

# 泥层高度对细粒全尾浓密规律的影响

尹升华, 王勇

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

**摘要** 深锥浓密机是膏体制备的关键设备, 而泥层高度影响着浓密机内部料浆沉降速度和压密浓度。通过量筒静态沉降试验发现, 扰动区料浆沉降速度最快, 无明显规律; 沉降区料浆高度越高, 沉降速度越快; 压密区为匀速沉降。采用动态搅拌装置, 对不同泥层高度料浆浓密规律进行探究。结果表明, 当泥层高度一定时, 料浆浓度的变化速率随着压密时间的增加而逐渐减小, 6h 内料浆浓度变化最快, 压密效率最高, 当压密时间达到 12h 时, 极限质量分数变化很小; 在相同压密时间下, 不同泥层高度下料浆极限质量分数范围为 71.23%—74.43%。经分析, 该料浆质量分数达到 70% 以上时, 极限质量分数值与高径比呈线性正相关。因此, 泥层高度是影响底流浓度大小的一个重要因素。

**关键词** 深锥浓密机; 泥层高度; 沉降速度; 底流浓度

**中图分类号** TD853, TD854

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.07.004

## Influence of Mud Height on the Concentration of the Fine Tailing

YIN Shenghua, WANG Yong

Civil and Environmental Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract** The deep cone thickener is the key equipment for paste manufacture, and the mud height influences the slurry setting velocity and the thickening density in the thickener. The cylinder's static test shows that the settlement velocity of the slurry is the fastest in the disturbance area and without obvious law; the greater the initial height of the slurry, the larger its setting velocity in the setting area; a uniform settlement velocity is found in the compaction area. The concentration of the tailing with different mud heights is studied by the dynamic mixing facility. The results show that, when the mud height is fixed, the rate of the slurry concentration change is gradually reduced as the compaction time is increased. The rate of the slurry concentration change is the highest within 6h. When the compaction time is up to 12h, the rate of the limit concentration change is very small. The limit mass fraction of different mud heights is 71.23%—74.43% at the same compaction time. The analysis shows that when the limit mass fraction of tailings is above 70%, the limit concentration and the height to diameter ratio have a linear relationship. Therefore, the mud height is an important factor which affects the underflow concentration.

**Keywords** deep cone thickener; mud height; settling velocity; underflow concentration

### 0 引言

膏体充填技术因其环保、节能、减排、安全、高效等优点被世界上众多国家认可并应用, 并代表着充填技术的发展方向<sup>[1-3]</sup>。深锥浓密机是膏体充填的关键脱水设备, 具有产能大、效率高、底流浓度大等优点, 在国内外众多矿山得到了推广使用<sup>[4-9]</sup>。泥层高度大是该类浓密机的一大特点, 使用该类产品制备膏体将是一种趋势<sup>[10]</sup>。

国内外对该类浓密机做了大量研究, 陈述文等<sup>[11]</sup>介绍了

浓缩机高度对尾矿处理效果的影响, 但并没有深入研究其影响规律; 王勇等<sup>[12]</sup>认为深锥浓密机底流浓度与浓密机高径比密切相关, 并建立了二者之间的数学关系, 这是对深锥浓密机底流浓度与外形结构之间关系研究的一个尝试, 但是没有涉及泥层高度对浓密规律影响的研究。国外对浓缩理论的研究非常重视, Gladman 等<sup>[13]</sup>认为机械搅拌会增大脱水速度和脱水区域; Rudman 等<sup>[14]</sup>研究了料浆屈服应力 (Compressive Yield Stress) 和耙子转速对扭矩的影响, 但针对泥层高度对细

收稿日期: 2011-12-22; 修回日期: 2012-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51104011, 50934002); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目 (kjdb200902-12); 教育部创新团队资助计划项目 (IRT0950); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (2011000612002)

