

轻型结构

作者：Karel Lambert

翻译：橙色救援微信公众号

1 简介

2004 至 2006 年，我获得了安全工程硕士学位，其中包括一门关于职业安全和健康的课程。作为这门课程的一部分，我写了一篇关于奥斯坎普消防站职业安全的论文，我在那里做过志愿消防员。为了更好地论证这一主题，我研究了许多美国消防员牺牲事故案例。我发现很多消防员是因为从着火房间的上方坠落而不幸遇难。

我本人从未听说过在比利时或相邻的其他国家发生过类似事故。我想不明白，为什么在美国差别会如此之大呢？后来，我逐步意识到，这是因为他们的建造方式与我们截然不同。北美国家的许多房屋都是用木头建造的，这与我们的砖石建筑形成了鲜明的对比。

以前，大尺寸木材主要用于建造住宅，然而建筑材料价格非常昂贵，一根大木梁比一根木椽要贵。在美国，建造方法从原来使用木梁转向使用椽梁、工字梁、甚至是小桁架，这种特殊的建筑方式被称为轻型结构。

这种新型建筑具有众多优点，首先是价格低廉，其次是材质很轻。因此，美国大量公寓倾向于采用轻型结构。还有一个优点是木材使用数量的减少，降低了对环境的破坏。

然而，除了众多好处之外，轻型建筑也有一些缺陷，其中之一就是在火灾中的表现（抗烧性）很差，本文意就轻型建筑的这一缺陷展开论述。



图1 木桁架（拍摄：NIST）

2 风险

2.1 稳定性

在荷兰，有一个土木工程师使用的术语叫“结构整体性”，用来定义体积周长比。国际上更多使用的是表面积和体积的比（ s/v ），这与上面的式子截然相反。

横梁的体积等于横梁的截面积乘以长度，横梁的表面积等于截面周长乘以长度。因此，横梁的体积与表面积之比等于其截面积与周长之比。

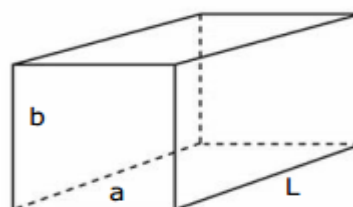


图2 横梁的示意图

$$V = S \times L \quad S = a \times b = \text{截面积} \quad A = (2 \times a + 2 \times b) \times L = \text{周长} \times L$$

$$\frac{V}{A} = \frac{S \times L}{(2 \times a + 2 \times b) \times L} = \frac{\text{截面积} \times L}{\text{周长} \times L}$$

$$\frac{V}{A} = \frac{\text{截面积}}{\text{周长}}$$

图 3 展示了工字梁的截面，这种建筑构件可以由木材或钢材制成。这幅图可以使我们对它的“结构整体性”有一个大致的了解，图中的截面表示它的体积（V），而表面积（A）则由截面的周长来表示。

比较工字梁和横梁的整体结构不难发现，横梁的截面大得多，使用的材料较多，同时它的表面积更小。横梁的内部在火灾中受到了更好地保护，火必须先烧穿横梁的外层才会燃烧至其内部。在此期间，横梁的内部仍然可以正常承重。

工字梁的腹板连接上下翼缘。低温条件下，工字梁可以像木制横梁一样坚固。有些木制工字梁的腹板厚度不超过 7 毫米。但在火灾中，由于温度较高，这两类建筑构件的表现完全不同。工字梁的周长较长，意味着更多的表面部分遭受大火烘烤，一旦腹板断裂，构件就会失效发生倒塌。显而易见，工字梁基本不具备耐火性能。

美国在这一领域进行了大量研究，大量测试表明，轻型木结构支撑的木质地板耐火时间只有 8 分钟。这意味着火灾发生后不久，地板就会塌陷（或者消防员从地板坠落）。

人们发现火灾需要多长时间？报警需要多长时间？消防队到场需要多长时间？现场铺设水带出水内攻又需要多长时间？

显然，消防员展开内攻时，地板已经变得脆弱不堪。对于地下室火灾，消防员延伸水带会进一步增加地板的负荷。两名消防员的内攻小组，佩戴空气呼吸器、携带相关装备后总重量轻松超过 200 公斤。这正是美国有那么多的消防队员从楼上坠落的原因。

天花板也是如此，当消防员在着火层灭火时，必须时刻警惕可能塌落下来的天花板。这种情况下发生坍塌的原因更加复杂，可能是因为天花板里的木质托梁失效，也可能是因为支撑天花板的承重柱或墙体失效所致。

