

国外建筑材料与设计丛书

坠落的玻璃

——玻璃幕墙在当代建筑中的问题与解决方案

[美] 帕特里克·洛克伦 著
周 洵 译

falling glass

problems and solutions in contemporary architecture



中国建筑工业出版社

Falling Glass

TU227/25

2008

国外建筑材料与设计丛书

坠落的玻璃

——玻璃幕墙在当代建筑中的问题与解决方案

[美] 帕特里克·洛克伦 著
周 洵 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2005-2848号

图书在版编目 (CIP) 数据

坠落的玻璃：玻璃幕墙在当代建筑中的问题与解决方案 / (美) 洛克伦著；周洵译. —北京：中国建筑工业出版社，2007

(国外建筑材料与设计丛书)

ISBN 978-7-112-09714-2

I. 坠… II. ①洛…②周… III. 玻璃-幕墙-结构设计-研究 IV. TU227

中国版本图书馆CIP数据核字 (2007) 第159606号

Falling Glass: Problems and Solutions in Contemporary Architecture/Patrick Loughran

Copyright © 2003 Birkhäuser Verlag AG (Verlag für Architektur), P.O.Box 133, 4010 Basel, Switzerland

Translation Copyright © 2008 China Architecture & Building Press

All rights reserved.

本书经 Birkhäuser Verlag AG 出版社授权我社翻译出版

责任编辑：孙 炼 率 琦

责任设计：董建平

责任校对：李志立 王雪竹

国外建筑材料与设计丛书

坠落的玻璃

——玻璃幕墙在当代建筑中的问题与解决方案

[美] 帕特里克·洛克伦 著

周 洵 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京方嘉彩色印刷有限责任公司印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：9 3/4 字数：259千字

2008年5月第一版 2008年5月第一次印刷

定价：58.00元

ISBN 978-7-112-09714-2

(16378)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

(邮政编码 100037)

目 录

前言	6
镍的硫化物	10
热应力	24
侵蚀	36
不亲和性	54
渗漏	64
能量问题	82
结构	104
设计冗余	126
撞击影响	138
致谢	150
作者简介	151
参考书目	152
插图来源	154

前言



第7页插图：伦敦的气压塔

1999年春，我有幸得到弗朗西斯·普利姆交流学者奖学金的资助，有机会学习已在欧洲兴起但在美国并不多见的新建筑体系。作为一名工程师出身的建筑师，我对新技术尤其感兴趣。而且，我研究的专题是建筑围护体系的创新。那时在欧洲正兴起以独特技术为特点的建筑潮流，我决定去获取第一手资料，看看那些伟大建筑是如何建造的。

