

立式砂仓断面积和高度研究及应用

陈秋松¹, 张钦礼¹, 王新民^{1,2}, 肖崇春³

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南中大设计院有限公司, 湖南长沙 410075;
3. 飞翼股份有限公司, 湖南长沙 410075)

摘要: 基于室内实验、集料供排平衡理论、流体动力学理论, 提出立式砂仓断面积和高度的计算模型。断面积计算模型的核心是有效沉降速度, 通过沉降规律分析, 提出有效沉降速度为干涉沉降结束时液面下降高度与沉降时间之比。高度计算模型由压缩层、沉降层、溢流层、储砂空间和稳定放砂高度组成, 核心是压缩层高度计算, 应用流体动力学理论提出压缩层高度和砂浆浓度的关系式。以某矿立式砂仓为例, 计算得到立式砂仓直径 D 为 10 m, 砂仓高度 H 为 26.5 m。现场试运行结果表明: 砂仓底流体积分数可达 44% (质量分数 69%) 溢流水体积分数控制在 3% 以下, 浓缩效果良好。

关键词: 充填; 立式砂仓; 断面积; 有效沉降速度; 压缩层; 砂仓高度

中图分类号: TD 853 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)07-1040-05

Study on the Sectional Area and Height of Vertical Sand Silo and Its Application

CHEN Qiu-song¹, ZHANG Qin-li¹, WANG Xin-min^{1,2}, XIAO Chong-chun³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Zhongda Design Institute Co., Ltd., Changsha 410075, China; 3. Feny Corporation Limited, Changsha 410075, China. Corresponding author: ZHANG Qin-li, E-mail: zhangqinlicn@126.com)

Abstract: Based on indoor experiments, aggregate balance theory and fluid dynamics theory, mathematical models of vertical sand silo area and height were established. The core of sectional area calculation model is the effective sedimentation velocity which is equal to the ratio of the descent height of the liquid level and the sedimentation time. The height calculation model consists of compression layer, sedimentation layer, overflow layer, reserving sand space and stable sand height. Because the calculation of the compression layer height is the key part in the model, an equation on compression layer height and mortar concentration was put forward. Then this method was applied to a vertical sand silo. It was got that the diameter of the vertical sand silo is 10 m, and the height of vertical sand silo is 26.5 m. The field operation trial showed that the bottom flow volume fraction of sand silo can reach 44% (the mass fraction is 69%) and the volume fraction of over-flow water can be controlled under 3%, which means the concentration effect is very well.

Key words: filling; vertical sand silo; sectional area; effective sedimentation velocity; compression layer; silo height

随着经济的高速发展和资源的大量消耗, 矿业面临的两大难题越发突出: 资源开采的深部化和地表尾矿废石的灾害化。深部开采面临地压增大的情况, 甚至产生破坏性极大的岩爆, 而地表排

放尾矿废石不仅会带来环境污染, 更会给生态造成长远的破坏^[1]。对于这两大难题, 业内学者如于润沧院士^[2], Jiao 等^[3], 王新民等^[4]普遍认为对井下采空区进行全尾砂胶结充填是理想的解决

方案.

选厂排出的全尾砂浆体质量分数仅 10% ~ 25%, 无法满足矿山高浓度胶结充填要求, 因此, 在利用全尾砂作为充填骨料进行充填制浆前, 必须对全尾砂浆体进行浓缩沉降, 以实现全尾砂的高浓度稳定供料. 目前, 国内外常用的浓缩储砂设施主要有立式砂仓^[5-6]和新兴的深锥浓密机^[7]. 虽然深锥浓密机采用动态浓缩原理, 发展势头强劲, 但国内应用实例较少, 技术相对不够成熟, 价格较高; 立式砂仓由于结构简单、占地面积小, 且由于应用时间长, 工艺技术成熟, 目前在充填矿山得到更为广泛的应用. 相关学者针对立式砂仓的进砂和放砂原理、局部结构进行了深入的研究^[8], 也为立式砂仓稳定放砂的可行性奠定了理论基础, 提供了实践依据.