总而言之，轻型结构在火灾中的脆弱性，对消防员的生命安全构成了极大威胁。

2.2 火势蔓延和火焰蔓延

比利时的建筑规范允许独立房屋中使用轻型木结构（联排房屋只要相邻房屋间有防火墙分隔也允许）。

幸运的是，比利时的皇家法令之中有“基本规范”。该法令规定了在建造公寓和办公楼时必须满足的一些要求，其中一项正是建筑构件的耐火性能，它要求在火灾发生后一段时间内，建筑物应保持结构的完整性。这样，消防员就可以在大楼内相对安全地展开作业。耐火性能的规范有助于把火势控制在着火房间之内，房间的墙壁能够在一定时间内阻止火势蔓延。

墙壁和地板通常是由混凝土或砖块等材料构成的。火灾发生后，这些墙壁和地板是阻止火势蔓延的有力屏障。在比利时发生火灾时，这种建筑结构出现坍塌的情况并不多见。

如果换作木墙和木地板，要想达到同样的效果几乎不可能。为使木墙具有良好的防火效果，就必须通过添加诸如石膏板之类的保护性覆盖物对墙体进行保护。

如今在北美，公寓几乎完全选用木材建造。只要价格便宜，总会有人愿意这样去做。比利时要求必须给墙体和楼板做防火保护，以达到必要的耐火性能，这增加了成本，但使用木材仍然时有发生。

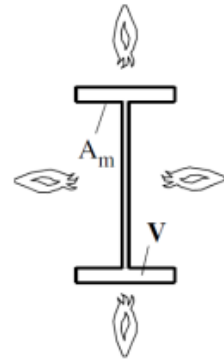


图 3 工字梁的截面图
绘制：Rudy Van Impe

在布鲁塞尔的纽斯街，一家建筑公司正在建造一幢公寓楼。他们的想法是在现有建筑的顶部增加大约 200 套公寓。如果使用混凝土，就会给原始建筑的承重带来极大的挑战。用木材来建造，能够顺利增建几层。按照计划是要在木材上加装保护层的，然而，在施工过程中，尚未来得及加装保护层就发生了火灾。布鲁塞尔消防局发现他们正面临着一场规模巨大的火灾，毕竟当时没有采取任何措施来阻止火势蔓延，大火迅速蔓延到了整幢大楼。在施工过程（建造、翻新或拆除）中，轻型木结构意味着巨大的火灾隐患。当火灾达到一定规模时，消防部门就很难再安全开展灭火救援工作。



图 4 和图 5 木制公寓火灾发展的两张照片
拍摄: Karen Jones

分半钟。

在 YouTube（国外一家视频网站）上，有一段关于德克萨斯州休斯敦火灾的视频。视频中，一名建筑工人被困在一栋在建木制公寓楼的阳台上（可以搜索关键词“着火大楼阳台上的人”）。

在视频的开头，我们可以看到这个人已经逃到了阳台上。显然，他已经没有时间从建筑内的楼梯跑下来了。这段视频清楚地展示了火势蔓延的速度，大火几乎瞬间吞噬了整个顶层。

当火势逐渐发展并点燃了房间内一件家具时，这可以是靠近墙的沙发，另一个主要的危险因素也悄然形成。然后在建筑火灾的顶部，通风或通风受限火灾也会发展。。到那时，想挽救这栋建筑就变得异常艰难。

当火势逐渐发展并点燃了房间内一件家具时，这可以是靠近墙的沙发，另一个主要的危险因素也悄然形成。然后在建筑火灾的顶部，通风或通风受限火灾也会发展。。到那时，想挽救这栋建筑就变得异常艰难。

当火势逐渐发展并点燃了房间内一件家具时，这可以是靠近墙的沙发，另一个主要的危险因素也悄然形成。然后在建筑火灾的顶部，通风或通风受限火灾也会发展。。到那时，想挽救这栋建筑就变得异常艰难。

当火势逐渐发展并点燃了房间内一件家具时，这可以是靠近墙的沙发，另一个主要的危险因素也悄然形成。然后在建筑火灾的顶部，通风或通风受限火灾也会发展。。到那时，想挽救这栋建筑就变得异常艰难。

2.3 建筑火灾

像这样的轻型建筑，具有很高的火灾危险性。这些建筑同砖砌建筑一样，所有的电气设备（电线、插座等）都设置在墙体内。不同之处在于砖是不可燃的。电气设备往往是起火源，电路出现故障时，某些位置的温度会升高很多。对砖墙而言这问题并不严重，但在木墙里就会形成阴燃，难以靠近扑灭并逐渐蔓延开来。当火势蔓延到建筑本身时，就升级为建筑火灾。对于消防部门来说，这无疑是一个巨大的挑战。

