

铸件的凝固

R·W·路德 尔 著

党 刚 译

中 国 工 业 出 版 社

——铸件的凝固——

R·W·路德尔 著

党 刚 译

中国工业出版社

本书介绍研究铸件凝固机理和凝固速度的理论和实验方法，
概括而扼要地归纳总结了許多专家在这方面的研究成果；在内容
上，理论与实际并重。

本书供铸造专业研究人員和工程技术人员参考。

R. W. Ruddle

THE SOLIDIFICATION OF CASTINGS

The Institute of Metals, London, 1957年第2版

* * *

鑄件的凝固

党 剛 譯

*

机械工业图书編輯部編輯 (北京苏州胡同141号)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印張 $13 \frac{5}{8}$ · 插頁 2 · 字数 302,000

1963年12月北京第一版·1963年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,910 · 定价(10-7)2.75元

*

統一书号: 15165 · 2147(一机-461)

序 言

許多年來，生产健全鑄件总是一件需要經過試驗和失敗的事。尽管一些一般原則已为大家所公认，但是所用的开澆口、补縮和激冷的方法，主要还是基于鑄造工作者自己的得来不易的經驗。

不过到了近几年，人們的注意力已經轉向鑄件生产与設計的学理方面，結果就着手了几个方面的研究工作。其中之一就是研究鑄件凝固的机理及其凝固速度。广泛地說，鑄造工艺这些方面的研究工作可以分为两部分：其一是关于这个課題的基本原理的工作；其次是更富于实用性的研究，如冒口大小对于鑄件健全程度的影响。当然，在这两部分之間存在着一定的相互关系，因而在发表的論文中有許多是这两方面同时論及的。

对于鑄造工作者來說，無論从目前或是从根本着想，強調这种工作的重要性都不能算太过份，因为鑄件的健全与否主要受其凝固方式的支配。要想稳定地生产质量比目前所能达到的更高的鑄件，就有賴于这方面的工作；此外，在凝固的机理和凝固速度方面所做的許多工作的成果，都具有直接实用的价值。本书的目的就是：希望以容易理解的形式，概括和扼要地将这一領域內的研究成果有批判地介紹給讀者。像初版一样，这本书的讀者对象主要是研究工作者和高级鑄造工艺师，但是对于从事实际工作的鑄造工作者來說，有許多部分也会是很有益的。

这个領域內的研究工作者近时显得十分活跃，而且自从七年前本书第一版問世以来又发表了大量的論文；因此需要把本书彻底加以修正，所以保存的原文就很少了。此外，本书所涉及的範圍也扩大了一些，对于与凝固动力学相对的凝固的机理談得詳細得多；关于實驗技术的討論也扩大了。这些改动的最后結果，使

本版的字数超过了初版的三倍。

第一章簡述了研究鑄件凝固所用的主要实验方法；这些实验的技术部分，需要时将在以后的章节中詳述。第二章討論了金屬和合金凝固机理的示性方面，以便易于了解此后討論的計量問題。这一章特別重要，它包括对这些問題的討論：如晶粒改进問題以及在不同金屬和合金鑄件中观察到的不同宏观組織的产生原因等。第三章专讲凝固过程中鑄件和鑄型的热流的数学。鉴于近似方法在这一領域內显然有很大的用处，所以在这里詳細加以討論。这本书的編排方式，使不願深入研究艰深的鑄件热流数学的讀者可以略去第三章（以及第七章第2节），而不致于对理解本书的其余部分有何妨碍。第四章詳述砂型和鑄錠型里热流的实验工作；这一章中的資料极为重要，因为鑄件的凝固速度几乎完全决定于鑄型能轉移热量的速度。砂型鑄件和硬型鑄件的凝固速度，分別在第五第六两章討論。鑄件的形状和大小、合金的热性能及各种其他因素对凝固速度的影响，都在这两章中加以叙述。第七章只討論連續鑄錠时所得到的热流速度和凝固速度。第八章涉及許多更实际的問題，包括：鑄件的凝固条件与其健全程度的关系、在补縮不良的鑄件中决定疵孔类型的因素、补縮的机理、冒口的效率及其有效作用范围、激冷的价值，最后还有将这些題目用于改进鑄件健全程度方法的基本知識。对于从事实际工作的鑄造工作者來說，这一章也是十分有用的。本书有两种附录：第一种列出并討論了关于金屬和造型材料高溫热性能的有用資料；第二种包括用于計算鑄件和鑄型热流速度的一些表和两个数学方程式。