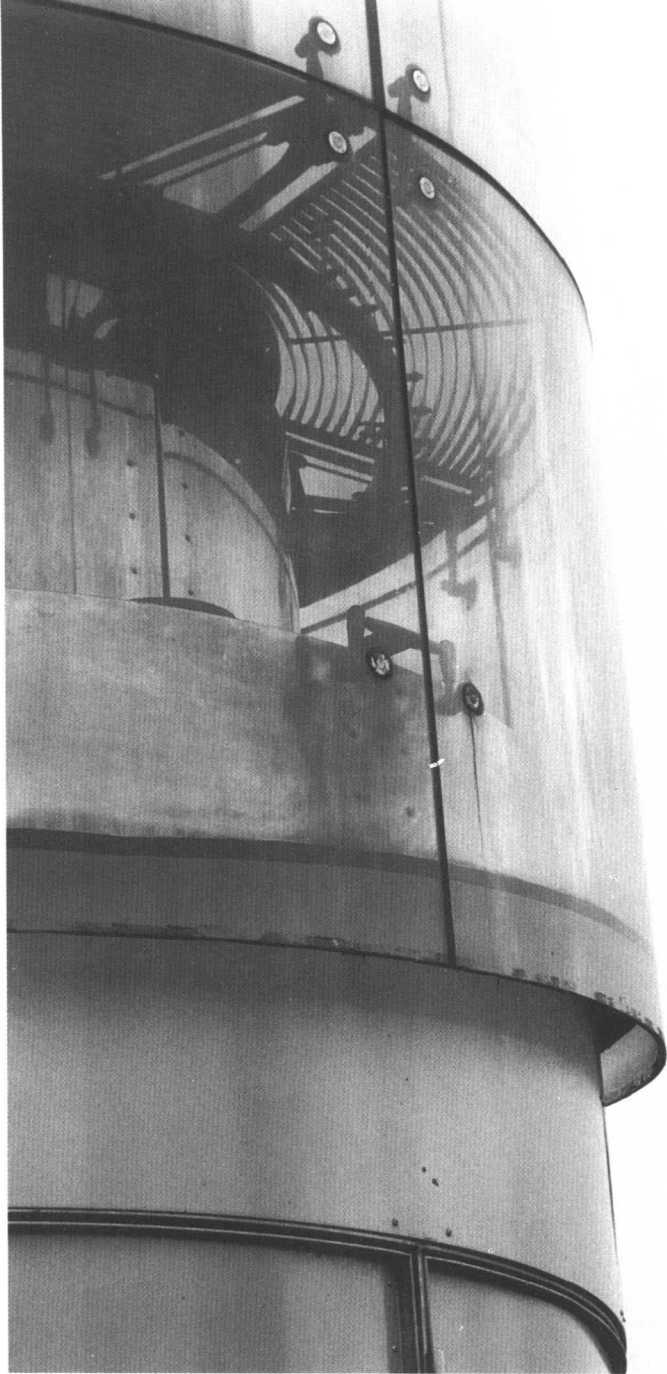
在访问研究过程中，我去了伦敦，也正是在那里，我萌生了写书的念头并确定了书名。凯瑟琳·斯莱瑟（Catherine Slessor）在《可持续建筑和高科技——生态技术》一书中介绍了伦敦西区的玻璃塔。在插图中展示了一座被奇妙的蓝色玻璃覆盖的高塔，我真的无法想像它是如何建造的。1995年建成的伦敦气压塔坐落于牧羊人树丛镇的东端，是当地的地标性建筑，属于泰晤士水利组织。巨大的气压塔建在泄洪管道上方，将大气压力转换成可以控制出水口的电子信号。随着气压

的变化，排水口开放的数量也在变化，圆柱形塔内的水平面亦随之升降。从排水口排出的水通过塔底座的水泵和循环槽进行收集和循环。为了清晰显示水平面的变化，气压塔内的水被染成了亮蓝色。夜间，气压塔的中空内柱可以提供照明，以突出水面的升降变化。

当我亲眼见到气压塔时，不禁感到吃惊：这个塔实在太小了，15m高的塔身坐落于道路交叉处环形路的中央，它更像是座玻璃雕塑，而非我从前想像的擎天柱。由于以前看到的图片仅仅是指向天际的塔身，所以我无法想像塔的高度。向弯曲的玻璃管道望去，组成玻璃筒体的整块玻璃构件由不锈钢反凹陷贯穿螺栓固定，构件的边缘接口从外部进行密封。虽然我对这类点支撑玻璃细部设计比较熟悉，但对如何在曲面上实现这类细部设计还是非常感兴趣的。玻璃内壁上留下了一层蓝色染色剂条纹的薄膜。很遗憾，气压塔里没有水。看到玻璃气压塔空空，失去了与水有关的功能，真是令人失望。随即，我围着塔转了几圈，近距离地观察气压塔。在塔的不锈钢底座上规规矩矩地贴着这样的告示：“危险！小心玻璃坠落！”这使我联想起，冬天美国高层建筑楼下普遍挂有“小心坠冰”的提示。虽然这些曲面玻璃部件都完好无损，但塔周围的地面上确实有一些强化玻璃的碎片。

那天晚些时候，我向有关建筑师了解了这个项目的简单情况。他们承认这个气压塔已经好几个月不能正常工作了。至于玻璃破碎的问题，他们解释说曾经有人向塔投掷了一块砖头。但在塔基