当火势逐渐发展并点燃了房间内一件家具时，这可以是靠近墙的沙发，另一个主要的危险因素也悄然形成。然后在建筑火灾的顶部，通风或通风受限火灾也会发展。。到那时，想挽救这栋建筑就变得异常艰难。

2.4 现场评估

在比利时，我们有建造砖房的传统。正如一句比利时谚语所说：“比利时人生来肚里就有一块砖。”砖房对我们来说再正常不过了。除此之外，社会认同也有着很大的影响。人们都想建造便宜的房子，但又不想让其他人看到。因此，尽管木制房屋的数量在增加，但在比利时的普通街道上也不见踪影。大多数木制房屋都用砖墙作为外墙。因此，仅从外观很难区分木制建筑与传统的砖砌建筑。



图 6 一栋正在建造的木结构房屋
拍摄: Nathalie Van Moorster



图 7 同一栋房子在施工后, 因为建筑物外部被砖块覆盖, 所以看起来跟传统房屋没有区别 拍摄: Nathalie Van Moorster

如果这类房屋发生火灾, 存在的危险会令消防员猝不及防。消防队到场后, 没有任何迹象表明这是一幢木制房屋。在通风火灾中, 大量的火焰从窗户和门中冲出, 这意味着墙壁和天花板受到大量的热。经验告诉消防员, 这对于砖混建筑来说不是问题。然而, 对于木制房屋来说, 情况就不同了。夜间, 当建筑物一层发生火灾时, 消防员在楼上进行搜救就变得危险重重。大火可能已经使建筑结构受损, 搜救人员随时有坠落的可能。在这种情况下, 他们可能直接坠入着火房间。

在一间由砖砌墙和水泥地面构成的房间内, 一组消防员进行灭火, 另一组消防员开始在楼上的卧室搜寻被困人员。混凝土楼板可以保证结构的稳定性, 但木制房屋就不行。

在木制房屋里, 墙壁也会过火, 大火紧接着就会蔓延到整个建筑中。尤其是楼上和阁楼, 很可能被大火包围。一旦火势蔓延到阁楼或屋顶, 就很难控制了。在有砖砌外墙的情况下, 消防队一开始可能不会考虑到火灾迅速蔓延的可能性。当砖砌建筑的一个房间内处在火灾发展阶段, 消防员会快速将其扑灭, 这么做能解决大部分问题。但如果发生在木制房屋里, 消防员就必须确认火势是否已经蔓延到建筑内部。

3 战例

3.1 休斯顿, 德克萨斯州: 屋顶坍塌

2013年5月31日12时08分左右, 休斯敦消防局接到报警称, 一家餐厅阁楼起火。休斯敦消防局是一个拥有3800名职业消防员的消防局, 保护着1600平方公里范围内的200多万人, 人口数量大约是布鲁塞尔的两倍, 而面积则是十倍。

51号水罐车第一个到达现场, 在赶往现场途中, 就能看到浓烟已经开始聚集。12时12分救援力量到达火场, 并立即展开内攻。热成像仪显示最高温度达到84°C。12时15分, 内攻人员进入建筑物内大约3米处, 使用70毫米的水带开始灭火。他们汇报称, 火场内的温度不高, 但是能见度为零。12时18分, 由于供水可能出现了问题, 他们撤出了火场。2分钟后, 51号水罐车在68号水罐车的协助下恢复内攻, 并铺设了第二条内攻干线进入火场。12时23分左右, 部分建筑倒塌, 4名消防员当场牺牲, 另有15人重伤, 此时, 51号水罐车到场仅12分钟。

针对这一事故开展了广泛的研究, 一家工程公司对建筑结构的稳定性进行了检查, 屋顶是由桁架支撑的, 图8为该桁架的示意图。因为非常坚固, 这种建筑形式被广泛使用, 用有限的材料就能支撑起跨度很大的空间。在我们目前的建筑物中, 桁架通常用于钢铁工业, 有时也会用在大跨度的房间内。

这种建筑构件的缺点在于它十分脆弱, 因为桁架的整体结构偏低, 在火灾中极易发生坍塌。最重要的是, 在处理木制桁架时, 要特别注意连接弦的面板, 弦和腹板通常是由齿板或钉板连接的。

