

某碳质金矿氯离子与有机碳质物协同“劫金”性能研究

郭金溢^{1,2},林海彬^{1,2},李有辉^{1,2},邱耀兴^{1,2}

(1. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室; 2. 厦门紫金矿冶技术有限公司)

摘要:针对贵州某矿区碳质难处理金矿开展加压氧化过程中氯离子与有机碳质物协同“劫金”性能研究,考察了氯离子质量浓度、有机碳含量、反应温度、反应时间等对协同“劫金”效应的影响。结果表明:“劫金”效应与有机碳及氯离子含量,加压氧化反应温度及时间等因素有关。在金精矿与原矿按照质量比1:1进行配矿,控制有机碳质量分数4.5%,反应温度210℃,反应时间55 min,活性炭用量30 g/L条件下进行加压氧化—炭浸氰化,金浸出率达93.9%。通过加入硝酸银抑制剂等降低氯离子含量,降低该碳质金矿加压氧化过程“劫金”效应。

关键词:碳质金矿;氯离子;“劫金”性能;有机碳;加压氧化;氰化

中图分类号:TD952

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)06-0037-05

doi:10.11792/hj20250608

引言

世界黄金储量中60%以上是难处理金矿石,而目前全球黄金产量的1/3都来自难处理矿^[1-4]。碳质金矿是一种重要的难处理金矿,其特点是含有大量的碳质物,开采和处理难度较大。这些碳质物主要由碳元素、有机酸和碳氢化合物组成,通过吸附作用捕获金氰络合物,使碳质金矿在直接氰化过程中的金浸出率明显降低,即发生“劫金”现象^[5-6],属典型难处理金矿石之一^[7-11]。当矿石中碳质物含量较高或活性较高时,“劫金”现象更为明显。碳质金矿浸出率低,除了 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 物理吸附于碳质物外,还可能存在某些碳质物中大量金以含CO—N—S配位体的螯合物形式被固定。此外,碳质物与硅酸盐紧密嵌合,使得从原矿中通过浮选分离碳质物或通过添加钝化剂或掩蔽剂来减弱碳质物的“劫金”效应非常困难。姜涛等^[12]将碳质金矿归为物理难浸矿石类型,难浸原因概括为已溶解的金被碳质物吸附。

贵州某矿区金矿为碳质微细粒浸染型硫化矿,直接氰化金浸出率约10%,为典型的“卡林型”极难处理金矿石。通常,采用加压氧化法^[13-19]处理碳质金矿可获得较好的技术指标,但该矿石有机碳含量较高,氯离子含量对金回收率影响显著。FOMENKO等^[20]研究发现,有机碳及氯离子存在协同“劫金”效应,其“劫金”机理可能为:单质金在加压氧化过程中氧化并被 Cl^- 络合,生成 $[\text{AuCl}_4]^-$,之后在碳表面被还原,生成单质金并被有机碳吸附,导致该部分金无法在氰化过程中回

收。本文查明了与碳质金矿“劫金”性能有关的因素,开发技术可行、经济合理的高效处理工艺,提高金回收率,对碳质金矿资源的高效利用具有重要借鉴意义。

1 试验部分

1.1 原料性质

试验矿样取自贵州某矿区,磨矿细度-0.074 mm占比90%,原矿及其浮选金精矿组分分析结果如表1所示,金物相及硫物相分析结果如表2、表3所示。

表1 试验矿样组分分析结果

Table 1 Composition analysis results of test ore samples %

样品	Au ⁽¹⁾	Ag ⁽¹⁾	As	TS	Fe	CaO	MgO
金精矿	25.6	1.5	1.75	24.37	23.01	3.38	1.18
原矿	4.9	0.42	0.18	3.19	7.22	13.18	5.36
样品	Cu	Al	Pb	Zn	Si	TC	有机碳
金精矿	0.074	2.31	0.002 6	0.028	10.42	9.67	8.17
原矿	0.003 7	3.63	0.000 7	0.009 1	17.33	6.36	0.83
样品	Na	Hg ⁽¹⁾	F	Cl	Cd	Sb ⁽¹⁾	
金精矿	0.046	39.98	0.053	0.035	0.043	18.39	
原矿	0.085	4.3	0.061	0.026	0.003 7	14.48	

