



## Vale Inco公司的 Creighton 矿山： 每日掘进更深

拥有 107 年历史的 Creighton 矿山是位于加拿大安大略萨德伯里 (Sudbury) 地区 Vale Inco 公司六大矿山之一——而且由于其较高的矿石品位、采掘年限、储藏量及现有基础设施，成为第二最盈利矿山。Creighton 唯一的不足就是其深度——及将矿石输送到地面的成本不断增加。

该矿场位于大萨德伯里市西部、2,400 米 (7,800 英尺) 深处，是加拿大最深的矿山之一——伴随这一特点的是诸多挑战：较高的岩石应力决定了开采方法，该方法旨在将次表层地震活动的影响降至最低，较高的原岩温度促使采用了新颖的“冰洞”冷却网络，从而将新鲜空气泵入矿坑。

### 发现庞大的矿体

Creighton 的铜镍硫化矿体于 1856 年被发现，当时 A.P. Salter 观察到罗盘读数出现显著偏差。1901 年，从露天矿坑开采出了第一块矿石。1906 年，开始地下回采，两年以后，停止露天作业，每天产量达到 725 吨 (800 短吨)。

### 改进开采方法

Creighton 开始地下开采作业之后的 100 多年以来，其开采方法不断变化，而且不断改进。留矿开采法一度让位于方框支架开采法、充填开采法、分段崩落采矿法和点柱开采法，之后又回归留矿开采法与下向机械化充填开采法。最近，则采用了大直径深孔爆破开采与垂直后退式开采相结合的方法。此外，装岩与支撑方法也同样得以发展。无轨作业、水力充填、间柱开采及引进胶结充填方法也都曾经在不同时期实施过。

自开采以来，已经从 Creighton 矿山开采了 1.55 亿吨 (1.71 亿短吨) 矿石——铜品位 1.23%，镍品位 1.59%。

为了便于作业，矿山被划分成若干个区。4 区是目前最高的作业区，从 1,100 米延伸到 1,650 米水平 (3,570 英尺到 5,400 英尺水平)，矿床在上方展现。5 区主要包括 1,650 米与 1,950 米水平之间的旧矿坑 (5,400 英尺与 6,400 英尺水平之间)。6 区包括大面积矿体，已经从 1,950 米水平推进到 2,390 米水平 (6,400 英尺水平推进到 7,840 英尺水平)，矿床在深部展现。此外，目前重新启用了 3 号竖井作为培训中心，并计划于 2021 年重新开采。

## 确定矿石类型

Creighton 位于萨德伯里杂岩体 (SIC) 的南区。萨德伯里杂岩体的岩石有 18.5 亿年历史，岩体出露于一个 72 公里 (45 英里) 长轴，27 公里 (17 英里) 短轴的椭圆环内。

广义上，Creighton 主要有三类矿化物：次层苏长岩或石英闪长岩上的硫化物；位于底板岩层的高品位硫化物；以及与剪切相伴随的硫化物。Creighton 矿体包含的主要贱金属矿物是磁黄铁矿  $Fe(1-x)S$ 、镍黄铁矿 (Fe, Ni) $9S8$  和黄铜矿 (CuFeS<sub>2</sub>)。近期对 2,377 米 (7,800 英尺) 水平以下的勘探传出令人鼓舞的结果，预期将极大延长矿山的开采寿命。

2007 的产量达到 793,000 吨 (873,617 短吨)：铜品位 1.62%，镍品位 2.8%。

“似乎在目前工作面以下还有充分的未动用矿化物，” Creighton 的首席矿地质师 Dave Andrews 解释道。“这些较深层矿石可能位于一个更多花岗岩的下盘杂岩上。这一 (矿石形态) 过渡对开采方法的影响与矿化物集中于狭窄区域相随，因此，我们可能必须缩减我们的回采规模，甚至使用更为选择性的方法来替代大量采矿法。”

Creighton 矿石含多种金属，其中包括镍、铜、铂、钯、铍、钨、钽、金与银，但大部分是镍和铜。

Creighton 矿山使用大量采矿与选择性开采法。

## 使用选择性开采法

选择性开采使用下向机械化充填 (MCF) 法，主要用于水平层区域和狭窄高品位细碎带。目前在 Creighton 使用选择性开采法开采的矿石约占 5%。

在下向机械化充填法中，回采工作面从一个起始 7.5 米宽 (25 英尺宽) 的矿槽在 4.5 米高 (15 英尺高) 的升降机中横向驱动。在两个回采工作面之间留下 5 × 6 米宽 (16 × 20 英尺宽) 的间柱。近期，下向机械化充填法已经改进为下向机械化充填掘进法，实现纵向开采矿体。选择性开采法目前应用于 5 区 (即 1,650 米与 1,950 米水平或 5,400 英尺与 6,400 英尺水平之间的矿坑)。

