

浮栓式保温水箱

潘 根

(南京大学物理系)

对于适合于家庭使用的小型太阳能热水器来说,保温水箱性能的好坏,对整个装置的实用价值有着重要的影响。常规水箱的保温时间较短,主要是由于箱内的水有较大的自由表面,汽化速度较快所致。若在箱内放一块浮在水上的轻质材料板,使水失去了自由表面,从而杜绝了汽化热的损耗,那么就可使水箱的保温性能得到明显的改善,而所增成本甚微。文中介绍了“浮栓式保温水箱”的设计方法。

一、问题的提出

在开发和利用太阳能方面,热水器的实用价值无疑已得到了证实。在日本,早在七十年代,这种装置的普及率就已经高达75%;在塞浦路斯,凡属新建的住宅,都安装上了太阳能热水器。根据近年来的发展势头,预料这种装置在今后10—20年内也将在我国得到普及,因此,如何进一步改善太阳能热水器的性能,是一个值得重视的问题。

集热器和保温水箱是太阳能热水器的基本部件。热水器的实用价值是由这两部分共同决定的。就适合于家庭使用的、采光面积为 2m^2 的集热器来说,它相当于功率为 1kW 的电炉,每天的有效工作时间为 $5\sim 6\text{h}$,所采集到的太阳能相当于 $5\sim 6\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电能,能使 100kg 水的温度增加 $43\sim 52^\circ\text{C}$ 。按理说,即使是在冬季,太阳能热水器仍应当能提供合格的洗澡水。然而,实际情形并非如此。就南京地区(北纬 32°)的情况来看,太阳能热水器在冬季确实能使水温达到 $40\sim 45^\circ\text{C}$,但这种温度只能维持到太阳下山之前,等到人们下班回来需要使用时,水已经凉了。

上述问题固然与集热器的散热有关,但问题的关键是在保温水箱上,因为绝大部分水是在水箱内。

水的降温速度是与体积的 $\frac{2}{3}$ 次方成反比例的,水箱越大,则降温越慢。因此,对于集体单位使用的大型太阳能热水器来说,水箱的保温性能是不成问题的,但对于家庭用的小型装置来说,保温问题就非常突出了。与容量为 10m^3 的大水箱相比,容量为 0.1m^3 的小水箱的降温速度要比前者大21倍。未来太阳能热水器的普及将以小型的为主,所以改善小水箱的保温性能具有重大的意义。

常常有人想把杜瓦瓶的保温原理应用于水箱,但实际上是行不通的。尽管家庭用的太阳能热水器所配的水箱较小,但其容量并不是只有几升,而是几十升、上百升。如果这种水箱象杜瓦瓶那样采用抽真空的双层壁,并假定它是由六块面积均为 $0.5 \times 0.5\text{m}^2$ 的正方形壁围成的系统,那么每一块侧面就都要受到 2500kg 的正压力,因而要求它有很高的机械强度和刚性,造价就必定很高,而且很难保证它长期地不漏气。可见,把杜瓦瓶式的结构应用于太阳能热水器是行不通的。

笔者对常规保温水箱的散热机制进行了分析,找到了问题的关键,于1985年研制出一种“浮栓式保温水箱”。这种水箱的保温效果明显地优于常规保温水箱,而造价几乎没有增加。

二、对常规水箱散热方式的分析

常规保温水箱是由水槽和盖板组成的。为使箱内的水能够流出，盖板与槽口之间必须要有缝隙，或者专门开一气孔，其纵剖面如图 1 所示。

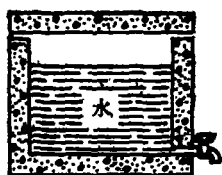


图 1

槽内的水与盖板之间通常是不接触的；因而水的上表面是一种“自由表面”。除上表面外，其余部分均与槽壁接触。在槽壁处，水不可能以“对流”的方式来散热，槽壁对于热辐射线来说又几乎是完全不透明的，因而“热传导”就成为该处唯一的散热方式了。槽壁材料的导热系数往往很小，利用傅里叶热传导定律可以证明：槽壁处的散热速度很小，不可能使水温迅速地下降。然而，实际水箱的保温时间都较短，这就意味着：热量主要是通过水的自由表面散失的。

