

缓冷坑结构温度场分析

张盛夏 马欣 黄毅华 刘轶群

中冶京诚工程技术有限公司 北京 100176

DOI:10.12238/ems.v7i9.15241

[摘 要] 本文采用 ANSYS 对缓冷坑结构进行了三维模型和二维模型的瞬态热分析，对缓冷坑结构的三维模型进行瞬态热分析，然后对三维模型取典型的剖面进行 二维分析，得到了温度场分布结果基本一致，此方法在工程实践中可以大量节省时间，提高效率。烟囱规范中的温度传递公式计算的温度结果是热传递的稳态结果，而且缓冷坑的缓冷时长相对较短，在热传递未达到稳态状态，本文根据有限元分析的结果，对烟囱规范中的温度传递公式进行了时间修正，其结果根据时长乘以相应的时间修正系数。修正后的温度计算公式方便用于缓冷坑结构的温度计算，并可以反算隔热层的厚度。

[关键词] ANSYS；缓冷坑结构；温度场分析

引言

缓冷坑的作用主要是保温，让钢材处于高温状态下释放氢含量，保证钢材的性能。棒线材的缓冷坑，大部分钢种的入坑温度是 450℃，少量钢种的入坑温度 600℃，分析时采用 600℃作为入坑温度。炼钢的缓冷坑入坑温度约 700℃至 800℃，采用 800℃作为入坑温度。缓冷工艺是从入坑温度降到 150℃，此过程棒线材工艺要求是持续 48 小时，炼钢工艺要求是持续 72 小时，然后打开坑盖降温到接近室温，再吊运出缓冷坑^[5]。

目前有缓冷房和缓冷坑两种做法，缓冷房由于保温效果较差，目前已极少使用，现在项目大量采用的是缓冷坑的做法，由于缓冷坑是地下结构，土壤可以起到很好的保温作用。

耐火砖有剥落的情况，其中的拉结筋也出现了松动，耐火砖内侧的扁钢也发生了严重的变形，已经失去了约束耐火砖的作用。在设计过程中隔热保温层内侧的防撞钢板，拉结筋也应该优化设置。无论是中间隔墙还是周围的坑壁，都因为高温作用，混凝土发生了碳化进而剥落了，钢筋裸露，整个缓冷坑已经完全破坏了。混凝土的高温作用应该引起重视。

1 缓冷坑结构三维有限元分析

本文对某工程大方坯连铸区的缓冷坑结构，采用 ANSYS Workbench 进行有限元三维建模，分析其温度场分布情况，确立温度的影响范围，总结温度场分布规律。其平面和剖面图如下图所示。平面长度为 22.3m，宽度为 11.3m，深度为 4.5m。保温隔热层每隔 3.5 米设置 30mm 宽的伸缩变形缝。