注:1)w/(g·t⁻¹)。

表2 金物相分析结果

Table 2 Gold phase analysis results

相别	金精矿		原矿	
	w(Au)/ (g·t ⁻¹)	分布 率/%	w(Au)/ (g·t ⁻¹)	分布 率/%
裸露金	0.24	0.86	0.12	2.60
碳酸盐及氧化物包裹金	0.33	1.18	0.006	0.13
硫化物包裹金	27.10	96.61	4.30	92.95
硅酸盐包裹金及其他	0.38	1.35	0.20	4.32
合计	28.05	100.00	4.626	100.00

收稿日期:2024-12-29; 修回日期:2025-02-17

基金项目:2021年福建省对外合作项目(2021H1012)

作者简介:郭金溢(1987—),男,高级工程师,从事湿法冶金及废水环保处理等方面的研究工作;E-mail:282506129@qq.com

表3 硫物相分析结果
Table 3 Sulfur phase analysis results

相别	金精矿 ^a		原矿 ^a	
	$w(\text{S})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	分布率/%	$w(\text{S})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	分布率/%
S ²⁻	25.34	98.14	2.88	93.81
S ⁰	0.08	0.31	—	—
S ⁶⁺	0.40	1.55	0.19	6.19
合计	25.82	100.00	3.07	100.00

由表1可知:原矿主要有价金属为金,通过浮选,有机碳显著富集到金精矿中。原矿及金精矿中氯质量分数很低,均为0.03 %左右。

由表2、表3可知:原矿和金精矿中金主要以硫化物包裹金形式存在,分布率达90 %以上;硅酸盐包裹金及其他分布率较低。矿石中硫大部分以S²⁻形式存在,而金主要以硫化物包裹金形式存在,因此,有效回收金需打开硫化物的包裹。

1.2 试剂及设备

试剂:椰壳活性炭,工业级;硫酸、盐酸、氧化钙、氰化钠,均为分析纯。

设备:PE-900F型原子吸收光谱仪、XMB-φ240×300型棒磨机、GSHA-2L型高压釜等。

1.3 试验方法

1.3.1 加压氧化试验

按一定配比分别称取原矿和金精矿($P_{90}=74\text{ }\mu\text{m}$),加入硫酸脱除碳酸盐,控制酸化终点pH值约1.5,矿浆浓度20 %,氧分压0.7 MPa,转速700 r/min,反应温度210 ℃,进行加压氧化。反应至不消耗氧气后,保温保压一定时间;降温卸压后,控制转型温度90 ℃~95 ℃,转型2 h,之后液固分离、洗涤,渣烘干后氰化。

1.3.2 氰化试验

氰化试验条件:氧化钙调节pH值约11.0,控制矿浆浓度约35 %,活性炭用量分别为0,30 g/L,氰化钠

用量3 kg/t,浸出24 h。

2 试验结果与讨论

2.1 碳质“劫金”性能考察试验

为考察有机碳质物的“劫金”性能,开展加压氧化渣直接氰化和炭浸氰化对比试验。同时,考察不同有机碳含量对加压氧化—炭浸氰化的影响。

2.1.1 碳质“劫金”考察

将金精矿与原矿按照质量比1:1进行配矿,不额外补加氯离子,在210 ℃条件下进行加压氧化,氧化渣开展直接氰化和炭浸氰化对比试验,活性炭用量分别为0,30 g/L。考察氧化渣中有机碳与活性炭竞争吸附效果,结果如表4所示。

表4 碳质“劫金”影响试验结果

Table 4 Test results of preg-robbing effect of carbonaceous matter				
$w(\text{氧化渣有 机碳})/\%$	活性炭用 量/ $(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	氰化渣 Au 品 位/ $(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	$\rho(\text{氰化液 Au})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	Au 浸出 率/%
4.7	0	13.75	1.26	28.75
4.7	30	0.96	0	95.08

