

引人注目的 紧固件

位于瑞士欧洲核子研究组织的大型强子对撞机，是世界上最大、最复杂的科学仪器之一。对撞机以无法想象的力量粉碎亚原子粒子，产生的数据可以帮助物理学家回答物理学的一些重大根本性问题，解释宇宙起源的奥秘。钼对于这些革命性实验的成功实施，发挥了重要的作用。

➤ 红线标出了大型强子对撞机地下环形隧道的位置，前景为大型强子对撞机偶极子模型。© 2009–2020 CERN



➤ 工程师测试一个LHC超级磁体的电气系统

世界上最大的粒子加速器——大型强子对撞机（LHC）在升级改造中，使用了超过25万个高强度、特种316L不锈钢紧固件。大型强子对撞机位于瑞士日内瓦附近，是一个非常巨大的装置，物理学家用它来探索宇宙中最小粒子的奥秘。对撞机的能量太强大，以至于一开始有人担心它会产生一个能够吞噬大块星系的黑洞。幸运的是，加速器成功地撞碎了质子和离子，为粒子物理学研究提供了数据，并没有出现人们担心的事件。但是科学家们希望能提高加速器粒子束的强度，为即将开始新项目做准备，且大型强子对撞机到了进行常规维护的时候，因此，2018年底开始对加速器进行维护升级。

维护升级项目预计将花费两年时间。除了进行系统的维护外，此次升级将使研究人员能够收集比过去多十倍的数据。升级项目包括更换用来固定加速器真空管的紧固件。为了科学探索的顺利进行，这些紧固件不得不经受很大的考验，例如承受从 -271°C 到 300°C 的温度范围。升级更换是必要的，因为含铝材料制成的连接件将帮助确保实验能够在未来继续进行。

极限设施

大型强子对撞机于2008年12月开始首次运行，是欧洲核子研究组织粒子加速系统的最新成员。它由27公里长的超导磁体环组成。在内部，由超导磁体驱动的两束粒子束以接近光速的速度彼此撞击。碰撞之前，粒子束在保持超高真空的两个单独的粒子束管中反向传播。液氮将超导磁体冷却到低于外太空的温度： -271.3 摄氏度。这种极端冷却是必需的，这样磁体才能保持恒定、高能、超导的状态，而不产生电阻或能量损失。为了应对这些极端条件，对撞机中使用的材料必须是地球上最耐用的材料之一。

大型强子对撞机通过将移动航空母舰的能量集中在不到一毫米宽的粒子束中，使质子和离子分离，希望能找到亚原子颗粒，并研究其性能。2012年，这个粒子加速器发现了传说中的“上帝粒子”——希格斯玻色子粒子。这一开创性的发现填补了粒子物理学标准模型理论的空白，标准模型是一个有五十年历史的古老理论，它解释了宇宙中的质量从何而来。利用大型强子对撞机提供的数据，已有2000多篇粒子物理学领域的论文发表。科学探索通常会发现更多的问题。科学家希望将每秒碰撞次数加倍，从而可以回答一些新问题。升级之后的大型强子对撞机有望每年产生超过1500万希格斯玻色子粒子，而2017年的数量为300万。提高希格斯玻色子的数量，所提供的数据将大大增加，且有更多的机会来观察新现象。

升级大型强子对撞机

关闭并准备对大型强子对撞机进行维护需要世界上数千名科学家的合作。为了更换20多个超导磁体和装置的其他部件，团队必须安装升降机到地下100米。仅仅将冷到难以想象的加速器加热到室温就花费了大约四个月的时间，清除了超过100吨的液氮。无疑，大型强子对撞机的维护是一个巨大的考验，需要动用无数资源。

因此，使用寿命长的高强度部件，例如钼合金化材料的紧固件，是极其必要的。

强悍的紧固件

大型强子对撞机升级中使用的紧固件有特殊要求，与标准316L不锈钢紧固件有很大的不同。这些紧固件必须强度比316L更高且磁导率要低得多。它们的最低抗拉强度需要达到1000 MPa，而相关ISO标准规定的最高抗拉强度为800 MPa。它们的屈服强度应至少为900 MPa，而现有标准规定是600 MPa。这些紧固件必须是非磁性的，以避免在加速过程中扰乱粒子的运动。为了使紧固件集这些杰出的性能于一身，其生产商瑞典Bumax公司规定了较高的钼含量：2.5%–3%，而通常316L的钼含量为2%–2.5%。通过降低不锈钢的磁导

10亿： 每秒碰撞次数

2008年11月10日： LHC 第一次测试粒子束

26695米： LHC超导磁体环的长度

约25万： 设施升级中将更换的紧固件个数

2178： 保持LHC运行每天所需要的人员数量

600千兆瓦： LHC年均耗电量

–271.3： LHC磁体偶极子运行温度

11245： 每秒钟一个粒子环行超导磁体环的次数

4%： 宇宙中已知有形物质的估计百分比

96%： 宇宙中由未知粒子组成部分的估计百分比

率，使紧固件几乎无磁性，钼在这个过程中发挥了核心作用。

由奥氏体不锈钢制成的紧固件必须进行冷加工，以达到承受对撞机极致的温度和力量等工作条件所需的抗拉强度。但是，在这种冷加工强化的过程中，316L不锈钢的一部分非磁性奥氏体金相组织会转变为有磁性的形变马氏体组织。这些微小的缺陷可能会干扰超导磁体之间的粒子流，从而阻碍加速器的功能。较高的钼含量有助于防止这种马氏体转变。这样得到的是超高强度的紧固件，同时还不影响对撞机中的磁力。

防止马氏体转变对于对撞机本身的结构也十分重要：所以，27.4公里长、容纳粒子束的真空管由316LN不锈钢制成。它是316不锈钢的衍生牌号，较高的氮含量使材料具有更高的强度并防止马氏体形成。同样，如果磁导率不够低，加

速器将无法正常工作。因此，在整个加速器的设计中，特种奥氏体不锈钢被广泛应用。

继续碰撞

大型强子对撞机预计将在2021年恢复运行。来自13个国家29个机构的科学家将开始新研究项目，每秒原子碰撞的次数将增加一倍。使用新的含钼紧固件后，粒子可以自由粉碎，而不会受到磁干扰。紧固件的强度意味着它们可以轻松承受升级后粒子束的强度。未来也许将有更具革命性的新发现问世，而钼也为解释宇宙奥秘做出了重要贡献。（Karlee Williston）



➤ 各种尺寸的紧固件螺栓特写，类似于LHC升级所使用的螺栓。© Bumax