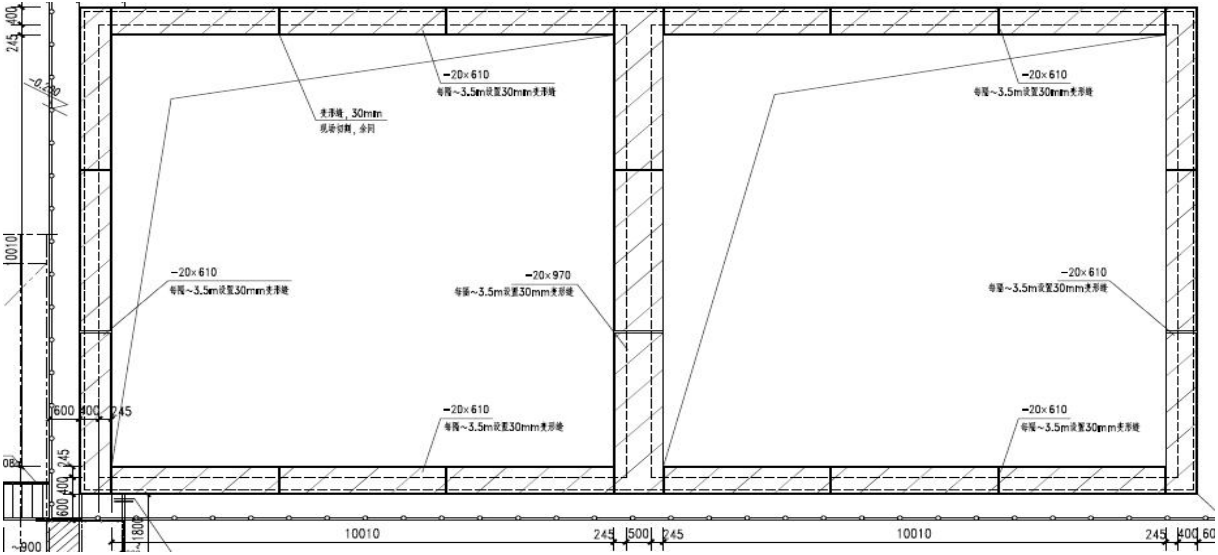


图 1 缓冷坑结构平面图

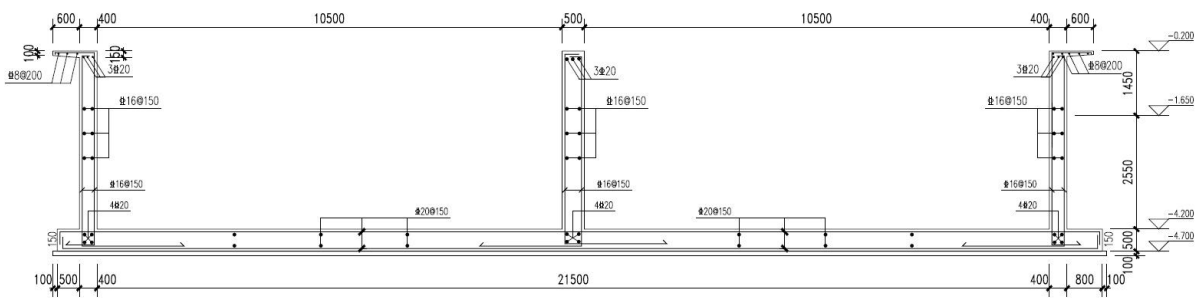


图 2 缓冷坑结构立面图

为了准确计算缓冷坑结构的温度场分布情况，三维建模时，每侧往外扩 15m，将周围的土体建到模型中。模型中包含了 H 型钢，伸缩缝，详见材料示意图。

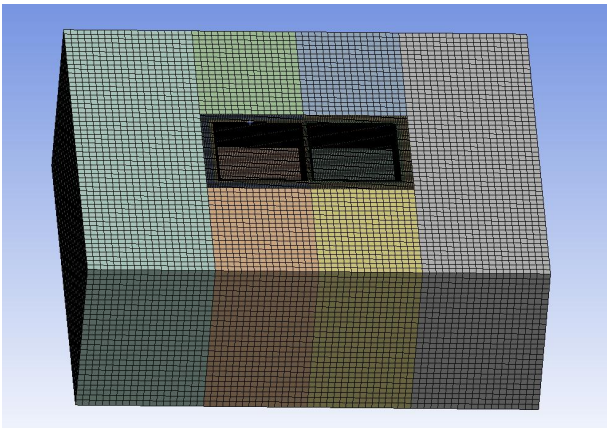


图 4 缓冷坑（含土体）分析模型

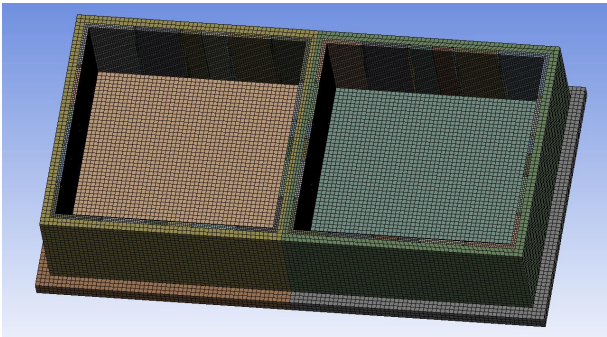


图 5 缓冷坑（不含土体）分析模型

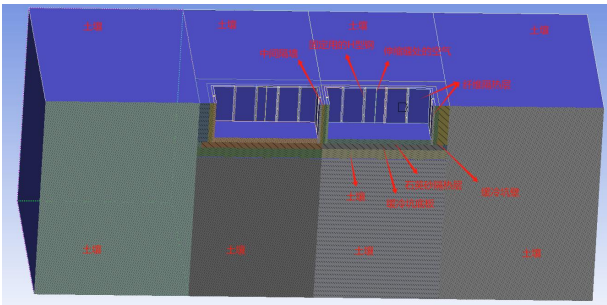


图 6 缓冷坑（含土体）各部分材料示意图

材料的热学参数见下表。

表 1 材料热物理参数

	陶瓷纤维	沙子	土	混凝土	钢材
导热系数 (W/m℃)	0.086	0.7	1.6	1.2	60.5