作者简介: 尹升华, 讲师, 研究方向为膏体充填技术, 电子信箱: csuysh@yahoo.com.cn

粒全尾沉降、浓密规律影响的研究却较少。因此,研究不同泥层高度下絮凝沉降规律和浓密规律对深锥浓密机的推广使用具有重要的理论支撑作用。

浓密机工作要求进料量等于排出量,从而保证一定的泥层高度,泥层高度一般又是通过絮凝剂添加及底流抽出速度来控制。尾矿进入深锥浓密机首先通过絮凝沉降,之后便进入压密浓缩阶段。对于特定浓密机来说,泥层高度决定着清液层的高度,而清液层的高度则和絮凝沉降作用有着直接关联。泥层高度是保证尾矿充分压密的基本条件,只有一定的泥层高度才能保证预期的底流。本文对相同料浆浓度和不同料浆高度下的絮凝沉降规律进行研究,同时对不同高度的泥层压密规律进行分析,以期膏体浓密技术的应用提供依据。

## 1 试验材料与仪器

### 1.1 试验材料

试验材料来自某铜钼矿选场排放口,该矿尾矿基本物理性能见表1。该尾矿容重较小,孔隙率相对较大,理论饱和浓度低。测量粒度组成时,先采用人工筛分方式对全尾矿进行筛分,对-200目颗粒采用激光粒度仪进行测量,结果如图1所示。该尾矿-320目质量分数为45.45%,属于细粒尾矿<sup>[15]</sup>。

表1 全尾砂基本物理性能  
Table 1 Basic physical properties of the tailings

物理性能	指标值
真密度/(t·m <sup>-3</sup> )	2.688
容重/(t·m <sup>-3</sup> )	1.4
孔隙率/%	47.92
理论饱和浓度/%	74.50

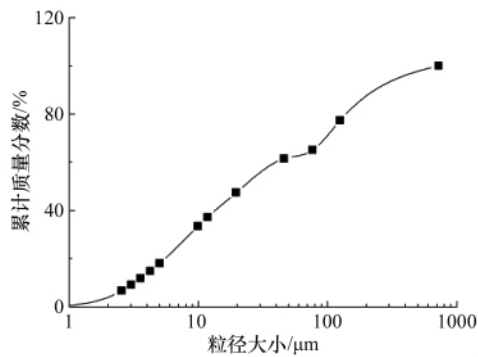


图1 尾矿粒度组成  
Fig. 1 Grade constitution of tailing

### 1.2 试验仪器

不同料浆高度对沉降速度影响试验采用量筒静态沉降方法,试验用仪器主要包括1000mL量筒、絮凝剂搅拌机(转速调至100—300r/min)、500mL烧杯、精度0.01g药物天平、秒

表计时器、自制砂浆搅拌机(在量筒内上下移动搅拌机,使砂浆混合均匀)和注射器(移取絮凝剂溶液)。

泥层高度对浓密规律影响试验采用自制深锥模型,可通过程序控制该装置转速、运行时间等参数,最低转速可控制在0.03r/min,更加接近实际深锥压密行为。

## 2 试验结果

### 2.1 不同高度料浆沉降试验

固定料浆质量分数为20%,絮凝剂溶液质量分数为0.3%,絮凝剂单耗为20g/t,根据尾砂和水的不同添加量来实现不同料浆高度,建立6个料浆高度水平试验。试验方案见表2。

表2 不同高度料浆沉降试验方案  
Table 2 Experiment plan of different height slurry settlement

序号	尾砂/g	水/g	絮凝剂溶液/g
1	100.0	400	0.67
2	112.5	450	0.75
3	125.0	500	0.83
4	150.0	600	1.00
5	175.0	700	1.17
6	200.0	800	1.33

料浆沉降开始后每隔一段时间记录固液分界面高度。开始时沉降速度快,记录的时间间隔为1min,随着沉降速度的减慢,记录的时间间隔增大。料浆沉降高度与沉降时间的关系见图2。

