac{1}{2})\Delta x - \frac{h}{2}] \\ \quad \mp f_y'[T(x=a)]A_s(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) \pm f_y'[T(x=h-a')]A_s'(\frac{h}{2} - \frac{a'}{2}) \end{array} \right. \quad (C.12)$$

(2) 偏心受压界限状态 B 点 (C 点)

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{uT,B(C)} = \sum_{i=(h-x_{bT})/\Delta x}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x \\ \quad + f_y'[T(x=h-a')]A_s' - f_y[T(x=a)]A_s \\ M_{uT,B(C)} = \sum_{i=(h-x_{bT})/\Delta x}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x \cdot [(i + \frac{1}{2})\Delta x - a] \\ \quad + f_y'[T(x=h-a')]A'(h-a-a') \end{array} \right. \quad (C.13)$$

(3) 纯弯曲状态 D 点 (E 点)

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{uT,D(E)} = \sum_{i=(h-x_T)/\Delta x}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x \\ \quad + f_y'[T(x=h-a')][A'_s] - f_y[T(x=a)][A_s] = 0 \\ M_{uT,D(E)} = \sum_{i=(h-x_T)/\Delta x}^{n-1} \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x \cdot [(i + \frac{1}{2})\Delta x - a] \\ \quad + f_y'[T(x=h-a')][A'_s](h-a-a') \end{array} \right. \quad (C.14)$$

当条形区域数 $n \rightarrow \infty$ 时，条分法即为积分法。相比积分法而言，条分法避免了积分法繁琐的积分计算。 n 越大，条分法的计算在数学上越精确，计算量也越大；反之亦然。而且，确定 n 或 Δx 时，需要考虑与 x_{bT} 、 x_T 、 h 、 a 、 a' 等数值间的关系，尽量使混凝土受压区边界与某个条形区域边界重合。采用条分法计算高温承载力时确定合理的 n 或 Δx 是非常重要的。

C.2.3 等效截面法

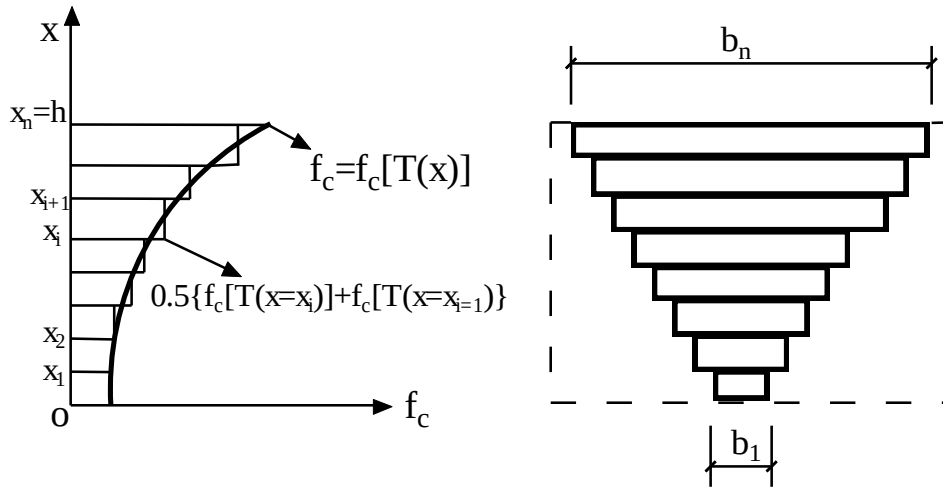


图 C.2-4 等效截面法示意图

等效截面法是将强度损失转换为截面宽度损失的高温承载力简化计算方法。在构件截面高度 x 划分 n 个高为 Δx 、面积相等的条形区域；条形区域内温度均匀，在 $x_i - x_{i+1}$ 区域内，强度按 $\frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\}$ 取值；然后在每个区域内计算高温承载力，然后按照等量承载力的原则，将强度的损失转化为截面宽度的损失，如图 C.2-4 所示。

$x_i - x_{i+1}$ 区域内，受压承载力为：

$$N_{iT} = \frac{1}{2} \{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x$$

设 f_c 为混凝土常温强度，则 $x_i - x_{i+1}$ 区域的折算宽度 b_i 为：

$$b_i = \frac{\{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\} \cdot b \cdot \Delta x}{2 f_c \cdot \Delta x}$$

$$= \frac{\{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\}}{2 f_c} b = K_i b$$

$$\text{其中, } K_i = \frac{\{f_c[T(x=x_i)] + f_c[T(x=x_{i+1})]\}}{2 f_c}$$

将上式中的 K_i 称为截面等效折减系数。则有全截面受压时的构件混凝土受压承载力、受压承载力与 o 点的力矩为：

$$N_{u,T} = \sum_{i=0}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x$$

$$M_{o,T} = \sum_{i=0}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x \cdot (i + \frac{1}{2}) \Delta x$$

