

News & Highlights

尾矿坝溃决的剖析与未来的警示

Jane Palmer

Senior Technology Writer

2019年1月25日，位于巴西布鲁玛丁霍附近的Córrego do Feijão铁矿的尾矿坝发生了灾难性的破坏，下游释放出巨大的有毒泥浆（图1）。污泥浪潮造成237人死亡，使该事件成为历史上最致命的尾矿坝灾害之一[1,2]。

尾矿是采矿作业中产生的湿废物，大坝限制了这种细碎且往往有毒的碎屑的储层。最常见的尾矿坝——也就是所谓的“上游”坝——只不过是一堆厚厚的淤泥，随着废物的累积，这些淤泥越堆越高。巴西淡水河谷公司拥有并经营的Córrego do Feijão矿上游大坝高87 m，蓄积了近 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的废料[3]。

事实证明，尾矿坝极易发生事故[4]。加拿大里贾纳大学环境系统工程教授Shahid Azam和克利夫顿联合公司（位于加拿大里贾纳）环境工程师Qiren Li在2010年对尾矿坝百年来的溃决进行了广泛的研究[4]，发现在此期间，超过1/100的尾矿坝（占世界18 401个尾矿矿场的1.2%）坍塌。相比之下，传统蓄水坝的溃坝率为万分之一。

多种因素可能导致尾矿坝的溃决。这些物质可能会慢慢泄漏出去，地震可能会撼动大坝及其地基发生晃动，而过快地填满水库可能会导致水库溢水和维修问



图1. 2019年1月25日，巴西布鲁玛丁霍附近的Córrego do Feijão铁矿尾矿坝（箭头处）坍塌，导致一波有毒泥浆顺流而下，造成237人死亡，269.84 hm^2 的土地被毁，这是历史上最致命的尾矿坝灾难之一。图片来源：Vinicius Mendonça/Ibama（CC-BY-SA-2.0）。

题,从而导致过量的水积聚起来。完善的工程设计是不够的;对案例的分析表明,管理不善和经营策略不当也是导致大坝溃坝的因素[5]。在布鲁玛丁霍大坝发生灾难后,巴西当局下令禁止在该国上游修建大坝,并已着手调查为何大坝在宣布安全后仅几个月就发生了故障[5]。据报道,在故障前的几个月里,公司员工对不安全环境的投诉没有得到重视[6]。

除了给淡水河谷造成约 4.8×10^9 美元的损失,并迫使其首席执行官和其他几位高管在3月份辞职外[7],这场灾难还促使全球矿业界呼吁采取行动。4月,国际采矿与金属理事会(ICMM)、责任投资原则(PRI)和联合国环境规划署(UNEP)对全球矿山尾矿储存设施进行了独立审查[8]。审查的目的是为尾矿库设施的安全设计和管理建立一个国际标准,该标准可适用于所有尾矿坝,而不受其所在地或运营人的影响。

“该评估同意的新标准将是ICMM成员的强制性标准,并将在其全球所有运营资产上采用,”ICMM首席执行官Tom Butler表示,“我希望非成员国也能签署该标准。”

撇开设计、运营和维护问题不谈,布鲁玛丁霍矿难还提高了采矿工程师对气候变化持续影响的认识,气候变化可能导致更强的降水。尾矿坝由于异常多雨,如果排水不足,大部分为固体的尾矿坝会液化——这一过程被称为液化,它增加了对潮湿、饱和的大坝墙的压力,并增加了大坝变弱和倒塌的风险。在Azam和Li [4] 2010年的研究中,他们在对218个大坝故障的仔细检查中发现,异常的强降雨是一个常见原因。此外,过量降雨的影响随时间增长而增加:在2000年以前,25%的故障与过量降雨有关;2000年以后,比例上升到40% [4]。

“毫无疑问,这是一个与不稳定的降雨有关的问题,”Butler说,“人们可能会为5000年一遇的事件设计这些水坝,但你会不断听到每10年就会出现5000年一遇的事件。”

尽管尾矿坝很可能受到影响,但与气候变化相关的极端天气事件可能会导致排水系统、交通网络和建筑物等其他基础设施无法按设计运行,从而可能造成人员伤亡和广泛而代价惨重的破坏。

马里兰大学土木与环境工程教授、技术与系统管理中心主任Bilal Ayyub说:“仅在美国,我们每年就投入了价值 1.3×10^{12} 美元的基础设施建设,这是一种紧迫感。而且我可以向你们保证,大部分建造的设计并未考虑到气候变化。”