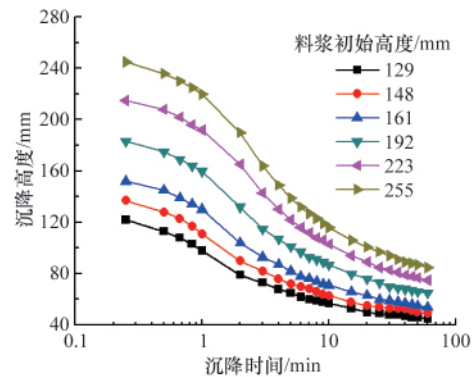


图2 不同时间的料浆沉降高度  
Fig. 2 Slurry setting height at different time

根据不同时间的沉降高度计算不同时间段的沉降速度,即

$$\text{沉降速度} = (\text{料浆初始高度} - \text{界面高度}) / \text{沉降时间} \quad (1)$$

计算结果见图3,不同料浆高度时,前2min沉降速度较快,沉降速度受料浆高度的影响没有明显规律;但从第3分

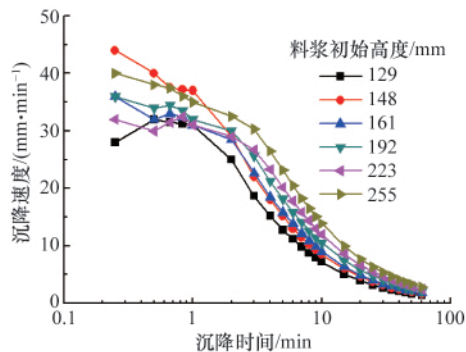


图3 不同高度料浆的沉降速度

Fig. 3 Setting velocity of different height slurry

钟开始,沉降速度随着料浆高度的增加而加快,基本呈线性增长,时间越久,沉降速度受高度影响越小。

不同沉降时刻沉降速度随料浆高度的变化见图4,在相同沉降时间内,初始料浆高度越大,沉降速度也越大;对于同一初始料浆高度,随着沉降时间的推移,料浆沉降速度迅速减小,逐渐趋于稳定。

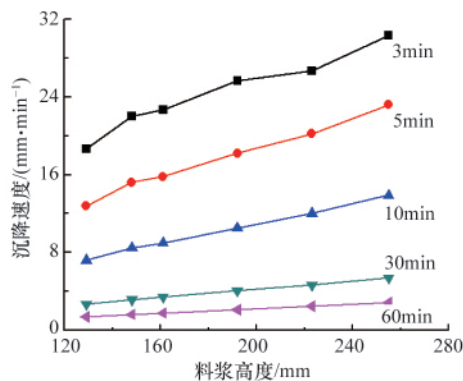


图4 不同时刻的沉降速度

Fig. 4 Setting velocity at different time

### 2.2 不同高度料浆浓密试验

根据尾砂不同添加量(750,1500,2250g)控制泥层高度,水添加量均为2250g,其他条件如絮凝剂吨耗(25g/t)、絮凝剂质量分数(0.3%)和转速(0.1r/min)等固定。不同高度泥层的沉降高度及极限质量分数计算结果见表3。

表3 不同高度泥层浓密试验结果

Table 3 Concentration experimental results of different height slurry

初始高度/mm	沉降时间									
	0.5h		3h		6h		12h		24h	
	高度/mm	质量分数/%	高度/mm	质量分数/%	高度/mm	质量分数/%	高度/mm	质量分数/%	高度/mm	质量分数/%
341	93	65.22	86	68.32	82	70.23	81	70.73	80	71.23
382	182	66.43	170	69.17	162	71.13	158	72.15	155	72.94
424	264	68.05	241	71.77	234	72.99	230	73.70	226	74.43

不同高度泥层的底流浓度以及与浓密时间的关系见图5。底流浓度随浓密时间的增大而增大,且泥层高度越大,底流浓度越大;此外,由图5还可看出,随着压密时间的增加,料浆浓度增加速率逐渐减小,前6h内料浆浓度变化最快,压密效率最高;当压密时间达到12h时,极限质量分数变化很

