



北海潜水员公司

NORDSEETAUCHER GmbH

高压隧道作业与潜水®



高压环境作业 盾构机潜水与待压作业

在 40 米深处，即压力相当于 4 巴，传统作业方式对待压作业工程师在作业区域内进行压缩空气作业已不再理想。况且，下一代隧道将比目前隧道长度更长、地理位置更深，潜水员和待压作业工程师发挥主导作用将是未来高压作业的必然趋势。

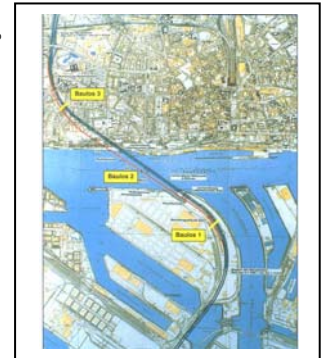
在软土或软岩地质，隧道作业的主要挑战来自高压地下水。为防止地下水大量渗漏、确保掌子面稳定、并能提供刀盘维保通道，盾构机的设计和操作都因此而深受影响，也同时导致了工期的延长以及预算的增加。设计方在规划隧道位置时应将此考虑在内。



德国易北河第四隧道盾构机直径达 14.2 米，隧道最薄浅埋断仅为 7 米，地下水压高达 4.5 巴，因此易北河第四隧道成为泥水盾构机施工的里程碑。盾构机在隧道南部 2561 米的挖掘地质是由沙、泥灰和大圆石组成的冰积土，而隧道北部段土质为更为连续的黏性土，有泥沙，含沙砾和大圆石的黏土等。

土质的高磨损性导致了刀盘维保进仓作业的频繁进行。我们发现不仅刀具磨损严重，而且刀盘背面也由于持续与开挖仓底部沉积的泥渣不断摩擦而磨损严重。因此压缩空气待压修复作业耗时大量，总耗时 6 周。

在易北河隧道最深处，作业人员在开挖仓中的工作压力最高达到 4.5 巴。



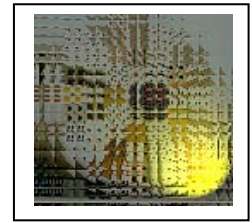
此项目总共进仓作业时间为 10920 小时，进仓人次为 2738 次，进仓压力最高达到 4.5 巴，其中 237 人次的进仓压力大于 3.6 巴。减压病报告总共为 21 例，均在小于 3.6 巴的情况下发生。



现要使用治疗仓的情况。

易北河第四隧道第一次使用了治疗仓。治疗仓通过连接上北大西洋公约 (NATO) 法兰后再连接到盾构机的压缩空气闸，这样就伤员可以在待压条件下被运送至地面。但十分幸运的是，此次施工并未出

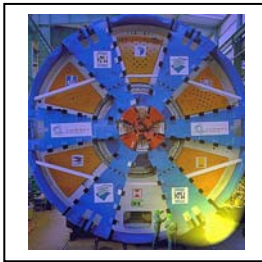




德国威悉河隧道是德国不来梅威悉河北部的 1640 米双隧道。隧道施工采用的是直径为 11.71 米的泥水盾构，施工地质为冰积土。冰积土主要有弱土且部分土况十分松散，含硬花岗岩但沙含量少的大圆石，在浅埋段土质为十分松软的黏土和泥煤。在易北河下，发现的塑性黏土已相互黏附成纹理坚硬，剪切强度已达到软弱岩层。

隧道仰拱块最低点为海平面下 40 米。由于北海的潮汐，河面水位在海平面上下 2 米处浮动，也曾最高达到高于海平面 5.2 米。隧道走势中，地下水压与隧道仰拱块之间压力大致在 2.5 巴至 4.0 巴之间，在暴潮时水压高达至 4.5 巴。

刀盘维修工作是在大于 4.5 巴的压缩空气压力下展开的，而碎石机的维修则是在大于 5.0 巴压力中进行。此外，潜水员也能适应在膨润土压力大于 5.0 巴环境下工作。常规空气压缩（非混合气体）和吸氧减压操作得顺利完成。在总共 5000 小时的待压作业和 1400 人次的进仓作业中，其中有 600 小时的作业压力大于 3.6 巴。减压病报告为 15 例，均在低于 3.6 巴的情况下发生。



荷兰 Westerschelde 隧道全长 6.6 千米，它是隧道施工中第一个采用饱和潜水进入开挖仓的隧道项目。两条隧道使用的是 11.33m 的泥水盾构。隧道地质由中等至良好的中空第四纪砂和大约 2 千米长的大量第三硬泥土质组成。在隧道最深处的黏土下，同时也发现大量第三金沙。