水的自由表面可以有热辐射，但因受到盖板的阻挡，这种热辐射场基本上是在箱内，不能使水温迅速下降。自由表面上方的空气层可以导热，但它的导热系数比泡沫塑料的导热系数还要小。空气被热水加热后可以对流，但在有盖板的情况下，空气层内的温度差不可能很大，因而“对流”也将是困难的。如此看来，水的蒸发必定是散热的主要方式。其重要性可以用以下三个事实来证明。

第一，水在 50°C 时的饱和蒸气压高达 0.12 atm ，在 40°C 时仍可达 0.073 atm ，这就表明洗澡水的蒸发速度是相当快的。

第二，蒸发只能发生在自由表面上，蒸发速度正比于自由表面的面积。在常规水箱内，水

的自由表面通常占边界总面积的六分之一左右。如果水层很薄，那么自由表面就会几乎占总边界面积的一半。也就是说，在常规水箱内，水的蒸发面是很大的。

第三，水的汽化热很大，高达 $539\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。这就意味着：只要有 1 g 水化为汽，就能够使 539 g 水的温度下降 1°C 。

人们有这样的生活经验：开水倒入瓷碗后，过不了一刻钟就会变成温水；而同样体积的肉汤盛在同样的瓷碗中以后，即便过了二十分钟也还是相当烫的。这是因为：肉汤的上表面被一层油覆盖着，使下面的水很难蒸发，而油的蒸发速度远远小于水在同样温度下的蒸发速度。笔者正是由于受到了这件事的启发，而产生了“用浮栓来杜绝汽化”的想法，发明了“浮栓式保温水箱”。

三、浮栓式保温水箱

所谓“浮栓式保温水箱”，实际上只是在常规水箱内增添了一块由轻质保温材料（例如聚苯乙烯泡沫塑料）制成的板，其纵剖面如图 2 所示。该板的面积比箱内水的上表面略微小些，它浮在水面上，能随水位升降，故名之为“浮



图 2

栓”。浮栓的存在，使箱中的水几乎完全失去了自由表面，因而能杜绝汽化热的损失。

为便于计算，我们把“浮栓”想象为密闭的柱形腔体的保温壁的组成部分，并设想腔体的厚度是处处相同的，所用的材料也是处处相同的。其纵剖面如图 3 所示。

设腔壁厚度为 δ ，导热系数为 λ 。腔体容积为 V ，灌满了热水。水的密度为 ρ ，比热为 c 。由

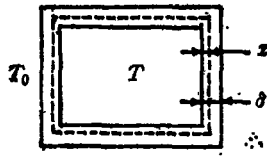


图 3

于水的导热系数远远大于保温壁的导热系数，故可认为水温的变化是一种准静态过程，即认为箱内的水始终具有均匀的温度。水的温度用 T 表示，其初始值为 T_m 。外界的气温用 T_0 表示，可以认为是恒定不变的。保温壁的内表面和外表面显然都是等温面，其温度分别等于水温 T 和气温 T_0 。图 3 中的虚线代表保温壁内的等温面，它与壁的内表面之间的距离为 x ，它的面积 S 应当是 x 的函数。该面上的温度用 T' 表示。

体积为 V 的水所具有的热容量为 ρVc 。因此，如果箱内的水在 t 至 $(t + dt)$ 期间所释放的热量为 $(-dQ)$ ，使水温由 T 变成为 $(T + dT)$ ，那么就有

$$\frac{dQ}{dt} = \rho Vc \frac{dT}{dt}. \quad (1)$$

如果 S 面附近的温度梯度为 $\frac{dT'}{dx}$ ，则由

傅里叶热传导定律得出： S 面处的以自外向内为正方向的热流量率为

$$\frac{dQ'}{dt} = \lambda S \frac{dT'}{dx}. \quad (2)$$

在保温壁的热容量可被忽略的情况下， $\frac{dQ'}{dx}$ 与 $\frac{dQ}{dt}$ 是几乎相等的，因而由以上两式可得

$$dT' = \frac{\rho Vc}{\lambda S} \frac{dT}{dt} dx. \quad (3)$$

积分之，得

$$\begin{aligned} T_0 - T &= \int_0^\delta \frac{\rho Vc}{\lambda S} \frac{dT}{dt} dx \\ &= \left(\frac{\rho Vc}{\lambda} \int_0^\delta \frac{1}{S} dx \right) \frac{dT}{dt}. \end{aligned} \quad (4)$$

