故宫古建大木构件典型残损问题分析

巩固擎天——柱的残损与加固

周乾

故宫的木结构古建筑群是我国古建筑的杰出代表。故宫古建筑中的木柱普遍存在有糟朽、开裂、柱顶石风化、加固件松动等典型残损问题，产生这些问题的主要原因与木柱构造特点、施工工艺、构件材料及木柱受力特征等因素相关，采取传统与现代的方法，即可实现木柱的有效加固，从而延长古建筑的寿命。

一　木结构古建筑的柱

故宫的木结构古建筑群是我国古建筑的杰出代表，具有重要的文化、历史和文物价值，保护意义重大。这些明清官式大木结构建筑在构造上一般由基础、柱子、斗栱、梁架、屋顶、墙体等构件组成，其中柱子作为古建大木结构的重要承重构件之一，主要用来承受上部传来的垂直的作用力。柱子按位置、功能不同，一般可分为檐柱、金柱、中柱、山柱、童柱等[一]（图一）。檐柱指屋檐下最外一圈的柱子，主要用来承担屋檐部分的重量。金柱位于檐柱以内，但不包括建筑物纵轴线上的柱子，主要用于承担檐头以上屋面的重量。在建筑物纵轴线上的柱子称中柱，顶着屋脊，将进深方向的梁架分为两段，多用于门廊建筑。山柱则位于山墙正中，将古建筑的排山梁架（即山墙位置的梁架）分为两部分。童柱一般放在横梁之上，下端不着地，上端的功用和位置与檐柱或金柱相同。此外，梁架内一般用于承担上部梁传来的力的瓜柱，其高度大于本身的宽度，也可认为是一种柱子。古建大木柱子的柱径约为柱高的十分之一，这样的截面尺寸在一般情况下可满足受力要求[二]。

由于木材具有易糟朽、易开裂等问题，在长时间自然或人为因素作用下，古建筑的木柱不可避免的会出现残损（即处于无法正常受力、不能正常使用或濒临破坏的状态）[三]，并威胁到整体结构的安全，因而

一　梁思成：《清式营造则例》，北京：中国建筑工业出版社，一九八一年。

二　王天：《古代大木作静力初探》，北京：文物出版社，一九九二年。另见周乾、闫维明、周锡元等：《中国古建筑动力特性及地震反应》，《北京工业大学学报》二〇一〇年第一期，第一三—一七页。

对它们进行残损鉴定极其重要。现基于大量勘查及分析结果，试探讨故宫古建筑木柱的典型残损问题，分析其产生原因，并提出相关修复方案，为故宫古建筑的修缮加固提供参考。

二　木柱残损的专业评估内容

古建筑木柱残损与否及残损状况，有其专业的评估规定。按照《古建筑木结构维护与加固技术规范（GB50165-92）》规定，木柱残损评估内容包括如下几个方面：

㈠柱子木料材质的腐朽程度应在许可范围内

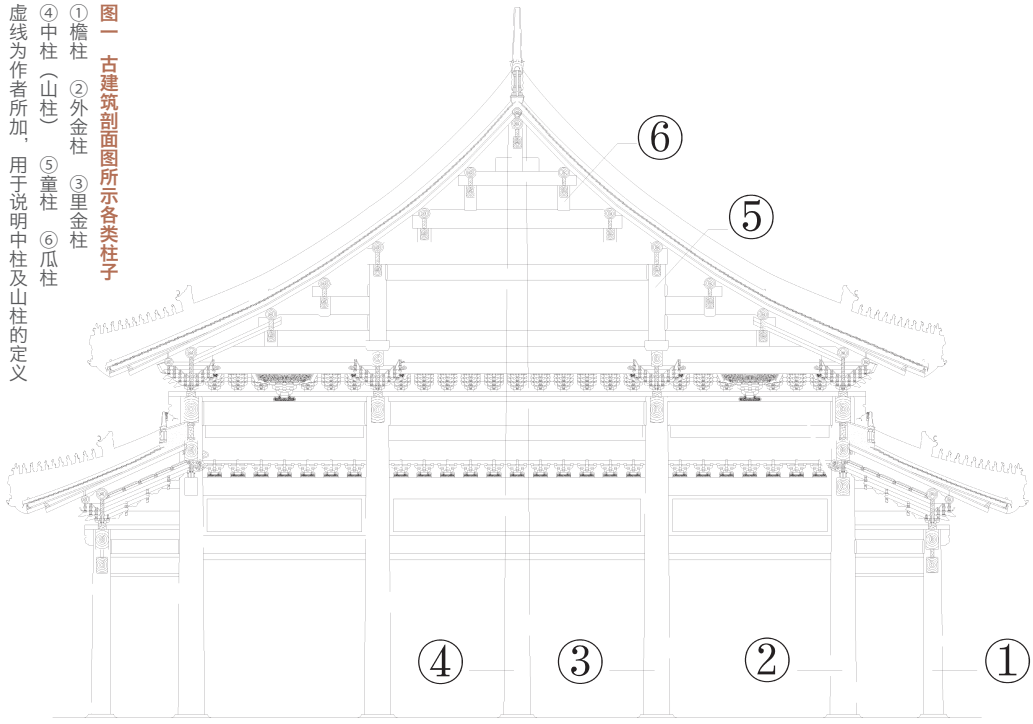
柱子的腐朽是指柱子受到木腐菌（导致木材腐朽的真菌）侵蚀后，不但其颜色发生改变，物理、力学性质也发生改变，最后木材结构变得松软、易碎，呈筛孔状或粉末状[四]。柱子的腐朽使得其质量减小，吸水性增大，强度和硬度降低。

