



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



News & Highlights

以减少碳排放为目标的建筑业创新

Mitch Leslie

Senior Technology Writer

米约萨塔 (Mjøstårnet) 是一座位于挪威布鲁蒙德 (Brumundal) 的金色木结构建筑。与现代摩天大楼相比,只有18层高的它,实在是相形见绌(图1)。它甚至不是挪威最高的建筑。但这座设有办公室、公寓和酒店的综合用途建筑之所以引人注目,是因为它几乎完全由木材建造而成[1]。建筑的梁、柱和桁架均是采用胶合木而非普通的钢或混凝土制成。胶合木是平行粘合在一起的几块木板的复合块[2]。该塔低楼层的楼板、墙壁、楼梯和电梯井均由木材建造而成[3]。出于增加稳定性和改善声学效果的需要,只有位于高楼层的公寓的楼板采用了混凝土[4]。

在2019年竣工后的三年里,85.4 m的米约萨塔一直是世界上最高的木结构建筑,但美国威斯康星州密尔沃基的Ascent MKE塔楼以仅高出1米多的“微小”差距打破了该纪录。Ascent MKE塔楼于2022年年中开放[5]。仅在美国,就有1300多座所谓的重型木结构建筑正在建设之中,这些建筑均用胶合木等工程木材产品代替了钢和混凝土[6]。

用木材建造摩天大楼是减少建筑领域温室气体排放的一种新方法。其他正在制定或已经实施的减碳策略包括在钢铁厂用氢气替代煤炭以及重新设计混凝土板来减少材料使用。美国西雅图华盛顿大学建筑学教授Kate Simonen表示,现在解决这个问题至关重要。为适应人口增长和城市化,并为发展中国家提供更好的住房和基础设施,在不久的将来,建筑物数量将会激增。据她所言:“从全球范围来看,未来几十年需要建造的建筑物数量非常惊人。”

根据纽约市咨询公司麦肯锡 (McKinsey & Company)



图1. 米约萨塔这座位于挪威的18层建筑的大部分强度均来自工程木材,这些木材构成了其所有的梁、柱和桁架。支撑其地板的木梁最厚可达720 mm,建筑物四角的柱子最厚达1425 mm。来源:Wikimedia Commons (CC BY-SA 4.0)。

的数据,专家认为建筑产业价值链(包括原材料的开采和加工,以及建筑物的建造、维护和运营)产生的温室气体约占全球温室气体排放总量的25% [7]。这其中,建筑工地所使用的柴油挖掘机和推土机以及制造玻璃和地毯等室内材料的工厂所排放的温室气体各占了一部分[8–10]。不过钢铁和混凝土生产才是建筑业温室气体排放的罪魁祸首

[11]。生产建筑用钢材和混凝土所产生的温室气体排放量分别约占全球总排放量的3.5%和4.5% [7,12]。

用工程木材替代混凝土和钢材有助于减少温室气体排放。重型木结构不仅在强度上可以与这些材料相媲美[6]，还可以显著减少碳排放。在2019年发表的一项研究中，Simonen及其同事计算出，用交叉层压木材（一种类似于胶合木的工程木材）建造一座八层建筑，将比使用混凝土建造减少近27%的碳排放[13]。同时，相关法规也正在演变，纷纷允许建造中等尺寸的重型木结构建筑。世界大部分地区采用的标准《国际建筑规范》（The International Building Code），现在也允许建造18层以下的木结构建筑[14]。但建筑商们希望建更高的木结构建筑，他们正在筹划东京的一座70层木结构塔楼和伦敦的一座80层摩天大楼[6]。

尽管这极具吸引力，但重型木结构在新建筑中所占的比例仍然相对较小[1]。它主要有两方面的缺点：成本高于传统材料以及需要消耗大量木材。建造米约萨塔和附近一座较小的建筑就需要18 000棵树[1]。Simonen警告说，重型木结构建筑只有用可持续管理森林中生长的木材建造，才能达到降低碳排放的目的。她指出，增加这种木材的供应需要时间，但在建筑中使用竹子和稻草等快速生长植物材料的“新兴方法”还是“有前途的”[15-16]。