我以前工作过的英国非鉄金屬研究协会慨允帮助打印手稿和准备許多图表，特在此表示謝意。对于該会图书管理員 B. Walgrave 女士及其同事們不倦地供給文献和代找难覓的資料，尤为感激。我的旧同事 A. Cibula 先生对第二章提供宝貴的評論，英

国陶瓷研究协会 A. E. Dobbs 博士帮助编制附录一中的耐火材料热性能表，金属研究所 N. B. Vaughan 先生和 N. King 女士细心校订原稿并提出许多有益的意見，以及吾妻帮助进行第三章的数字计算，都使我受惠不浅。

大部分图表蒙各出版者惠允复制，在此表示谢意。

R. W. RUDDLE (路德尔)

1957 年 2 月

符 号 表

- A ——面积
 b ——热扩散率 $= \sqrt{Kc\rho}$
 C ——电容
 C ——任意单位的热函
 c ——比热
 D ——鑄件直徑或深度
 D ——固体金屬壳厚度
 d ——距离
 E ——电动势
 E ——发射强度
 F ——权重因数
 F ——越过金屬/鑄型分界面的热通量
 F ——相对凝固時間 $= (A_{\text{鑄件}}/V_{\text{鑄件}}) / (A_{\text{鑄口}}/V_{\text{鑄口}})$
 f ——修正因数
 ΔG_1 ——单位体积凝固时的自由能变化
 ΔG_2 ——单位体积微晶, 形成微晶/液体分界面时的自由能变化
 H ——高度
 H ——单位重量的热函
 h ——表面的傳热系数
 K ——导热系数
 k ——热傳导
 L ——鑄件长度
 L ——熔化潜热
 L' ——修正无因次刻度的熔化热
 l ——距离
 M ——无因次模数
 N ——无因次模数
 P ——以体积分数表示的孔隙度

- Q ——单位面积轉移的热
 Q_c ——鑄件在固相綫以上的热函
 Q_w ——鑄件单位重量轉移的热
 ΔQ ——鑄件单位体积可轉移的热
 q ——凝固常数
 R ——电阻
 R ——鑄件半徑
 R ——鑄件的当量厚度
 r ——徑向距离
 Δr —— r (网眼单位) 的微增量
 S ——无因次形状因数
 s —— θ_c 与 θ_f 之間的平均比热
 T ——鑄件的厚度
 T ——绝对温度 ($^{\circ}\text{K}$)
 t ——时间
 Δt —— t 的微增量
 U ——越过鑄型外表面的热通量
 u ——过热
 V ——体积
 V_c ——鑄件体积
 V_r ——冒口体积
 v ——速度 (放低鑄件的)
 v_w ——速度 (冷却水的)
 W ——宽度
 W ——鑄件重量
 W ——热通量
 x ——距离
 Δx —— x 的微增量 (网格剖面或单位的尺寸)
 y ——距离
 Δy —— y 的微增量 (网格剖面或单位的尺寸)
 Z ——相对体积 $= (V_{\text{冒口}}/V_{\text{鑄件}})$