研究表明, 结构的变化对沉降性能有着至关重要的影响^[9-10]. 然而, 国内外对于立式砂仓的直径、高度等参数的研究较少, 在研究和设计过程中, 一般根据矿山充填能力, 通过参考其他类似矿山经验进行取值. 由于各个矿山全尾砂性质的差异, 在现场应用过程中溢流水含固量高、底流浓度不达标的情况常有发生. 同时, 立式砂仓直径大小直接影响着基建的投资, 取值过大导致投资浪费, 与矿山绿色可持续发展相悖, 取值过小影响浓缩效果. 因此, 对立式砂仓直径和高度进行系统的研究具有一定的理论价值和工程意义.

鉴于以上原因, 本文提出立式砂仓断面积和高度的数学计算模型, 并以湖南某锡矿立式砂仓为例, 计算结果和现场砂仓应用效果进行验证, 为工程应用提供理论依据.

1 立式砂仓断面积计算模型

1.1 有效沉降速度

沉降速度是衡量全尾砂沉降效果的最主要指标, 其大小直接关系到立式砂仓沉降的效率, 影响立式砂仓结构参数的确定. 低浓度全尾砂浆和絮凝剂混合后, 自管道进入立式砂仓进行浓缩沉降, 全尾砂颗粒在立式砂仓中的沉降过程可分为自由沉降、干涉沉降和压缩沉降.

1) 自由沉降. 全尾砂进入立式砂仓初始阶段, 全尾砂颗粒或絮凝团之间依靠重力进行沉降, 相互之间不存在干扰或干扰性弱, 在沉降曲线上接近一条斜直线, 如图 1 中 *AB* 段.

2) 干涉沉降. 自由沉降结束后, 全尾砂颗粒或絮凝团浓度提高, 在继续沉降的过程中相互之间碰

撞、挤压, 进入干涉沉降, 此时沉降速度逐渐下降, 在沉降曲线图上表现为向上凹的曲线, 如 *BC* 段. 干涉沉降阶段尚可清晰观察到沉降界面的下降.

3) 压缩沉降. 当全尾砂颗粒或絮凝团达到一定浓度后, 进入近饱和阶段, 此时全尾砂的浓缩依靠上层颗粒的重力和水压对下部的全尾砂进行压缩, 将水挤压而出, 从而进一步提高浓度. 在压缩沉降阶段, 沉降界面变化缓慢, 最后基本为一条水平直线, 如 *CD* 段.

计算全尾砂在立式砂仓内沉降速度的传统方法是通过室内量筒试验, 绘制沉降曲线, 以自由沉降或干涉沉降结束时间为拐点, 计算最大沉降速度^[11]. 然而, 由图 1 可见, 采用此方法计算得到的沉降速度为自由沉降速度或自由沉降与干涉沉降的平均速度, 若此时排出尾砂, 底流浓度必然偏低, 难以满足高浓度充填要求. 本文研究引入有效沉降速度, 通过压缩点的切线法进行计算, 即在沉降曲线上, 当压缩到高浓度点时作压缩点切线 (如图 1 中 *S* 点), 记录此时的沉降高度 Δh 和有效沉降时间 t_u , 则有效沉降速度 $\omega = \Delta h/t_u$.

通过不同的对比试验组^[12]得到不同絮凝剂添加条件下的有效沉降速度, 以最佳试验组的有效沉降速度作为后续计算依据.

1.2 砂仓断面积

准确选择砂仓断面积, 对于提高沉降效率、满足生产需求、合理安排工业场地面积、降低基建投资具有非常重要的意义.

研究立式砂仓可实现动态连续放砂, 即矿浆在砂仓中的沉降过程连续进行, 实现在立式砂仓中全尾砂的供(给)排(放)动态平衡. 由选厂排出的低浓度矿浆连续放入砂仓中心, 固体颗粒沉降到底部浓缩后稳定放砂, 同时澄清水由砂仓上部溢流槽排走. 从立式砂仓工作原理和设备作用方面考虑, 立式砂仓可近似看作浓缩池, 其沉淀面积的计算方法有 3 种: 以浓缩机分级粒度为计算依据的表格法计算, 按表面负荷法计算, 按沉降速度计算. 经实验和工业应用证明, 按沉降速度计算精确度较高, 有利于实现动态放砂平衡.

