

球形落管试样的冷却及重力水平研究

潘明祥 陈熙琛

(中国科学院物理研究所)

摘 要

本文从传热、流体流动的角度,对不同直径的球形落管试样,在不同气体介质及不同压力的落管中自由落下时的冷却凝固时间、过冷度及重力水平做了计算分析,并对运用落管进行金属及合金的微重力与无容器模拟研究中的一些问题作了讨论。

使一个熔化的金属球从一个垂直于地面的管子里自由落下,球在下落到地面之前可以不与非气体物质接触,而借自身的热辐射传热及与气体之间的对流传热等传热方式冷却或凝固。采用这种方法来研究金属及合金的冷却凝固过程,可有两个一般的方法所不能及的优点:一是无容器,二是可以在微重力条件下。这样的冷却凝固过程引起了材料科学研究者极大的兴趣。因为,液态的金属或合金在其冷却凝固过程中如果无容器及无杂质作为形核界面,则在凝固前可产生深的过冷而导致快速固化或凝固^[1];如果金属及合金在微重力的条件下冷却凝固,则可减少因密度差等因素产生的组织不均性^[2]。这就有可能出现新的、良好的金属组织结构及物理、化学性能^[2-4]。但是,什么种类的材料及多大体积的材料可利用落管进行无容器及微重力试验研究?利用落管进行试验能获得多大的重力水平?本文将从传热、流体流动等物理学的角度进行计算分析,给出上述问题答案。

一、理论分析

一个温度为 T 的金属球在充有气体的落管中自由落下时,在忽略气化冷却的情况下,热量损失速率可用下式表达^[5]:

$$\frac{dQ}{dt} = -HS(T - T_c), \quad (1)$$

式中 H 为复合换热系数, S 为球的表面积, T 及 T_c 分别是球的温度及冷却环境的温度。球的下落过程是动态变温过程,属非稳态传热冷却,故复合换热系数 H 是球温度 T 及球下落高度 h (或时间 t) 的函数。对于球的冷却情况, H 表达为^[5,6]

$$H = \varepsilon k(T^3 + T^2T_c + TT_c^2 + T_c^3) + \frac{2K_g}{D} + 0.3 \frac{K_g}{D} (c_{pg}\mu_g/K_g)^{1/3} (\rho_g V_m D / \mu_g)^{0.6}, \quad (2)$$

其中 ε 是球的热辐射系数, k 是玻耳兹曼常数, D 是球的直径, K_g , c_{pg} , μ_g , ρ_g 分别是气体的导热系数、定压比热、动力粘度及密度, V_m 是球的下落速度。气体的这些热物性参数都由球的膜面温度 T_f 评价,

$$T_f = (T + T_c)/2, \quad (3)$$

液态金属的冷却速度为

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{HS(T - T_c)}{c_{pm} \cdot m}, \quad (4)$$

其中 c_{pm} 为金属的定压比热, m 为金属熔球的质量。熔球在熔点温度 T_m 等温凝固所需的时间 t_s 为

$$t_s = \int_0^{t_s} dt = - \frac{\Delta H \cdot m}{HS(T_m - T_c)}, \quad (5)$$

其中 ΔH 为金属的熔化热。

当落管中充有气体时,球的下落速度 v_m 和

下落高度 h 与球在下落过程中遇到的阻力 F_w 有关。当考虑气体阻力时, 球的下落运动方程可表达为

$$h''m - gm + F_w = 0, \quad (6)$$

其中 g 是地球的重力加速度常数, h'' 是高度 h 的两阶导数。高度的一阶导数 $h' = v_m$ 。球的阻力 F_w 表达为^[6]

$$F_w = C_w S_p \frac{\rho_g V_m^2}{2}, \quad (7)$$

其中 S_p 是球的投影面积, $S_p = \frac{\pi}{4} D^2$; C_w 为球的阻力系数,

$$C_w = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4, \quad (8)$$

其中 Re 是雷诺数,

$$Re = \rho_g V_m D / \mu_g. \quad (9)$$

从(6)–(9)式可以看出, 想直接列出球的下落高度 h 的显式表达式是极困难或是不可能的, 直接求解(1),(4),(5)式也是不可能的。为此必须借助计算机, 采用迭代法求解。下面先介绍球在下落过程中所具有的重力水平概念。