- z —— 距离
 Δz —— z 的微增量 (网格剖面或单位的尺寸)
 α —— 温度扩散率 (热扩散率) $= K/\rho c$
 β —— 凝固时体积收缩的部分
 γ —— 网格垂直尺寸, 水平尺寸的分数
 δ —— 网格的水平尺寸, 直径的分数
 ϵ —— 放射率
 η —— 棱角常数
 θ —— 温度
 $\Delta\theta$ —— θ 的微增量 (或微减量)
 θ_a —— 周围液体的温度
 θ_c —— 铸件温度
 θ_{ch} —— 激冷物的温度
 θ_f —— 凝固温度
 θ_i —— 金属/铸型分界面铸型的温度
 θ_l —— 液相温度
 θ_m —— 型内温度
 θ_s —— (锭或型的) 表面温度
 λ —— 修正无因次刻度的熔化热
 μ —— 某一定半径的粒子的份量
 ξ —— 铸型常数
 ρ —— 密度
 σ —— Stefan 常数
 τ —— 修正无因次刻度的时间
 ϕ —— 修正刻度的温度
 χ —— 冷却速度
 ω —— 很短的时间间隔

各种常数和复合变数用 $a, b, B, C, c, d, D, f, l, k, L, M, N, P, S, W, X, Z, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \xi, \lambda, \pi, \sigma, \tau, \psi, \phi$; 表示整数用 m, n, r , 表示

目 次

序言	3
符号表	12
第一章 实验方法	1
1 倾出法	1
2 测温技术	3
(a) 方法的基础	3
(b) 使用的装置	4
(c) 热电偶的设计	9
(d) 分界面温度的测定	11
3 其它实验方法	12
4 模拟法	13
(a) 电分析器的理论	13
(b) 电分析器的操作	15
(c) 电模拟的范围	18
(d) 其它模拟法	19
5 数学分析法	21
第二章 铸件凝固的机理	23
1 引言	23
2 纯金属的凝固	23
(a) 凝固前沿的移动	23
(b) 宏观组织	26
3 固溶体合金的凝固	27
(a) 凝固前沿的移动	27
(b) 宏观组织	36
4 生核理论	39

(a) 用于純金屬的凝固	41
(b) 用于固溶体合金	41
5 接近共晶成分的合金的凝固	47
(a) 非鉄合金	47
(b) 鑄鉄	52
第三章 凝固速度的数学处理	60
1 分析法	61
(a) 基本原理	61
(b) 鑄型的吸热	62
(c) Neumann解法	68
(d) Schwarz 解法	69
(e) Lightfoot解法	70
(f) 其它解法	72
(g) 分析法的价值	74
2 近似法	76
(a) Schmidt 图解法	77
(1) 方法的基础——(2) 分界面的处理——(3) 应用于 复合固体	
(b) Dusenberre 数字法	84
(1) 方法的基础——(2) 分界面的处理——(3) 应用于 复合体——(4) 潜热释放的处理——(5) 对凝固问题的 应用——(6) 两个方向的热流的处理——(7) 热性能的 温度变化	
(c) Sarjant 和 Slack 法	104
(1) 方法的基础——(2) 分界面处理: 气隙形成——(3) 自鑄型外表面的热损失	
(d) 場作图法	111
第四章 鑄型的吸热	114
1 砂型	114

(a) 干砂型.....	114
(b) 湿砂型.....	124
(c) 棱角和曲面.....	132
(1) 外角——(2) 内角——(3) 圆柱形鑄型表面	
(d) 砂型中的激冷物.....	141
(e) 型心的影响.....	143
(f) 各种材料激冷能力的比較.....	143
2 激冷型.....	155
(a) 分界面温度.....	156
(b) 气隙形成.....	160
(c) 鑄型塗料的效应.....	165
(d) 鑄型的有限厚度.....	165
(e) 吸热速度.....	166
(f) 鑄型厚度的影响.....	171
第五章 砂型鑄件的凝固速度	173
1 [硬皮形成] 速度	173
(a) 应用傾出法的工作.....	173
(b) 应用温度测量技术的工作.....	179
(c) 应用电分析器的工作.....	187
(d) 砂型中激冷物的作用.....	191
2 鑄件形状的影响	196
(a) Chvorinov 法則	197
(b) 概括方程式的应用.....	208
(c) 棱角处和空心圓筒中的凝固.....	211
(1) 棱角——(2) 空心圓筒	
(d) 凝固時間的計算.....	217
3 概括的討論	223
第六章 鑄錠和激冷鑄件的凝固速度	225
1 采用傾出法的工作	225

