

# 轻型建筑

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，我在奥斯坎普消防站担任志愿消防员时，写了一篇关于职业安全的论文。为了更好地论证这一主题，我研究了许多发生在美国的消防员牺牲事故案例。我注意到，多数消防员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者相邻的其他国家发生过类似事故。令人费解的是，为什么在美国，差别会如此之大呢？后来，我逐步意识到，这是因为他们的建筑结构与我们的截然不同。在北美，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，大尺寸的木材主要用于建造住宅，建筑材料价格也非常的昂贵，一根大木梁比一根木椽要贵。在美国，建造业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建筑。

这样的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，美国大量的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。

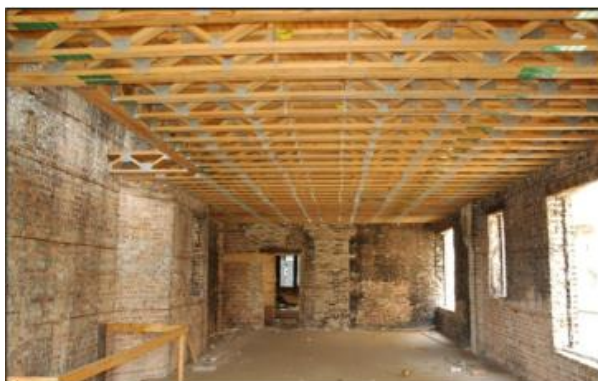


图1 木桁架（拍摄：NIST）

## 2 风险

### 2.1 稳定性

在荷兰，土木工程师中有一个术语叫“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与其长度相乘。横梁的表面积等于截面周长与长度的乘积。因此，横梁的体积与表面积之比等于其截面积与周长之比。

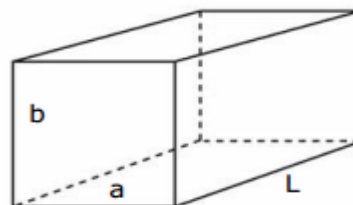


图2 横梁的示意图

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

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

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

图 3 展示了工字梁的截面。这种建筑元素可以由木头或是钢铁制成。这幅图可以使得我们对“结构整体性”的概念有一个大致的了解，图中的截面表示它的体积（V），而表面部分（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，横梁的截面越大，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，火必须先烧掉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法兰。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。但在火灾发生时，由于温度较高，这两类建筑元素的特征完全不同。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，建筑就会倒塌。显而易见，工字梁基本不具备耐火性能。

美国在此领域已经开展了众多研究。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，短时间内，地板就有塌陷的可能（很可能导致消防员坠落）。

人们发现火灾需要多长时间？拨打报警电话需要多长时间？消防队到场需要多长时间？现场铺设水带出水展开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。对于地下室火灾而言，消防员延伸水带干线会进一步增加地板的负荷。两名内攻消防员佩戴空气呼吸器、携带相关装备后总重量往往超过 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。这种情况下发生倒塌的原因更加复杂，可能是因为天花板里的木质托梁倒塌，也可能是因为支撑天花板的承重柱或墙体失去应力所致。

总而言之，轻型建筑在火灾中的脆弱性，给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木材轻质结构（连片布置的房屋在相邻房屋间有防火墙分割的情况下同样允许）。

幸运的是，比利时的皇家法令之中写入了一些“基本规范”。这一法令规定了在建造公寓和办公楼时，必须满足的一些要求，其中一项正是关于建筑构件耐火性能，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，同样有助于把火势控制在着火房间之内，房间的隔墙能够在一定时间内阻止火势向相邻房间蔓延。

墙壁和地板通常是由混凝土或砖块构成的。火灾中，这些墙壁和地板是阻止火势蔓延的有力屏障。这种建筑结构，在比利时发生火灾时，出现建筑物倒塌的情况并不多见。

如果换作木墙和木地板，要想达到同样的效果几乎不可能。为了使得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，出于降低成本考虑，公寓几乎清一色选用木头建造。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，无形中提高了成本。但是，使用木质材料的情况，仍然不时出现。