由表4可知:氰化过程不加活性炭进行竞争吸附时,金浸出率仅为28.75 %;加入活性炭进行竞争吸附后,金浸出率提高至95.08 %。在该配矿比例下,氧化渣中有机碳在氰化过程中会产生“劫金”效应,但活性炭的吸附性能比有机碳的“劫金”性能强。因此,加入活性炭后,金浸出率显著提高。

2.1.2 不同有机碳含量加压氧化—炭浸氰化试验

为研究有机碳含量与“劫金”性能的对应关系,将金精矿和原矿按照不同配比进行配矿,考察不同有机碳含量对加压氧化—炭浸氰化工艺的影响。不额外补加氯离子,在210 ℃条件下进行加压氧化,氧化渣开展炭浸氰化试验,结果如表5所示。

由表5可知:有机碳含量越高,加压氧化—炭浸氰

表5 不同有机碳含量试验结果

Table 5 Test results of varying organic carbon contents

$m(\text{精矿}):m(\text{原矿})$	配矿 ^a			NaCN用量/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	氧化渣		氰化渣	
	$w(\text{Au})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	$w(\text{S}^{2-})/\%$	$w(\text{有机碳})/\%$		$w(\text{S}^{2-})/\%$	渣产率/%	$w(\text{Au})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	Au 浸出率/%
1:2	11.8	10.3	3.3	1.53	0.05	83.7	0.36	97.43
1:1	15.3	13.8	4.5	1.61	0.17	78.8	0.77	95.62
2:1	18.7	17.3	5.7	1.72	0.11	80.3	1.29	94.03
1:0	25.6	24.4	8.2	1.82	0.23	73.2	3.08	90.96

化过程的“劫金”现象越显著。因此,在满足加压氧化系统酸平衡和热平衡的条件下,应控制入釜物料有机碳含量最低,可减少碳质“劫金”效应。

为保证系统热平衡,将金精矿与原矿按照质量比

1:1进行配矿,控制有机碳质量分数为4.5 %,酸化终点pH值约1.5,矿浆浓度20 %,氧分压0.7 MPa,转速700 r/min,不额外补加氯离子,在210 ℃进行加压氧化;氧化渣加入氧化钙调节pH值约11.0,控制矿浆浓

度约 35 % ,活性炭用量 30 g/L,氰化钠用量 3 kg/t,浸出 24 h,金浸出率可达 95.62 %。

2.2 氯离子协同“劫金”性能考察试验

高含量氯离子不仅会腐蚀设备,而且还可能与矿石中的有机碳结合生成“劫金”物质。因此,为了考察溶液中氯离子在加压氧化预处理过程中的“劫金”影响,进行了不同氯离子质量浓度对碳质金矿加压氧化—炭浸氰化金浸出率的影响试验。

2.2.1 不同氯离子质量浓度试验

将金精矿与原矿按照质量比 1:1 进行配矿,采用纯水酸化,酸化调浆后分别添加不同量盐酸,控制氯离子质量浓度分别为 0, 100, 120, 150, 180, 200, 300 和 500 mg/L,进行加压氧化,氧化渣开展炭浸氰化试验,结果如表 6 所示。

表 6 不同氯离子质量浓度试验结果

Table 6 Test results of varying chloride ion mass concentrations

$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{氧化液 Au})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氰化渣 Au 品位/ ($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	Au 浸出率/%
0	<0.02	0.96	95.1
100	<0.02	1.16	93.9
120	<0.02	7.57	62.8
150	<0.02	9.45	52.8
180	<0.02	9.74	50.3
200	<0.02	9.90	49.0
300	<0.02	10.58	46.9
500	0.052	11.12	43.2

由表 6 可知:酸化液中氯离子质量浓度对加压氧化—炭浸氰化工艺的金浸出率影响较大。氯离子质量浓度超过 100 mg/L 时,金浸出率急剧下降,且随着氯离子质量浓度增加,金浸出率逐步降低。原因可能是酸化液中氯离子导致金在加压氧化预处理过程中浸出。氯离子质量浓度为 500 mg/L 时,氧化液含金 0.052 mg/L。