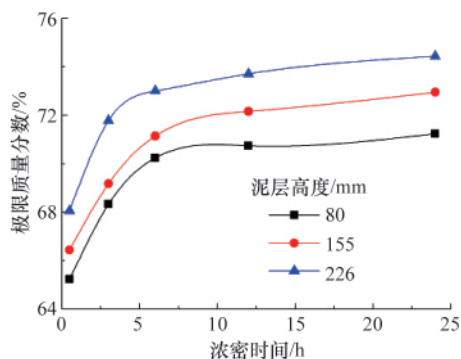


图5 不同浓密时间的料浆浓度

Fig. 5 Slurry concentrations of different thickening time

小;24h时料浆浓度几乎与12h时没有变化。经计算,得到泥层高径比(泥层极限高度与直径比值)与极限质量分数的关系(表4)。极限质量分数与高径比的关系见图6,不同泥层高度下尾矿极限质量分数范围为71.23%—74.43%,最大值接近理论饱和和质量分数值74.5%,该尾矿浓度达到70%以上时,极限质量分数值与高径比呈线性正关系。

表4 不同高径比对应的极限质量分数

Table 4 Limit concentrations of different height to diameter ratios

极限高度/mm	直径/mm	高径比	极限质量分数/%
80	100	0.8	71.23
155	100	1.55	72.94
226	100	2.26	74.43

回归极限质量分数与高径比方程为

$$y=69.497+2.193x \quad (2)$$

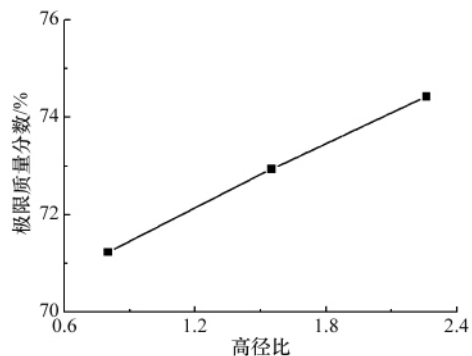


图 6 极限质量分数与高径比的关系

Fig. 6 Relationship between limit concentration and height to diameter ratio

其中,  $y$  为极限质量分数,  $x$  为高径比。复相关系数  $R^2=0.999$ , 可见, 该尾矿在膏体浓度范围之内, 极限质量分数值与高径比基本呈线性关系。

### 3 讨论与分析

#### 3.1 不同料浆高度对沉降规律影响分析

目前, 絮凝沉降技术已广泛应用于各类矿山的尾矿浓缩沉降生产中<sup>[15]</sup>。絮凝剂利用“架桥”原理, 在内聚力的作用下, 尾砂颗粒相互碰撞并在絮凝剂长链结构作用下吸附在一起, 聚集成较大的絮凝团, 从而加快尾砂沉降速度<sup>[16]</sup>。量筒沉降研究对深锥絮凝沉降具有较好的参考借鉴作用。

料浆在量筒内部的沉降共分为 3 个区域, 分别为扰动区、沉降区和压密区, 见图 7<sup>[6]</sup>。其中扰动区较短, 完成时间较快, 沉降区基本可以视为自由沉降, 压密区接近匀速沉降。

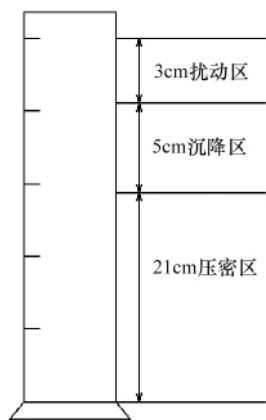


图 7 量筒沉降原理

Fig. 7 Settlement principle of measuring cylinder

不同料浆高度下, 前 2min 沉降规律不明显, 这是因为前 3min 颗粒处于扰动区域; 当颗粒进入沉降区域后, 颗粒之间几乎没有干扰, 进行自由沉降。

相同料浆浓度时, 料浆高度越大, 对应的自由沉降高度越大, 沉降速度也就越快, 因此会出现 3min 后沉降速度随着

料浆高度的增加而加快的现象; 进入压密阶段后, 料浆受力情况稳定, 呈现匀速沉降; 当达到一定的浓度后, 料浆颗粒受力达到平衡, 料浆高度不再变化。

因此, 可以通过适当增加深锥高度, 在保持泥层高度不变即停留时间不变的前提下, 增加清液层高度, 从而加快料浆沉降速度。

#### 3.2 不同泥层高度下料浆浓密规律探讨

当某一停留时间或泥层高度对应底流浓度为饱和浓度时, 再增加停留时间或泥层高度, 极限质量分数不增加。

处于压缩过程中的颗粒由于各自距压缩点的高度不同, 所受的有效应力也各不相同。而在不同的高度下孔隙度不同, 即压力不同时颗粒间的孔隙不同。在压力作用下, 颗粒之间互相关联的强度将受到削弱或破坏, 从而使颗粒发生相对移动和重新排列, 相互挤紧。颗粒之间孔隙中的水也同时被排出, 颗粒间的孔隙体积因而变小。

