

某选钛厂入库尾矿选矿工艺研究^①

高煜¹, 卢东方¹, 刘振强¹, 王毓华¹, 郑霞裕¹, 陈福林²

(1.中南大学资源加工与生物工程学院,湖南长沙410083; 2.攀钢集团研究院有限公司,四川攀枝花617000)

摘要:为从某选钛厂尾矿中有效回收钛资源、提高原矿相对利用率,对TiO₂品位5.81%的选钛厂入库尾矿进行了选矿工艺研究,制定了重选-磁选工艺流程,并研究了磁选过程中磁场强度,重选过程中上升水流量、给矿速度、给矿浓度等对钛铁矿选别指标的影响。结果表明,经+38 μm 粒级重选,-38 μm 粒级分级底流重选、分级溢流磁选的重选-磁选联合工艺选别,能够获得TiO₂品位16.08%、回收率62.63%的粗精矿,抛出产率77.41%、TiO₂品位2.39%的尾矿,大大减少了后续浮选流程入矿量。

关键词:钒钛磁铁矿;攀枝花;钛精矿;尾矿综合利用;钛铁矿;重选;磁选;逆流重选柱

中图分类号:TD981

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.016

文章编号:0253-6099(2023)06-0074-05

Beneficiation of Tailings in Tailings Pond of Titanium Processing Plant

GAO Yu¹, LU Dongfang¹, LIU Zhenqiang¹, WANG Yuhua¹, ZHENG Xiayu¹, CHEN Fulin²

(1.School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
2.Pangang Group Research Institute Co Ltd, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: To effectively recover titanium resources in the tailings from a titanium processing plant and improve the relative utilization rate of raw ore, beneficiation of the tailings with a TiO₂ grade of 5.81% from the tailings pond was studied. A gravity and magnetic separation process were proposed and the influences of magnetic field intensity, rising water flow rate, feeding rate and feeding concentration on ilmenite separation indices were studied. The results show that after a gravity separation of +38 μm range, a gravity separation of underflow from -38 μm classification and magnetic separation of overflow from -38 μm classification, a rough concentrate with TiO₂ grade of 16.08% was obtained at recovery of 62.63%, while tailings with a yield of 77.41% and TiO₂ grade of 2.39% was cast off. Consequently, the feeding amount of succeeding flotation can be greatly reduced.

Key words: titanomagnetite; Panzhihua; titanium concentrate; comprehensive utilization of tailings; ilmenite; gravity separation; magnetic separation; countercurrent gravity column

攀西地区钒钛磁铁矿资源探明储量93.933亿吨,预测储量达300亿吨,其中铁储量占全国储量的20%,居全国第二位;钛资源保有储量(以TiO₂计)4.28亿吨,占全国储量的93%,居世界第一位;钒资源保有储量(以V₂O₅计)1047.86万吨,占全国储量的63%,居世界第三位^[1]。但在攀西地区钒钛磁铁矿综合利用过程中存在资源利用率偏低的问题,铁、钒、钛元素回收率分别为60%、39%和10%左右,特别是宝贵的钛资源,相对原矿利用率仅10%~20%,造成了资源的

大量浪费^[2],如何在选铁尾矿中有效富集回收钛资源以提高原矿利用率是近年来的重要研究内容。本文对某选钛厂入库尾矿进行了回收钛铁矿的选矿工艺研究。

1 原矿性质

试验所用矿石源自某选钛厂入库尾矿,其XRD分析结果见图1,主要矿物物理性质见表1,粒度分布情况见表2。

① 收稿日期:2023-06-17

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2903202);钒钛资源综合利用国家重点实验室资助项目(2021P4FZG05A)