蓝色染料正从玻璃接缝处流出
伦敦气压塔

下并没有发现被砖砸过的迹象，于是我重新回到塔下，仔细查看了玻璃部件。通过近距离观察，我发现反凹陷贯穿紧固螺栓边缘有蓝色染色剂渗出的痕迹，好像这些在平面嵌板玻璃制造业中很普通的部件允许水从内向外渗漏似的。但设计师不应在没有研究每个设计细部可能出现的衍生结

果的情况下反转围护结构系统，就像不能把雨伞倒过来使用一样。

正是这个工程项目引发了我对建筑外部围护结构设计失败案例的兴趣。于是我带着这个问题开始了在欧洲的交流学者之旅，探寻欧洲当代伟大建筑是如何建造的。在研究之旅结束时，我初步了解到为什么它们其中有些会

出现问题。我回到美国后继续研究，发现建筑围护结构问题并不仅仅出现在欧洲的建筑或新建的外壳建筑中。过去的 70 年中，世界上很多建筑项目都一直受玻璃幕墙的困扰，而且玻璃仍是当今建筑中备受争议的最基本元素。但谁又能想像会有不使用玻璃的现代建筑呢？

本书中介绍的建筑都是由 20 和 21 世纪部分伟大建筑设计师设计的，很具创意和创新性。当然每个新创意都可能出现瑕疵，就像“小心玻璃坠落”的提示那样。本书目的不是说服大家重拾更为常规的建筑风格，而是告诉设计

师如何避免典型的设计缺陷。玻璃这种独特的建筑材料因其透明性而得到使用，却因其易碎特性而引发问题。本书描述了当代玻璃建筑中可能出现的许多潜在问题，并提供了可以帮助设计人员预防设计失败的可能手段。除指出问题外，部分章节也介绍了一些成功的玻璃幕墙建筑。

尽管本书所述的是失误的问题，但无意追究责任，特意将追究错误的问题放置一边未加评论。我不想为过去发生的错误追究责任，只想避免类似问题在将来再次发生。

镍的硫化物

由于玻璃透明和稳定的特性，建筑师在建筑中一直使用玻璃。现代科技的应用增强了玻璃的固有特性，但随之也带来了一些潜在问题。硫化镍是人造玻璃中偶尔含有的杂质，它存在于玻璃生产过程的熔化环节中，金属镍元素与硫元素结合生成了一种硫化镍石。硫化镍石本身对玻璃并无任何损害，但在玻璃通过热处理强化后，它就可能对玻璃产生不

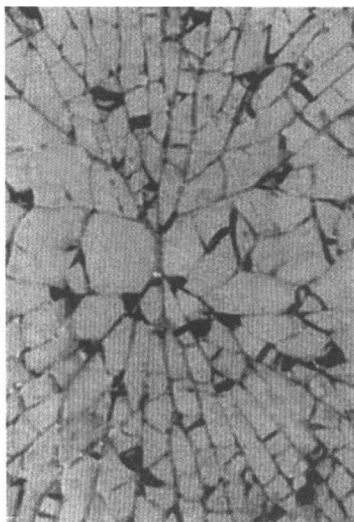
良影响。含有硫化镍石的强化玻璃很容易发生突变失效。如果这种玻璃处在温度变化的环境中，其硫化镍石的体积会发生细微变化，如果膨胀现象出现在玻璃厚度方向的中间层，玻璃就可能发生爆裂，这就是通称的自然破损。