## 应用大量采矿法

如果矿体很大而且急倾斜，则使用大量采矿法，目前 Creighton 使用该方法开采的矿石约占 95%。首选大量采矿法为槽切开采法 (slot-slash)。

垂直后退式开采 (VRM) 于二十世纪八十年代中期引进，取代了充填开采法。经改进的垂直后退开采法 — 槽切开采法于二十世纪九十年代后期引进，取代了垂直后退开采法。从垂直后退开采法转而采用槽切法是为了将爆破次数减至最少，从而减少爆破导致的损害。这两种方法都是大量采矿法，运用了从顶坎钻出的 152 毫米 (6 英寸) 开采爆破孔一直穿透到底坎。在这些爆破孔内填满爆炸物并引爆，然后在底坎使用铲运机 (LHD) 铲起破碎的矿石并倒入矿石溜井。

在槽切开采法中，将使用一个 1.2 米 (4 英尺) 直径的天井钻孔在回采工作面钻出一个槽天井。回采工作面底部和槽天井周围的开采爆破孔将填满爆炸物并引爆。该方法形成更多的自由爆破面，使 Creighton 可以通过较少爆炸次数来开采回采工作面。

回采工作面的高度介于 26 至 61 米 (85 至 200 英尺) 之间，但“内部”水平尺寸则变化不大，因此从一个回采工作面开采的矿石介于 6,300 至 91,000 吨 (7,000 至 100,000 短吨) 之间。较低品位的矿石则可能需要二次爆破。

在 6 区域内，使用了下向顺序开采法，开采顺序向邻近前一充填回采工作面的下方进行。但是，下向开采法对顺序 (必须遵守严格的梯段) 和充填质量作出了限制，其显著优势则是由于没有形成底柱，从而减少了地震活动性。此外，由于将应力推出至拱座，因此不会产生永久性的坎/柱，并提升了回采率。

Vale Inco 的安大略营运业务规划与矿山技术服务经理 Alex Henderson 承认：“由于我们开采的深度，遵照此顺序显得尤其重要。否则，我们的开采工作很可能遭受可观的地震强度。在此区域，水平应力是垂直应力的两倍。我们希望随着深度增加，水平与垂直应力之间差异会变得均一。”

以开发为目的的钻探使用了两台臂架车装式钻机，功率为 6 立方米（8 立方码）的Caterpillar® R1700G 柴油铲运机在开发及回采工作面上装岩与运载。在较低区域则使用了卡车将破碎的矿石运输到 2,100 米水平（7,000 英尺水平）上的井下破碎站。

## 管理地震活动

Creighton 的采矿工程师考虑的主要问题之一就是开采/挖掘活动引起次表层地震活动的发生。

“我们遇到过的大部分重大的地震活动都是由于存在断层平移，” Henderson 解释道，“大部分地震活动都是在开采爆破期间或紧接其后发生的。每一班结束时，我们会留出若干小时让“地震衰减”，然后才重新进入该区域。我们会在矿山周围策略性地部署众多的地震检波器来监控这些区域，如果我们感觉衰减速度和期望的不一样，我们将临时关闭这一矿山区域，并延长重新进入该区域的等待时间。我们曾经多次遵照此规定并避免了导致工人受到伤害的事故。”

使用的开采方法由 Vale Inco 内部人员使用应力模式不断改进。“我们目前正在努力的一个主要创新”，矿山经理 Kelly Strong 解释道，“不是开采方法本身，而是其随后的支撑方法。Creighton 从来不会使用单一的矿山支撑系统。我们目前在开发与开采巷道和拖运区域采用了一系列的支撑系统。”

这些支撑系统包括如水力充填的尾砂胶结；喷射混凝土；喷射拱；加强支撑；和大直径缝管式锚杆— 46 毫米直径（1.8 英寸）未夹，相较于传统 34 毫米直径（1.3 英寸）未夹缝管式锚杆。

“这些‘肥大的’缝管式锚杆非常结实，无法用手安装，因此，我们采用了一人操作的锚杆钻车装置，该装置可钻孔并将这些 46 毫米直径（1.8 英寸）的锚杆安装到位，” Strong 说道。“这种锚杆钻车是一种远程操作机器，因此操作人员可以在距非支撑区域一定距离的小室进行操作。这点很重要，因为我们经常发现我们要在充填区下方挖掘巷道。”

充填区包含来自 Clarabelle 工厂的尾砂，这种尾砂作为浆料（40% 的固体物和 60% 的水）沿 40 厘米（16 英寸）直径的表面管注入一个存储槽并搅拌，等待与水泥/飞尘混合，然后注入地下进行充填。