作者简介:高煜(1998—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为细颗粒矿物的物理分选。

通信作者:卢东方(1982—),男,河南焦作人,副教授,主要研究方向为选矿设备研发、流体力场仿真及选矿工艺。

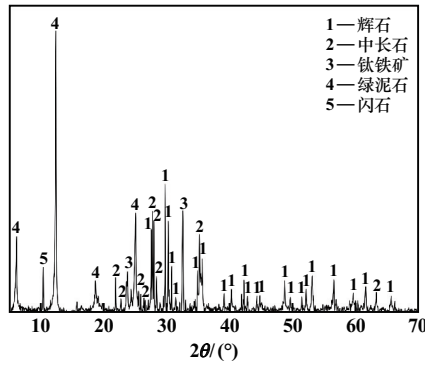


图1 某选钛厂入库尾矿 XRD 分析结果

表1 原矿主要矿物物理性质

矿物名称	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	比磁化系数/ ($10^{-6} cm^3 \cdot g^{-1}$)	显微硬度/ ($kg \cdot mm^{-2}$)
钛铁矿	4.623	240	713~752
绿泥石	2.626	237	295~426
钛辉石	3.250	100	933~1 018
斜长石	2.672	14	762~894

表2 原矿粒度分布与金属分布

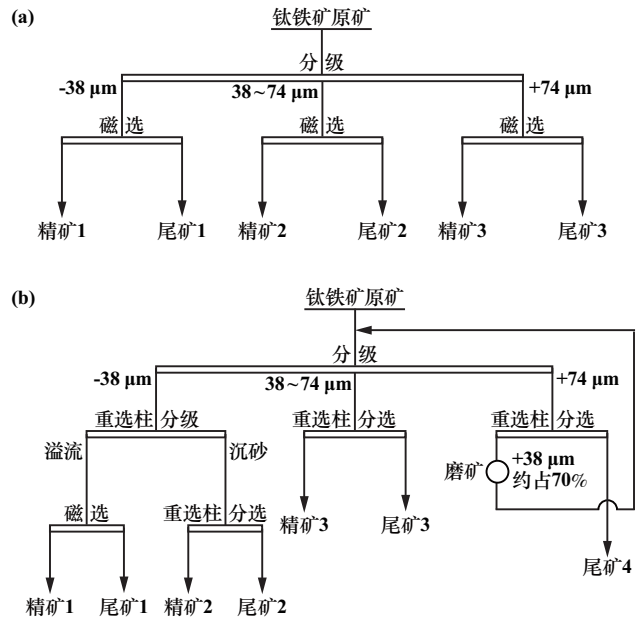
粒级/ μm	含量/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 金属分布率/%
+150	7.52	1.35	2.02
-150+74	20.40	2.62	10.66
-74+38	27.08	3.42	18.45
-38	45.00	7.68	68.87
合计	100.00	5.02	100.00

该矿样中含 Ti 元素的主要目的矿物为钛铁矿,主要脉石矿物为绿泥石,同时还伴有一定量辉石、中长石以及少量闪石等。钛在该类型矿床中主要以类质同象或类质同象分解物赋存于钛磁矿中,导致钛资源难以回收^[3]。由表1可知,钛铁矿与脉石矿物物理性质较接近,这使得钛资源回收困难。由表2可知,-38 μm 粒级含量 45%,微细粒含量高且 TiO₂ 金属占比大(约 68%),选铁流程使选钛原矿泥化严重^[4],加大了其分选难度,该入库尾矿的钛铁矿回收成为难题^[5]。

2 试验方案

由钛铁矿与脉石矿物之间的磁性和密度差异可知,该矿物选矿流程主要围绕以下两个方面进行:① 基于钛铁矿与脉石矿物的比磁化系数差异及细粒级矿物占比极大的特点,采用全磁选工艺选别钛铁矿,该流程相对简单,强磁预选技术能提高入选品位、减少浮选过程中矿泥干扰,是提高细粒钛铁矿分选效率的关键^[6]。② 基于钛铁矿与脉石矿物的密度差异,采用重选-磁

选联合工艺^[7],采用基于干涉沉降理论和斜板层流剪切作用的大通量流化床预选技术^[8],与高梯度磁选技术结合抛除脉石矿物,为进一步提高浮选分离效率创造条件。试验原则流程见图2。



(a) 全磁选流程; (b) 重选-磁选联合流程

图2 试验原则流程

3 选矿试验研究

3.1 全磁选流程

由表2可见,+150 μm 粒级中 TiO₂ 金属分布率仅 2.02%,但-38 μm 粒级中 TiO₂ 金属分布率达到了 68.87%,表明原矿粒度越细,TiO₂ 金属分布率越高。