采用等效截面法时，极限 $N_{uT} - M_{uT}$ 相关曲线上特征点承载力状态的平衡方程可表述如下：

(1) 极大轴向承载力状态 A 点

$$\begin{cases} N_{uT,A} = f_y[T(x=a)]A_s + f_y'[T(x=h-a')]A_s' + \sum_{i=0}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x \\ M_{uT,A} = \sum_{i=0}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x \cdot [(i + \frac{1}{2})\Delta x - \frac{h}{2}] \\ \quad \mp f_y'[T(x=a)]A_s(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) \pm f_y'[T(x=h-a')]A_s'(\frac{h}{2} - \frac{a'}{2}) \end{cases} \quad (C.15)$$

(2) 偏心受压界限状态 B 点 (C 点)

$$\begin{cases} N_{uT,B(C)} = \sum_{i=(h-x_{bT})/\Delta x}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x + f_y'[T(x=h-a')]A_s' - f_y[T(x=a)]A_s \\ M_{uT,B(C)} = \sum_{i=(h-x_{bT})/\Delta x}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x \cdot [(i + \frac{1}{2})\Delta x - a] + f_y'[T(x=h-a')]A_s'(h-a-a') \end{cases} \quad (C.16)$$

(3) 纯弯曲状态 D 点 (E 点)

$$\begin{cases} N_{uT,D(E)} = \sum_{i=(h-x_T)/\Delta x}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x + f_y' [T(x=h-a')] A_s' - f_y [T(x=a)] A_s = 0 \\ M_{uT,D(E)} = \sum_{i=(h-x_T)/\Delta x}^{n-1} f_c \cdot K_i b \cdot \Delta x \cdot [(i+\frac{1}{2})\Delta x - a] + f_y' [T(x=h-a')] A_s' (h-a-a') \end{cases} \quad (C.17)$$

等效截面法的原理与条分法的原理有相通之处，可以看到将 K_i 的表达式代入等效截面法平衡方程里，即得到条分法平衡方程。国内外研究人员在进行混凝土构件的高温承载力简化计算时，多采用等效截面法。同样，采用等效截面法时， n 越大， Δx 越小，计算越精确，也愈繁琐。

附录 D

附表 D.1 衬砌结构火灾调查表

附表 D.1 衬砌结构火灾调查表

案例编号:		勘查日期:	年 月 日		
隧道名称:		所在地址:			
负责人姓名:		住 址:		联系方式:	
围岩级别:	☐ I级围岩 ☐ II级围岩 ☐ III级围岩 ☐ IV级围岩 ☐ V级围岩 ☐ VI级围岩			隧道埋深（火源处）:	m
隧道类型:	☐ 分离式隧道 ☐ 连拱隧道 ☐ 小径距隧道				
结构类型:	☐ 直墙式 ☐ 曲墙式				
衬砌材料:	☐ 素混凝土 ☐ 钢筋混凝土 ☐ 石块砌体 ☐ 砖混材料 ☐ 其他材料				
火灾经过:	发现时间: 月 日 时 分				
	开始灭火时间: 月 日 时 分				
	扑灭火时间: 月 日 时 分				
事故原因:					
火 源:	车 型:	☐ 小汽车	☐ 公交车	☐ 重型货车	☐ 油罐车
	燃烧数量:	辆	辆	辆	辆
燃烧情况	气候条件:	☐ 炎热 ☐ 寒冷 ☐ 强风 ☐ 湿润 ☐ 干燥			
	燃 烧:	☐ 爆炸 ☐ 轰然 ☐ 其他情况			
	主要燃烧材料	☐ 化学易燃物品 ☐ 油料 ☐ 布料 ☐ 其他情况			
受火范围:					
勘查人员签名:					

附表 D.2 衬砌结构受损情况简单评估表

附表 D.2 衬砌结构受损情况简单评估表

案例编号:		勘查日期:			年 月 日		
勘查项目	颜色变化	残留物 估计	裂纹与爆 裂情况	钢筋外 露情况	结构变形 情况	损伤深度 (mm)	受火面积 (m²)
受损等级	基本无						
	轻度损伤						
	较严重损伤						
	严重损伤						
	破坏						
勘查结果:							
勘查员签名:							