这些建筑构件仅仅是上面有网格状钉子覆盖的薄金属板。这些板与弦相连，就是用这种方式来维持整个桁架的结构。危险的是它们在高温下会发生变形，极易发生脱落。一旦桁架板不再充分与弦和腹板相连，就会发生坍塌。休斯顿的那家餐厅进行了翻新，最初只盖上了屋顶，后来又上面加了混凝土瓦片，正是因为这额外负荷使坍塌比预期更早。

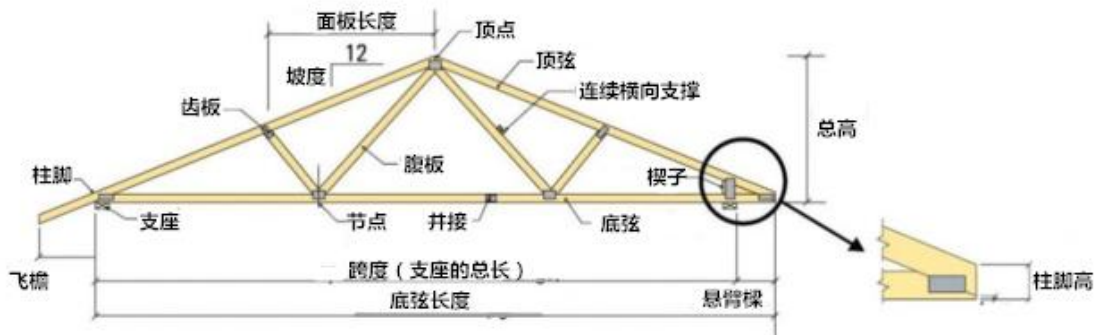


图 8 休斯顿着火餐馆的木桁架，这样的桁架由面板连接的弦和腹板组成

事后调查显示，餐馆的员工在火灾发生前 3 小时就已经闻到了一股烧焦的味道。经过几次快速查看，均未发现起火。也许，此时建筑物的某处已经开始了燃烧。直到火焰从建筑物内烧到了室外，人们这才发现着火了。此时才有人报警。大火已经在建筑物内闷烧了 3 个小时，并在木墙内蔓延开来。

3.2 俄亥俄州科尔雷恩镇：消防员从楼上坠落

2008 年 4 月 4 日，科莱恩镇消防队接到报警称一座独栋住宅发生火灾。这个特殊的消防队由 60 名职业消防员和 150 名志愿消防员组成，保护着 117 平方公里辖区内的 6 万居民。

早上 6 时 11 分，着火房屋内的火灾自动报警器发出警报，消防队员立即出警。6 时 20 分，指挥中心确认起火。3 分钟后，第一辆水罐车到达现场，从房主那里得知着火点在地下室，无人员被困。两名消防员（一名指挥员和一名战斗员）用 45 毫米水带开始内攻。侦查发现，门口有轻微烟雾，水带在建筑内推进花费了一些时间，第三名消防员进入帮助两名内攻队员。随后，内攻人员进入楼下的地下室，这时第三名消防员到屋外拿水带。当他回到门口时，队长命令他留在外面，这时，内攻人员发生了意外。

6 时 37 分，开始营救内攻人员。此时，第一个水罐车已到场 14 分钟。救援人员注意到，建筑首层地面部分坍塌，两名内攻消防员不幸牺牲。

事后调查显示，在火灾警报响起 16 分钟后，内攻人员进入建筑。当时，大火最多只燃烧了 16 分钟。支撑首层木地板的横梁的宽 5 厘米，高 25 厘米，但因大火的燃烧使强度下降，最终还是发生了倒塌。调查人员推断，由于地下室的高温，内攻小组被迫决定撤离，他们可能穿过房间从后门走去。内攻队员的总重量超过了脆弱横梁的承载能力，地面发生了坍塌，内攻队员掉进了燃烧的地下室。

在这短短的 16 分钟内，5 厘米宽的木梁被削弱，最终发生了倒塌。试想如果是 7 毫米厚腹板的工字梁支撑，情况会怎么样呢？

3.3 比利时于克勒的事故

在比利时，也至少发生过一起轻型结构在火灾扑救中造成严重后果的事故。2008 年 8 月 30 日，两名布鲁塞尔消防员在于克勒的一场火灾中丧生。着火的建筑物由几个不同的部分组成，消防员牺牲的位置是在一种轻型的木制结构中，而这起事故中极端火灾现象是决定因素，烟气爆炸直接导致