为能更好回收钛资源、提高矿物分选效率,在矿物进入磁选之前首先对矿物进行分级,然后按图2(a)所示流程对各粒级钛铁矿分别进行磁选,收集精矿与尾矿,测其品位,计算回收率。磁选设备为武汉恒乐矿物工程设备有限公司生产的 XCRQ-50 \times 70 湿式强磁选机。

3.1.1 +74 μm 粒级钛铁矿磁选

给矿流速 300 mL/min、给矿浓度 15%,不同磁场强度下+74 μm 粒级钛铁矿磁选试验结果见表3。该粒级矿物颗粒较粗,磁场强度较大时,颗粒受到的矿浆曳力/磁力比极小,极易被磁介质捕获。该部分解离度也较低,磁场强度 2.2 T 时,回收率可达到 98.19%,精矿产率也达到了 90.10%,但大量未解离的颗粒被捕获至精矿中,导致精矿品位极低。适当降低磁场强度,可有效提高精矿品位,磁场强度 1.0 T 时,可获得品位 4.71%、回收率 68.80%的钛精矿。

表3 +74 μm 粒级钛铁矿磁选试验结果

磁场强度/T	精矿产率/%	回收率/%	精矿品位/%	尾矿品位/%
1.0	41.71	68.80	4.71	1.53
1.4	63.64	89.18	3.94	0.57
1.8	82.16	97.04	3.54	0.22
2.2	90.10	98.19	3.50	0.08

3.1.2 38~74 μm 粒级钛铁矿磁选

给矿流速 300 mL/min、给矿浓度 15%，不同磁场强度下 38~74 μm 粒级钛铁矿磁选试验结果见表 4。从表 4 可见，磁场强度 2.2 T 时，可获得产率 83.74%、回收率 98.58% 的精矿，但因磁场强度较高，绝大部分低密度脉石颗粒也被捕获至精矿产品中，导致精矿品位降低。磁场强度较低时，品位较低的颗粒相对于品位较高的颗粒更难被磁介质捕获。磁场强度 1.0 T 时，精矿品位 6.64%、回收率 60.50%。

表4 38~74 μm 粒级钛铁矿磁选试验结果

磁场强度/T	精矿产率/%	回收率/%	精矿品位/%	尾矿品位/%
1.0	32.91	60.50	6.64	2.45
1.4	44.65	80.12	6.58	1.40
1.8	73.79	95.48	5.10	0.57
2.2	83.74	98.58	4.49	0.33

3.1.3 -38 μm 粒级钛铁矿磁选

给矿流速 300 mL/min、给矿浓度 15%，不同磁场强度条件下 -38 μm 粒级钛铁矿磁选试验结果见表 5。磁场强度过高时，部分脉石矿物也会被捕获至磁介质上，导致精矿品位降低。-38 μm 粒级钛铁矿粒度较细，解离度相对较好，磁场强度不宜过高。综合考虑精矿品位与回收率指标，磁场强度 1.4 T 为宜，此时精矿品位 15.35%、回收率 46.25%。

表5 -38 μm 粒级钛铁矿磁选试验结果

磁场强度/T	精矿产率/%	回收率/%	精矿品位/%	尾矿品位/%
1.0	17.47	29.38	15.45	7.86
1.4	27.32	46.25	15.35	6.71
1.8	47.44	70.88	14.17	5.25
2.2	50.71	74.71	13.95	4.86

3.2 重选-磁选联合流程

鉴于矿样粒度分布特性及金属分布情况，首先对钛铁矿进行分级处理，再按图 2(b) 所示流程对各粒级钛铁矿分别进行选别。试验中使用的重选设备为梯形斜面搅拌式逆流分选柱 (TARC)。

3.2.1 +74 μm 粒级钛铁矿重选

给矿浓度 35%、搅拌速度 400 r/min，+74 μm 粒级钛铁矿重选试验结果如表 6 所示。增大上升水流量和给矿速度，精矿品位和尾矿产率都有一定程度的增加，适当减小底流流量也能提高精矿品位。上升水流量 56 L/h、底流流量 20 mL/min、给矿速度 240 mL/min 时，可获得品位 7.12%、回收率 59.97% 的精矿产品，同时抛掉产率 74.00%、TiO₂ 含量 1.67% 的尾矿。