2.2.2 不同有机碳含量试验

将金精矿和原矿按照不同配比进行配矿,采用纯水酸化,向酸化矿浆中分别加入盐酸,控制氯离子质量浓度 100 mg/L,进行加压氧化,氧化渣开展炭浸氰化试验,结果如表 7 所示。

表 7 不同有机碳含量试验结果

Table 7 Test results of varying organic carbon contents

$w(\text{有机碳})/\%$	氰化渣 Au 品位/($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	Au 浸出率/%
3.8	0.99	94.8
4.5	1.16	93.9
5.7	2.70	88.1
8.2	9.61	72.5

由表 7 可知:同等氯离子质量浓度条件下,金浸出率与有机碳含量有关。有机碳含量越高,协同“劫金”现象越明显,氯离子耐受范围越窄。

综合上述表明,金浸出率与有机碳及氯离子含量均有关。金精矿与原矿按照质量比 1:1 进行配矿,在氯离子质量浓度超过 100 mg/L 时,金浸出率急剧下降。同等氯离子质量浓度条件下,有机碳质量分数超过 4.5 %,协同“劫金”现象明显,金浸出率从 93.9 % 下降至 72.5 %。

2.2.3 反应温度试验

将金精矿与原矿按照质量比 1:1 进行配矿,采用纯水酸化,向酸化矿浆中加入盐酸,控制氯离子质量浓度 100 mg/L,分别在 210 ℃、220 ℃进行加压氧化,氧化渣开展炭浸氰化试验,结果如表 8 所示。

表 8 不同反应温度试验结果

Table 8 Test results of varying reaction temperatures

反应温度/℃	氰化渣 Au 品位/($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	Au 浸出率/%
210	1.16	93.9
220	7.42	78.8

由表 8 可知:氯离子耐受范围与加压氧化反应温度有关。反应温度越高,氯离子耐受范围越窄,耐受限越低,“劫金”现象越明显。反应温度从 210 ℃提高至 220 ℃,金浸出率从 93.9 % 降低至 78.8 %。

2.2.4 反应时间试验

将金精矿与原矿按照质量比 1:1 进行配矿,采用纯水酸化,向酸化矿浆中加入盐酸,控制氯离子质量浓度 100 mg/L,进行加压氧化,氧化渣开展炭浸氰化试验,结果如表 9 所示。

表 9 不同反应时间试验结果

Table 9 Test results of varying reaction time

反应时间/min	氰化渣 Au 品位/($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	Au 浸出率/%
55	1.16	93.9
140	7.76	77.7

由表 9 可知:加压氧化反应时间影响金浸出率,碳质金矿在有氯离子存在的情况下,加压氧化反应时间越长,金浸出率越低。反应时间从 55 min 提高到 140 min 时,金浸出率从 93.9 % 降低至 77.7 %;这可能是在硫化物氧化的最后阶段,由于过度氧化,当铁离子与亚铁离子的摩尔比高时,氧化还原电位高到金被氯离子溶解并被碳质物吸附。

2.3 降低氯离子协同“劫金”效应试验

将金精矿与原矿按照质量比 1:1 进行配矿,采用纯水酸化,向酸化矿浆中加入盐酸,控制氯离子质量

浓度 200 mg/L, 一组直接进行加压氧化, 另一组按照 Ag 与 Cl 摩尔比为 1 加入 AgNO₃ 后进行加压氧化, 氧化渣开展炭浸氰化试验, 结果如表 10 所示。

表 10 降低氯离子协同“劫金”效应试验结果

Table 10 Test result with reduced synergistic preg-robbing effect of chloride ions

AgNO ₃ 加入量/g	氰化渣 Au 品位/(g·t ⁻¹)	Au 浸出率/%
0	9.90	49.0
0.77	1.05	94.4

由表 10 可知: 在加压氧化前, 通过加入 AgNO₃ 将氯离子沉淀, 可有效避免加压氧化过程中氯离子与有机碳的协同“劫金”效应, 提高金浸出率。推测银保护作用机制可能为银与氯离子形成不溶性 AgCl 或可溶性络合离子 [AgCl₂]⁻, 使氯离子活性降低。这种相互作用可能发生在压力氧化前和氧化过程中。