若令

物理

$$\tau = \frac{\rho Vc}{\lambda} \int_0^\delta \frac{1}{S} dx, \quad (5)$$

则可将 (4) 式改写成

$$\frac{dT}{T - T_0} = -\frac{dt}{\tau}. \quad (6)$$

积分之，并注意 T 的初始值为 T_m ，便有

$$\ln \frac{T - T_0}{T_m - T_0} = -\frac{t}{\tau}. \quad (7)$$

由此可见，

$$T - T_0 = (T_m - T_0)e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

即

$$T = T_0 + (T_m - T_0)e^{-t/\tau}. \quad (9)$$

由 (8) 式可以看出： τ 是箱内的水温与箱外的气温之差 $(T - T_0)$ 下降到初始温差 $(T_m - T_0)$ 的 $\frac{1}{e}$ 所需的时间。我们把 τ 称为

保温水箱的“降温时间常数”。它是水箱保温性能方面的主要指标，由 (5) 式来确定。

降温时间常数 τ 与水箱的几何形状有关。水箱的形状以圆柱形的和长方柱形的居多。

1. 圆柱形水箱的降温时间常数

若圆柱形水箱的内表面的底面半径为 R ，高为 h ，则其容积为

$$V = \pi R^2 h. \quad (10)$$

保温壁内的等温面 S 也是圆柱形的，其底面半径为 $(R + x)$ ，高为 $(h + 2x)$ ，因而

$$\begin{aligned} S &= 2\pi(R + x)^2 + 2\pi(R + x)(h + 2x) \\ &= 2\pi(R + x)(R + h + 3x). \end{aligned} \quad (11)$$

将以上两式代入 (5) 式，得

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\pi \rho R^2 h c}{\lambda} \int_0^\delta \frac{1}{2\pi(R + x)(R + h + 3x)} dx \\ &= \frac{\rho R^2 h c}{2\lambda(h - 2R)} \ln \frac{(R + h)(R + \delta)}{R(R + h + 3\delta)}. \end{aligned} \quad (12)$$

当 $h = 2R$ 时，上式将给出 $\frac{0}{0}$ 的不定型。

这时可利用洛毕达法则定出

$$\tau = \lim_{h \rightarrow 2R} \frac{\rho R^2 h c}{2\lambda(h - 2R)} \ln \frac{(R + h)(R + \delta)}{R(R + h + 3\delta)}$$

$$\tau = \frac{\rho R^2 c \delta}{3\lambda(R + \delta)} \quad (13)$$

可以证明：在体积一定时，高与底面直径相等的圆柱体具有最小的表面，即散热面积最小。因此， $h = 2R$ 代表着最佳结构。

2. 长方柱形水箱的降温时间常数

若长方柱形水箱的内表面的底面边长为 a 和 b ，高为 h ，则其容量为

$$V = abh \quad (14)$$

保温壁中的等温面所围成的也是长方体，其三条棱为 $(a + 2x)$ 、 $(b + 2x)$ 和 $(h + 2x)$ ，因而

$$\begin{aligned} S &= 2[(a + 2x)(b + 2x) + (b + 2x) \\ &\quad \times (h + 2x) + (h + 2x)(a + 2x)] \\ &= 2[ab + bh + ha \\ &\quad + 4(a + b + h)x + 12x^2] \end{aligned} \quad (15)$$

将(14)、(15)两式代入(5)式，得

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\rho abhc}{\lambda} \\ &\times \int_0^\delta \frac{1}{2[(ab + bh + ha) + 4(a + b + h)x + 12x^2]} dx \\ &= \frac{\rho abhc}{8\lambda A} \ln \frac{(A + B)(A - B - 6\delta)}{(A - B)(A + B + 6\delta)} \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $A = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 - ab - bh - ha}$ ，
 $B = a + b + h$ 。