㈡沿柱身任一部位不能有虫蛀孔洞

蛀孔的产生，主要成因是昆虫或海生钻孔动物的蛀蚀。深度十毫米以上的大虫眼和深而密集呈蜂窝状的小虫眼将破坏木柱的完整性，并使木材强度和耐久性降低，是引起木材变色和腐朽的主要原因之一。

㈢木材本身材质无明显天然缺陷

即在柱的关键受力部位，其木节、裂纹（包括扭（斜）纹与干缩裂缝）的尺寸应在许可范围内。木节是指树干内部活枝条或枯死枝条的基部，木节的类型、尺寸、密集程度及分布位置影响着柱子的强度等级。裂纹是指木材纤维与纤维之间分离而形成的裂隙。天然裂纹产生的原因一般因树木生长时期受环境（包括气候因素）、生长应力因素或木材干燥过程而形成。裂纹破坏了木柱的完整性，降



图一　古建筑剖面图所示各类柱子
①檐柱　②外金柱　③里金柱
④中柱（山柱）　⑤童柱　⑥瓜柱
虚线为作者所加，用于说明中柱及山柱的定义

三　古建筑木结构维护与加固技术规范（GB50165—92）。

四　徐有明：《木材学》，北京：中国林业出版社，二〇〇六年。

低了其强度，同时也是木腐菌侵蚀木材的主要渠道，因此应予以控制。

㈣柱的弯曲变形应在许可范围内

柱的弯曲包括柱子的天然弯曲及外力作用下产生的弯曲。柱的弯曲尺寸过大时，容易产生偏心受力，有可能导致柱子失稳甚至折断，从而威胁建筑结构整体安全。故宫古建大木结构的柱子一般选材严格，且柱径截面充裕，柱弯曲变形问题出现得很少。

㈤柱底与柱顶石之间的接触面积应满足最小值要求

即指柱子与柱顶石之间有充分的接触面积，且在外力（如地震）作用下柱底产生一定的滑动后仍能立在柱顶石上，这样可避免因柱底缺乏可靠支撑而导致柱子倾斜、歪闪，进而诱发木构架整体失稳甚至倒塌的问题。需要说明的是，柱子是浮放在柱顶石上的，而不是插入地下，这是古建大木结构建筑的重要构造特征之一，如此一是可避免柱根产生糟朽，二是柱底与柱顶石之间可进行适量的摩擦滑移，从而减小地震对古建筑结构整体的破坏。

㈥柱身任一位置无明显损伤

所谓明显损伤，如断裂、劈裂或压皱等，即在外力（如地震、人为破坏等）作用下柱子不能受损严重，原因在于上述损伤症状会使得柱子的整体性被削弱，或使得其有效受压截面尺寸减小，或使得其处于偏心受力状态，均不利于柱子受力。

㈦木柱历次加固现状完好

即柱子的某一部位曾经因为残损而被加固，加固部位的残损问题未重新出现，且采取的加固材料无老化、松动，粘接材料无空鼓，原有挖补部位无松动、脱胶或重新出现腐朽问题。柱身未出现新的变形或变位，或榫卯脱离、开裂、铁箍松动等问题。