比热容 (J/kg℃)	740	840	900	970	434

模型的边界条件：上表面为热辐射，环境温度为 20℃，另外 5 个土壤面为热流边界 $q_b=0.0375\text{W/m}^2$ 。温度荷载：在缓冷坑的内表面设置入坑温度 600℃。

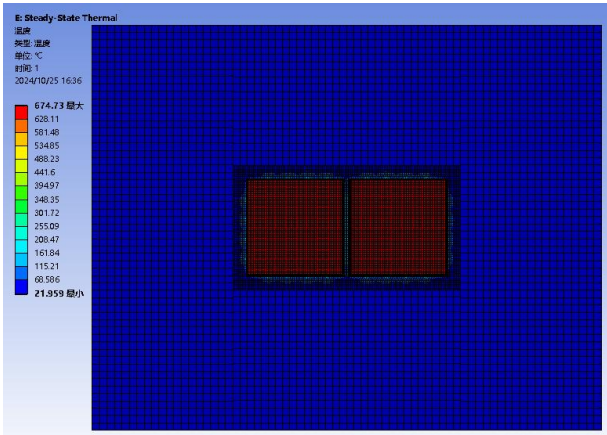


图 7 缓冷坑（含土壤）顶面温度分布图

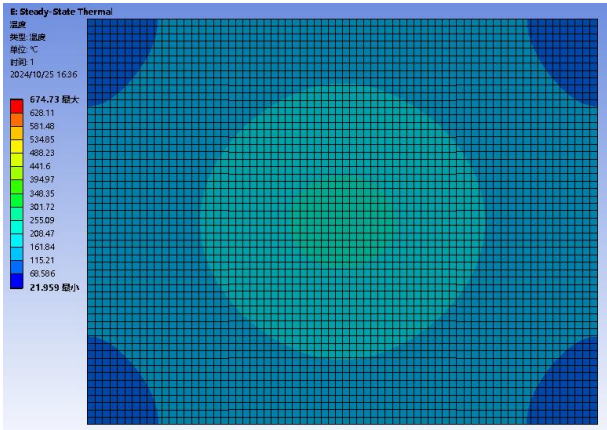


图 8 缓冷坑（含土壤）底面温度分布图

从顶面温度来看, 周边的土壤及缓冷坑壁的温度场略高于环境温度, 是因为顶部直接与空气接触, 有较好的散热条件。从底面的温度分布图来看, 以缓冷坑为中心, 温度以波纹的形式从中心向四周逐渐递减。四角的温度最低, 由于其位置贴近边界, 热交换边界有叠加效应, 结果存在失真的情况, 根据圣维南原因, 温度经过 15 米的传递, 边界对于缓冷坑结构的温度分布的影响已基本消除。