定义球的重力水平 g_1 为球在下落过程中所遇到的阻力 F_w 与地球重力加速度常数 g 和球质量 m 之积 gm 的比:

$$g_1 = F_w / mg. \quad (10)$$

我们知道, 当物体静止在地球表面时所具有的重力是一个 g 的水平。正常的金属及合金熔体的冷却与凝固都是在一个 g 的重力水平进行的。然而, 当一个物体在空中突然地作自由落体运动时, 在下落刚开始后的瞬间, 由于地心引力的作用, 此物体处于几乎完全失重的状态, 即重力水平 g_1 接近于零, 或者说物体处于微重力状态。物体继续下落, 速度不断增加。如果物体是在真空中自由下落, 则物体总是保持几乎完全失重状态。如果物体是在气体介质中自由下落, 则随着物体运动速度的增加而遇到的阻力也不断增加, 重力水平 g_1 也增加。当阻力 F_w 等于 mg 时, 物体便开始做匀速下落运动而所具有的重力水平又达到一个 g 的正常状态, 即物体不再处于微重力状态。当然, 一个正在快

速下落的物体突然受阻时, 会产生超重现象, 即物体在受阻后的一瞬间所具有的重力水平 g_1 大于 $1g$ 。

本计算中, 假定落管中气体还能用连续介质模型处理, 冷却过程是按牛顿冷却模型进行处理。连续介质流体模型的有效性按克努森数 Kn 进行判别^[7],

$$Kn = \frac{\lambda}{D} \begin{cases} < 0.01 & \text{为粘滞流,} \\ > 1 & \text{为分子流,} \end{cases} \quad (11)$$

其中 λ 是气体分子运动的平均自由程,

$$\lambda = 0.03433 \cdot \mu_g \cdot \left(\frac{1}{\rho_g p} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

这里 p 是气体压力。当 $Kn < 0.01$ 时, 本计算结果有效。

本文给出的冷却过程计算中假定牛顿冷却条件满足, 即球内部温度梯度小到可忽略不计, 热阻集中在球的表面。用毕奥数 Bi 作为牛顿冷却条件成立的判据^[8],

$$Bi = HD / 2K_m. \quad (13)$$

当 $Bi < 0.1$ 时, 牛顿冷却模型有效。

另外, 考虑到液态金属热物理性能测量上的困难, 故计算中假定象导热系数及比热等物理性能与温度无关, 即视为常数。

二、结果与讨论

本计算是采用迭代法借电子计算机进行的模拟计算, 得到金属熔球的下落高度、下落时间、球的温度、重力水平 g_1 及毕奥数等量值。计算时分别采用下落高度增量或冷却温度增量作为迭代计算步长。结果表明, 当都取等步长增量计算时, 两者的某些输出参量值的精度可互相补充。

以温度增量为步长计算的典型输出结果列于表 1。

选择铈、铁、铝及铋四种金属作为典型的材料进行了计算。这四种金属熔球的直径均为 3, 4, 5, 8 及 10mm。在落管中分别充入 1, 10, 100 及 760Torr 的氦气及氮气。四种金属的热物性参数列于表 2。