(a) 早期工作	225
(b) Spretnak 的工作	229
(c) 其他的近期工作	233
2 运用温度测量技术的工作	237
(a) Pellini 等人的研究工作	237
(b) 英国人的近期工作	239
3 其它方法	246
4 非铁金属钎方面的工作	249
第七章 連續鑄件的凝固	252
1 引言	252
2 数学研究	252
3 实验工作	266
(a) 测定液池形状的简单技术	266
(b) 温度测量法的应用	272
4 連續鑄件中的气隙形成	285
第八章 应用于生产健全鑄件	287
1 引言: 定向凝固的概念	287
(a) 影响「硬皮形成」合金的鑄件健全程度的因素	287
(b) 以浆状方式凝固的合金, 影响其鑄件健全程度的因素	290
(1) 形成分散小孔的机理——(2) 控制分散小孔数量的因素——(3) 易产生分散小孔的鑄件的补縮	
(c) 鑄铁的补縮特性	302
2 补貼的采用	303
3 冒口的設計及有效使用	305
(a) 冒口的形状	305
(b) 冒口的尺寸	306
(c) 冒口的补縮范围	316
(1) 板状鑄件——(2) 棒形鑄件——(3) 接合截面	

(d) 补縮范围和冒口尺寸.....	328
(e) 其它合金鑄件的补縮范围.....	335
(f) 冒口的效率.....	335
4 激冷物的采用	344
(a) 接合处的激冷.....	344
(b) Pellini 等人的工作	346
(1) 鋼鑄件中激冷物对补縮范围的影响——(2) 鋼鑄件中 筋和突起部的激冷——(3) 生产鋼鑄件时激冷和补縮的結 合使用——(4) 青銅鑄件的激冷	
(c) 間接激冷物和采用激冷能力高的造型材料.....	368
5 鑄錠	370
附录一 金屬和造型材料的热性能	372
(a) 液态純金屬的热性能	372
(b) 純金屬的熔化热	372
(c) 固态純金屬在接近熔点温度时的热性能	374
(d) 合金的热性能	374
(e) 造型材料的热性能	377
附录二 数学函数	392
参考文献	398
名詞术语索引	410
人名索引	419

第一章

实验方法

虽然关于鑄件凝固的机理及其凝固速度的現有知識是基于許多不同种类的、应用多种技术的实验的結果，但也可以說，我們对于这些問題的理解大部分得自四个基本方法。特别是其中的一种叫做溫度測量法的技术，在闡明凝固的机理方面有极大的价值；还可以說，所有关于凝固速度的知識，不是从这项技术就是从其他三种实验方法得来的。这四种方法既然将在本书以后各章里占有重要地位，在本章以下各节里仅先加以叙述和评价。另外还有一两项技术也要简单地提一提。

1 傾出法

最初对鑄件凝固速度所作的許多研究工作（如 Briggs和Gezelius〔1〕等所作的研究）都采用了这种方法。这种方法尽管目前已大都为更富于內容的技术所代替了，但仍有一些用处。实验的技术很简单。同时澆鑄許多同样的鑄型（所用的鑄型通常是形状简单的），让鑄型里的金屬的凝固持續預定的時間，鑄型的預定時間各不相同，到了時間，就把鑄型翻轉过来或傾出液态金屬。鑄型里未凝固的液态金屬流出来了，留下一层固体壳子，在理論上，这就是自澆鑄到傾出这一段期間內凝固的金屬所形成的。随后把这些壳子的厚度量出来，从所获結果得出壳子或〔硬皮〕厚度对時間的曲綫；这个曲綫叫做〔硬皮形成曲綫〕，用以描述想像在凝固一开始就在型壁上形成的完整的金屬硬壳向鑄件液态心部进展的速度。图1是表示鋼球硬皮形成速度的一个例子。