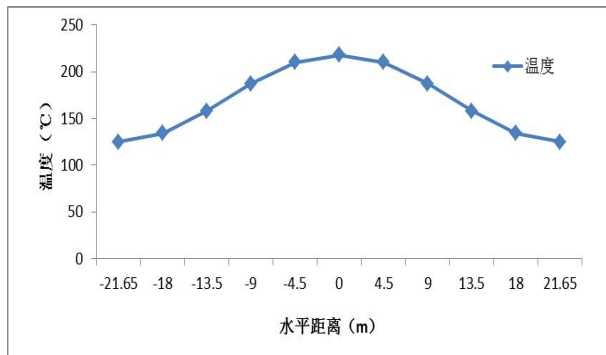


图9 土壤底面温度变化趋势图

从上图可知, 土壤底面的温度分布呈现正态分布, 中间大, 四周小, 温度从 218 度逐渐减少到 125 度。

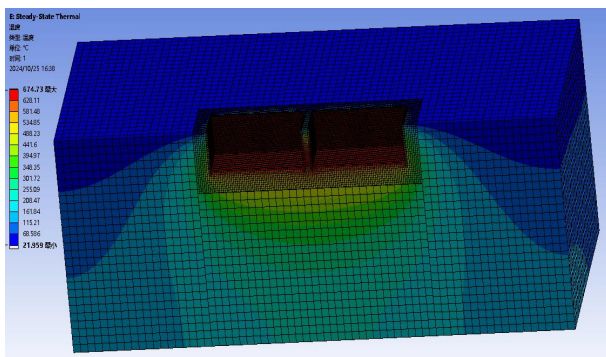


图11 缓冷坑(含土壤)剖面温度分布图

从上图可知, 土壤的温度从上至下是逐渐减小的, 水平方向的分布, 以缓冷坑为中心向两侧逐渐减小的。

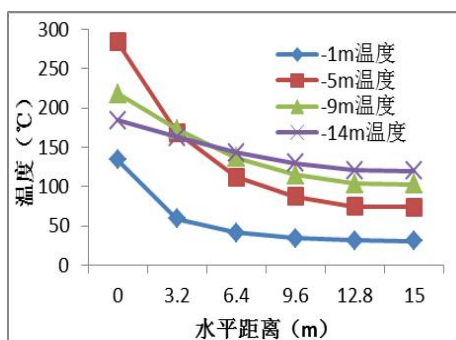


图12 缓冷坑侧面土壤深度温度分布图

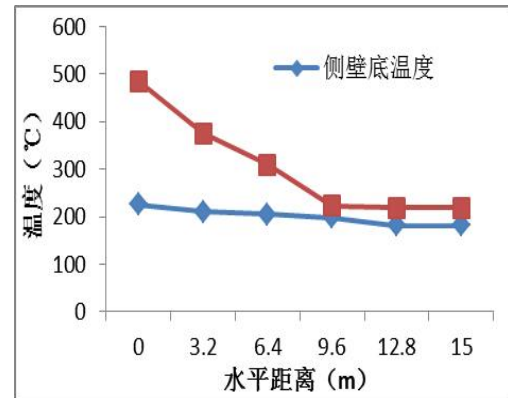


图13 缓冷坑底面土壤深度温度分布图

从缓冷坑侧面土壤深度温度分布图可知, 在距离缓冷坑 4 米开始, 随着土壤深度的增加, 其温度是逐渐增加的, 在距离缓冷坑 4 米以内, 由于缓冷坑侧壁的传热, 在缓冷坑底部处温度最高, 然后随着深度的增加, 温度逐渐降低。从缓冷坑往外扩散, 温度是逐渐降低的。图中的曲线的斜率为温度梯度, 从上到下, 温度梯度是逐渐增加的, 从 4 条曲线来看, 曲线末端基本处于水平状态, 说明最后的温度梯度趋于 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 从此也可以得出土壤的宽度设置合理, 边界条件对缓冷坑结构的温度分布影响已基本可以忽略。

从缓冷坑底面土壤深度温度分布图可知, 从缓冷坑中心到侧壁位置, 温度是逐渐降低的。从缓冷坑底面往下, 随着深度的增加, 温度是降低的。从 2 条曲线来看, 曲线末端基本处于水平状态, 最后的温度梯度趋于 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 从此也可以得出土壤的深度设置合理, 边界条件对缓冷坑结构的温度分布影响已基本可以忽略。