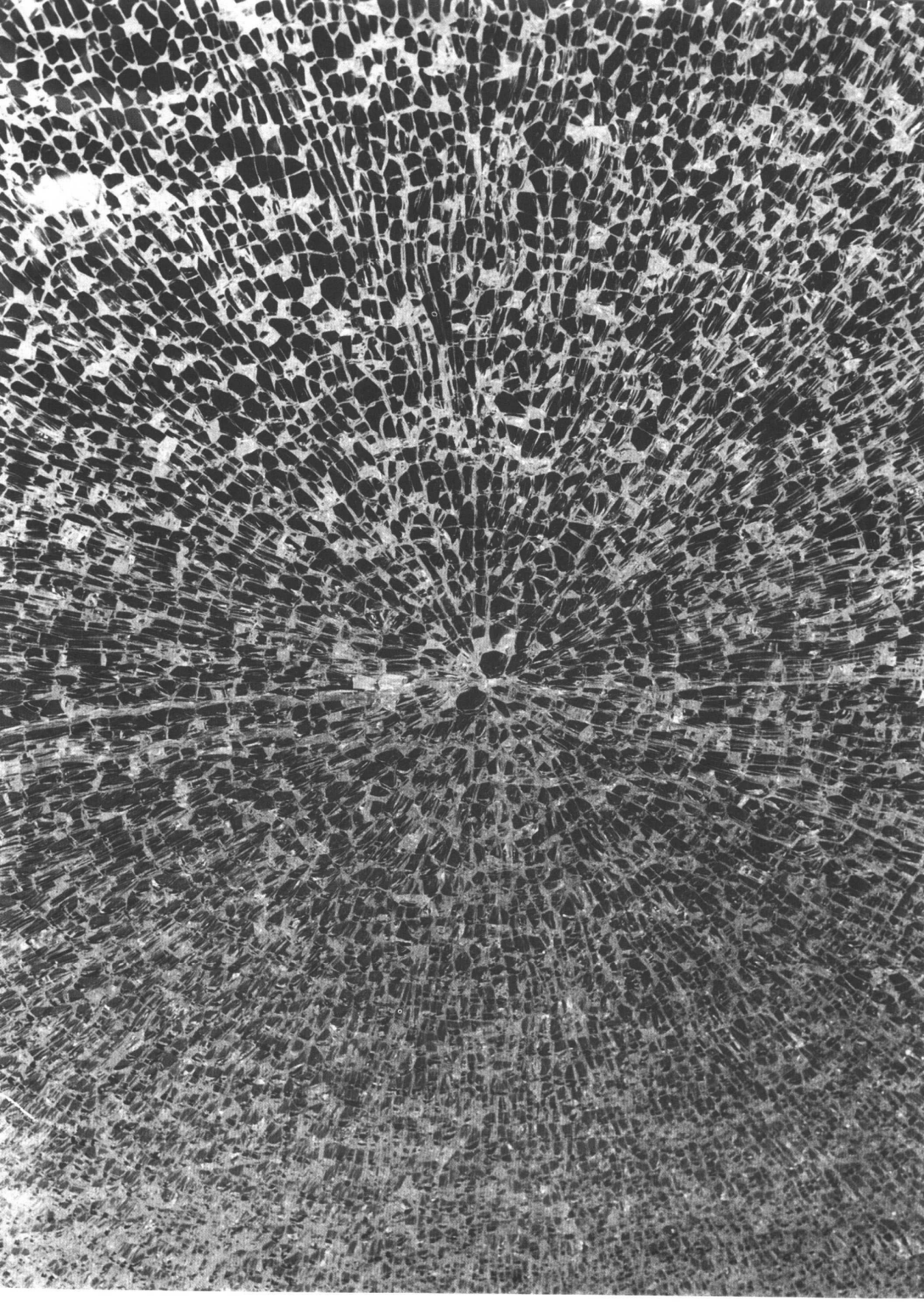
由于硫化镍石的体积和位置不同，可能需要相当长的时间，通常是几年，才会发生这种剧烈变化。强化玻璃爆裂后会崩散成无数细小碎块。如果爆裂后没有崩散，我们可以发现爆裂的根源是一个蝴蝶形状的裂纹。这种由硫化镍石造成的玻璃失效类型又称为“猫眼式”破裂。实际上，这种现象的根源早在 19 世纪 60 年代就已经被发现了，只是随着新技术的应用以及玻璃作为建筑材料被越来越广泛地运用，这个问题才得到了广泛的关注。