表6 +74 μm 粒级钛铁矿重选试验结果

上升水流量/ (L·h ⁻¹)	底流流量/ (mL·min ⁻¹)	给矿速度/ (mL·min ⁻¹)	抛尾 率/%	回收 率/%	品位/%	
					精矿	尾矿
32	43.3	240	9.04	97.87	3.78	0.54
56	43.3	240	24.29	92.24	4.24	1.21
56	20	320	79.44	47.51	7.44	2.13
56	20	240	74.00	59.97	7.12	1.67

3.2.2 38~74 μm 粒级钛铁矿重选

底流流量 20 mL/min、搅拌速度 350 r/min，38~74 μm 粒级钛铁矿重选试验结果见表 7。从表 7 可见，增大上升水流量、给矿速度、给矿浓度，精矿品位、尾矿品位、尾矿产率均提高，但回收率降低^[9]。上升水流量 32 L/h、给矿速度 240 mL/min、给矿浓度 35% 时，可获得品位 12.46%、回收率 63.52% 的精矿，抛出产率 80.12%、品位 1.78% 的尾矿。

表7 38~74 μm 粒级钛铁矿重选试验结果

上升水流量/ (L·h ⁻¹)	给矿速度/ (mL·min ⁻¹)	给矿 浓度/%	抛尾 率/%	回收 率/%	品位/%	
					精矿	尾矿
24	240	35	78.71	64.73	11.40	1.68
32	240	35	80.12	63.52	12.46	1.78
24	320	35	85.37	42.32	11.71	2.73
24	320	40	84.36	51.19	11.41	2.02

3.2.3 -38 μm 粒级钛铁矿重选-磁选

-38 μm 粒级入料钛铁矿中细颗粒占比较多，采用 Battersize2600 激光粒度分布仪对 -38 μm 粒级钛铁矿分级产物进行粒度分析，结果见表 8。可见溢流中 -10 μm 粒级占比 81.31%，泥化严重，这部分颗粒不利于重选。故利用 TARC 对 -38 μm 粒级钛铁矿进行脱泥处理，脱泥底流重选、溢流磁选，可有效提升精矿品位。

表8 TARC 分级试验结果

产品名称	产率/%	回收率/%	品位/%	D ₅₀ /μm	-10 μm 粒级 含量/%
溢流	52.28	49.03	7.85	4.299	81.31
沉砂	47.72	50.93	9.56	23.209	17.88

-38 μm 粒级钛铁矿脱泥后,控制底流流量 17 mL/min,对脱泥后底流产品进行了重选试验,结果见表 9。增大给矿速度,更多的颗粒从溢流排出,溢流产率急剧增大,尾矿 TiO_2 品位增大, TiO_2 回收率降低。增加给矿浓度可大幅提升精矿品位,增加上升水流量可提升抛尾率^[10]。上升水流量 16 L/h、给矿速度 160 mL/min、给矿浓度 30%时,对-38 μm 粒级钛铁矿分级底流进行重选,可获得 TiO_2 品位 20.35%、回收率 79.25%的粗精矿,此时抛尾率 62.55%、尾矿 TiO_2 含量 3.19%。

表 9 -38 μm 粒级钛铁矿分级底流重选试验结果

上升水流量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	给矿速度/ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	给矿 浓度/%	抛尾 率/%	回收 率/%	品位/%	
					精矿	尾矿
8	240	25	52.64	82.96	16.02	2.96
16	240	25	55.13	81.87	16.98	3.06
16	160	30	62.55	79.25	20.35	3.19
16	240	30	73.33	68.77	22.28	3.68

-38 μm 粒级钛铁矿分级溢流 TiO_2 品位 7.85%,相对于脱泥底流品位略低,但该粒级-10 μm 颗粒含量占 81.31%,导致该粒级钛铁矿黏度相对较大,颗粒自由沉降速度极小,不适于采用重选进行分选。-38 μm 粒级钛铁矿分级溢流粒度极小,颗粒解离度较好,给矿速度 300 mL/min、给矿浓度 15%条件下对该产品进行了磁选试验,结果见表 10。增强磁场强度可大幅提高精矿回收率,磁场强度 2.2 T 时,可获得 TiO_2 品位 14.18%、回收率 58.71%的粗精矿。