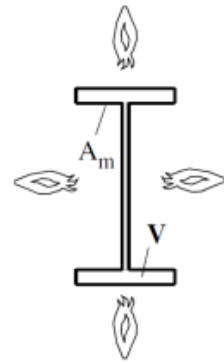


图 3 工字梁的截面图  
绘制：Rudy Van Impe

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。如果要用混凝土来建造，那就会给原始建筑的承重带来极大的挑战。假如用木材来建造，那就能够顺利增建几层。按照计划是要在木材上加装保护层的，然而，在施工过程中，尚未来的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—场规模巨大的火灾，因为之前没有采取任何措施来防止火势蔓延。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，轻质木结构建筑意味着巨大的火灾隐患。当火灾达到一定规模时，消防部门就很难安全展开救援。



图 4/5 展示木制公寓火灾的两张照片  
拍摄: Karen Jones

在 YouTube(—家视频网站,注册于 2005 年 2 月 15 日,由华裔美籍华人陈士骏等人创立,让用户下载、观看及分享影片或短片。译者注)上,有一段关于得克萨斯州休斯敦火灾的视频。视频中,—名建筑工人被困在—座在建的木制公寓楼的阳台上

(使用搜索词“在着火大楼阳台上的人”)。

在视频的开头,我们可以很清楚地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上跑下来了。这段视频清楚地展示出了火势蔓延的速度,大火几乎瞬间就在整栋建筑物中蔓延开来。

(使用搜索词“在着火大楼阳台上的人”)。

在视频的开头,我们可以很清楚地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上跑下来了。这段视频清楚地展示出了火势蔓延的速度,大火几乎瞬间就在整栋建筑物中蔓延开来。

该男子最终被消防队用云梯消防车救了出来。在这次营救行动中,顶层的墙壁发生了坍塌。这两张截图之间仅仅隔了 1.5 分钟。

## 2.3 建筑物火灾

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—样,所有的电气设备(电线、插座、…)都设置在墙体内。不同之处在于,砖块是不可燃的。电气设备往往是起火源,电路出现故障时,故障点的温度会升高很多。对砖墙而言自然不是什么问题,但换作木墙的话,就会形成阴燃,难以靠近并逐渐蔓延开来,最终演变成为火灾。当火势蔓延到建筑本身时,就会升级为建筑火灾。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离墙较近的家具时,另—个主要的危险因素也悄然形成,火焰会蔓延至建筑物的顶部,就会形成通风控制型火灾。此时,保护建筑物变得异常艰难。

## 2.4 现场评估

在比利时,我们更倾向于建造砖房。正如—条比利时谚语所说:“比利时人自出生胃里就有—个砖块。”砖房对我们来说再正常不过了。在这一点上,社会认同也有着很大的影响,人们都想要



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



图 7 —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 Moorter

建造一个便宜的房子，但却羞于让人们看到。因此，尽管木屋的数量在增加，但在比利时的普通街道上却看不到。大多数木制房屋都有一堵砖墙作为外饰。因此，在比利时，仅从外观上看，很难区分木质建筑与严格意义上的砖砌建筑。

这类房屋发生火灾，那么消防员很可能会掉以轻心。消防队到场后，仅从外观很难判断出这是一幢木制房屋。在一场通风控制型的火灾中，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，这对于一个砖砌混凝土建筑来说不存在什么问题。然而，对于木制房屋来说，情况就不同了。夜间，当建筑物底部发生火灾时，消防员在楼上执行搜救任务就变得危险重重。很有可能大火已经使得楼板的强度受损，导致搜救人员随时有坠落的可能。在这种情况下，他们可能直接坠入火海当中。

在一间由砖砌墙和水泥地板构成的房间内，可以由一组消防员进行灭火，另一组消防员可以开始在卧室等地搜寻被困人员。混凝土楼板可以保证结构的稳定性，但对于木制房屋而言，是不可能的。

在一栋木制房子里，墙壁可能过火，大火紧接着就会蔓延到整个建筑中。尤其是起火楼层的上一层和阁楼的地板，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。在有砖砌外观的情况下，消防队可能一开始不会考虑到火灾迅速蔓延的危险性。当火灾发生在一座砖砌建筑的一间屋子内，消防员会在发展阶段就快速将火扑灭，而这么做也基本能够解决问题。但如果这发生在一座木制房屋里，消防队员就必须确认火势是不是已经蔓延到整个建筑了。

## 3 战例

### 3.1 休斯顿,德克萨斯州:屋顶坍塌

2013年5月31日，大约12时18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名消防员的职业消防局，保护着1600平方公里辖区范围内的200多万人，人口数量大约是布鲁塞尔的两倍，而面积则是它的十倍。