三　古建筑木柱存在的典型残损问题

基于对故宫大量古建筑柱子的勘查结果，可归纳出故宫古建筑柱子的典型残损问题包括如下几个方面：

㈠糟朽

古建筑的木柱有的为露明，有的则包砌在墙内。露明的柱子由于通风性能良好，不容易产生糟朽；古建筑的墙体一般缺乏良好的防潮措施，部分墙体的材料还会吸收地表、空气中的水分，使得墙体更加潮湿。包砌在墙体中的木柱长期处在空气密闭而潮湿的环境中，很容易产生糟朽。木柱糟朽一般从柱根和外表皮开始，然后逐渐由外向内、由下向上蔓延[五]。柱的糟朽减小了柱子的有效受压截面，使柱子处于偏心受压状态，很容易使周边木构架产生倾斜或不均匀沉降，不利于木结构整体受力，并相应会造成上部结构开裂、变形等问题。

㈡开裂

柱子出现的裂缝包括自然因素引起的干缩裂缝以及外力作用引起的破坏性裂缝。无论哪种形式产生的裂缝，当其宽度和深度超出一定的范围时，柱子的受力性能就要受到影响。故宫古建筑底部承重柱由于选材严格，且截面尺寸充裕，因而很少出现因外力作用产生的破坏性裂缝，其表面的干缩裂缝也一般在许可范围内。而位于脊枋下面的脊瓜柱，由于其截面厚度仅为底部承重柱径的二分之一[六]，且由于构造原因导致其截面有严重的削弱，而其所承担的屋面传来的荷载值却与底部柱子相近，因而很容易出现破坏性裂缝。脊瓜柱开裂产生的裂缝一般与其受压方向相同，裂缝易造成脊瓜柱处于偏心受力状态，且有效受压截面尺寸减小，使得柱子易产生歪闪，严重影响其上部梁架的稳定，因而一经发现需要及时加固。

㈢柱顶石风化

作为柱底支撑构件，柱顶石对古建大木结构整体结构的稳定性起重要作用。柱顶石要有一定的坚硬度才能使柱子立在上面而不产生倾斜，还要有充足的宽度以保证外力作用下柱子产生侧移时还能立在柱顶石上。然而勘查发现，柱顶石风化是故宫古建筑柱子存在的一个典型问题。柱顶石风化主要指柱顶石材料在空气中因物理、化学作用而变松散的过程。柱顶石风化使得柱底有效支撑截面减小，在外力作用下柱子产生侧移时很可能从柱顶石上掉落，从而使其受压性能降低甚至丧失，并导致木结构内力重分布，威胁大木结构整体安全。由此可知，采取可靠措施预防柱顶石风化，或者对已风化的柱顶石采取及时有效的补强措施极其必要。

㈣加固件松动

对于部分已出现残损的木柱，故宫修缮采取的传统加固材料以铁件为主，加固做法如铁件打箍、包镶

五　马炳坚：《中国古建筑的构造特点、损毁规律及保护修缮方法（上）》，《古建园林技术》二〇〇六年第三期，第五七—六二页。

六　马炳坚：《中国古建筑木作营造技术》，北京：科学出版社，一九九五年。

等。其主要原因在于铁件材料具有体积小、强度高、加固效果好、施工方便等优点。然而铁件材料的主要弊病为在空气中易锈蚀，即铁件本身产生了物理体积和化学性质的缺失和变化。虽然在一定时间内铁件能提供附加承载力以避免木柱的深度破坏，但是铁件长期暴露在潮湿的空气中时，会生成氧化铁从而产生锈蚀，结果造成铁件本身松动或者断裂。加固件松动后，铁件加固的作用会减弱或丧失，木柱被加固部位的强度和刚度未能得到提高，使得木柱仍处于非正常受力状态，直接威胁古建大木结构整体安全。