表 10 -38 μm 粒级钛铁矿分级溢流磁选试验结果

磁场 强度/T	精矿 产率/%	TiO_2 回收率/%	精矿 TiO_2 品位/%	尾矿 TiO_2 品位/%
1.0	4.41	9.56	16.32	7.12
1.4	7.98	16.80	15.48	6.65
1.8	23.84	20.78	14.32	5.42
2.2	33.08	58.71	14.18	4.93

3.3 对比及讨论

通过分析原矿物理性质,基于钛铁矿和脉石矿物的磁性和密度差异,形成了全磁选流程和粗粒重选-细粒磁选联合流程。

全磁选流程试验结果见表 11。对 TiO_2 品位 5.81%的原矿分级处理后磁选,可获得 TiO_2 品位 9.21%、回收率 52.07%的粗精矿,同时可抛出 TiO_2 含量 4.30%的尾矿,抛尾率 67.15%。

重选-磁选联合流程试验结果见表 12。经重选-磁选联合流程分选,可获得 TiO_2 品位 16.08%、回收率 62.63%的粗精矿,同时可抛出 TiO_2 含量 2.39%的尾

矿,抛尾率 77.41%。不难发现,经重选-磁选联合流程,在获得更高精矿品位和回收率的同时,还能够抛出品位更低、抛尾率更高的尾矿,大大减少了后续浮选入矿量。

表 11 全磁选流程试验结果

粒级/ μm	品位/%			回收率/%	抛尾率/%
	原矿	精矿	尾矿		
+74	2.96	4.71	1.53	68.80	58.29
-74+38	3.75	6.64	2.45	60.50	67.09
-38	8.79	15.35	6.71	46.25	72.68
合计	5.81	9.21	4.30	52.07	67.15

表 12 重选-磁选联合流程试验结果

给料名称	分选 方法	品位/%			回收 率/%	抛尾 率/%
		原矿	精矿	尾矿		
+74 μm 粒级	重选	2.96	7.12	1.67	59.97	74.00
38~74 μm 粒级	重选	3.75	12.46	1.78	63.52	80.12
-38 μm 粒级分级底流	重选	9.56	20.35	3.19	79.25	62.55
-38 μm 粒级分级溢流	磁选	7.85	14.18	4.93	58.71	66.92
合计		5.81	16.08	2.39	62.63	77.41

钛铁矿原矿粒度细,-38 μm 粒级含量 45.00%,其中钛金属分布率达 68.87%,高梯度磁选过程中,为了保证钛铁矿回收率,需采用较高的磁场强度,但同时也造成脉石矿物夹杂率增加,预选效率降低。矿样中主要脉石矿物钛辉石与目的矿物钛铁矿比磁化系数相近,在高背景场强下很难实现钛铁矿与钛辉石的分离,大量钛辉石进入磁精矿中,进而进入浮选作业。研究表明,细粒钛辉石含量增加会导致浮选泡沫变黏及恶化浮选过程,造成钛铁矿浮选回收率急剧下降^[11]。鉴于钛铁矿与钛辉石、长石之间的密度差异,采用逆流重选柱进行粗粒重选^[12]、高梯度磁选机进行细粒磁选,进一步抛除脉石矿物,为提高浮选分离效率创造了条件。

4 结 论

1) 钛铁矿入库尾矿(本试验原矿)有用金属在-38 μm 粒级中的分布率为 68.87%,粒度越细、品位越高是该矿样无法得到高效处理的原因。

2) 对 TiO_2 品位 5.81%的原矿分级后各粒级分别全磁选,最终可获得 TiO_2 品位 9.21%、回收率 52.07%的精矿,尾矿 TiO_2 含量 4.30%,抛尾率 67.15%。

3) 对 TiO_2 品位 2.96%的+74 μm 粒级钛铁矿进行一次重选,可获得 TiO_2 品位 7.12%、回收率 59.97%的粗精矿,尾矿 TiO_2 含量 1.67%,抛尾率 74.00%;对 TiO_2 品位 3.75%的 38~74 μm 粒级钛铁矿进行一次重