即使在未来几十年里会出现工程木结构建筑热潮，世界还是需要在建筑活动中使用混凝土和钢材。但专家表示，可通过改变这些材料的制造和使用方式，来助力减少温室气体的产生。混凝土行业一直在致力于减少其碳排放量。自1992年以来，混凝土行业的碳排放量已增加了两倍[17]。世界上最大的水泥制造商组织全球水泥与混凝土协会承诺到2050年实现碳中和，并制定了实现这一目标的计划[18]。各国政府也在采取或承诺采取行动。2021年，美国使用混凝土第二多的加利福尼亚州通过了一项法律，要求水泥制造商到2045年碳排放量达到“净零”水平[19]。世界上许多大型经济体，包括美国、欧盟和日本，均承诺到2050年实现碳中和，而占世界混凝土产量55%的中国，则计划到2060年实现这一目标[20-21]。

尽管如此，混凝土制造的脱碳仍然是一项巨大挑战[22]。混凝土对气候的大部分影响源于其关键成分水泥的生产。制造最常用水泥的前期步骤包括在850~900℃下煅烧石灰石（主要成分是碳酸钙），来产出石灰和二氧化碳[11,23]。仅这一步的二氧化碳排放量和能源使用量就占到了水泥厂二氧化碳排放总量和能源使用总量的60% [23]。而且，在下一步，将石灰与沙子和黏土混合并在窑中烧制，也需要大量的能量来将窑内温度提高到1400℃以上

[11,23]。这一阶段的产物，即熟料，将作进一步的加工来生产水泥，之后水泥会再与水、沙子和砾石进行混合来生产混凝土[11]。

目前，有很多可用于减少混凝土制造过程碳排放的方法。少用水泥或熟料就是策略之一。人们已通过向水泥中添加诸如燃煤发电厂的粉煤灰等材料，减少了熟料的用量。为了进一步减少所需的数量，制造商可以纳入更多的替代品，并混合更广泛的材料，如人造纤维等[11]。另外，煅烧黏土和石灰石等替代品也可以替代水泥。美国的几个州现在允许在混凝土中以石灰石粉替代5%~15%水泥用量[24]。其他方法则是针对二氧化碳的最大来源，即石灰石煅烧[25]。美国加利福尼亚州奥克兰的一家初创公司Brimstone所生产的水泥，就使用了不产生二氧化碳的硅酸钙，而非石灰石。该公司甚至声称其水泥会从空气中吸收二氧化碳[26]。

重新设计结构也可以减少温室气体排放。例如，英国巴斯大学建筑和土木工程专业的保罗·谢泼德（Paul Shepherd）教授和他的同事们就对建筑的一个典型结构构件——混凝土楼板进行了修改。据Shepherd介绍，他和同事所创造的原型（图2）是“以更恰当的方式使用混凝土”。他说：“混凝土在压缩时效果很好，但在拉伸时效果不佳。”弓形楼板可使混凝土抵抗压缩，并减少其承受的张力，从而减少楼板厚度。通过添加一个平面来创建水平地板，可让管道、导管和布线在地板和楼板之间的空间中穿行，故建筑的高度不会受到影响。该团队的方法还摒弃了浪费原料的浇筑过程（即将混凝土倒入模板中）。取而代之的是，机器人通过喷涂一层又一层浸渍有玻璃纤维增强材料的混凝土来制作楼板[27]。Shepherd说，这些改动使混凝土楼板建造所需的混凝土量减少了75%，碳足迹减少了60%。



图2. 英国巴斯大学的Paul Shepherd及其同事设计的这种弧形混凝土楼板所产生的温室气体排放量，比传统楼板少了60%。Shepherd站在置于该楼板上方的地板上。来源：巴斯大学，已获引用许可。

尽管此类方法可能会减少混凝土行业的碳排放，但行业和一些专家认为，达到“净零”还需要碳捕集、利用与封存（CCUS）技术[11-12,18]。这项技术从工厂的废气中

提取碳，然后将其封存，甚至将其转用于制造塑料等产品[28]。封存之所可能是混凝土内，一些公司正在测试是否可以将捕集的碳注入水泥中，以帮助水泥硬化[25]。水泥行业已开始小规模使用碳捕集技术。2019年，在中国开业了一家试点工厂[29]，世界第二大水泥制造商德国海德堡水泥公司也正在建设两座此类设施[30]。然而，批评人士指责称，依赖碳捕集是有风险的，因为这项技术的成功记录不佳[31]。例如，最近对13个著名碳捕集项目的审查发现，有两个项目失败了，而其余大部分项目所去除的碳比预测量要少得多[32]。而且，碳捕集也非常昂贵。根据一项估计，在混凝土行业实施碳捕集、利用与封存，将使水泥制造成本增加25% [11]。