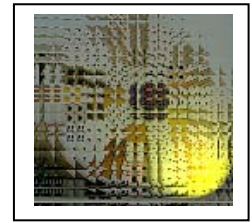
隧道仰拱块最低点为海平面下 60m，水位大致都在海平面上下 2.5 米浮动，也曾最大超出海平面 4 米。隧道覆土在 28m 至 40m 不等。

当我们北海潜水员公司被邀请参与 Westerschelde 双隧道施工时，我们丝毫没有犹豫，因为我们深知这是一次我们把易北河第四隧道和威悉河隧道所取得经验用于实践的最佳机会。可我们面对的问题却又有所不同：易北河隧道的工作压力最高为 4.5 巴，而威悉河隧道的工作也只是在最高 5.0 巴的压力下进行的。但我们得知 Westerschelde 隧道的工作压力将高达 8.5 巴。

鉴于在 8.5 巴的压缩空气下，呼吸空气中的氮气会使人引起昏迷，所以在 8.5 巴的压力下无法开展压缩空气作业。因此，从一开始我们就计划使用混合气体作业。

几十年来，大量的已经证实且被应用在国际商业海上潜水的潜水方案和潜水程序，同样也能在大于 5.0 巴的盾构类隧道施工中。

其中就有混合气体的使用。这些混合气体是用氧气和不同惰性气体按照不同压力要求配比而成，它能使潜水员在待压条件下连续工作几天甚至几周，这种方法也称作饱和潜水法。在压力为 3.0 巴到 6.0 巴的条件下，饱和潜水作业也可以把压缩气体当成工作气体，此种方案也是将来潜水的趋势。混合气体作业的安全成功进行需要十分周密的盾构机准备及必要的后勤配合。



鉴于隧道覆土浅薄，在刀盘的开挖仓中降低膨润土压力将变的十分危险。因此，受过专业训练的潜水员将进行刀具的检测和更换工作，以防需要开展修补或保养工作。

Westerschelde 项目中总共进行了 6 此饱和潜水作业，合计时间为 40 天，每次减压时间为 4 天。在混合气体条件下的进仓作业总共 10 次。此外还有 546 人次，合计 1652 小时的普通压缩空气进仓。减压病报告为 5 例，并且全部都在地面治疗仓治愈。

膨润土潜水

准备

为使潜水员能够在膨润土中进行潜水作业，盾构机压力墙需安装特殊法兰接口，这些是潜水员进仓后的呼吸管路、备用气体、通讯线路、照明线路、视频和数据传送线路、以及冲洗潜水面罩空气调节器的水路准备的。



潜水面罩



一般海上潜水用的潜水面罩经过改良可被使用在膨润土潜水中。为使潜水员在膨润土中——一种黏土悬浮物，呼吸更加简易，并减小呼吸阻力，面罩空气调节器配上了水冲洗装置。持续的新鲜水供给同时也能防止呼吸黏膜黏附在一起。

脐带

正如这名称所代表的，脐带是潜水员的生命线。脐带由各种着色不同的管路和线路组成，其中含供气管路、储气管路、供水管路、通讯线路，照明线路，视频与数据传送线路。

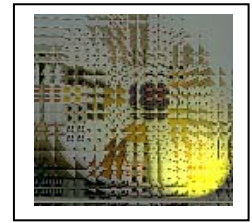


饱和条件下潜水与工作

生活仓

饱和潜水即指长时间在高压条件下生活与工作，例如超过 28 天，但目前暂不明确人类可以停留的最长时间。为满足潜水员和工程师能在此条件下工作，一个加压的分居室的生活仓。它最大能容纳 9 名潜水员和工程师，里面应配置浴室，卧室和洗手间等设施。





穿梭闸



鉴于技术和卫生原因，在隧道区域建立饱和潜水员生活仓且将生活仓与盾构机相连接并不可行，因此则需要配置一个移动运输装置——穿梭闸。穿梭闸将潜水员从隧道外的生活仓接往隧道，然后潜水员再登入盾构机。每个穿梭闸最多可运送 4 个潜水员、技师和工程师。只要穿梭闸抵达盾构机，穿梭闸内的人即可进入盾构机控制室和开挖舱进行刀盘的检测和维修保养工作了。

高压潜水面罩

与工作压力为 4.5 巴的易北河第四隧道和工作压力为 5.0 巴的威悉河隧道不同的是，我们并不能在 Westersheld 隧道中进行压缩空气潜水作业。取而代之的是由氦气、氮气和氧气组成的混合气体。潜水员所有配置也与前面的项目配置大同小异。但是，在 Westershelde 隧道潜水作业中，我们选用了一种更轻的，只在化学工业中用的面罩。这些面罩是为此项目特别改进的，在市场上并不流通。在项目开始前，关于面罩的测试就已在比利时泽布勒赫海军高压中心进行。这种特制的面罩拥有两条呼气调节装置以及一个可控冷却系统。由于在隧道掌子面的温度可以高达 50 摄氏度，所以冷却系统就十分必要了。