3 结 论

1) 该碳质金矿在满足加压氧化系统酸平衡和热平衡的条件下, 通过原矿和浮选金精矿合理配矿, 控制入釜物料有机碳含量最低, 降低碳质“劫金”效应。

2) 氧化渣氰化过程不加活性炭进行竞争吸附, 金浸出率仅为 28.75 %; 加入活性炭进行竞争吸附后, 金浸出率提高至 95.08 %。氧化渣中的有机碳在氰化过程中会产生“劫金”效应, 而活性炭的吸附性能比有机碳的“劫金”性能强, 因此加入活性炭后金浸出率显著提高。

3) 该碳质金矿加压氧化过程“劫金”现象除了与有机碳含量有关外, 还与入釜矿浆氯离子含量有关。金精矿与原矿按照质量比 1:1 进行配矿, 氯离子质量浓度超过 100 mg/L 时, 金浸出率急剧下降; 同等氯离子质量浓度条件下, 含有机碳超过 4.5 % 时, 协同“劫金”现象明显, 金浸出率从 93.9 % 下降至 72.5 %。

4) 氯离子耐受范围与加压氧化反应温度有关。反应温度越高, 氯离子耐受范围越窄, 耐受限越低, “劫金”现象越明显。反应时间也会影响金浸出率, 碳质金矿在有氯离子存在的情况下, 反应时间越长, 金浸出率越低。

5) 在加压氧化前, 通过加入 AgNO₃ 将氯离子沉淀, 可避免在加压氧化过程中产生氯离子与有机碳的协同“劫金”效应, 提高金浸出率。

6) 降低氯离子与有机碳协同“劫金”效应, 可通过

在加压氧化前将氯离子洗涤或沉淀脱除, 也可考虑从消除碳质“劫金”方面研究。

[参 考 文 献]

[1] 崔永霞, 沈艳. 难处理金矿石提炼技术研究进展[J]. 黄金科学技术, 2007, 15(3): 53-57, 61.

[2] 陈聪, 姚香. 难处理金矿石预处理方法简述[J]. 黄金科学技术, 2004, 12(4): 27-30.

[3] 李俊萌. 难处理金矿石预处理方法研究现状及其发展趋势[J]. 稀有金属, 2003, 27(4): 478-481, 490.

[4] 苏大雄, 张秋利, 周军, 等. 难处理金矿的预处理[J]. 有色金属工程, 2002, 54(增刊 1): 137-141.

[5] 俞海平, 刘菁. 难处理金矿石浸出工艺研究现状[J]. 广州化工, 2011, 39(17): 25-27.

[6] 杨洪英, 巩恩普, 杨立. 低品位双重难处理金矿石工艺矿物学及浸金影响因素[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(12): 1 742-1 745.

[7] 杨洪英, 佟琳琳, 殷书岩, 等. 湖南某难处理金矿的加压预氧化—氰化浸金试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(9): 1 305-1 308.

[8] 张磊, 郭学益, 田庆华, 等. 难处理金矿预处理方法研究进展及工业应用[J]. 黄金, 2021, 42(6): 60-68.

[9] 熊召华, 浦江东, 胡海平. 某难处理金矿石绿色高效联合提金工艺试验研究[J]. 黄金, 2018, 39(1): 58-61, 65.

[10] 满露梅. 复杂卡林型金矿选冶联合工艺的研究与探索[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(3): 63-69.

[11] 丘盛华, 毛佐国, 刘子帅, 等. 某选锌尾矿硫磺分离工艺研究[J]. 云南冶金, 2014, 43(2): 31-34.

[12] 姜涛, 胡熙庚. 关于难选金矿石的处理[J]. 黄金, 1991, 12(5): 26-33, 43.

[13] 许晓阳. 难处理金矿石加压氧化—氰化提金技术研究[J]. 黄金, 2020, 41(4): 50-53.

[14] 陈汝璨, 张磊, 郭学益, 等. 卡林型金精矿加压氧化—铁矾分解—非氰提金研究[J]. 黄金, 2024, 45(3): 27-31.