缓冷坑结构的温度场布置整体趋势从内到外, 从下到上, 温度是逐渐减小的, 影响温度分布的主要因素是边界的散热条件。

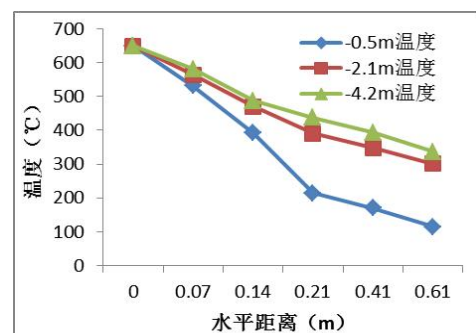


图14 缓冷坑坑壁温度分布图

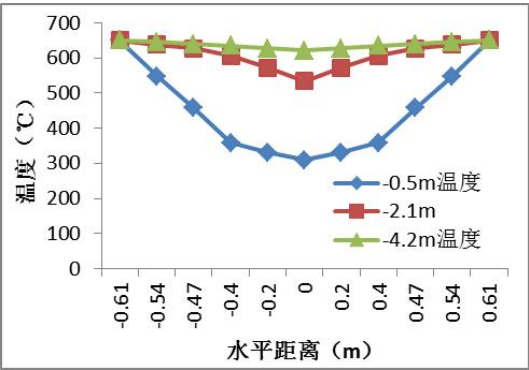


图 15 缓冷坑隔墙温度分布图

分别取侧壁-0.5m，-2.1m，-4.2m 处沿水平方向的温度值，绘制曲线见缓冷坑坑壁温度分布图，温度值从内往外是逐渐减小的，由于顶面具有较好的散热条件，从上到下温度梯度是逐渐减小的。

从缓冷坑隔墙温度分布图来看，以隔墙中心为 0，向两侧分别取点的温度值，图形呈对称形态，从上到下，温度值逐渐增大。从中心到两侧，温度是逐渐增加的。由于顶部的散热条件较好，温度梯度较大，越往下温度梯度越来越小，到最后底部，温度值基本不变了。

从缓冷坑轴侧温度分布图上可以看到坑壁顶面有蓝色的斑点，这是由隔热的型钢支架传热到坑壁的温度，这也是这种隔热形式的缺点，坑壁存在局部无隔热层的情况，导致局部高温。伸缩缝处的空气也起到了很好的隔热作用，并未在坑壁上产生局部高温。

2修正烟囱规范中的地下烟道温度传递公式

《烟囱设计规范》(GB50051-2013) 第 5.6.4 条和 5.6.7 条规定了地下烟道的温度计算公式^[1]，详细如下：

$$T_{cj} = T_g - \frac{T_g - T_a}{R_{tot}} (R_{in} + \sum_{i=1}^j R_i)$$
 2.1

式中： T_{cj} —计算点 j 的受热温度 (°C)

T_g —烟气温度 (°C)

T_a —空气温度 (°C)

R_{tot} —内衬、隔热层、筒壁或基础环壁及环壁外侧计算土层等

总热阻 ($m^2 \cdot K/W$)

$$R_{tot} = R_{in} + R_1 + R_2 + R_{ex}$$
 2.2

$$R_{in} = \frac{1}{a_{in}}$$
 2.3

$$R_1 = \frac{t_1}{\lambda_1}, R_2 = \frac{t_2}{\lambda_2}$$
 2.4

$$R_{ex} = \frac{1}{a_{ex}}$$
 2.5

式中： R_{in} —内表面热阻 ($m^2 \cdot K/W$)

R_{ex} —外面热阻 ($m^2 \cdot K/W$)

R_1 —隔热层热阻 ($m^2 \cdot K/W$)

R_2 —混凝土层热阻 ($m^2 \cdot K/W$)

t_1 —隔热层厚度 (m)

t_2 —混凝土层厚度 (m)

a_{in} —内表面传热系数 [$W/(m \cdot K)$]

a_{ex} —外表面传热系数 [$W/(m \cdot K)$]

λ_1 —隔热层传热系数 [$W/(m \cdot K)$]

λ_2 —混凝土层传热系数 [$W/(m \cdot K)$]

根据烟囱规范第 5.6.8 条， $a_{in} = 58 [W/(m^2 \cdot K)]$ ，
 $a_{ex} = 23 [W/(m^2 \cdot K)]$ 。

根据上述公式计算出了缓冷坑侧壁分别采用纤维板和耐火砖的混凝土内壁温度，见下表，并采用 ANSYS WORKBENCH 进行了有限元分析，结果见下表。由于烟囱规范公式计算出来的温度值是基于稳态热传导的结果，但是缓冷坑的温度作用时长般可分为 24 小时，48 小时和 72 小时三种工况，采用有限元瞬态分析得到不同时间工况下的温度值，将温度结果除以规范公式的结果，得到温度作用的时间修正系数 η ，详见下表。