表1 落管试样冷却和重力水平计算典型输出数据形式*

高度 (m)	时间 (s)	温度 (K)	重力水平 (*g)**	辐射传热 (W)	对流传热/辐射传热比	下落速度 (m/s)	换热系数 (W/m ² ·K)	毕奥数	努谢尔特数	雷诺数	普朗特数
液相冷却: 从 2761K 冷却到 2741K											
0.0004	0.009	2751	0.00014	0.28	0.00	0.093	729.4	0.0138	2.03	0.0	0.67
0.0018	0.019	2741	0.00014	0.28	0.73	0.187	723.4	0.0137	2.03	0.0	0.67
凝固温度: 2741K											
净凝固时: 0.6179s											
固相冷却: 从 2741K 冷却到 2541K											
1.98	0.637	2741	0.01097	0.17	0.84	6.2	764.3	0.0145	2.31	1.3	0.67
2.03	0.644	2731	0.01092	0.21	0.85	6.2	766.3	0.0143	2.31	1.3	0.67
2.07	0.652	2721	0.01104	0.21	0.86	6.3	761.7	0.0143	2.32	1.4	0.67
2.12	0.659	2711	0.01117	0.21	0.87	6.4	757.1	0.0142	2.32	1.4	0.67
2.17	0.667	2701	0.01129	0.20	0.88	6.4	752.6	0.0141	2.32	1.4	0.67
2.22	0.674	2691	0.01142	0.20	0.89	6.5	748.1	0.0140	2.33	1.4	0.67
2.27	0.682	2681	0.01155	0.20	0.90	6.6	743.6	0.0139	2.33	1.5	0.67
2.32	0.690	2671	0.01167	0.20	0.91	6.7	739.2	0.0138	2.33	1.5	0.67
2.37	0.697	2661	0.01180	0.20	0.91	6.7	734.8	0.0138	2.34	1.5	0.67
2.43	0.705	2651	0.01194	0.20	0.92	6.8	730.4	0.0137	2.34	1.5	0.67
2.48	0.713	2641	0.01207	0.20	0.93	6.9	726.0	0.0136	2.34	1.6	0.67
2.54	0.721	2631	0.01220	0.20	0.94	7.0	721.7	0.0135	2.35	1.6	0.67
2.60	0.730	2621	0.01234	0.20	0.95	7.1	717.4	0.0134	2.35	1.6	0.67
2.66	0.738	2611	0.01248	0.20	0.96	7.1	713.2	0.0134	2.35	1.6	0.67
2.72	0.746	2601	0.01262	0.19	0.97	7.2	709.0	0.0133	2.36	1.7	0.67
2.78	0.754	2591	0.01276	0.19	0.98	7.3	704.8	0.0132	2.36	1.7	0.67
2.84	0.763	2581	0.01290	0.19	0.99	7.4	700.6	0.0131	2.36	1.7	0.67
2.90	0.771	2571	0.01305	0.19	1.00	7.5	696.5	0.0130	2.37	1.8	0.67
2.97	0.780	2561	0.01319	0.19	1.01	7.5	692.4	0.0130	2.37	1.8	0.67
3.04	0.789	2551	0.01334	0.19	1.02	7.6	688.3	0.0129	2.38	1.8	0.67
3.10	0.798	2541	0.01349	0.19	1.04	7.7	684.3	0.0128	2.38	1.8	0.67

* 材料是金属铌,冷却气体是氦气;熔球直径 3mm, 质量为 0.1107g, 表面积是 28.3mm²;熔球起始温度为 2761K,落管中气体温度为 300K;气体压力为 100Torr.

** 这里重力水平中的“*g”意思为该栏中的数据乘上重力加速度常数 g, g 的值为 9.8m/s².

表2 计算用金属的热物性数据

元素	熔点 (K)	比重(在 T _m 时)(kg/m ³)		比热(在 T _m 附近) [kg/(kg·K)]		熔化热 (kJ/kg)	导热系数[W/(m·K)]		热辐射系数(在 T _m 附近)	参考文献
		固态*	液态	固态	液态		固态	液态		
铌	2741	8139	7830	0.347	0.435	288	79.1	52	0.317	[8-12]
铁	1808	7458	6900	0.788	0.788	272	34.6	40.3	0.26	[13-16]
铝	933	2585	2380	1.194	1.09	395	92.1	210.8	0.113	[13,14,17]
铋	544	9800	10030	0.127	0.142	50.2	7.04	17.1	0.158*	[8,17]

* 根据文献[16]中的数据计算的值。

1. 凝固时间

直径皆为 3, 4, 5, 8 及 10mm 的铌、铁铝及铋熔球在真空中仅靠热辐射冷却。使熔球在熔点温度完全凝固所需的时间见表 3。该表中所示的凝固时间表明了金属熔点对凝固时间的影响是很大的。熔点越低的金属，完全凝固所需要的时间越长。5m 高的落管提供的约 1s 时间可使直径为 3mm 的铌熔球接近完全凝固，而