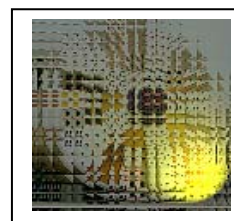


面罩是由高压面罩生产商瑞士 Composite Beat Engel 公司设计制造的，经过和我们北海潜水员公司的密切合作已证明此面罩十分可靠。面罩内有一个转换装置，它可将面罩在一小时内可转换成可控呼吸面罩。每个面罩都配有与地面供气管路连接的借口、独立的紧急供气借口以及通讯装置。这种面罩现在已在环境条件十分恶劣的高压作业中使用，例如隧道作业，使用者对其十分满意。



中国南京长江隧道是在中国南京的穿越长江的隧道项目，为全长 2990 米的双隧道，使用的是两台直径为 14.96 米的泥水盾构，掘进地质为黏土和细沙组成的软冲积层。

隧道仰供块最深处低于海平面 65 米，由于潮汐影响，河面水位在正负海平面 1.5 米范围内波动。



此项目的主要施工任务为压缩气体内进行焊接作业。根据我们以往的研究与经验，在压缩气体内进行焊接作业并不成问题。但由于此次刀盘六个刀臂的铲刀均需翻新，所以任务十分艰巨。在焊接进行前，刀盘边侧需焊接支撑。为此，我们全天候日夜连续工作了 12 周。工作压力已经达到 5.4 巴，为稳定压力，我们选用了添加了高密度、高黏稠度的混合物的膨润土。

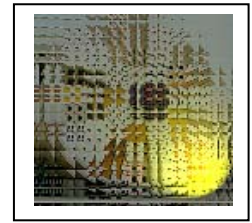


焊接工作中，我们采用了最新设计的面罩。面罩配有三条供气管路，2 个调节器、1 条自由管路、通讯线路和带传感器的焊接护罩。

刀盘维修作业的压力最高达到 5.4 巴，碎石机维修作业压力最高至 6.5 巴，但普通压缩空气作业（非混合气体）以及含氧减压都顺利进行。在总共 4000 小时的待压作业中，共进行了 850 人次

进仓作业，减压病报告仅为 3 例。





概括

大于 4 巴压力的高压地下水压力使隧道作业更加困难，对刀具设计和加工技艺也提出更高要求。

盾构机、隧道设备和隧道作业程序的设计中，其性能之一应该可以提供可靠充足的、且持续的支撑压力，用以在掘进或进仓是平衡地下水压。

隧道掘进如果是在硬土或岩石中进行，高压地下水对泥水盾构或 EPB 盾构都将不会产生大问题，因为隧道掌子面可以保持稳定，而且土质渗透性低阻住了地下水的渗出。

如果在粗粒土或不稳定岩石层中掘进，则需要可以提供可靠稳定的掌子面支撑保持掌子面稳定并避免在进仓和掘进中泥土大面积塌方。对于泥水盾构来说，取得稳定的掌子面将会相对容易一些。

地下水压力大小，土质磨损度打下已经隧道不同地质的长度决定了进仓时的进仓条件，所以盾构机应该要能满足普通压缩空气作业、混合气体作业或饱和潜水作业，不同方式的潜水作业选择取决于压力要求和进仓工作时间的长短。

只有在地质条件十分坚硬、渗水度十分低或者强岩层中，才能试图冒险在普通压力下进仓作业。但是，现场同时也应保证能够在需要时随时提供压缩气体支撑或地面治疗仓救护。

以往的经验已经证实了饱和潜水作业是一种十分成功可行的隧道高压潜水作业，同时，在 6 压缩空气下作业的压力可以高达 6.5 巴，但此时的工作效率并不十分乐观。

隧道施工和盾构机生产商**德国海瑞克公司**、高压作业医疗顾问公司 **DR. FAESECKE**，德国高压训练中心，德国船级检验公司 **GERMANISCHER LLOYD**，设计和生产商 **COMPOSITE BEAT ENGEL**，和北海潜水员公司的之间的合作密切频繁，我们也希望继续加强将来的合作。我们潜水人员、工程师、高压作业技师在一系列破土工程中获得最佳的训练效果，而持续的训练以及隧道挖掘机的不断改良给我们提供了一个十分光明的隧道施工未来：更深、更大、更长。