如果 $a = b = h$ ，则 $A = 0$ ， $B = 3a$ ，使(16)成为不定式。这时可仿照(13)式，利用洛毕达法则，由(16)式求极限而定出

$$\tau = \frac{\rho a^2 c \delta}{6\lambda(a + 2\delta)} \quad (17)$$

可以证明：在体积一定时，正立方体的表面积小于长方体的表面积，即散热面最小。因此， $a = b = h$ 代表着最佳结构。

只要知道了降温时间常数 τ 、环境温度 T_0 和水的初始温度 T_m ，就可以由(9)式计算出任意时刻的水温 T 。

笔者曾制作了容量为 $0.3 \times 0.4 \times 0.42 \text{m}^3$ 的浮栓式保温水箱。保温壁是两层聚苯乙烯泡沫板，总厚度 δ 为 0.05m 。这种材料的导热系数 λ 为 $0.03 - 0.04 \text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。水的密度 ρ 为 $1000 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，比热 c 为 $1 \text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。

将这些数据代入(16)式，便可知该水箱的降温时间常数 τ 为 $60 - 80 \text{h}$ 。如果初始水温为 45°C ，环境温度为 -7°C ，那么经六小时后水温的理论值就应为 $40.1 - 41.2 \text{°C}$ 。实验是在雪后的夜晚进行的。自傍晚六点到午夜 12 点，气温由 -5°C 逐渐下降到 -9°C ，平均气温为 -7°C 。初始水温为 45°C ，六小时后变为 37°C ，比理论值低 $3 - 4 \text{°C}$ 。尽管实验值不如理论值，但已能证明浮栓式水箱有良好的保温性能。

实验与理论之间有明显的偏差，原因是：实验装置中的保温壁不是密闭的，它有十二条缝隙；同时还装有温度计、水位指示器和金属的水龙头，都是从箱内通到箱外。这些地方都会散热，而在理论公式中未考虑到。

四、浮栓式保温水箱的设计

1. 给热水的温度 T 规定一个下限 T_c 。

水温的下限根据具体的用途而定。如果热水只是用于洗衣、洗碗等，则可把 T_c 定为 $25 - 30 \text{°C}$ 。如果是用于洗澡，则需根据季节的特点来确定 T_c 。夏季洗澡水的温度以 $35 - 40 \text{°C}$ 为宜，春秋二季以 $40 - 45 \text{°C}$ 为宜，冬季以 $45 - 50 \text{°C}$ 为宜。如果浴室内的气温不低于 25°C ，则在冬季仍可用 40°C 的水洗澡。

2. 给水箱规定一个有效保温时间 t_c 。

所谓“有效保温时间”，就是水温 T 在这段时间内不得低于 T_c 。太阳能热水器中的水温通常是在下午三点左右达到最大值。此后直到太阳下山之前，水温稍有下降，但下降的幅度很小。太阳下山以后，气温骤然下降，水温的下降也就加快了。如果希望在夜里十点钟之前水温始终高于 T_c ，则可将有效保温时间 t_c 定为 5h （或 5h 以上）。

3. 确定水箱的降温时间常数 τ

将(7)式中的 T 和 t 分别用 T_c 和 t_c 代入，便可定出

$$\tau = \frac{t_c}{\ln \frac{T_m - T_0}{T_c - T_0}} \quad (18)$$

其中 T_m 为热水的初始温度, T_0 为环境温度。

4. 确定水箱的容积 V

作为太阳能热水器的部件, 水箱的大小应与集热器的各项参数相匹配。集热器的有效工作时间 Δt 通常是自上午九点左右开始, 至下午三点左右结束, 约为 5—6h。在这段时间内, 阳光的平均辐照度 μ 约为 $0.85 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。如果集热器的采光面积为 S' , 效率为 η , 则在 Δt 时间内采集到的能量为 $\eta \mu S' \Delta t$ 。如果这些能量能使热容量为 $\rho V c$ 的水由冷水变为温度为 T_m 的热水, 而温度的上升幅度为 ΔT , 那么就意味着 $\rho V c \Delta T$ 与 $\eta \mu S' \Delta t$ 相等, 因而