100m 高的落管提供的约 4.5s，还远不能使直径为 3mm 的熔球完全凝固。

表 4 给出了当落管中充入压力为 10Torr 的氦气及氮气作冷却时介质所能获得的冷却效果。比较表 3 与表 4 可以看出，充入气体的冷却效果对高熔点金属(例如铌)的作用不如对低熔点金属(例如铋)的大。分析表明，就熔球做自由落体运动的情形，高熔点金属依然主要靠辐射

表 3 不同直径的金属铌、铁、铝及铋熔球，在真空的落管中于 T_m 温度下，等温完全凝固所需要的时间 (s)*

直径 (mm)	Nb	Fe	Al	Bi
3	1.1	6.1	100	354
4	1.5	8.0	134	472
5	1.9	10	167	589
8	3.0	16	268	943
10	3.7	20	335	1179

* 本文的全部计算均按：铌过热 20K；铁过热 20K；铝过热 10K；铋过热 10K；

表 4 不同直径的金属铌、铁、铝及铋熔球，在压力为 10Torr 的氦气及氮气的落管中于 T_m 温度下，等温完全凝固所需要的时间 (s)

直径 (mm)	Nb		Fe		Al		Bi	
	He	N ₂	He	N ₂	He	N ₂	He	N ₂
3	0.9	1.0	2.0	3.8	4.1	11	6.1	15
4	1.0	1.3	3.1	5.3	6.5	16	9.5	20
5	1.3	1.7	4.3	7.0	9.3	21	13	25
8	2.4	2.8	8.2	12	18	34	23	40
10	3.1	3.5	11	15	24	44	30	49