四　木柱出现残损的原因分析

通过分析归纳，可得故宫古建木柱产生典型残损问题的主要原因包括如下几个方面：

㈠材料原因

木材虽然有良好的变形和抗压、抗拉性能，但还有抗剪性能（指材料承受剪切力的能力）差、易开裂、易糟朽、易虫蛀、有木节等问题。木柱材质缺陷产生的主要原因有：

①生理原因，即树木在生长过程中产生的缺陷，是先天性的，如木节。

②病理原因，即树木在生长过程中或被伐倒后受到生物因素如菌类、虫类等危害而形成的原因，是后天性的，保护措施适当可以减缓甚至避免其发生，如腐朽、虫蛀等。

③人为原因，即木柱加固或施工过程中引起的缺陷，这也是后天性的，可以避免。

④多因素作用的结果使得木材产生缺陷，如裂纹、抗剪性能差等，需要采取及时有效的加固措施。

对于柱顶石材料而言，石材长时间在空气中产生风化是其残损的主要原因。

对于铁件加固材料而言，铁件材料长时间在空气中产生锈蚀是其残损的主要原因[七]。

㈡构造原因

故宫古建大木结构的重要构造特点之一在于梁和柱采用榫卯节点形式连接，即梁端做成榫头形式，插入柱头预留的卯口中。对于底部承重柱而言，由于柱截面尺寸充裕，即使在柱顶开设卯口，柱子剩余截面也能满足抗压承载力要求，因此柱底部很少出现受压开裂破坏的问题。但对于脊瓜柱而言，其承载截面尺

七　刘大可：《中国古建筑瓦石营法》，北京：中国建筑工业出版社，一九九三年。

寸小，为满足榫卯搭接的构造要求还需削弱垫板、枋所占位置的尺寸，因而在竖向荷载作用下极易产生破坏性裂缝。

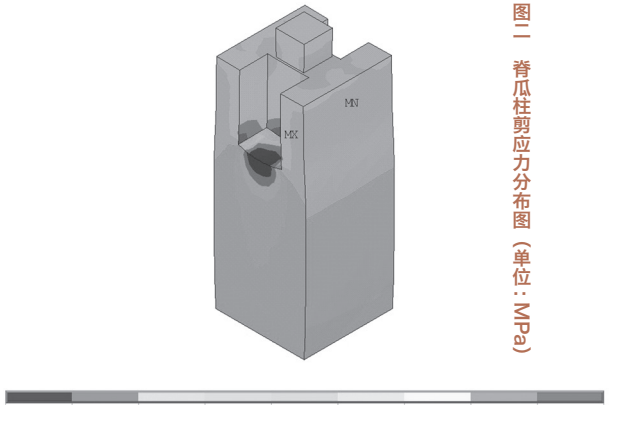
以某脊瓜柱为例，从其在屋面荷载作用下产生的剪应力分布图（图二）（考虑瓜柱底部铰接约束，因此未绘出底部的榫头）可以看出，剪应力绝对值越大则表示越危险，则在脊瓜柱卯口位置的剪应力最大，且剪应力主要沿卯口及竖直朝下方向分布，与抑斋脊瓜柱实际开裂情况吻合。

㈢工艺原因

对于柱子糟朽问题而言，古建施工工艺是引起该问题的重要原因。这是因为古建筑承载的主体是木构架，墙体仅起维护作用，按照古建大木施工工艺要求[八]，施工时立大木构架在先，其次再砌筑维护墙体。这种工艺作法虽然满足了建筑的使用功能要求，但是造成部分柱子被包砌在墙体内。有的后檐墙及山面墙体与柱子相交处设有透风，透风是一块有透雕花饰的砖，其作用在于使柱子根部附近的空气流通而使柱根不糟朽[九]。故宫宫殿的墙体上身和下碱（红色墙体以下，用以防潮隔碱的堆砌墙体）外部的下皮均有透风，以便空气对流。然而包砌部分角柱的墙体是没有透风的，这使得柱子在受到潮湿空气时排不出去；或者部分透风因为柱子的变形而造成通道堵塞，同样使得柱子容易处于潮湿状态。在上述因素的综合作用下，与维护墙体相交的柱子缺乏通风，且受到墙体材料吸附水的作用，长期处于潮湿状态，因而产生糟朽问题。

㈣外力原因

外力原因包括两个方面：一是木柱受到突然增大的外力作用，如地震、大风、暴雪等引起的破坏；二是木柱承受的外力不变，但木柱自身的材料强度（即抵抗力）下降引起的崩坏。木柱一般的承受压力，在正常情况下，竖向荷载作用在柱轴心位置。在突然发生的地震、风、雪等荷载作用下，柱受力方向要产生偏离，偏离轴心，这使得柱子处于偏心受力状态，很容易造成柱的开裂破坏，甚至导致柱折断。古建筑木结构还有一个重要特点，即随着时间增长，木材的材料强度降低及弹性模量（即描述物质弹性性能的总称）降低，即产生老化。这使得木柱变得易弯曲、易破坏，因而即使外力不变，木柱自身也容易产生开裂或折断。另外，弯曲的柱子的受压条件比直立的柱子差很多，在相同的条件下，更容易被破坏。此外，木柱上的加固件松动、脱落的原因有可能为铁件材料松弛形成，也有可能是外力作用过大而现有的铁件拉接强度不足，导致加固失效。