建筑坍塌。问题是，假如在混凝土建筑中，最终结果是否相同？烟气会如此轻易地在建筑的不同部位迅速蔓延吗？混凝土建筑也会因烟气爆炸而倒塌吗？

4 应对措施

轻型结构所带来的问题很难解决。幸运的是，目前这种类型的建筑在比利时并不多见。正因为如此，人们不会认真考虑能够从根本上解决这个问题。然而，由于轻型木结构价格低廉，未来这类建筑的数量将不断上升，下面提供了解决这个问题的几个可能方法：

4.1 建筑结构登记

防止消防员在建筑坍塌事故中伤亡有且只有一种办法，那就是站在建筑物外面，远离建筑可能坍塌区域。

做好建筑结构登记有很大帮助，登记表的内容可以包括建筑物及其首层结构。指挥中心一旦接到报警，就可以查询该表了解建筑类型。在赶赴现场途中，消防员可以通过指挥中心获取着火建筑的结构信息，这样就能提前知道他们处置的是不是轻型结构。必要时，可以及时调整灭火战术，这是避免上述事故发生的唯一办法。当然，这是一项规模浩大的工程，但它对于其他方面也大有裨益。许多工业建筑都采用钢结构，钢是一种建筑材料，在不进行额外保护处理的情况下，耐火性能有限。在这些情况下，消防员在行动展开前获知这些信息非常有用。

4.2 开展建造方法和倒塌原理的学习和培训

消防部门关于建筑物的不同建造方法开展的培训太少，特别是对基层消防员。事实证明，开设一门关于不同建造方法的课程很有用，每种类型的建筑都有其特定的优点和缺点，某些类型的建筑在火灾中的耐火性能很好。其他类型的在火灾中都有非常具体的问题。例如，当与砖墙和屋檐直接相连的其他结构烧毁时，就会向外倒塌。2011年发生在比利时若杜瓦涅的事故表明，消防员对这些建筑结构的倒塌原理还不够了解，相关的培训课程或许会有所帮助。

如果消防部门能进行充分的培训，那么消防员就能够识别建筑的类型，更好的评估风险。2013年本系列的第18篇文章，“建筑是你的敌人”，介绍了倒塌事故。这篇文章也是增加消防员对于不同建筑结构认知的初步尝试，在建筑火灾扑救中，关于建筑方法的知识通常也会派上用场。

4.3 巨大的影响

如果真的转向了建造木制房屋的趋势，那么这将对消防工作产生巨大的影响。从这个角度来看，看看那些辖区内主要是木制建筑的消防队会很有趣。悉尼消防管理高效，首车在接到报警后5到10分钟内便可到达现场。如果想要保住房子，就必须在接下来的5分钟内控制住火势。如果大火蔓延到建筑物内部，那么整栋房子就没有了。为了实现这一点，需要配备更多职业消防员。每个消防站常驻一台水罐消防车和四名消防员，这样就可以在辖区内能形成一张紧密的消防网络，每个消防站的辖区都不大，能够在最短的时间内到达现场。

在美国和加拿大也可以找到同样的组织形式。在这里，职业消防员保护郊区，这样他们就能很快地扑灭木制建筑火灾。

在比利时，志愿消防员构成了郊区消防服务的基础。志愿消防员的出警时间通常比职业消防员慢几分钟，毕竟他们得先开车来到消防站。最重要的是，比利时的消防站数量较少，但辖区都很大，

这也延长了出警的时间。这两种因素导致了消防队经常无法迅速到达现场，并及时扑灭木制房屋火灾，今后消防队很可能会面临更多被完全烧毁的房屋火灾。

5 我仍心怀梦想

2013年，我在一篇关于倒塌事故的文章中引用了马丁·路德·金的话：“我有一个梦想。”这是行动的召唤，呼吁从比利时发生的事故中吸取教训。在大多数国家，每一起严重事故都要经过系统调查，并出具详细的调查报告，这样人们就可以尽可能多地了解哪里出了问题。有时，我们花了大量时间对事故进行分析并给出详细的事故报告，以防悲剧重演。我们必须不计损失的开展好这些工作，不能让那些遇难的消防员白白牺牲……

6 参考书目

- [1] *Firefighter fatality investigation FFF FY 13-08, Texas state fire marshall, 2013*
- [2] *Van Impe Rudy, Postgraduate studies in fire safety engineering, Passive fire protection, course at UGent, 2010*
- [3] *Lambert Karel, The building is your enemy, De brandweerman, September 2013*
- [4] *Lambert Karel, Ukkel, De brandweerM/V, May 2016*
- [5] *NIOSH, Firefighter fatality investigation and prevention program, 2008-09, A Career Captain and a Part-time Fire Fighter Die in a Residential Floor Collapse—Ohio, 2009*