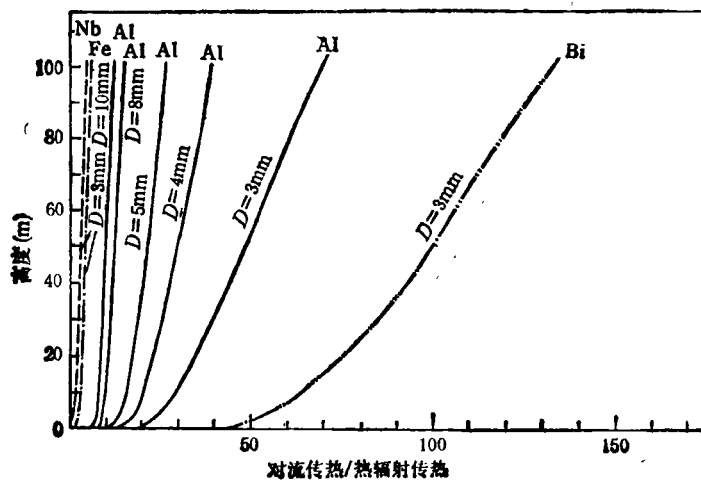


图 1

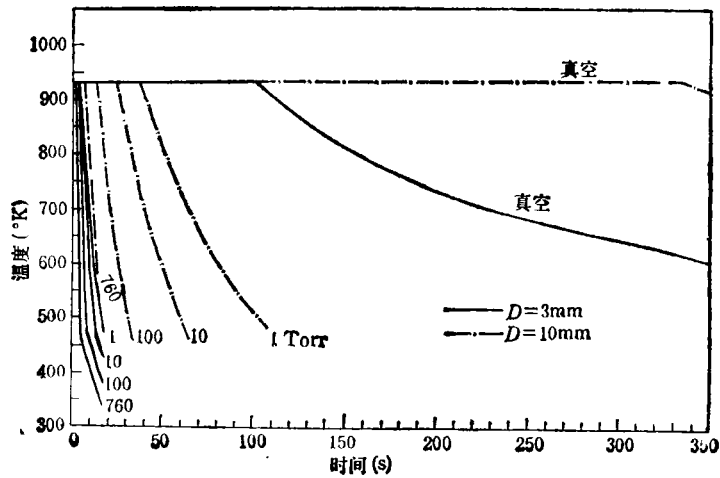


图 2

冷却,而低熔点金属则主要靠对流传热冷却.若在落管中充入少量氦气或氮气,则可以增强低熔点金属的冷却效果.图1给出了直径都为3mm的铌、铁及铋熔球和不同直径的铝熔球在充有10Torr氦气的落管中下落时,下落高度与对流传热/热辐射传热比(Q_c/Q_r)的关系曲线.从图1中可以看出,熔球的直径越大, Q_c/Q_r 值则越小.图2给出了直径为3和10mm的铝熔球在充有不同压力氦气的落管中下落时,冷却凝固温度与时间的关系.可以看出氦气压力对铝熔球的冷却凝固时间的影响.还可以看出,具有较大熔化热的金属需要更长的时间才能完全凝固.

2. 过冷

如果接近熔点温度的金属熔球在释放后落下、冷却,但到熔点温度以下还没有开始凝固,则熔球就会处于过冷状态.由于这种过冷是无容器形式的过冷,所以能达到的过冷度可能是很大的.图3给出了直径为3和10mm的铌熔球在充有不同压力氦气的落管中能获得的过冷度与下落时间的关系曲线.图4给出金属铌、铁、铝及铋熔球(直径为3mm)在真空和充有10 Torr 氦气的落管中下落时能获得的过冷度与下落时间的关系.从图4可以看出,对于高熔点金属,即使不用气体作冷却介质,亦可获得

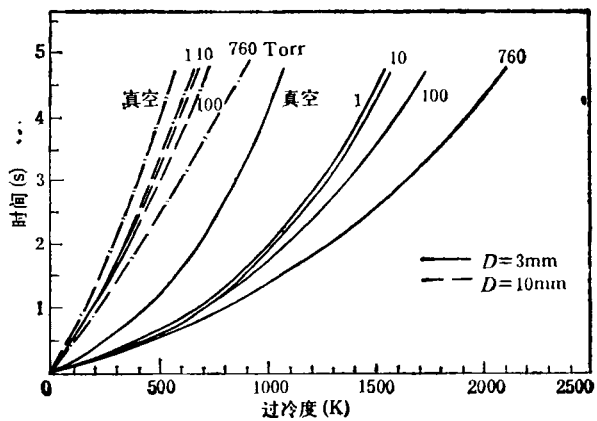


图 3

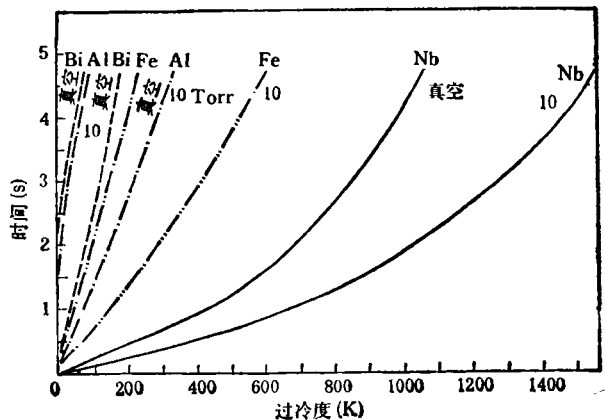


图 4

大的过冷度。对于低熔点金属，要想获得大的过冷度，则需充入气体冷却。例如，直径皆为3mm的铈及铝，它们在5m高的落管所提供的约1s时间内能获得的最大过冷度分别约为440K，及1K，然而在充入110Torr氮气的落管中，于1s内低熔点铝能获得约75K的过冷度，而铈的过冷度约为650K。

计算结果表明，氮气的冷却效果（表4）明显地比氦气好。

3. 重力水平

表5和表6分别给出了直径不同的铈球及铝球在充入不同压力的氦气及氮气的落管中下落了100m的高度时所具有的重力水平值。从表5中可看出，直径为3mm的铈熔球在10及760Torr的氦气中下落到100m时所具有的重力水平约为 $5 \times 10^{-2}g$ 及 $4 \times 10^{-1}g$ 。显然，气体的压力越大，球所受的阻力也越大，因而所具有的重力水平也越大。