“充填回采工作面时，我们必须分阶段进行，以使多余的水能通过岩石内缝隙渗透，” Strong 说道。“我们目前正在研究使用浆体进行充填，但到目前为止，并未在 Creighton 作出其商用决定。”

## 处理矿石与废物

所有矿石都使用一个 5,200 千瓦（7,000 匹马力）的双臂吊车和两个 13.5 吨（15 短吨）的铝质箕斗吊高到 9 号竖井。矿石从以下三个独立区域之一运到竖井：4、5 或 6 区。

- 4 区矿石被倾倒在矿石溜井，并送入一个在 1,500 米（5,000 英尺）水平的柴油机车。矿料将被运输 1,400 米（4,500 英尺）到一个破碎站，而破碎的矿石将被输送到 9 号竖井 1,600 米（5,280 英尺）水平的装载硐室。此水平装载硐室的输送速度为每小时 308 吨（340 短吨）。
- 5 区矿石被倾倒在矿石溜井，并送入一个在 1,950 米（6,400 英尺）水平的柴油机车。矿料将被运输到一个矿石溜井，并送入 2,000 米（6,600 英尺）水平的破碎站，而破碎的矿石将被输送到 9 号竖井 2,036 米（6,680 英尺）水平的装载硐室。
- 6 区矿石将通过卡车经斜坡道运输到 2,124 米（6,970 英尺）水平的堆放处。然后，此矿料被倾倒在 2,133 米（7,000 英尺）水平的破碎站，破碎的矿料与 5 区矿石一样，将（通过一个传输带）送入 9 号竖井 2,036 米（6,680 英尺）水平的装载硐室。此 2,036 米（6,680 英尺）水平装载硐室的运输速度为每小时 272 吨（300 短吨）。所有人员和矿料都通过 9 号竖井罐笼出入矿山。

矿山目前正寻求其它途径代替卡车沿斜坡道向上运输矿石。“我们矿山深处还有大量矿石，而且我们必须确保不会因为使用不合适及不可持续的矿石运输方法而浪费这里的财富，” Henderson 说道。“我们可能会讨论安装一个带装料斗的二级内部吊装系统，从而实现在竖井之间运输矿石。”

## 提供充分的通风

Creighton 9 号竖井矿坑使用一个通风系统实现每分钟送入 45,000 立方米（160 万立方英尺）新鲜空气。新鲜空气是从地面经过 3 号竖井附近的旧回采工作面上的破碎岩石送入，这由于寒冷的冬天和空气中的湿气而形成的“冰洞”。该冰洞起了热交换的作用，温暖了冬天的冷空气，冷却了夏天的热空气。次表层平均气温为摄氏 3 度（华氏 37 度），各季节略有差异。

采用冰洞系统后，到目前为止，还不用提供机械制冷。目前为止，在节约设施费用、维护和功耗方面效果显著。Creighton 是率先在加拿大采用此简化、新颖的冰洞冷却系统的矿山之一。

Strong 解释说：“由于在不久的将来，我们的工作将超出现有冷却系统的极限，我们必须寻求众多替代方案。其中一个选择就是使用昂贵的机械制冷设备来对我们的冰洞形成补充。替代方案应是扩展露天坑以增加用于送入地下的新鲜空气的汇集面积 / 冷却表面。但是，现在要说会选择哪个方案还为时过早。在这一方面的模拟工作继续进行。”

## 加工矿石

Creighton 矿山的矿石在地下破碎之后才吊装至地面，并送入地面装料斗，然后通过铁路运到 Clarabelle 工厂。然后与本集团在安大略经营的六个矿山及第三方在该工厂卸载的矿石混合。混合的矿石经过一个破碎流程送入，然后通过一系列的球磨和棒磨机碾碎，再进入浮选区。在浮选时，不含矿物质的岩石和大部分磁黄铁矿将被拒绝并泵入尾矿区。含矿镍黄铁矿将被恢复并泵入冶炼厂作进一步加工。黄铜矿或富含铜的精矿也将被分拣出来并出售给第三方。

在不久的将来，矿山计划开始生产更高品位的铜与镍精矿，贵金属（铂、钯、金与银）则并入铜精矿一类。镍精矿将继续在 Copper Cliff “铜崖”区处理，而铜精矿则将交由第三方处理。

## 保护环境

百年来，由于伐木和冶炼业务，萨德伯里地区一直和砍伐森林相关联。

将该地区恢复到开采前状况的工作目前已经而且将继续取得显著进步。“我们已在该地区付出相当大的努力来恢复其地貌，及对过往 150 年来一直遭到破坏的此处环境进行修复，” Vale Inco 萨德伯里地区营运安全主管 Art Hayden 解释道。总体而言，萨德伯里土壤研究（Sudbury Soils Study）已经给该地区开出了一张健康证明。