$$V = \frac{\eta \mu S' \Delta t}{\rho c \Delta T} \quad (19)$$

集热器的效率 η 与温度 T_m 有关。辐射损耗正比于绝对温度的四次方, 因此 T_m 越大, η 就越小。 T_m 低于 45°C 时, η 可达 0.7 以上; T_m 为 55°C 时, η 接近于 0.6; T_m 高于 65°C 时, η 将低于 0.4。人们都希望水温高些, 又希望效率高些, 但是这两种愿望是相互排斥的。一般可把 T_m 定为 55°C , 这时

$$\frac{\eta \mu}{\rho c} \approx 0.432 \text{ m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}.$$

5. 确定水箱的形状和尺寸

水箱形状的确定是人为的。若采用圆柱形, 则最优结构的尺寸是

$$h = 2R = 2 \left(\frac{V}{2\pi} \right)^{1/3}; \quad (20)$$

若采用方柱形, 则最优结构的尺寸是

$$a = b = h = V^{1/3}. \quad (21)$$

在现场设计时, 还应当考虑环境的具体情况, 整体结构是否紧凑、美观等因素, 所以并非只以 (20) 或 (21) 为依据。

6. 确定保温壁的厚度 δ

对于圆柱形水箱来说, 由 (12) 式可知保温壁的厚度为

$$\delta = \frac{R(R+h)(1-e^{-\alpha^2})}{3R\alpha^2 - (R+h)}, \quad (22)$$

其中 λ 是导热系数,

$$\alpha = \frac{2\tau(h-2R)}{\rho R^2 h c}.$$

若 $h = 2R$, 则 (22) 式是 $\frac{0}{0}$ 的不定式。这时, 可利用

$$e^{\alpha^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (\alpha^2)^n,$$

代入上式得

$$\delta = \frac{3\lambda\tau R}{\rho R^2 c - 3\lambda\tau}. \quad (23)$$

对于方柱形水箱来说, 由 (16) 式可知

$$\delta = \frac{(A^2 - B^2)(1 - e^{-\beta^2})}{6(A - B)e^{-\beta^2} + 6(A + B)}, \quad (24)$$

其中

$$\beta = \frac{8\tau A}{\rho abhc},$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2 + h^2 - ab - bh - ha}$$

$$B = a + b + h.$$

若 $a = b = h$, 则 (22) 式是 $\frac{0}{0}$ 的不定式。这时可仿照导出 (23) 式时所采用的办法, 得到

$$\delta = \frac{6\lambda\tau a}{\rho a^2 c - 12\lambda\tau}. \quad (25)$$

水箱和保温壁的几何尺寸确定后, 就可以投料制作了。

下面举一个例子。某工厂打算利用屋顶采集太阳能, 为全厂职工提供洗澡水, 并为锅炉预热冷水。屋顶的采光面积总共有 1000 m^2 。预料在春、秋二季能满足需要, 但在冬至以后的一个半月里不能提供足够多的热水, 而在夏至以后的一个半月里却又几乎不需要热水。因此, 需要设计一个热水库, 把夏至以后所产的热水储存到冬季使用。