基于有效沉降速度的研究, 假设全尾砂颗粒在立式砂仓中均匀沉降. φ_v 为供料全尾砂浆体积分数(%), φ_{vd} 为立式砂仓底部排出的全尾砂浆体积分数(%), ρ_s 为全尾砂干容重(kg/m^3). 设想立式砂仓中混合层固体速度存在两个分量, 一是浑液面沉速 ω (有效沉降速度, m/h), 二是浓缩体向下排出速度 U (m/h), 这样固体通过量 G ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) 近似为

$$G = \varphi_v(\omega + U)\rho_s \quad (1)$$

在稳定放砂理想状态下,任意时刻供砂固体量与仓底排出量相等^[13-14],即

$$G = \varphi_{vd}U\rho_s \quad (2)$$

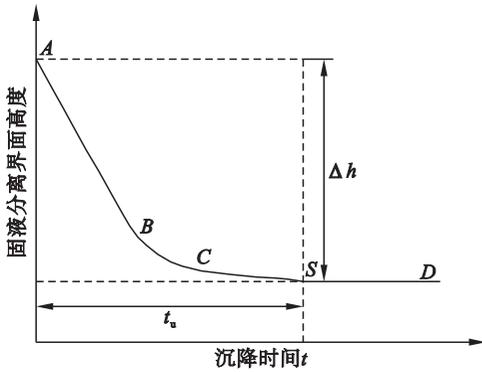
由式(1)和式(2)消去 U , 则

$$G = \frac{\varphi_v\omega\rho_s}{1 - \varphi_v/\varphi_{vd}} \quad (3)$$

综上所述,可得立式砂仓的面积 A 为

$$A = \frac{Q_s}{G} = \frac{Q\varphi_v}{\omega} \left(\frac{1}{\varphi_v} - \frac{1}{\varphi_{vd}} \right) \quad (4)$$

式中: Q_s 为全尾砂固体流量, m^3/h ; Q 为全尾砂供砂流量, m^3/h .



图中时间和高度单位根据实验实际情况设定,后进行单位转换
图 1 全尾砂沉降曲线

Fig. 1 Sedimentation curve of unclassified tailings

2 砂仓高度计算模型

全尾砂颗粒在立式砂仓中的沉降过程分为自由沉降、干涉沉降和压缩沉降,因此,全尾砂经过静态沉降达到稳定状态时,立式砂仓内沿竖直方向按固体的浓度分布,亦可大致分为 3 个层域:溢流层(澄清区)、沉降层和压缩层.在沉降层内,随深度的增加,浓度变大.在压缩区内,随深度的增加,浓度进一步增大,但变化的幅度逐渐变小,当达到一定的深度时,固体浓度恒定.浓度变化趋势与图 1 沉降曲线相符.

2.1 压缩层高度

高浓度全尾砂浆体由压缩层放出,处于压缩层中的颗粒,由于它们在压缩层中的位置不同,所以所受的压力也不同.在压力的作用下,颗粒之间的连接强度将受到破坏从而产生位移,使得颗粒相互挤压,造成颗粒间以及絮团内部的孔隙也越小,水分被挤出^[15].假设压力从 p_1 微增至 p_2 ,此时有

$$e_1 - e_2 = \alpha(p_2 - p_1) \quad (5)$$

其中: e_1, e_2 为增压前后压缩层在 p_1, p_2 作用下达到稳定状态时的孔隙比; α 为压缩系数.