表 2 有限元和规范公式计算的温度结果

隔热材料	坑内温度 (°C)	450			600			800		
	作用时间 (小时)	24	48	72	24	48	72	24	48	72
纤维板	有限元 (°C)	47	59	68	57	73	85	70	93	108
	规范公式 (°C)	78	78	78	98	98	98	125	125	125
	时间修正系数 (η)	0.60	0.76	0.87	0.58	0.74	0.87	0.56	0.74	0.86
耐火砖	有限元 (°C)	71	113	120	87	141	148	104	168	182

砂子	规范公式 (℃)	208	208	208	273	273	273	360	360	360
	时间修正系数 (η)	0.34	0.54	0.58	0.32	0.52	0.54	0.29	0.47	0.51
	有限元 (℃)	39	71	84	49	92	106	63	114	136
	规范公式 (℃)	218	218	218	288	288	288	380	380	380
	时间修正系数 (η)	0.18	0.33	0.39	0.17	0.32	0.37	0.17	0.30	0.36

根据烟囱规范的温度计算公式,以有限元计算的温度值和规范计算的温度值反算温度作用时间修正系数。根据温度作用时间修正后的坑壁和坑底温度计算公式如下:

$$T_c = \eta \left[T_g - \frac{T_g - T_a}{R_{tot}} (R_{in} + R_1 + R_2) \right]$$

2.6

式中: T_c —坑壁或坑底的温度 (℃)
 η —温度作用时间修正系数

为了安全考虑,温度作用时间修正系数取上表中的修正系数的最大值,温度作用时间修正系数见下表,本表的修正系数应用范围,温度荷载工况为从入坑温度经过下表中的时间,直线下降至 150℃,而且隔热材料的厚度符合以下范围:纤维板 200~300mm 厚,耐火砖 400~500mm 厚,砂子 500~600mm 厚,隔热材料的厚度超出此范围,本表的系数仅供参考。

表 3 温度作用时间修正系数

温度作用时间	24 小时	48 小时	72 小时
纤维板坑壁时间修正系数 η	0.60	0.76	0.87
耐火砖坑壁时间修正系数 η	0.34	0.54	0.58
坑底时间修正系数 η	0.18	0.33	0.39

注:本表系数按假定的土壤理想边界条件进行计算得到的结果

通过 2.6 式,可以估算坑底和坑壁的温度,或者根据坑底和坑壁的温度反算隔热层的厚度。

3 小结

本文采用有限元方法对缓冷坑结构进行了温度场分析,得出了缓冷坑结构的温度场分布,并与实测的缓冷坑结构的温度进行了对比,而且采用有限元的瞬态分析结果对烟囱规范的温度计算公式进行了修正,得出如下结论:

(1)从缓冷坑侧面土壤深度温度分布图可知,水平面内,以缓冷坑为中心,土壤的温度由内向四周是逐渐降低的。在竖直面内,从地面至缓冷坑底面,缓冷坑壁外侧土壤的温度

逐步增加,从缓冷坑底板往下,土壤温度逐步减小;

(2)缓冷坑坑壁的温度从内往外是逐渐减小的,从上到下温度是逐渐增加。

(3)缓冷坑隔墙以其中心为对称轴,温度分布呈对称形态,从上到下,温度值逐渐增大。从中心到两侧,温度是逐渐增加的。

(4)根据缓冷坑的缓冷时长和温度作用曲线,采用有限元软件进行计算,按有限元计算的结果与规范公式计算的结果进行比对,推导出了烟囱规范的温度计算公式的时间作用系数,对规范公式计算的温度结果进行修正。

[参考文献]

[1]中华人民共和国住房和城乡建设部. 烟囱工程技术标准: GB/T 50051-2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021: 10-1.

[2]中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010-2010 (2024 年版) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2024: 4-24

[3]白青波, 李 旭, 田亚护, 房建宏. 冻土水热耦合方程及数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 131-136.

[4]严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报, 1984, 3 (7): 76-85.

[5]王志明. 缓冷坑热处理工艺的开发与应用 [J]. 生产实践, 2002, 2 (8): 15-18.

[6]肖祥南. 64 米简支槽形箱梁的温度场及效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.

[7]李建军. 大型LNG 储罐热-结构耦合有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.

作者简介: 张盛夏, 男, 1987 年出生, 高级工程师, 从事结构设计工作。