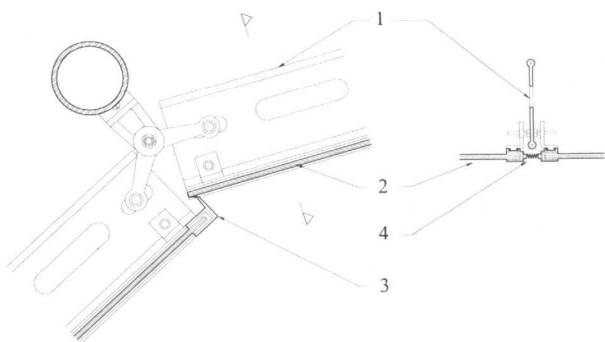
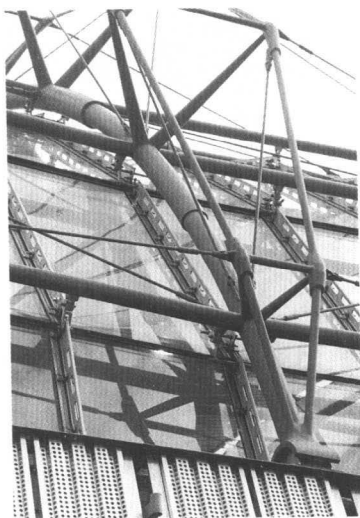
伦敦滑铁卢车站的国际站区就遇到了由于玻璃含有硫化镍而出现玻璃失效的情况。曾经获得建筑大奖的滑铁卢车站国际站区建成于 1994 年，是专门用于停靠通过英吉利海峡隧道从法国来英国列车的车站。这一新建筑彻底

本页两图：“猫眼式”破碎表明强化玻璃破碎是由硫化镍石造成的。在破碎玻璃中间的垂直裂纹就是硫化镍石膨胀的位置

第 11 页插图：由硫化镍石造成的蝴蝶形裂纹







上图：伦敦滑铁卢车站国际站区复杂天窗系统的外部照片

下图：伦敦滑铁卢车站国际站区天窗系统结构图：可以实现所有整体成型玻璃板自由移动的标准化结构。

1. 伸出的铝制天窗框架
2. 10mm 厚强化玻璃
3. 玻璃框架上端刮水片封口
4. 玻璃框架边缘的可伸缩接合垫

改变了这座建于维多利亚时期具有历史意义的火车站。这座车站大厅让所有乘高速火车来伦敦的旅行者为之振奋：长长的月台依铁轨而建，蜿蜒蛇行，可以容纳长达 400m 的欧洲之星火车进出车站。月台顶棚的基本结构是双绞索桁架三销固定平面拱形结构。由于月台形状是几何不对称的，中间销位置偏于一侧。销的西侧为陡峭竖起的玻璃拱顶，东侧则是由波纹不锈钢盖板组成的相对平缓的拱顶。富于创新性的天窗系统也符合整体建筑的复杂几何结构。其玻璃装配环节是天窗设计中独有的。10mm 厚的整体式强化玻璃面板的长边一侧由金属框架固定。邻近的玻璃板间由手

风琴形可伸缩接合垫连接。玻璃板底部的紧固夹可固定玻璃，顶部的刮水片可以使该玻璃板能被单独移动而不受其上玻璃板的影响。这种分割式玻璃顶棚韧性很强，可以抵御风、雨、雪的影响。

可是建成后不久，这座大厅的天窗部分就发生了玻璃破碎。天窗玻璃板只经过强化而未经层压处理。未经层压处理的强化玻璃失效后，只能承受其自身重量，用作顶棚玻璃时一旦破裂便很容易从框架中散落。由于大量强化玻璃碎片从高空坠落会对从下面经过的行人造成危害，设计人员在滑铁卢车站玻璃顶棚部分下面加挂了类似帐篷的织物结构，以接住掉落的玻璃。各国对高空玻璃装配标准的规定各有不同，在滑铁卢车站建造的时候，英国并没有规定高空玻璃必须经过层压处理，而且这个工程的玻璃失效是硫化镍造成的。由杂质污染造成的玻璃破碎是强化玻璃生产中无法回避的问题。要了解玻璃如何被杂质污染，就必须首先了解玻璃的生产过程。