图二　脊瓜柱剪应力分布图（单位：MPa）

八　文化部文物保护科研所：《中国古建筑修缮技术》，北京：中国建筑工业出版社，一九八三年。

九　故宫博物院编：《武英殿（一）》，北京：紫禁城出版社，二〇一一年。

五　古建筑木柱的加固方法

㈠替换加固

该法是在柱子糟朽、虫蛀或开裂非常严重，必须更换构件的情况下采用的加固措施。选择的新料尽量与旧料同一树种及尺寸相同。抽换柱子时，首先应清除干净柱子周边的杂物，然后把窗扇、抱框等与柱子有关联的构件拆下，再在梁端部放千斤顶。转动千斤顶，将梁抬升至使原有柱子不再承重的高度，再将旧柱拆下，把新柱立直，最后按中线垂直吊正[一〇]。如果梁底原有的海眼大小深浅与新换柱子的馒头榫（柱头与梁垂直相交时使用的榫，与之相对应的是梁头底面的海眼）不合适，可将榫头略加修理使其合适（图三）。

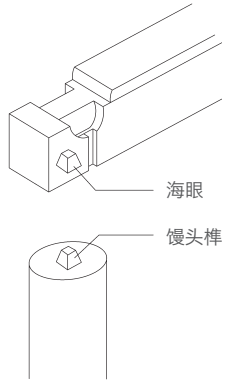
㈡墩接加固

墩接柱根是木柱修缮的一种常用方法。做法有两种：柱根包镶和墩接[一一]。一般来说，柱根占圆周面积一半或一半以上部分糟朽，糟朽深度不超过柱径的五分之一时，可采取包镶的做法。包镶即用锯、扁铲等工具将糟朽的表皮剔除干净，然后按剔凿深度、长度及柱子周长，制作出包镶料（要求材质尽量与原有木柱材料相同），包在柱心外围，使之与柱子外径一样，平整浑圆，然后用铁箍将包镶部分缠箍结实。当柱根糟朽严重（糟朽面积占柱的截面的二分之一，或有柱心糟朽现象，糟朽高度在柱高的五分之一至三分之一）时，宜采用墩接方法。墩接是指将柱子的糟朽部分截掉，换上新料。常见的做法是刻半榫墩接（俗称巴掌榫）（图四），即将接在一起的柱料各刻去直径的二分之一作为搭接部分，搭接长度一般为柱径的一到一·五倍，端头做半榫，以防止搭接部分移位；或者用抄手榫墩接（图五），方法是将柱子截面按十字线锯作四瓣，各剔除对角两瓣，然后对角插在一起。

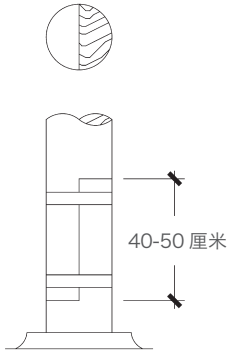
完成柱的墩接加固后，对木柱及加固铁件应涂刷防锈（腐）漆，以避免糟朽、锈蚀问题的再次出现。

㈢化学加固

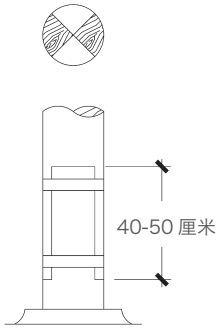
包括粘接和灌注两种做法[一二]。对于柱表皮的损伤或缺失，可采用环氧树脂粘接方法。具体做法为：先剔除柱的损伤部分，制作同样尺寸的新料，然后用环氧树脂胶（建议配合比为 E-44 环氧树脂：多乙烯多胺：二甲苯 =100:13—16:5—10）将新料粘接。