[15] 杨晓峰, 梁树丰, 潘凤娇. 高硫富砷金矿氧化预处理工艺研究现状[J]. 黄金, 2022, 43(2): 85-89.

[16] 殷书岩, 赵鹏飞, 陆业大, 等. 加压氧化技术在难处理金矿上的应用[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(1): 28-30.

[17] 李骞, 董斯宇, 许瑞, 等. 金矿提金技术及其研究进展[J]. 黄金, 2020, 41(9): 86-101.

[18] 李波, 张力先, 徐继刚. 难浸金矿石的预处理技术[J]. 沈阳黄金学院学报, 1996, 45(1): 76-82.

[19] 夏光祥, 涂桃枝. 加压氧化法预处理含砷难冶金矿的研究[J]. 黄金, 1995, 16(3): 23-26.

[20] FOMENKO I, ZAYTSEV P, PLESHKOV M, et al. Pressure oxidation of double refractory gold concentrates [C] // Alta metallurgical services. Proceedings of alta 2013 gold sessions. Perth: Alta metallurgical services, 2013: 72-84.

Synergistic preg-robbing behavior of chloride ions and organic carbonaceous matter in a carbonaceous gold ore

Guo Jinyi^{1,2}, Lin Haibin^{1,2}, Li Youhui^{1,2}, Qiu Yaoxing^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Resources*;

2. *Xiamen Zijin Mining and Metallurgy Technology Co., Ltd.*)

Abstract: This study investigates the synergistic preg-robbing behavior of chloride ions and organic carbonaceous matter during the pressure oxidation process of a refractory carbonaceous gold ore from a mining area in Guizhou Province. The effects of chloride ion mass concentration, organic carbon content, reaction temperature, and reaction time on the synergistic preg-robbing effect were examined. Results indicate that preg-robbing is influenced by the presence of organic carbon, chloride ions, as well as the pressure oxidation temperature and time. When gold concentrate and raw ore were blended at a mass ratio of 1:1, with an organic carbon mass fraction of 4.5 %, a reaction temperature of 210 °C, a reaction time of 55 min, and an activated carbon dosage of 30 g/L, the pressure oxidation followed by carbon-in-leach cyanidation yielded a gold leaching rate exceeding 93.9 %. The preg-robbing effect was effectively mitigated by reducing chloride ion content using silver nitrate as an inhibitor, improving the pressure oxidation performance for the carbonaceous gold ore.

Keywords: carbonaceous gold ore; chloride ion; preg-robbing behavior; organic carbon; pressure oxidation; cyanidation

.....
(上接第 27 页)

Ground pressure control practice in deep mining in the Sanxin Gold–Copper Mine

Yao Yifei¹, Li Minzhi¹, Li Junping², Tian Bo¹

(1. *Hubei Sanxin Gold Copper Limited Company*;

2. *School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology*)

Abstract: As mining in the Sanxin Gold–Copper Mine extends to deeper levels, the engineering geological conditions and orebody occurrence have worsened, with increasing in-situ stress and intensified ground pressure manifestations. This study utilized field investigation data on ground pressure phenomena, in-situ stress measurements, and laboratory-derived physical and mechanical rock parameters. Using Flac^{3D} software for numerical simulation, the overall distribution pattern of ground pressure was analyzed. The study determined the reasonable safety distance from the orebody boundary to along-the-vein drifts in the hanging wall and footwall. It also optimized stope structural parameters and surrounding rock support methods during extraction to control issues such as roof caving and collapses, thereby preventing excessive ore dilution and rock mass displacement in both walls. A threshold for non-contact between the backfill and roof was proposed to avoid overall movement of the stope roof or backfill, which could result in surface cracking or subsidence. The research provides several conclusive recommendations for ground pressure control in deep mining, offering technical support and theoretical basis for the safe and efficient extraction of deep orebodies in the Sanxin Gold–Copper Mine.

Keywords: deep mining; ground pressure control; stope structural parameter; ground pressure investigation; numerical simulation; ground pressure distribution regularity; control method