浓缩层底部的压缩过程是靠其上层浮容重产生的.设在高度 h 处的面积为 A_h (图 2) 则有

$$A_h = \pi h^2 / \tan^2 \alpha \quad (6)$$

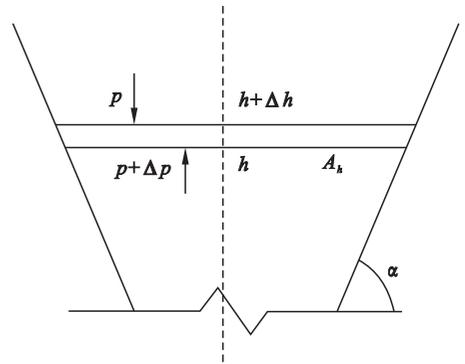


图 2 高度 h 处的力学分析

Fig. 2 Mechanical analysis at h height

设在高度 h 处的孔隙度为 N_h , 则有

$$-dp = (1 - N_h)\Delta\rho A_h dh / A_h \quad (7)$$

其中: $\Delta\rho$ 为颗粒和水的密度差, kg/m^3 ; $-dp$ 表示方向相反.

根据式(5),当 $p_1 = 0$ 时 $e_1 = e_0$, 则有

$$p = -1/\alpha(e_h - e_0) \quad (8)$$

其中: e_0 为澄清区与沉降区临界处的孔隙比,近似等于 1; e_h 为 h 处的受压层的孔隙比; $e_h = N_h / (1 - N_h)$. 将 e_0, e_h 代入式(8)中求导,结合式(7) 则有

$$dN[\alpha(1 - N)^2] = (1 - N)\Delta\rho dh \quad (9)$$

对式(9)积分,换算后有

$$\frac{1}{2(1 - N)^2} = a\Delta\rho h + K \quad (10)$$

$$h = \frac{\rho_s^2}{2a\Delta\rho w^2} + K \quad (11)$$

式中: K 为常数; w 为 h 处尾砂浆的质量分数(%), $w = \rho_s(1 - N)$.

由于立式砂仓底流浓度必须满足流动性能要求,以保证稳定供料,因此,存在边界底流质量分数 w_d (%) 与上文提到的立式砂仓底部放砂体积分数相对应,即存在边界孔隙度 N_d , 此时易得常数 K 为

$$K = \frac{1}{2(1 - N_d)^2} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)中,整理后得压缩层高度与矿浆质量分数的数学关系

$$h = \frac{\rho_s^2}{2a\Delta\rho} \left(\frac{1}{w^2} - \frac{1}{w_d^2} \right) \quad (13)$$

2.2 沉降层高度

矿浆浓度接近临界压缩点浓度的位置到清液

层(澄清层)之间为沉降区,该层中主要发生自由沉降和干涉沉降,由于沉降速度较快,且供砂时一般采用导流桶深入沉降层,该层高度一般取 1.0~1.5 m(细颗粒较多时,取大值),以满足对矿浆中微细颗粒的过滤要求。

2.3 溢流层高度

溢流层高度的选择,一般要求保证溢流水的连续稳定达标排放,避免因生产过程中可能产生的不稳定因素所造成的泥线波动,即砂浆短距离逆流影响溢流水排放效果。根据矿浆性质、生产量的大小以及操作控制质量(包括自动化程度)高低,一般取值 1.5~2.0 m。

2.4 稳定放砂高度和储砂高度

白象山立式砂仓试运行过程发现,当立式砂仓高浓度砂浆低于一定高度时,底部放砂浓度明显降低,无法实现高浓度放砂。这是由于尾砂颗粒间及其与仓壁间存在黏结力,在水的穿透作用下,造成水从中央渗透,降低放砂浓度。因此,为保证立式砂仓稳定放砂,一般增加 1 m 砂仓高度。

立式砂仓在设计过程中,要求满足一次连续充填的用砂量要求,根据充填能力、充填配比、工作制度等进行常规数学计算,此处不再赘述。

综上所述,砂仓高度(H)由压缩层、沉降层、溢流层、储砂高度和稳定放砂高度组成。

3 实例验证

以湖南某锡矿充填系统研究为例,采用本文研究成果对立式砂仓结构参数进行计算。该矿拟采用全尾砂高浓度胶结充填系统,使用立式砂仓进行全尾砂浓缩沉降。由于可用工业场地面积有限,作为充填系统的主要建筑,在保证浓缩效果的前提下,对立式砂仓结构参数进行研究是合理布局工业场地的基础。