图三　馒头榫和海眼示意图



图四　刻半榫示意图



图五　抄手榫示意图

一〇　薛玉宝：《用环氧树脂加固处理古建筑木构件的方法》，《古建园林技术》，二〇〇九年第四期，第五六—五七页。

一一　参见注六、注九。

一二　参见注三、注一〇。

当柱的内部因虫蛀或腐朽形成中空时，若柱表层完好厚度不小于五十毫米，可采用灌注法加固。灌注材料可以是环氧树脂或不饱和聚酯树脂灌注剂（建议配合比为不饱和聚酯树脂过氧化环己酮浆：萘酸钴苯乙烯液：干燥石英粉 =100:4:2—4:80—120）。加固时要求在柱中应力较小的部位开孔。若通长中空时，可先在柱脚凿方洞，洞宽宜小于一百二十毫米，再每隔五十毫米凿一洞眼，直至中空的顶端。在灌注前应将腐朽木块、碎屑清除干净。柱中空直径超过一百五十毫米时，应在中空部位填充木条或木块。加固时，先将调制好的灌注剂适量灌入劈裂的隙缝中，适度敲振木柱，使灌注剂浸透饱和，与木柱紧密结合，之后镶入加工好的木条或木块，将其捣实。补充灌注剂并振捣匀实至覆盖填充木条或木块为止。

㈣碳纤维加固[一三]

二十世纪六十年代以来，碳纤维（Carbon Fiber Reinforced Plastic，简称 CFRP）材料出现并逐渐应用于建筑加固工程中，且以 CFRP 布的形式应用较多（图六）。与古建筑加固木柱的一般方法对比，采用 CFRP 布的优越性体现在：

①墩接木柱更换构件时需要进行局部或全部落架（指将原有的大木构架卸下），这对构件可能造成损伤。而采用 CFRP 布材料粘贴于柱子的破坏区，可以增强其抗压性能，同时也避免了对古建筑的落架和调整复位，而且达到了良好的加固效果。

②铁件加固木柱虽然方法简单，但是容易造成局部二次受力（即柱子额外承担的铁件对柱子本身的约束力或嵌固力），同时也影响了外观。采用 CFRP 布不仅解决了柱子受力不足的问题，而且对结构外观不产生影响。

③嵌补木柱裂缝仅能解决其表面问题，因为嵌补是很难深入柱子裂缝深层的。而 CFRP 布加固则不存在这个问题，通过在裂缝区包裹 CFRP 布材料，利用 CFRP 布高强度的特征来参与受力并控制裂缝的扩展，达到修复木柱的效果。

CFRP 布加固木柱的原理是：将 CFRP 布缠绕粘贴在木柱的表面，在柱子受轴力（方向与柱子轴线重合的力）并产生横向膨胀时纤维被动提供侧向约束力，使轴压柱（受到受力方向与柱轴线重合的压力的柱子）处于三向受压状态，从而提高柱子的受力性能。采用 CFRP 布对轴压柱进行约束加固的主要方

图六—一　CFRP 布完全包裹木柱形态示意图

图六—二　CFRP 布螺旋式部分包裹木柱形态示意图

图六—三　CFRP 布间断式部分包裹木柱形态示意图

一三　周乾：《CFRP 加固木柱轴压性能理论研究》，《低温建筑技术》，二〇〇九年第九期，第五一—五四页。

式有三种：

①包裹式：包裹式是最普遍采用的技术，将 CFRP 布用聚合物树脂浸渍，一层层地包裹在柱的周围，主纤维方向与柱轴线相垂直。

②缠绕式：缠绕的原理与包裹式类似，只是缠绕时用连续的纤维束（CFRP 布）代替片材，目前国内还没有应用此技术加固柱的工程实例。

③预制外套式：为防止方形柱角处的纤维易因应力集中而造成提前破坏，可预制圆形或者椭圆形的 CFRP 布外套，将方形截面柱改形成圆形或者椭圆形，以提高约束效应。

㈤柱顶石加固

当柱顶石表层因风化面积过大而影响柱子承载力时，应予以更换。当柱顶石严重风化或缺损时可进行修补，原则是要保证补配材料的强度与原柱顶石相当，同时颜色也相近。传统的补强材料为：白蜡、黄蜡、芸香、木炭及石面（与原有石材相同的材料磨成的粉末）按一定比例混合，加温溶化后即可使用[一四]。

六　结论

在采取了现场勘查与归纳分析相结合的方法，探讨了故宫古建筑柱子的典型残损问题与加固方法后，可得出如下的结论：

㈠故宫古建筑木柱的典型残损问题包括糟朽、开裂、柱顶石风化、加固件松动等。

㈡木柱残损的产生原因与柱子、柱顶石及加固件材料，柱子构造，施工工艺、外力作用等因素相关。

㈢对于残损的木柱，可采用替换、墩接、化学、CFRP 布等方法加固；对于风化的柱顶石，应予以及时的更换或修补。

在意识到了这些问题，并及时解决之后，相信故宫古建筑会再度焕发青春，寿命得以延长，以更完美的姿态呈现在世人面前。

一四　参见注七。