当铈熔球的直径为10mm时，在压力分别为10及760Torr的氦气中下落了100m的高度时所具有的重力水平分别约为 $7 \times 10^{-3}g$ 及 $6 \times 10^{-2}g$ ，比直径为3mm的铈熔球降低了一个数量级。说明了，熔球的质量越大，所具有的重力水平越小，即失重程度越大。这一点在对比了相同尺寸及相同压力的铈与铝熔球的重力水平后更可以清楚地看出。图5是直径为3mm的铈、铁、铝及铋熔球，在充有10Torr氮气的落管中下落时，球具有的重力水平与下落高度的关系。图5中的曲线都表明，熔球所具有的重力水平是随着下落高度的增加而增大的。图6表明熔球（以铝为例）具有的重力水平是落管中氦气压力、熔球直径与下落高度的函数。

图7给出了熔球直径、氦气压力及金属熔点与重力水平的关系曲线。曲线上的重力水平值是熔球下落了100m高度时所具有的。从图7中可以看出，在760Torr以下的较低压力

表5 不同直径的铈熔球，在分别充入不同压力氦气及氮气的落管中，下落了100m时所具有的重力水平

直径 (mm)	1 Torr		10 Torr		100 Torr		760 Torr	
	He*	N ₂	He	N ₂	He	N ₂	He	N ₂
3	0.044	0.053	0.055	0.089	0.11	0.27	0.38	0.89
4	0.028	0.033	0.035	0.057	0.07	0.18	0.24	0.69
5	0.019	0.022	0.024	0.040	0.05	0.13	0.17	0.55
8	0.008	0.010	0.011	0.019	0.03	0.07	0.08	0.33
10	0.006	0.007	0.007	0.014	0.02	0.05	0.06	0.25

* 仅供参考。

表6 不同直径的铝熔球，在分别充入不同压力的氦气及氮气的落管中下落了100m时所具有的重力水平

直径 (mm)	1 Torr		10 Torr		100 Torr		760 Torr	
	He*	N ₂	He	N ₂	He	N ₂	He	N ₂
3	0.11	0.13	0.15	0.27	0.35	0.76	0.9	1.0**
4	0.07	0.08	0.10	0.18	0.24	0.61	0.8	1.0***
5	0.04	0.06	0.07	0.13	0.18	0.49	0.6	1.0****
8	0.02	0.03	0.03	0.07	0.09	0.31	0.4	0.9
10	0.01	0.02	0.02	0.05	0.07	0.25	0.3	0.9