由压缩试验得到的压力与孔隙比之间的关系曲线如图 8 所示<sup>[17]</sup>。当压力变化范围不大时, 颗粒间的压缩曲线可以近似地用直线  $M_1M_2$  表示, 而极限质量分数与高径比呈线性关系与这一理论吻合。这条直线的表达式为

$$e_1 - e_2 = a \cdot (P_2 - P_1) \quad (3)$$

其中,  $e_1, e_2$  为增压前后颗粒层在  $P_1, P_2$  作用下达到稳定状态时的孔隙比;  $P_1, P_2$  为增压前后使颗粒层压缩并达到稳定的压力强度,  $N/cm^2$ ;  $a$  为压缩系数,  $cm^3/N$ 。

随着压密时间不断增加, 料浆内部的水随着转子的转动沿着导水杆排出, 底流浓度随着增加。随着泥层高度的增加, 压力逐渐增大, 孔隙比逐渐减小, 底流浓度随之增大。

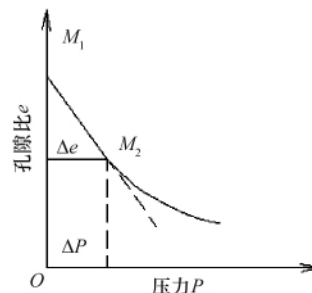


图 8 压力与孔隙比的关系

Fig. 8 Relationship between pressure and porosity

### 4 结论

(1) 料浆在量筒内部的沉降共分为扰动区、沉降区和压密区 3 个区域。通过不同料浆高度沉降速度试验发现, 料浆高度越高, 沉降速度越快。前 2min 内料浆处于扰动区, 在沉降区域料浆沉降速度较快, 压密区呈现直线沉降, 当颗粒受力达到平衡时, 料浆高度不再变化, 达到极限质量分数。

(2) 当泥层高度一定时, 充分的压密时间是达到预期底流浓度的重要因素。随着压密时间的增加, 料浆浓度增加速率逐渐减小, 6h 内料浆浓度变化最快, 压密效率最高; 当压密

时间达到 12h 时, 极限质量分数变化很小, 24h 时料浆浓度几乎与 12h 时没有变化, 因此, 建议压密时间保证在 12h 左右。

(3) 在同等压密时间下, 泥层高度越大, 底流浓度越大。不同泥层高度下尾矿极限质量分数范围为 71.23%—74.43%, 最大值接近理论饱和和质量分数值 74.5%。该尾矿质量分数达到 70% 以上时, 极限质量分数值与高径比呈线性正关系。因此, 在保证停留时间的前提下, 泥层高度是影响底流浓度大小的一个重要因素。