当涉及脱碳时，钢铁也存在许多与混凝土相同的问题[22]。这两种材料的制造均属能源密集型，依赖化石燃料，生产过程会产生大量二氧化碳。但可通过各种创新，来助力减少钢铁的碳足迹。韩国汉阳大学地球资源与环境工程副教授 Jinsoo Kim 及其同事已经确定了86项可以减少钢铁碳排放的干预措施，而且所有这些措施现在都可以或者很快就会实现[33]。

在最常见的炼钢过程中，排放碳最多的步骤发生在高炉中（图3），此时富氧铁矿石和焦炭在2000°C以上高温条件下发生反应[11,34]。焦炭中的一氧化碳带走铁矿石中的氧原子，产生二氧化碳和熔融生铁，这种转化被称为还原[34]。然后，生铁经过进一步加工，生成钢和更多的二氧化碳[35]。



图3. 在钢铁厂高炉喷出的火花中，铁矿石和焦炭正在发生反应，生成生铁和二氧化碳。在最常见的炼钢过程中，这一步产生的二氧化碳最多。来源：Třinecké železářny, 已获引用许可。

世界上约5%的钢铁厂使用化石燃料产生的氢气和一氧化碳而非焦炭来还原铁矿石[11,34]。以这种方式形成的直接还原铁在电弧炉中转化为钢[34]。该过程产生的二氧化碳减少了40% [34]。

另外，还可通过改用生产过程不消耗化石燃料的“绿色”氢气，来进一步减少碳排放。例如，在瑞典“突破性

氢能炼铁技术”（HYBRIT）项目的一个试点工厂中，使用风力涡轮机发电用于电解水制氢[34]。然后，氢气进入熔炉并还原铁矿石，产生水作为副产品[31,35]。这种方法将炼钢过程中的二氧化碳排放量减少了97% [11]。HYBRIT工厂于2021年完成了第一批钢材的生产[35]，其他国家也正在运行类似的试点工厂[36]。

战略大学钢铁技术与创新网络（一个设于英国斯旺西大学，由行业和学术研究人员组成的联盟，简称SUSTAIN）项目经理 Richard Curry 表示，氢的可获得性仍然是这一方法的障碍。他说，相对于其他燃料，“目前氢的供应微不足道”。生产更多的氢气将需要消耗大量的能源[37]。据研究人员计算，如果所有现有的钢铁厂都改用绿色氢，供应这种气体将需要消耗目前世界可再生能源和核能产量的两倍[37]。此外，Curry表示，氢气和铁矿石之间的反应需要额外的能量，这意味着用这种方法生产钢铁“仍然不具有商业价值”。

遏制钢铁行业温室气体排放的另外两条途径是碳捕集和增加废铁回收。但Curry表示，但这两种方法都不可能带来巨大的变化。他指出，碳捕集方法通常涉及胺分子，而胺分子会被钢铁厂的巨大温度和压力波动破坏，从而降低技术的有效性。据Curry所述，包括SUSTAIN钢铁成员在内的研究人员正在测试碳捕集的替代方案，但这些方法仍在开发之中。尽管目前约有25%的钢铁是由回收的废铁制成，但这些回收铁经常会受到其他金属和塑料等材料的污染。为了提高废铁的回收量，行业需要更有效的分类和分析方法。

Kim表示，生产“绿色”钢铁的费用可能是该行业脱碳的最大障碍。“全球钢铁市场竞争激烈，因此生产成本至关重要。”他还表示，减少钢铁生产对气候的影响需要国际社会的共同努力。“没有合作，行业就无法实现脱碳。”

Simonen补充道，减少建筑业的碳排放需要不仅能够解决钢铁和混凝土问题还能解决整个行业温室气体来源的解决方案，这与其他行业（包括发电）碳减排的努力相吻合。她强调，技术进步固然很重要，但文化变革也同样必要。例如，当下的规划者往往倾向于拆除和更换旧建筑。但她表示，修复和改造旧结构反而可以大量减少碳排放。为了实现气候变化和可持续发展目标，“我们必须重新思考我们建设的地点、方式及时间”。