尽管这种方法在研究凝固速度（尤其在鋼錠凝固速度方面）的早期給予了人們以很有价值的結果，但却有許多值得爭議之处，使其不能在近期研究工作中广泛应用。首先，它只能測量一种量，即硬皮形成速度，对其他一些重要問題（如凝固中的鑄件内部的溫度梯度）則不能提供資料。其次，应用此法只限于鑄件凝固的初期，因为到了后期，实验工作者不能再打穿固态金屬的外壳，或者另外保持一条通路到鑄件内部的液体里；这样，中部仍保持液态的金屬就不可能傾出了。

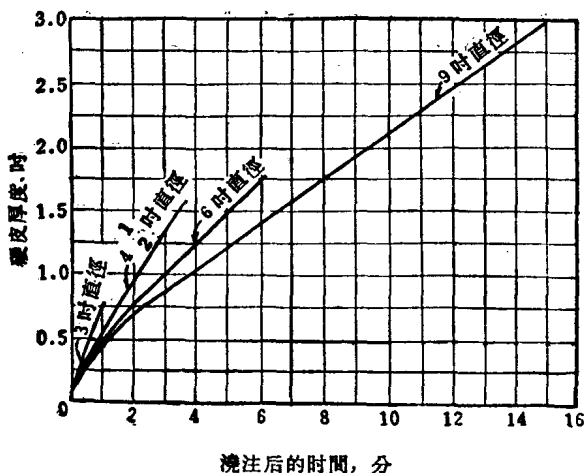


图1 鋼球的凝固速度。(Briggs 和 Gezelius[1])。

这个方法的最大缺点是，当試圖将其用于有凝固范围的合金时，即使其范围只有很少几度，也会产生謬誤的結果，因为留在型內的「固体」硬皮实际上还含有一定数量的液态金屬，如Bochvar 和 Kuzina[2]就鋁-銅合金作的实验所表明的那样。Pellini[3]也曾就傾出法得到的謬誤征状举了例，而Chvorinov[13]則曾經詳盡地討論过这个方法的缺点。如果合金的凝固范围相当寬，此法一般是不能用的。例如，Hunsicker[4]感到此

法对鋁合金不适用，因为趋势是，或者在翻轉时型內所有的金屬都落出来，或者尽管鑄件显然沒有完全成为固体，而金屬却全部留在鑄型里。Alexander [34] 也注意到此法应用于鋁合金的缺点。同样，Richmond [5] 在研究青銅鑄件时发现，澆鑄前必須在型壁上插上鋼釘，使釘子突出的一端成为未完全凝固的壳子的支撑物，否則就得不到滿意的硬皮。上述各种結果，可以用“純金屬与有相当寬凝固范圍的合金具有不同的凝固机理”來說明，并将在第二章內予以討論。即使是純金屬和凝固范圍微不足道的合金，傾出法似乎也可能产生謬誤的結果，因为就是这些材料，当鑄型翻轉时也可能有一些液态金屬被从型壁向前发展的枝状晶的尖端所夹住。所以，将来显然應該放弃这个方法，对过去用此法所得的結果應該有所怀疑，而且只能作为示性的，不能作为計量的。

2 測溫技術

(a) 方法的基础

傾出法的这些缺点促使研究工作者近年来寻找其他的方法，以便对凝固中的鑄件內部发生的变化情况取得准确的知識，这就使測溫技术获得了相当普遍的采用。在本质上，这个方法很简单。把一些热电偶的端头放在型腔內各个想了解的地方，各热电偶就可記錄許多冷却曲綫，从金屬注入时起一直可繼續到整个凝固过程，而且想观察到什么时候都成。

关于鑄件凝固期間所发生的冶金变化，測溫方法給出明确的資料，而且不像模拟法（第13頁）或数学分析法（第21頁）那样，需要具有关于鑄件所用合金的高溫热性能的知識；这就是此法的特別优点。此法能够了解凝固的开始和終了的过程，并且示明金屬