* 仅供参考。

** 在下落到约40m高度时达到；

*** 在下落到约58m高度时达到；

**** 在下落到约76m高度时达到。

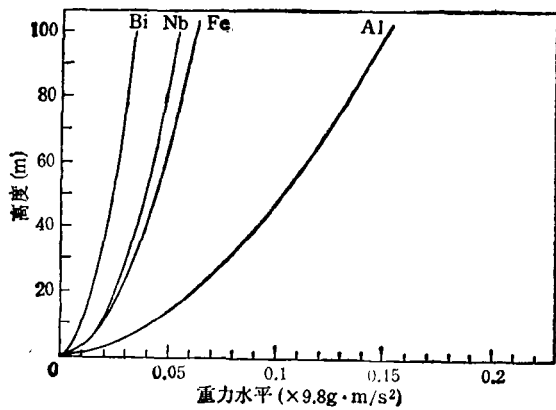


图 5

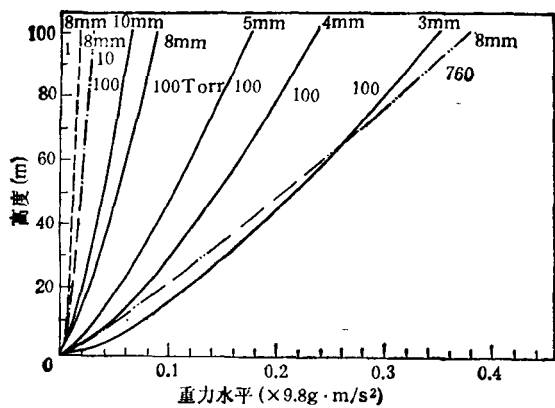


图 6

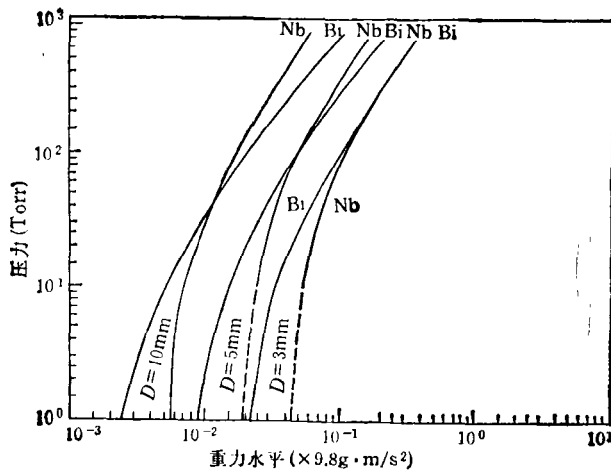


图 7 落管中自由下落的熔球所具有的重力水平是管中氮气压力及金属熔点与熔球直径的函数

时，球密度对重力水平的影响是主要的。随着压力的增加，金属熔点对重力水平的影响逐渐明显，甚至超过了密度对重力水平的影响。尺寸越大，熔点对重力水平的影响也越明显。

通过对所选择的不同种类的金属及不同尺寸 of 金属熔球于充入不同种类和不同压力气体的落管中冷却凝固和重力水平的计算，可以得出以下几点主要结论：

1. 在高度一定的落管中，当金属熔球在近熔点温度下落时，较大尺寸的高熔点金属能够完全凝固，而低熔点金属则不能。

2. 在落管中充入适当压力（例如小于 760 Torr）的氮气，可明显地增加对低熔点金属的冷却效果，因而能够使较大尺寸的低熔点金属完全凝固。这可弥补落管高度限制的不足。

3. 如果金属熔球在落管中下落时，冷却到熔点温度以下还没有开始凝固，则金属熔球能获得较大的过冷度。一定尺寸的高熔点金属在真空中就可获得较大的过冷度，而在落管中充入适当压力的氮气可以使低熔点金属获得较大过冷度。

由于落管中充入适当压力的氮气后可使金属熔球获得更大的过冷度，甚至熔球能被冷却到均匀形核的温度，因此可以采用落管装置来研究金属及合金达到最大程度过冷时的形核及凝固后的微观结构。氮气是较好的冷却介质，在落管中充入不同压力的氮气，可扩大落管的用途，以能研究更多种类和更大尺寸 of 金属及合金。

4. 熔球在落管中自由下落了一定高度时所具有的重力水平，受管中残存的或充入的气体介质种类、介质压力、金属熔球的比重、质量、金属的熔点等因素影响，另外还与熔球在管中下落的高度有关。较高熔点、较大比重及较大质量的金属熔球可以获得微重力的效果。熔点低、比重及质量都小的金属熔球，可以获得低重力但不是微重力的效果，也可能连低重力的效果都达不到，而是近于正常重力水平（即接近 1g）的。

5. 落管中残存或充入的气体压力越大，则

熔球在下落了相同高度后所具有的重力水平越高。熔球在一定压力的气体介质中落下时所具有的重力水平,随下落高度的增加而增加。

可见,无论对何种金属做试验,在落管中充入一定压力的气体以后,虽然增加了冷却效果,但同时也提高了重力水平。同样,在落管中充入一定压力气体的情况下,增加落管高度虽然增长了冷却熔球的时间,但却提高了下落到终点时所具有的重力水平。因此,在某些情况下用较短的和充入较高压力气体的落管来做金属熔球的无容器及低重力条件下的冷却凝固模拟试验,可能与用较长和充入较低压力气体的落管进行模拟试验具有相同的效果。只有采用真空落管或管中充入的冷却气体压力极低(例如小于 1 Torr)的落管能对金属及合金进行微重力和无容器加工的模拟试验研究。管中冷却气体的引入会程度不同的破坏微重力效果。