51号水罐车分队第一个到达现场，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。12时15分，测温仪显示天花板的温度达到84℃。内攻人员进入建筑物内大约3米的位置处，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，因为可能供水出现了问题，内攻小组撤出了火场。2分钟后，51号水罐车分队再次发起内攻，68号水罐车分队也来到火场进行增援，铺设第二条内攻干线进入火场。12时23分左右，大楼的一部分发生倒塌，4名消防员当场牺牲，其他15人受重伤，此时，距离51号分队到达现场仅仅过了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，他们发现屋顶是由桁架支撑的，图8为桁架的示意图。这样的建筑形式被人们广泛的使用，因为非常坚固，且仅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，有时也会被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，在使用面板连接木制桁架的弦时需要特别注意，弦和腹板通常是由齿板或钉板连接起来的。这些建筑构件仅仅是上面有一些成网格状的钉子覆盖的薄钢板。这些板材与弦相连，就是用这样的建筑构型来维持整个桁架的结构。危险的是它们在受热的情况下会发生变形，这极易导致其发生脱落。一旦桁架板不再充分地跟弦和腹板相连，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，又在屋面上加上了混凝土瓦片，正是因为这额外添加的负担使得建筑物比预期坍塌的更早。



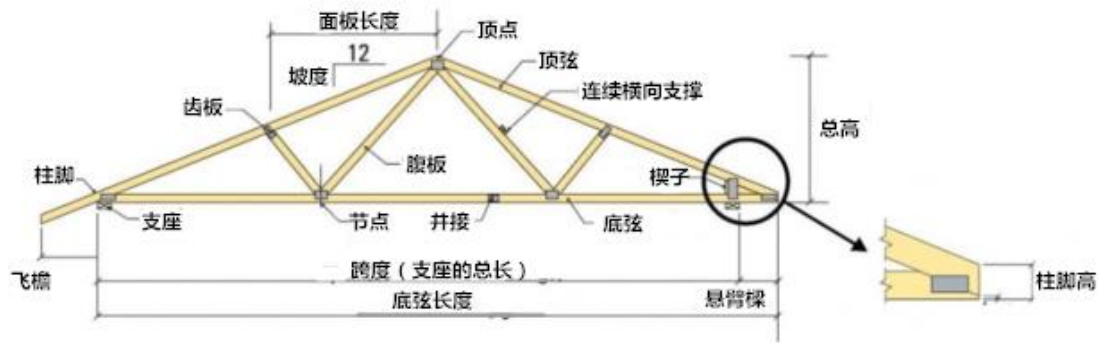


图 8 休斯顿着火餐馆的木桁架，这样的桁架由面板连接的弦和腹板组成

事后的调查显示，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。马上有人报了火警。此时，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立的房子发生了火灾。这个特殊的消防队由 60 名职业消防员和 150 名志愿消防队员组成，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，调度室确认火警。3 分钟后，第一水罐车分队到达现场，从房主那里得知着火点在地下室，无人员被困。两名消防队员（一名中队长和一名战斗员）用一条 45 毫米水带线开始内攻。侦查发现，门内有一些烟雾，水带在建筑内推进花费了一些时间，第三名消防员也进入到建筑内帮助那两名内攻队员。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。当他回到门口的时候，队长命令他留在外面，这时，内攻人员发生了意外。

6 时 37 分，对内攻人员的营救工作正式展开。此时，距离第一个水罐车分队到场只有 14 分钟。救援人员注意到，建筑底层地面已经发生了坍塌，内攻小组的两名消防队员不幸遇难。

事后调查显示，在火灾警报响起后过了 16 分钟，内攻人员即进入了建筑物内。当时，大火最多只燃烧了 16 分钟。支撑底层木制地面的横梁的宽度为 5 厘米、高度为 25 厘米，但是由于大火的燃烧使得强度下降，最终还是发生了倒塌。调查人员推断，由于地下室的高温，内攻小组被迫决定穿过房间从后门撤离。内攻小组队员的总重量对于已经被严重削弱的横梁来说太重了，使得底层地面发生了坍塌，内攻队员从底层掉进了正在燃烧的地下室。