该城市近期荣获了一项联合国教科文组织大奖，以表彰萨德伯里地区卓越的环境恢复工作。“我们已经投资超过 10 亿美元，从而减少了超过 90% 的放射，” Hayden 说道。

Creighton 于 2001 年 7 月根据安大略矿山开采法案（Ontario Mining Act）制定了一项矿山闭坑计划。该计划确定了在矿山闭坑之前及之后的各项矿山复垦重建活动。矿山闭坑复垦成本预计约为 1000 万美元。

## 遵循水质指南

矿山的地表水自然流入尾矿区。然后通过水管接入污水处理厂，符合水质指南后，排出到当地河流。

在地下，Creighton 是相对的干矿，主要是充填和钻井设备产生的水。矿山水被收集到 579 米（1,900 英尺）与 2,100 米（7,000 英尺）之间的四个水平面上的主污水集水仓。2,100 米（7,000 英尺）水平以下的水则被收集到三个水平面，然后泵入 2,100 米（7,000 英尺）水平的主集水仓。这些集水仓可沉淀固体物，清水将分阶段泵至地面。

## 发电

Creighton 约 25% 的电力来自 Vale Inco 电网，其余电力则取自省电网。满负荷生产时，Creighton 每月平均需要 1,050 至 1,100 万千瓦小时电，（2007 年中）每千瓦小时电价约为 0.06 美元。约 60% 的电力用于通风，20% 用于吊装（人员与矿石），20% 用于泵、破碎站、移动设备和开采钻井。

## 利用采矿热潮

目前的采矿热潮已经对 Creighton 的运营产生了积极和消极的影响。“金属价格上涨意味着矿山的部分区域，例如低品位区域和残采区域，我们现在认为从经济角度而言可开采，但在之前却无法开采，” Strong 说道。“此外，近期我们已经开始采用底部矿层开采法（bottom-sill-slashing）作为获得极为宝贵矿石更高采出率的创新方法。”

另一方面，就目前全球的竞争水平而言，Strong 认为 Creighton 为矿山扩大和新项目聘请所需的经验丰富的矿工、操作员和技术人员方面存在困难。“结果就是我们需要大量的时间和精力来培训此类人员。尽管如此，事实上，Creighton 的员工特别是技术人员流失率仍然比较低。”

## 参与非开采活动

在非开采方面，Creighton 具有萨德伯里中微子观测站（Sudbury Neutrino Observatory），该站的开张仪式由全球知名天体物理学家和畅销书“A Brief Moment in Time”的作者诺贝尔奖获得者 Stephen Hawking 主持。该观测站的设施在粒子物理学领域被认为是全球一流的设施。该实验室位于地下约 1,800 米（6,000 英尺）处。

此外，在努力减少环境足迹方面，Creighton 还建立了地下温室，温室内的树苗全年都在生长，而不必经历地面严冬的考验。

## 展望未来

Creighton 的管理人员为技术人员确定了许多被认为值得进一步努力的优先工作，其中包括：

- 继续探明最高与最低矿床储藏范围
- 完成范围研究，以确定在深达 3,000 米（10,000 英尺）处采矿的最佳开采方法及基础设施

Henderson 解释说：“矿山深处不仅有大好机会，而且在旧的矿坑内还遗留了一些残余矿石。由于开采不划算或当时的开采方法不允许的原因，其中部分矿石在过去 100 年被忽略了，但现在则可以安全且经济地开采。”

Strong 预计矿山的深度勘探钻井方案已完成四分之三，该方案将勾勒出矿藏量、品位和应力。“在那之后，需要大量的工程工作来论证将该类别从资源转变为储备的合理性，” Strong 解释道，同时他还概括了矿山目前正在展开的三个主要领域的工作：

- 向矿山内部 2,500 米（8,200 英尺）水平（即深入两个水平）以下掘进。
- 探究在矿山 3,000 米（10,000 英尺）水平开发采矿的可能性。
- 从地面和地下钻井以正确开采 610 米（2,000 英尺）水平以上 402 矿体矿石。

深至 3,000 米（10,000 英尺）及以下，主要挑战在于确定 Creighton 在 2,377 米（7,800 英尺）处采用的开采方法是否仍然可行—假设地震活动随着井深而增加。

为此，Creighton 矿山正与众多研究机构、工程机构、科技大学及最佳开采创新中心（Centre of Excellence in Mining Innovation, CEMI）合作，以确定目前的开采方法在更深水平是否仍然安全可行。

“此外，我们正在研究深度矿山或地震活动矿山采用的其它开采方法，” Henderson 说道。“我确信，日后全世界将来 Creighton 学习该情况下的开采方法。”