天窗下面挂了幕布以免行人被坠落的玻璃砸到。这种玻璃失效是由硫化镍石造成的。
伦敦滑铁卢车站国际站区



制造玻璃的原材料（批量生产投料）

玻璃的主要成分是砂子，这种原材料是生产优质玻璃的诸多化学元素的一部分。在制造玻璃过程的开始阶段，这种原材料中包括 7 种主要成分：

透明浮法玻璃的公称成分

成分	重量百分比 (%)
二氧化硅 (SiO ₂) 砂 (石英)	73.0
氧化钠 (Na ₂ O)	13.8
氧化钙 (CaO)	6.6
氧化镁 (MgO)	3.6
三氧化二铝 (Al ₂ O ₃)	0.17
三氧化二铁 (Fe ₂ O ₃)	0.12
三氧化硫 (SO ₃)	0.30

硫化镍不是批量生产浮法玻璃时特意加入的成分，而是生产过程中不可避免出现的两种元素的副产品。

镍 (Ni)

虽然不是原材料，镍总能混入生产投料中。目前，镍污染的根源还没有找到。必须注意的是，

生产投料的主要成分是取自地面的天然砂砾，而且砂砾中可能包含少量的有害杂质。因此在浮法玻璃生产投料中可能存在不可溶解的夹杂物。这些杂质大体可分为结瘤、泥土和碎石几类，但它们大多不会影响玻璃的性能。在工业标准中对夹杂物的大小和最低间距有容许限度。在原材料中可以发现富镍物质的细微粉末或颗粒。除原材料杂质外，富镍的致污物，如不锈钢，也通过不锈钢器件与混合物接触而进入玻璃生产投料中。

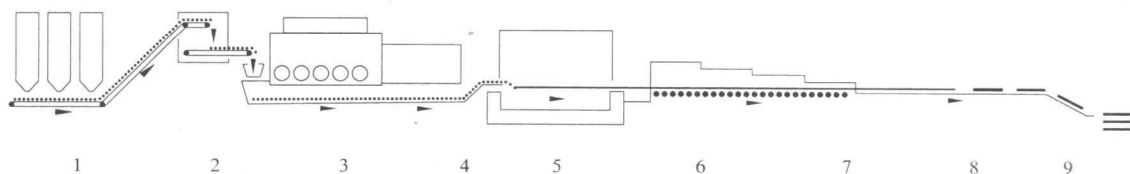
硫 (S)

浮法玻璃生产过程中的硫有两个来源。首要来源是玻璃生产投料中的硫酸钠，加入硫酸钠的目的是去除混合物中的微小气泡。另一个来源是用来熔化原材料的燃料中包含硫的成分。

硫化镍 (NiS)

生成硫化镍石的化学反应发生在制造玻璃的熔化阶段。硫与少量镍化合产生了这种制造麻烦的物质。硫化镍石的体积在

2840°F (1560°C) 2012°F (1100°C) 1112°F (600°C) 104°F (40°C) 86°F (30°C)



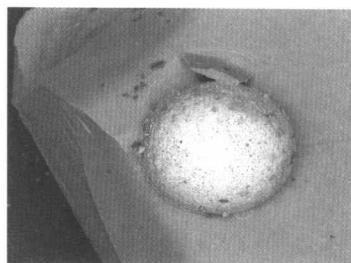
0.076 ~ 0.38mm 之间。正是因为其体积小，故在浮法玻璃生产过程中无法通过实际检查发现硫化镍石。目前，浮法玻璃技术无法完全去除玻璃中的硫化镍石杂质。由于玻璃格窗是成批制造的，常常有很多玻璃板中含有硫化镍石，因此建筑中的玻璃失效现象很少只发生在某一块玻璃窗上。这类问题一般在同一项目的多块玻璃窗上发生，其原因就是该批次的熔化玻璃原料中含有富镍物质。