3.1 基础参数

基本参数如表 1 所示。其中:供砂质量分数由选厂提供,为平均排尾质量分数;底流质量分数根据充填浆体浓度需求进行确定,该矿设计要求放砂质量分数波动介于 55%~65% 之间,因此 h 处砂浆质量分数取 55%,底流质量分数取 65%;体积分数通过下式进行换算:

$$\varphi = \frac{w}{\frac{\rho_s}{\rho} - w \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)}$$

式中: φ 为体积分数%; w 为对应的质量分数%; ρ_s 、 ρ 分别为固体及水的密度 kg/m^3 。

供砂流量:按要求的底流体积分数 39.62%,放砂能力 $100 \text{ m}^3/\text{h}$,平均供砂体积分数 9.79% 计算,每小时需进砂量 404.70 m^3 。

有效沉降速度:矿方在先前工作的基础上,已确定絮凝沉降相关参数。在给定絮凝剂类型和单耗的条件下进行室内沉降实验。图 3 为实验沉降曲线,经图中数据分析,在 3 min 左右时,固液分界面高度变化已经十分微小,干涉沉降结束,进入压缩沉降。此时固液界面下降高度 19.6 cm,则有效沉降速度为

$$\omega = 6.53 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1} = 3.92 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$$

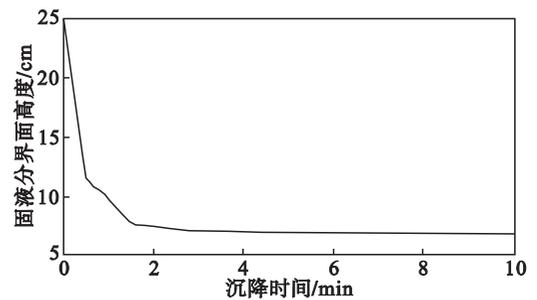


图 3 沉降曲线

Fig. 3 Sedimentation curve

3.2 结构参数计算

3.2.1 断面积

将供砂流量 Q 、供砂体积分数 φ_v 、底流体积分数 φ_{vd} 、有效沉降速度 ω 代入式(4)中,计算立式砂仓断面积:

$$A = \frac{404.70 \times 9.79\%}{3.92} \times \left(\frac{1}{9.79\%} - \frac{1}{39.62\%} \right) = 77.73 \text{ m}^2$$

因此,该矿立式砂仓断面积为不小于 77.73 m^2 ,取直径约为 10 m。

3.2.2 砂仓高度

将表 1 相关参数代入式(13)中,计算立式砂仓压缩层高度:

$$h_1 = \frac{2830^2}{2 \times 0.108 \times (1350 - 1000)} \times \left(\frac{1}{55^2} - \frac{1}{65^2} \right) = 1.92 \text{ m} \approx 2 \text{ m}$$

由于该矿尾砂细泥含量较高,沉降层、溢流层高度取大值。立式砂仓参数计算结果如表 2 所示。

3.3 现场工业实验

该矿立式砂仓系统建成后进行了现场工业实验,尾砂沉降的体积分数达到 44%,折算成质量分数为 69%,顶部溢流水体积分数控制在 3% 以内,达到良好的浓缩沉降效果。由此可见,本文研究成果在确定立式砂仓结构参数方面可信度较高。

表 1 基本参数
Table 1 Basic parameters

参数	符号	单位	值	参数	符号	单位	值
干尾砂实密度	ρ_s	kg/m ³	2 830	水的密度	ρ	kg/m ³	1 000
供砂质量分数	w_0	%	23.50	底流质量分数	w_d	%	65
供砂体积分数	φ_v	%	9.79	底流体积分数	φ_{vd}	%	39.62
供砂密度	ρ_1	kg/m ³	1 179.19	放砂密度	ρ_2	kg/m ³	1 725.08
有效沉降速度	ω	m/h	3.92	充填能力	—	m ³ /h	100
料浆灰砂质量比	—	—	1:10	供砂流量	Q	m ³ /h	404.70
压缩系数	a	—	0.108	h 处砂浆质量分数	w_h	%	55%