选,可获得 TiO_2 品位 12.46%、回收率 63.52% 的粗精矿,尾矿 TiO_2 含量 1.78%,抛尾率 80.12%;对 TiO_2 品位 9.56% 的-38 μm 粒级分级底流进行一次重选,可获得 TiO_2 品位 20.35%、回收率 79.25% 的粗精矿,尾矿 TiO_2 含量 3.19%,抛尾率 62.55%;对 TiO_2 品位 7.85% 的-38 μm 粒级分级溢流进行一次磁选,可获得 TiO_2 品位 14.18%、回收率 58.71% 的粗精矿,尾矿 TiO_2 含量 4.93%,抛尾率 66.92%;通过重选-磁选联合流程,最终可获得 TiO_2 品位 16.08%、回收率 62.63% 的精矿,尾矿 TiO_2 品位 2.39%,抛尾率 77.41%。

4) 逆流重选柱能够实现钛矿物资源的有效富集与回收,且效果优异。利用逆流重选柱处理该选钛厂入库尾矿,取得了较好的预选效果。

参考文献:

- [1] 钟祥,史志新,高健. 攀西地区白马钒钛磁铁矿工艺矿物学探讨[J]. 冶金分析, 2021,41(10):29-35.
- [2] 钟祥,陈福林,史志新,等. 矿物自动分析系统在攀西某矿区钒钛磁铁矿工艺矿物学上的应用[J]. 冶金分析, 2022(7):62-70.
- [3] 崔毅琦,王凯,童雄,等. 难选微细粒钛铁矿资源的回收利用研究概述[J]. 矿冶, 2014(6):14-18.

- [4] 袁致涛,马玉新,李庚辉,等. 某铁尾矿再回收铁矿物试验研究[J]. 矿冶工程, 2016(4):37-40.
- [5] 陈树民. 攀枝花微细粒级(-19 μm) 钛铁矿回收探索试验[J]. 矿产综合利用, 2004(5):7-11.
- [6] 邵安林. 东鞍山高碳酸盐铁矿石磁选精矿浮选工艺研究[J]. 金属矿山, 2011(10):79-82.
- [7] 张琦,唐学飞,刘杰,等. 鞍山式铁矿重选精矿工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 2019(2):183-187.
- [8] 刘振强,卢东方,曾繁森,等. 自制逆流分选柱用于低品位黄铁矿预富集的流场模拟及试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):39-43.
- [9] Galvin K P, Callen A M, ZHOU J, et al. Performance of the reflux classifier for gravity separation at full scale[J]. Minerals Engineering, 2005(1):19-24.
- [10] ZHENG Biao Peng, Kevin Galvin, Elham Doroodchi. Influence of inclined plates on flow characteristics of a liquid-solid fluidised bed: A CFD-DEM study[J]. Powder Technology, 2019,343:170-184.
- [11] 张国范,王丽,冯其明,等. 钛辉石对钛铁矿浮选行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009,19(6):1124-1129.
- [12] 褚浩然,王毓华,曾繁森,等. 逆流分选柱预富集细粒氧化锑尾矿的试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):45-48.

引用本文: 高煜,卢东方,刘振强,等. 某选钛厂入库尾矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):74-78.

矿冶科技期刊集群入选湖南省培育世界一流湘版科技期刊建设工程项目

由长沙矿冶研究院有限责任公司牵头申报的矿冶科技类期刊集群项目成功入选湖南省培育世界一流湘版科技期刊建设工程 2023 年项目!

矿冶科技期刊集群是由长沙矿冶研究院有限责任公司主办的《矿冶工程》牵头,联合湖南省其他 12 家矿冶类科技期刊共同组建的专业学科期刊集群。未来,集群将以期刊为核心,秉承“出版+服务”理念,从整合资源、提升质量、搭建平台、服务行业、引育人才五个维度,打造精品化、专业化、集约化、体系化和国际化的矿冶类专业特色期刊集群,以一流科技期刊矩阵服务我国矿冶行业高质量发展,助力我省“三高四新”战略及社会主义现代化新湖南建设!

消息来源:矿冶工程杂志编辑部