在这短短的 16 分钟内，5 厘米宽的木梁都被削弱了，最终发生了倒塌。试想如果它是一个由工字梁支撑的 7 毫米厚的腹板的话，情况会怎么样呢？

### 3.3 比利时于克勒的事故

在比利时，至少在这起事故中，轻型建筑给火灾扑救工作带来了严重的后果。2008 年 8 月 30 日，两名布鲁塞尔的消防队员在乌克兰的一场火灾中丧生。着火的建筑物由几个不同的部分组成，消防队员牺牲的位置，是由一种轻型的木制结构构成，而这起事故中极端火灾特性是直接导火索，烟气的爆炸直接导致了建筑的坍塌。问题是，假如这个建筑是由混凝土构成的，那么同样的事故还会发生么？烟雾是否还能在建筑物的不同部位迅速蔓延开？一栋混凝土建筑会因为烟气的爆炸而倒塌么？

## 4 应对措施

轻型建筑所带来的问题是很难解决的。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，人们不会认真考虑一个能够从根本上解决这个问题。然而，由于轻型木制结构价格低廉，将来这样的建筑必然会大量涌现。下面就轻型建筑火灾给出一些应对措施：

### 4.1 建筑结构登记

防止消防员在建筑物倒塌事故中伤亡只有一种办法，那就是尽量站在建筑物外边进行灭火，或者是尽量远离建筑倒塌区域。

做好建筑物结构登记。登记表的内容包括建筑物及其底层结构的建筑结构。一旦建筑发生火灾，调度中心可以通过建筑物登记情况及时了解建筑类型。在赶赴现场途中，消防员可以通过调度中心第一时间获取着火建筑的结构。这样，消防队员就能提前判断他们将要面临的是不是一个轻型建筑。必要时，可以及时调整灭火战略。这是杜绝上述事故发生的唯一办法。当然，这是一项规模浩大的工程，但对于其他方面也大有裨益。许多工业建筑都采用钢结构，在不进行额外保护处理的情况下，钢是一种耐火性能很差的建筑材料。在这些情况下，消防人员在火灾扑救行动展开前获知这些信息非常有用。

### 4.2 开展建筑结构和倒塌原理的学习和培训

消防部门在建筑物的建造方法上进行的培训很少，特别是对于基层和中层的消防员。事实证明，开设一门关于不同建造结构的课程很有必要。每种类型的建筑都有其独特的优点和缺点，某些建筑物在火灾中的耐火性能很出色。但还有一些建筑物，在火灾中会出现很大的问题。例如，当与砖墙和山墙直接相连的建筑物其他部分发生火灾时，砖墙和山墙会向外发生倒塌。2011年发生在比利时若杜瓦涅的事故表明，消防员对这样特定的建筑结构的倒塌原理还不够了解。相关的培训课程或许可以有效避免类似事故的发生。

如果消防部门能进行充分的培训，那么消防员就能够准确识别建筑的类型和判断不同建筑构型可能带来的风险。本系列的第18篇文章，《建筑是你的敌人》，介绍了倒塌事故，橙色救援到时候会翻译，这篇文章也是增加消防员对于不同建筑构型认知的初步尝试，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局是很有趣的。悉尼消防的高效管理，使得第一水罐车分队通常在接到报警后的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分钟内把火势控制住。如果大火在建筑物内蔓延开来，那么整栋房子都肯定会葬身火海了。为了实现这一点，需要配备一大批职业消防员。每个消防站中配备一台水罐消防车和四名消防员，通过这种方式，可以在辖区内就能形成一张紧密的消防网络。每个消防站的辖区都不大，能够做到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结构。在这里，职业消防员保护郊区，这样他们就能很快地扑灭木头引发的火灾。

在比利时，志愿消防队员构成了郊区消防服务的基础。志愿消防队员的出警时间通常比职业消防员多出几分钟，毕竟他们得先自己开车来到消防站。最重要的是，比利时的消防站很少，但规模

都很大，这也延长了出警的时间。这两种因素都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。以后，消防队很有可能会更多地面对在火场上被完全烧毁的木制房屋。

## 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。”这是行动的呼唤，呼唤从比利时发生的事故中开始学习。在大多数国家，每一次严重的事故都经过了系统地调查，并出具详细的调查报告，这样人们就可以尽可能多地了解到底是哪里出了问题。有时候，我们花了大量的时间对事故进行分析并给出详细的事故报告，这在一定程度上可以避免类似的事故再次发生。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……

我仍心怀梦想…

- [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*

Karel Lambert