现在通常采用退火法制造浮法玻璃。这种方法是 1955 年发明的，熔化的玻璃漂浮于液态锡基层表面并逐渐冷却，以保证没有应力残留。退火浮法玻璃易碎，而且碎片尖利，所以大部分国家禁止将未经层压处理的退火浮法玻璃用作门或天窗。需要注意的是，硫化镍杂质可以存在于退火浮法玻璃中，但不会对玻璃特性产生影响。这种杂质只有在玻璃经过强化处理后会引发问题。硫化镍石属于微量杂质，除导致强化玻璃自然破裂外，基本不为人所注意。只有研究退火玻璃强化的过程才能了解由硫化镍造成的玻璃失效的原因。

上图：浮法玻璃制造流程。硫化镍石是该系统的有害副产品。

1. 加入原材料
2. 混合
3. 熔化
4. 提纯
5. 液态锡漂浮基层
6. 冷却
7. 切割
8. 分块
9. 储存

下图：自然破裂玻璃中的硫化镍石的显微照片（直径约 400μm）



强化玻璃制造

1920年，巴黎的圣戈班玻璃和化学制品有限公司 (Société Anonyme de Manufactures des Glaces et Produits Chimiques de St. Gobain) 发明了强化玻璃。其生产过程为：通过传送带将退火玻璃送入熔炉，加热至半熔化状态，然后迅速冷却。由于玻璃表层的冷却比内层快很多，造成表层玻璃被压缩，内层玻璃产生张力。这种强化过程使玻璃板具备了热预应力。由于完全强化的玻璃表层密度水平较大，用这种玻璃制造的产品的强度通常是同等厚度、同样大小和相同型号的退火玻璃产品强度的四倍。单片玻璃经强化处理后不能切割、钻孔、打磨或抛光。任意一处一旦受力破裂，整块玻璃就马上破碎成细小玻璃颗粒。

自然破裂

玻璃经过强化，硫化镍杂质就会改变状态，随着时间和温度的变化而增大或转化。玻璃一旦安装，硫化镍杂质就会随温度变化而变化，造成玻璃内部出现微小裂缝。如果裂缝穿透强化玻璃的张力层，释放出的能量将使整块玻璃自然破裂。

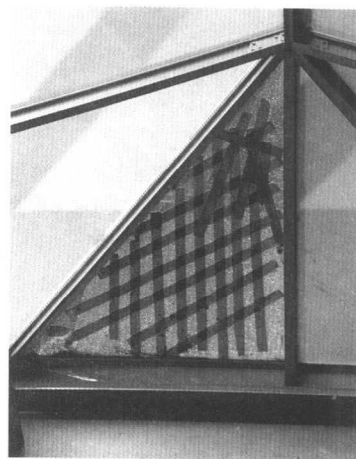
自然破裂是完全强化玻璃不可避免的固有特性。此类玻璃失效的原因是：强化玻璃内部张力层存在硫化镍石，当其受到温度变化影响时会发生形变，造成玻璃破裂。温度变化可使硫化镍石体积产生微小变化（约2%），但正是这种微小变化造成了玻璃的完全失效。它致使窗框中玻璃制品的滞留性严重降低。像变魔术

一般，小小的杂质可以顷刻间将如钢铁般坚固的透明屏障变为空洞旁的一堆透明玻璃颗粒。那为什么这种材料还会被应用在建筑物上呢？出乎意料的是，目前使用最普遍的安全玻璃正是以强化玻璃失效的模式为前提的。