表 2 立式砂仓结构参数
Table 2 Structural parameters of vertical sand silo

参数	符号	单位	值
砂仓直径	D	m	10
砂仓面积	A	m ²	78.5
砂仓高度	H	m	26.5
压缩层高度	h_1	m	2.0
沉降层高度	h_4	m	1.5
溢流层高度	h_5	m	2.0
稳定放砂高度	h_2	m	1.0
储砂高度(含锥体部分)	h_3	m	20.0

4 结 论

1) 基于室内实验、集料供排平衡理论,建立立式砂仓断面面积计算模型,其核心为有效沉降速度。通过沉降规律分析,提出有效沉降速度为干涉沉降结束时液面下降高度与沉降时间之比。

2) 应用流体动力学理论提出压缩层高度和砂浆浓度的关系式。立式砂仓高度计算模型由压缩层、沉降层、溢流层、储砂空间和稳定放砂高度组成。

3) 以某矿立式砂仓结构参数为例,得到立式砂仓直径为 10 m,砂仓高度为 26.5 m。经现场工业实验,砂仓底流体积分数可达 44%(质量分数 69%),溢流水体积分数控制在 3% 以下,浓缩效果良好。

参考文献:

- [1] 张钦礼,陈秋松,胡威,等. 充填钻孔寿命 SVM 优化预测模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(2): 2868-2874.
(Zhang Qin-li, Chen Qiu-song, Hu Wei, et al. SVM optimal prediction model of the backfill drill-hole life[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)* 2014, 45(2) 2868-2874.)
- [2] 于润沧. 我国充填工艺创新成就与尚需深入研究的课题[J]. 采矿技术,2011,11(3):1-3.
(Yu Run-cang. Achievements and subjects needing studied further of filling technology innovation in China[J]. *Mining Technology* 2011, 11(3):1-3.)
- [3] Jiao H Z, Wang H J, Wu A X, et al. Rule and mechanism of

flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, 32(6):1437-1441.

- [4] Wang X M, Zhao B, Zhang Q L. Cemented backfilling technology with unclassified tailings based on vertical sand silo[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(6):800-807.
- [5] Brown C J, Lahlouh E H, Rotter J M. Experiments on a square planform steel silo[J]. *Chemical Engineering Science* 2000, 55(20):4399-4413.
- [6] Goodey R J, Brown C J. The influence of the base boundary condition in modelling filling of a metal silo[J]. *Computers & Structures* 2004, 82(7):567-579.
- [7] Owen A T, Nguyen T V, Fawel P D. The effect of flocculant solution transport and addition conditions on feedwell performance in gravity thickeners[J]. *International Journal of Mineral Processing* 2009, 93(2):119-127.
- [8] Zhang Q, Zhang J X, Huang Y L. Backfilling technology and strata behaviors in fully mechanized coal mining working face[J]. *International Journal of Mining Science and Technology* 2012, 22(2):151-157.
- [9] Gheshlaghi M E, Goharrizi A S, Shahriyar A A. Modeling industrial thickener using computational fluid dynamics (CFD), a case study: tailing thickener in the Sarcheshmeh copper mine[J]. *International Journal of Mining Science and Technology* 2013, 23(6):885-892.
- [10] Wang H J, Yang S K, Wu A X. Experimental research on consolidation properties of tailings granule in paste discharge[C]// *Rock Mechanics: Achievements and Ambitions—Proceedings of the 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics*. Beijing: 2011:199-203.
- [11] Shi X Z, Hu H Y, Du X H, et al. Experimental study on flocculating sedimentation of tailings slurry in a vertical sand silo[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2010(3):1-3.
- [12] Liang Z, Han B P, Liu H. Optimum conditions to treat high-concentration microparticle slime water with bioflocculants[J]. *Mining Science and Technology*, 2010, 20(3):478-484.
- [13] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994:110-116.
(Fei Xiang-jun. Slurry and granular material transport hydraulics[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1994:110-116.)
- [14] Wilhelm J, Naide Y. Sizing and operating continuous thickeners[J]. *Mining Engineering*, 1981, 33:1710-1718.
- [15] 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(11):44-48.
(Zhan Han-hui, Yang Xiao-sheng, Cai Ming-hua. Compression process of thickener and its related calculation[J]. *Metal Mine*, 1989(11):44-48.)