由于担心气候变化的潜在影响,美国土木工程师协会(ASCE)于2011年成立了适应气候变化委员会(CACC)。Ayyub是该委员会的创始成员和前任主席,该委员会的重点是建立新的做法,帮助土木工程师预测与气候变化相关的温度、降雨、风暴强度和海平面上升的变化。

这些变化可能以多种方式造成损害。例如,在世界各地的沿海地区,大多数基础设施都位于海岸附近。当暴风雨发生时,海平面上升会产生更大的浪涌和巨浪,这些会淹没建筑物和交通系统,淹没排水系统,而这些排水系统的设计初衷并不是为了应对不断增加的洪水[10]。Ayyub在上海同济大学担任荣誉教授两年,目前正在调查高水位对上海地铁系统的潜在影响。

Ayyub还担任*Climate-Resilient Infrastructure: Adaptive Design and Risk Management* 的编辑,这是CACC在2018年出版的手册,为“适应性设计”和风险管理概念的标准和指南的制定奠定了基础[11]。该手册启动了ASCE进程,根据美国国家标准协会的要求,为应对气候相关危害的可持续基础设施制定标准。Ayyub说,这项工作可能需要几个月到几年的时间才能完成,这取决于利益攸关方达成共识所需要的辩论程度。

当工程师计划一个可能使用寿命为100年的新项目时,他们的设计决策是基于当前对气候变化的估计。但这些估计数字可能会随着温室气体排放的变化而波动,这些变化与全球人口和能源使用等因素有关,预计的影响也会有所不同。CACC手册建议工程师应该每隔几年重新审视一个项目,检查设计背后的假设是否仍然适用。Ayyub说:“项目应该有内置的功能,这样如果需要加强的话,就不需要拆除,这样我们就可以利用最初投入的土地来增加或扩建。”

虽然布鲁玛丁霍灾难很难被解释,因为“雨太大了”,但在工程设计和维护中考虑气候变化的必要性不容忽视。持续的监测变得越来越重要,特别是对于像尾矿坝这样的动力更强、风险更大的基础设施。Butler说:“重要的是要知道是否会发生危及人们生命的事情。”

References

- [1] Polícia Civil registra 237 mortos identificados após tragédia em Brumadinho [Internet]. Belo Horizonte: Jornal Estado de Minas; 2019 May 7 [cited 2019 May 23]. Available from: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/05/07/interna_gerais.1051902/policia-registra-237-mortos-identificados-apos-tragediabrumadinho.shtml. Portuguese.
- [2] World mine tailings failures—from 1915 [Internet]. Maine: World Mine Tailings Failures; [cited 2019 Mar 1]. Available from: <https://>

- worldminetailingsfailures.org/.
- [3] Petley D. The scale of the tailings dam collapse at Feijão mine in Brumadinho, Brazil. 2019 Jan 27 [cited 2019 May 8]. In: The Landslide Blog [Internet]. Washington, DC: American Geophysical Union. Available from: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2019/01/27/brumadinho-1>.
- [4] Azam S, Li Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotech News* 2010;28(4):50–4.
- [5] Santamarina JC, Torres-Cruz LA, Bachus RC. Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science* 2019;364(6440):526–8.
- [6] Darlington S, Glanz J, Andreoni M, Bloch M, Peçanha S, Singhvi A, et al. Brumadinho dam collapse: a tidal wave of mud [Internet]. New York: The New York Times; 2019 Feb 9 [cited 2019 Jun 5]. Available from: <https://www.nytimes.com/interactive/2019/02/09/world/americas/brazil-dam-collapse.html>.
- [7] Londoño E, Darlington S. Dam at Brazil mine could burst soon, officials warn [Internet]. New York: The New York Times; 2019 May 17 [cited 2019 Jun 5]. Available from: <https://www.nytimes.com/2019/05/17/world/americas/brazil-mine-dam-collapse.html>.
- [8] Professor Bruno Oberle to chair independent tailings review [Internet]. London: International Council on Mining and Metals; 2019 Apr 24 [cited 2019 Jun 4]. Available from: <https://www.icmm.com/en-gb/news/2019/chairof-independent-tailings-review-announced>.
- [9] Pendergrass AG, Knutti R. The uneven nature of daily precipitation and its change. *Geophys Res Lett* 2018;45(21):11980–8.
- [10] Ghanbari M, Arabi M, Obeysekera J, Sweet W. A coherent statistical model for coastal flood frequency analysis under nonstationary sea level conditions. *Earth's Future* 2019;7(2):162–77.
- [11] Committee on Adaptation to a Changing Climate. Climate-resilient infrastructure: adaptive design and risk management. Ayyub BM, editor. Reston: American Society of Civil Engineers; 2018.