储存热水的目的是为了能在冬季用于洗澡, 故可规定 $T_0 = 45^\circ\text{C}$ 。

热水的储存始于夏至, 止于立秋, 而使用所储的热水是始于冬至前夕, 止于立春前夕, 故要求热水库的有效保温时间长达半年, 即

$$t_c = 4380 \text{ h}.$$

热水库必定远远大于普通的保温水箱, 要

能承受较大的水压,故宜造在地下,不仅可以有较高的机械强度和较低的造价,而且可以利用泥土提供一个比冬季的气温高得多的环境温度。地温一般为 15°C 左右,故可认为

$$T_0 = 15^{\circ}\text{C}.$$

热水储入热水库时的温度 T_m 必须高于 T_c ,但又不宜过高。为使集热器有较高的效率,可规定 $T_m = 55^{\circ}\text{C}$ 。

将 t_c , T_c , T_0 和 T_m 的值代入(18)式,便可知 $\tau = 15225\text{h}$ 。

集热器的采光面积 $S' = 1000\text{m}^2$ 。它的有效工作时间 Δt 与地理环境有关。就长江流域的情况来看,夏至以后的一个半月里是以晴天为主,可以保证有30个晴天,即使下雨,也多为雷阵雨,往往是在下午四点钟以后发生,对太阳能热水器的工作无严重的影响。如果每个工作日按五小时计算,那么就可知 $\Delta t = 150\text{h}$ 。

在夏至以后的一个半月里,长江流域的地表水的温度和自来水的温度都是 $25-30^{\circ}\text{C}$ 。若用 25°C 代表冷水的标准温度,那么集热器使水温上升的幅度便应为 $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$ 。

将 S' , Δt 和 ΔT 的值代入(19)式,并注意 $\frac{\eta''}{\rho c}$ 约为 $0.432\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,便得

$$V = 2160\text{m}^3.$$

若热水库为圆柱形,并且 $h = 2R$,那么就可以由(20)式定出

$$R = 7.00\text{m}, h = 14.00\text{m}.$$

保温壁可采用矿渣棉,这种材料的价格很低而保温性能又较好,其导热系数 λ 为 $0.04-0.05\text{kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。在设计时,应取 λ 的上限,即 $\lambda = 0.05\text{kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。将 λ , τ , R , ρ 和 c 的值代入(23)式,便得

$$\delta = 0.34\text{m}.$$

知道了 R , h 和 δ ,就可以投料建造了。从“百年大计”角度考虑, δ 的值可放宽为 0.40m ,甚至为 0.50m 。这样,所需增加的成本甚微,而得益匪浅。若令 $\delta = 0.50\text{m}$,则可使 55°C 的水搁置了半年之后仍能保持 $47.7-49.1^{\circ}\text{C}$ 的温度。

热水库中所储存的 2160m^3 的热水如果是集中在一天内用完,那么不采用“浮栓”也是可以的。但是,如果是陆续地使用这些热水,“浮栓”就很重要了,因为一旦开始用水,水位就会下降,立即出现面积为 154m^2 的自由表面,汽化现象就不可避免,使水温迅速下降。

“ 2160m^3 ”是一个不可忽视的数字。在一个半月里消耗 2160m^3 热水,意味着每天的消耗量是 48m^3 。“ 48m^3 ”热水究竟有多少呢?在商业性的洗澡堂里,浴池的面积一般为 $3 \times 4\text{m}^2$,水的深度约为 0.5m ,也就是说,一浴池的热水量仅为 6m^3 。由此可见,“ 48m^3 热水”相当于八个浴池的浴水,可供 $1000-2000$ 人浴用。

(上接第639页)

二极管,具有整流特性。若不是半导体的,则不构成肖特基二极管,无整流特性。将上述金属-金刚石置于电路中,加交流信号,若是有肖特基特性的,则会对交流信号进行整流,产生直流信号,回路中的直流微安表发生偏转。半导体特性好的金刚石可在示波器上看到较好的半波整流波形。若不是半导体金刚石,则直流微安表根本不偏转。这就形成了把半导体材料组成半导体器件的测试方法。

在样品载装台中,是把半导体样品置于两个导电

材料制成的电极之间,使其与一个电极形成整流接触构成肖特基二极管,与另一个电极形成欧姆接触。若样品与两个电极间都形成肖特基二极管,则它们整流特性就会相互抵消。

本仪器测试的各种半导体金刚石的示波波形见图1。由图1可见半导体金刚石与金属紧密接触后的示波波形图与纯电阻的迥然不同。本仪器可测半导体样品的粒度 $\geq 0.5\text{mm}$,输入阻抗 $> 10^{12}\Omega$,可测样品的表观电阻范围 $\leq 10^{10}\Omega$ 。

(辽宁省地质实验研究所 赵亨达)