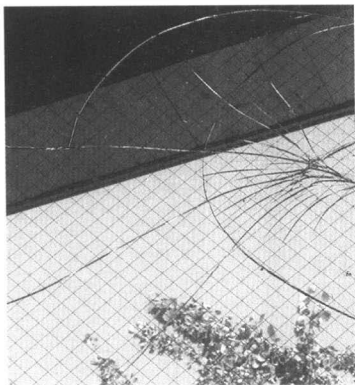
安全玻璃

美国国家标准组织 (ANSI) 对安全玻璃的定义为：“与其他材料共同建造的、经其他材料处理的或与其他材料合成的玻璃材料，这种玻璃在破碎后可以最大程度地避免对人体的伤害。”简言之，安全玻璃破碎后不会割伤人。安全玻璃通常应用于需要承受强大冲击的透明表面或必须避免出现碎玻璃飞溅的场所。设定安全玻璃标准是为了减少或消除因玻璃破碎造成的无谓伤害。通常，安全玻璃表面都印有永久性标志，说明其满足安全玻璃标准。在美国，以下五种产品是可以作为安全玻璃使用的，而大多数欧洲国家规定只有强化玻璃和层压玻璃才是安全玻璃。在欧洲，其他三类产品只有在特定安全条件下才可以使用。

强化玻璃：经过特殊热处理的单片玻璃，破碎后碎片成互连状态。强化玻璃不可切割、钻孔、打磨或抛光。任意一处一旦受力破裂，整块玻璃就马上破碎成细小玻璃颗粒。能够作为安全玻璃使用的强化玻璃破碎后的颗粒体积必须小于某固定值。一旦颗粒体积过大，这种玻璃就不能用作安全玻璃。因为强化玻璃破碎成很小的颗粒，玻璃制品在窗框中的滞留能力就会严重降低。强化



用强化层压玻璃制作的天窗破裂后不会从窗框上落下。在破裂的窗外面粘贴胶带以进一步保证安全。
芝加哥伊利诺伊中心



16 17

玻璃会分裂成若干块互连的玻璃结块从窗框中脱落。

层压玻璃：两张或更多玻璃板通过夹层结合在一起。最常见的夹层材料是聚乙烯醇缩丁醛（PVB）和硫化树脂。层压玻璃最重要的优点是能够在破裂后很好地保持原形。所以，层压玻璃可以用作天窗材料或安装在对安全性要求较高的地方。层压玻璃用作顶棚材料时，最好不要对玻璃两面都进行回火强化。因为如果双面都经过层压且同时破裂，玻璃板就会像湿毯子一样下垂，并可能从框架内脱落。

嵌丝玻璃：有金属丝完全嵌入的单片玻璃，但金属丝不一定嵌在玻璃片的中央。在两张玻璃片之间加入金属丝网，并对这种类似三明治的材料进行热压合就可制成嵌丝玻璃。玻璃嵌丝是加强玻璃耐火性的传统工艺。由于嵌丝玻璃在破裂后金属丝可以将玻璃碎块联结在一起，所以它可以用作安全玻璃。

塑料安全透明材料：单片的合成塑料材料，由两层或更多的合成塑料层经过层压成型，或由塑料材料与纤维或薄片形状的加固材料层压而成。塑料板比玻璃更容易划伤或褪色。

有机表层玻璃：一面或双面由应用聚合物表层、薄板或薄膜覆盖的玻璃。虽然这种玻璃受到一定强度的冲击会破裂，但碎玻璃仍然附着于塑料上，不会脱落。这种表层材料可以在一般玻璃制品安装好以后添加。增加薄膜比替换现有玻璃更经济，且抗破裂性较强，但玻璃破裂后的稳定性有限。

地方、州和国家规范都对安全玻璃的使用进行了规定。尽管规范不尽相同，但绝大多数要求使用安全玻璃的危险位置包括：门、门两边的窗户、玻璃隔断和天窗。有些规范允许使用防护装置，或在全高玻璃幕墙加装护墙靠椅栏以替代安全玻璃。但只要是使用强化玻璃作为安全玻璃的地方，就存在自然破裂的风险。

上图：非强化嵌丝玻璃用作窗户材料时可避免玻璃失效后脱落。
芝加哥冰球馆

右图：非强化层压玻璃作为出入口，显示了破裂后玻璃是如何保留在玻璃框中的。
巴黎国家图书馆