References

- [1] Mead R. Transforming trees into skyscrapers [Internet]. New York City: The

- New Yorker; 2022 Apr 18 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.newyorker.com/magazine/2022/04/25/transforming-trees-into-skyscrapers>.
- [2] Tumari K. Mjostårnet: the tallest timber building in the world [Internet]. Vadodara: The Constructor; [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://theconstructor.org/building/buildings/mjostarnet-building-setnew-world-record/58592/>.
 - [3] Mjosa Tower (Mjostårnet) [Internet]. London: Design Build Network; 2019 May 17 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.designbuildnetwork.com/projects/mjosa-tower-mjostarnet>.
 - [4] Kingson JA. The race to build wooden skyscrapers [Internet]. Arlington: Axios; 2022 Apr 26 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.axios.com/2022/04/26/wooden-skyscrapers-mass-timber>.
 - [5] Willcoxon M. The tallest mass timber building in the world is opening in downtown Milwaukee. It's healthier for the planet. And you [Internet]. Milwaukee: Milwaukee Journal Sentinel; 2022 Jun 29 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.jsonline.com/story/news/2022/06/29/milwaukee-newest-mass-timber-structure-ascent-opens-summer-sustainablearchitecture/7653606001/>.
 - [6] Niiler E. Wooden skyscrapers are on the rise [Internet]. New York City: Wall Street Journal; 2022 Apr 11 [cited 2022 Sep 8]. Available from: <https://www.wsj.com/articles/wooden-skyscrapers-are-on-the-rise-11649693924>.
 - [7] Call for action: seizing the decarbonization opportunity in construction [Internet]. New York City: McKinsey & Company; 2021 Jul 14 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.mckinsey.com/industries/engineering-construction-and-building-materials/our-insights/call-for-actionseizing-the-decarbonization-opportunity-in-construction>.
 - [8] Romeo N. How Oslo learned to fight climate change [Internet]. New York City: The New Yorker; 2022 May 4 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.newyorker.com/news/annals-of-a-warming-planet/how-oslo-learned-tofight-climate-change>.
 - [9] Smil V. The stunning carbon footprint of plate glass [Internet]. New York City: IEEE Spectrum; 2022 Mar 30 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://spectrum.ieee.org/float-glass>.
 - [10] Gertner J. Has the carbontech revolution begun? [Internet]. New York City: New York Times; 2021 Jun 27 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.nytimes.com/2021/06/23/magazine/interface-carpet-carbon.html>.
 - [11] Fennell P, Driver J, Bataille C, Davis SJ. Cement and steel—nine steps to net zero. *Nature* 2022;603:574–7.
 - [12] Hundertmark T, Reiter S, Schulze P. Green growth avenues in the cement ecosystem [Internet]. New York City: McKinsey & Company; 2021 Dec 16 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/green-growth-avenues-in-the-cement-ecosystem>.
 - [13] Pierobon F, Huang M, Simonen K, Ganguly I. Environmental benefits of using hybrid CLT structure in midrise nonresidential construction: an LCA based comparative case study in the US pacific northwest. *J Build Eng* 2019; 26: 100862.
 - [14] Kleeman A. Use of cross-laminated timber may rise in the US [Internet]. London: Reuters; 2022 Aug 25 [cited 2022 Sep 8]. Available from: <https://www.reuters.com/legal/legalindustry/use-crosslaminated-timber-may-rise-us-2022-08-25/>.
 - [15] Cairns R. Bamboo has been used for thousands of years in Asia. Now, it could help solve construction's sustainability problem [Internet]. Atlanta: CNN; [updated 2021 Nov 22; cited 2022 Sep 13]. Available from: <https://www.cnn.com/style/article/bamboo-sustainable-building-philippines-bali-hnk-spcintl/index.html>.
 - [16] Miles P. Straw-inspiring: houses made of the humble bale [Internet]. London: Financial Times; 2021 Dec 3 [cited 2022 Sep 13]. Available from: <https://www.ft.com/content/a42d0a24-2543-445e-83f1-8227d0110756>.
 - [17] Borenstein S. Cement carbon dioxide emissions quietly double in 20 years [Internet]. New York City: Associated Press; 2022 Jun 22 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://apnews.com/article/climate-science-china-pollution-3d97642acbb07fca7540edca38448266>.
 - [18] Concrete future [Internet]. London: Global Cement and Concrete Association; [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://gccassociation.org/concretefuture/>.
 - [19] Mulhern AC. Nut shells fuel cement kilns as Calif. imposes climate law [Internet]. Washington, DC: E&E News; 2021 Oct 28 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.eenews.net/articles/nut-shells-fuel-cementkilns-as-calif-imposes-climate-law/>.