- [1] J. P. Hirth, *Met. Trans. A*, **9** (1978), 401.
 [2] R. J. Naumann and H. W. Herring, *Materials Processing in Space: Early Experiments*, NASA

- SP-443, (1980).
 [3] J. Steinberg et al *Appl. Phys. Lett.*, **38** (1981), 135.
 [4] L. L. Lacy, T. J. Rathz and M. B. Robinson, *J. Appl. Phys.*, **53** (1982), 682.
 [5] 俞佐平,传热学,人民教育出版社,(1981), 215.
 [6] F. M. White, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill Company, New York, (1974), 213.
 [7] 高本辉,崔素言,真空物理,科学出版社,(1983), 182.
 [8] 钱滨江,伍贻文,常家芳,丁一鸣,简明传热手册,高等教育出版社,(1983), 376.
 [9] L. L. Lacy, M. B. Robinson and T. J. Rathz, *J. Crystal Growth*, **51** (1981), 47.
 [10] M. B. Robinson, NASA TM-82423, (1981).
 [11] M. B. Robinson, NASA TM-78189, (1978).
 [12] 胡汉起,金属凝固,冶金工业出版社,(1985), 31.
 [13] C. G. Levi and R. Mehrabin, *Metall. Trans. B*, **11** (1980), 21.
 [14] Y. S. Touloukian, D. P. DeWitt, *Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, Vol. 7, Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys*, New York, IFI/Plenum, (1970), 1540.
 [15] 陈新民,陈启元,冶金热力学导论,冶金工业出版社,(1986), 244.
 [16] 李振寰,元素性质数据手册,河北人民出版社,(1985), 26.
 [17] W. M. Rohsenow et al., *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, (1973).

一种新的天然放射性

罗马尼亚布加勒斯特物理和核工程研究所的 D. B. Ion 等人在 1986 年第 171 卷第 2 期 *Annals of Physics* 上发表了一篇题为“一种新的天然放射性: π 介子的自发发射”的文章。文章说:

“近几年来,有关基态核的质子放射性, β 延迟的双质子衰变, β 延迟的氘衰变、碳-14 放射性和氦放射性的报道已经相当多了。然而,这些放射性实际上属于两种类型:(1) 基本粒子的自发发射,如 γ 射线、电子、正电子、质子和中子。(2) 自发发射核子集团,如 α 射线, ^{14}C , Ne , β 延迟的双质子衰变, β 延迟的双中子衰变,通常也包括从对称的自发裂变到极不对称的自发裂变”。

“核的 π 介子放射性,也就是由基态核自发发射 π 介子。这是一种新的、富有魅力的、完全不同于(1),(2)两种类型的衰变方式,它仅仅可以通过三体终态核反应道实现”。

“使用 Wapstra 和 Audi 编制的实验质量表,计算了一些核的 Q_{π} 值和统计因子,结果表明,从能量的角度看,对所有 $Z > 80$ 的核,基态核的 π 介子放射性是完全可能的。”

“从统计理论的角度看,这种新类型的天然放射性对 $Z = 92-106$ 的核特别从优。因为些核的统计因子 $F_{\pi}/F_{\beta} = 40-200[\text{MeV}]^{1/2}$ 。”

“中性 π 介子(π^0)以 98.85% 的几率衰变成两条 γ 射线,其时间尺度为 $0.828 \times 10^{-16}\text{s}$ 。”

“对自发发射的中性 π 介子最方便的鉴别方法是借助于铅玻璃契仑可夫(Cherenkov)探测器望远镜组,探测由它的主衰变方式($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$)产生的两条 γ 射线”。

π 介子自发发射的理论,为低能核物理与粒子物理相结合提出了新的研究课题。

(李业祥根据 *Annals of Physics* 1986 年第 171 卷第 2 期第 237—252 页编译)