### 参考文献 (References)

- [1] Grabinsky M W. In situ monitoring for ground truthing paste backfill designs [C]//Jewell R, Fourie A. Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2010: 85–98.
- [2] Fall M, Nasir O. Predicting the temperature and strength development within cemented paste backfill structures [C]//Jewell R, Fourie A. Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2010: 125–136.
- [3] Belem T, Fourie A B, Fahey M. Time-dependent failure criterion for cemented paste backfills[C]//Jewell R, Fourie A. Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2010: 147–162.
- [4] Nasir O, Fall M. Coupling binder hydration temperature and compressive strength development of underground cemented paste backfill at early ages[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(1): 9–20.
- [5] 王洪江, 吴爱祥, 肖卫国, 等. 粗粒级膏体充填的技术进展及存在的问题[J]. 金属矿山, 2009, 39(11): 1–5.  
Wang Hongjiang, Wu Aixiang, Xiao Weiguo, et al. *Metal Mine*, 2009, 39(11): 1–5.
- [6] Tao D, Parekh B K, Zhao Y M, et al. Pilot-scale demonstration of deep cone™ paste thickening process for phosphatic clay/sand disposal[J]. *Separation Science and Technology*, 2008, 45(10): 1418–1425.
- [7] 季振万, 宋悦杰. 高效浓密技术的发展及应用[J]. 钼矿冶, 1995, 14(2): 89–97.
- Ji Zhenwan, Song Yuejie. *Uranium Mining and Metallurgy*, 1995, 14(2): 89–97.
- [8] 刘晓辉, 吴爱祥, 王洪江, 等. 膏体充填尾矿浓密规律初探 [J]. 金属矿山, 2009, 39(9): 38–41.  
Liu Xiaohui, Wu Aixiang, Wang Hongjiang, et al. *Metal Mine*, 2009, 39(9): 38–41.
- [9] 勾金玲, 赵福刚. 高效膏体浓密机在梅山选厂的应用 [J]. 矿业快报, 2007, 23(3): 70–72.  
Gou Jinling, Zhao Fugang. *Express Information of Mining Industry*, 2007, 23(3): 70–72.
- [10] Loan C, Arbuthnot L M. Transforming paste thickener technology[C]//Jewell R, Fourie A. Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2010: 365–373.
- [11] 陈述文, 陈启平. HRC 高压浓缩机的原理、结构及应用[J]. 金属矿山, 2002, 32(12): 33–36.  
Chen Shuwen, Chen Qiping. *Metal Mine*, 2002, 32(12): 33–36.
- [12] 王勇, 王洪江, 吴爱祥. 基于高径比的深锥浓密机底流浓度数学模型 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(8): 113–117.  
Wang Yong, Wang Hongjiang, Wu Aixiang. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(8): 113–117.
- [13] Gladman B, de Kretser R G, Rudman M, et al. Effect of shear on particulate suspension dewatering[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2005, 83(7): 1–4.
- [14] Rudman M, Simic K, Paterson D A, et al. Raking in gravity thickeners [J]. *International Journal of Minerals Processing*, 2008, 86: 114–130.
- [15] 于发, 曹沛萍. 梅山尾矿浓缩输送试验研究与优化改造[J]. 梅山科技, 2007(4): 55–58.  
Yu Fa, Cao Peiping. *Baosteel Meishan*, 2007(4): 55–58.
- [16] 史秀志, 胡海燕, 杜向红, 等. 立式沙仓尾矿砂浆液絮凝沉降试验研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(3): 1–3.  
Shi Xiuzhi, Hu Haiyan, Du Xianghong, et al. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2010, 30(3): 1–3.
- [17] 湛含辉, 杨小生, 蔡明华. 浓密机中压缩过程及其有关计算 [J]. 金属矿山, 1989, 5(11): 45–48.  
Zhan Hanhui, Yang Xiaosheng, Cai Minghua. *Metal Mine*, 1989, 5(11): 45–48.

(责任编辑 孙秀云, 代丽)

### · 科学共同体介绍 ·

## 中国植物学会

中国植物学会 (Botanical Society of China) 成立于 1933 年, 由著名植物科学家胡先骕、辛树帜、李继侗、张景钺、钱崇澍、陈焕镛、林溶等 19 人发起, 钱崇澍任第一届理事会会长。学会当时有会员 105 人, 发展至今共历 14 届。

中国植物学会是全国植物学科技工作者自愿结成的学术性、联合性、专业

性、行业性的全国性的非营利性的社会组织, 是中国科学技术协会的组成部分。

中国植物学会至 2008 年拥有 14138 名会员; 学会下设 6 个工作委员会、8 个专业委员会和 4 个二级分会; 除台湾省、香港和澳门行政特区外, 全国 31 个省、市、自治区均成立了植物学会。

中国植物学会主办《植物学报》、《植物分类学报》、《植物学通报》、《植物生态学报》、《生命世界》、《生物学通报》等学术期刊。

中国植物学会于 2008 年 7 月在兰州召开第 14 届全国代表大会, 选举洪德元任理事长, 葛颂任秘书长。

(责任编辑 徐子政(实习生), 秦政)