 - [20] Concrete needs to lose its colossal carbon footprint. *Nature* 2021; 597:593–4.
 - [21] Normile D. Can China, the world's biggest coal consumer, become carbon neutral by 2060? [Internet]. Washington, DC: Science; 2020 Sep 29 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.science.org/content/article/can-chinaworlds-bigger-coal-consumer-become-carbon-neutral-2060>.
 - [22] Dunn K. From concrete to steel, how construction makes up the “last mile” of decarbonization [Internet]. New York City: Fortune; 2021 Feb 16 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://fortune.com/2021/02/16/concrete-steelconstruction-design-climate/>.
 - [23] Fennell PS, Davis SJ, Mohammed A. Decarbonizing cement production. *Joule* 2021;5(6):1305–11.
 - [24] Srubar W. Concrete is more polluting than flying. Here are 4 innovative ways to clean it up [Internet]. New York City: Fast Company; 2022 Sep 10 [cited 2022 Sep 17]. Available from: <https://www.fastcompany.com/90786922/concrete-more-polluting-than-flying-4-ways-to-decarbonizecement-industry>.
 - [25] How cement may yet help slow global warming [Internet]. London: The Economist; 2021 Nov 4 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.economist.com/science-and-technology/how-cement-may-yet-help-slowglobal-warming/21806083>.
 - [26] Clifford C. These scientists bonded over toilet tech. Now they're working on carbon-free cement [Internet]. New York City: CNBC; 2022 Apr 28 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.cnbc.com/2022/04/28/carbon-freecement-breakthrough-dcvc-put-55-million-into-brimstone.html>.
 - [27] Changing floor shape could cut concrete usage by 75 percent [Internet]. Stevenage: E&T; 2022 Feb 21 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2022/02/changing-floor-shape-could-cutconcrete-usage-by-75-per-cent/>.
 - [28] Leslie Davis A. How to make recyclable plastics out of CO2 to slow climate change [Internet]. Washington, DC: Science News; 2022 Sep 9 [cited 2022 Sep 14]. Available from: <https://www.sciencenews.org/article/plastic-carbondioxide-capture-recycling-climate-change>.
 - [29] Stanway D. Concrete steps? For China cement giants, monster carbon footprint smothers climate goals [Internet]. London: Reuters; 2019 Sep 12 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.reuters.com/article/us-climate-change-china-cement/concrete-steps-for-china-cementgiants-monster-carbon-footprint-smothers-climate-goals-idUSKCN1VX0QQ>.
 - [30] Dempsey H. HeidelbergCement aims to tackle emissions with new carbonneutral cement plant [Internet]. London: Financial Times; 2021 Jun 2 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.ft.com/content/74a49a0c-bfe9-4f0b-a8a0-7e607d91d387>.
 - [31] De La Garza A. The inflation reduction act includes a bonanza for the carbon capture industry [Internet]. New York City: Time; 2022 Aug 11 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://time.com/6205570/inflation-reduction-actcarbon-capture/>.
 - [32] Vaughan A. Most major carbon capture and storage projects haven't met targets [Internet]. London: New Scientist; 2022 Sep 1 [cited 2022 Sep 8]. Available from: <https://www.newscientist.com/article/2336018-most-majorcarbon-capture-and-storage-projects-havent-met-targets/>.
 - [33] Kim J, Sovacool BK, Bazilian M, Griffiths S, Lee J, Yang M, et al. Decarbonizing the iron and steel industry: a systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Res Soc Sci* 2022;89:102565.
 - [34] Peplow M. Can industry decarbonize steelmaking? [Internet]. Washington, DC: Chemical & Engineering News; 2021 Jun 13 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/steel-hydrogen-lowco2-startups/99/i22>.
 - [35] De La Garza A. The world's steel comes at a steep climate cost. A Swedish company is trying to change that [Internet]. New York City: Time; 2022 Apr 28 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://time.com/6171369/ssab-swedengreen-steel/>.
 - [36] Pfeifer S. ArcelorMittal successfully tests use of green hydrogen at Canadian plant [Internet]. London: Financial Times; 2022 May 1 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.ft.com/content/ccc5439a-3c26-4331-9455-094edb638df4>.
 - [37] Hutson M. The promise of carbon-neutral steel [Internet]. New York City: The New Yorker; 2021 Sep 18 [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.newyorker.com/news/annals-of-a-warming-planet/thepromise-of-carbon-neutral-steel>.