

书中詳細地討論了各种淬火介质，叙述了在这些介质中冷却过程的特点，并列举了最常用的以水和油为基的淬火介质以及熔融的金属、盐和碱等淬火介质的冷却能力的數據。

本书供工程技术人员参考，也可作为高等学校学生的参考资料。

Л. В. Петраш
ЗАКАЛОЧНЫЕ СРЕДЫ
Машгиз, 1959

* * *

淬 火 介 质
白 云 昭 譯

*

机械工业图书编辑部編輯 (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许可证出字第 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 $3 \frac{7}{16}$ · 字数 86,000

1964 年 7 月北京第一版 · 1964 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,660 · 定价(科六)0.55 元

*

統一书号: 15165 · 2919(一机-608)

序 言

进行鋼的热处理时，正确地选择淬火介质，对工件的质量有着决定性的影响。

目前，淬火經常都是在水中、盐和碱的水溶液中以及油中进行的。

水和以水为基的介质的特点是，具有强烈的冷却能力，但在低溫范圍內它們使工件表面冷却得过快，而且它們的冷却能力与溫度有很大的关系。

因此在水中淬火时，工件常常产生裂紋。

油沒有这些缺点，但是冷却能力較低。

其他应用較少的淬火介质——盐、碱和金屬的熔液，在冷却能力上与油近似。

有許多著作是专门研究淬火介质的。在这些著作中对各种介质的冷却激烈度进行了比較，研究了溫度、循环和各种添加剂对冷却速度和淬火結果的影响。但是許多淬火介质冷却能力的性质和在这些介质中的冷却过程仍研究得不够。

本书的目的是把有关淬火介质的理論上的和实际中的資料系統化，确定它們可能适用的范圍，并闡明在淬火过程中出現的某些現象的机理。

书中所列举的資料为工件热处理时对选择及使用淬火介质提供了比較充分的根据。而且在研究新的淬火介质时还可以利用这些資料。

目 次

序言

第一章 各种介质的冷却特点	1
1 不改变介质物态的冷却	2
2 改变介质物态的冷却	4
3 在低沸点介质中工件表面和中心的冷却特点	10
第二章 淬火介质的评定	14
4 按硬度评定	14
5 按冷却曲线评定	14
6 按 720°C 时的冷却速度评定	15
7 按珠光体和马氏体温度区间的冷却速度评定	18
8 按冷却速度和试样温度的关系曲线评定	18
9 按散热系数与冷却表面温度的关系曲线评定	24
第三章 在以水为基的介质中的冷却	28
10 水的性质	28
11 在静止水中的冷却	29
12 水加热的影响	30
13 水循环的影响	32
14 杂质的影响	34
15 在盐类溶液中的冷却	40
16 在碱类溶液中的冷却	45
17 在酸类溶液中的冷却	47
18 在甘油溶液中的冷却	49
19 在水玻璃溶液中的冷却	51
20 在肥皂液中的冷却	53
21 在乳液和悬浮液中的冷却	54
第四章 在油中冷却	57
22 在油中冷却的特点	58
23 油的起始温度的影响	60

24 循环的影响	61
25 在矿物油中的冷却	61
26 在植物油和动物油中的冷却	67
27 在使用过程中油的性质的变化	68
28 油的再生	70
29 淬火槽和冷却装置	73
第五章 在金属、盐和碱的溶液中的冷却	76
30 在液体金属中的冷却	76
31 在盐和碱中的冷却	79
32 盐浴槽	91
33 碱浴槽	93
第六章 特殊的冷却方法	94
34 限制快速冷却的范围	94
35 控制冷却速度和均匀性	96
36 工件淬火时的浸入方式	100
参考文献	102

第一章 各种介质的冷却特点

淬火时鋼的冷却应保証在工件的整个截面上得到規定的組織，即应保証工件有一定的淬透性，同时不应引起淬火缺陷——裂紋、翹曲、变形和大的殘余应力。

鋼淬火成馬氏体时，在临界点 A_1 以下奧氏体低稳定区内应以大于临界淬火速度进行冷却。合金鋼的临界淬火速度值从十分之几到 $100^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ ，而碳鋼从 100 到 $600^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。虽然根据热动力学曲綫和 C-曲綫的数据，只是在比較狹小的，相当于珠光体和貝氏体轉变的溫度区内才必須加速冷却，然而实际上，由于淬火工件的体积和热慣性很大，所以工件的急速冷却通常都持續到相当大的溫度范围。工件淬火成馬氏体时，应加速表面的冷却，表面溫度的降低速度經常大大超过鋼的临界淬火速度。

从形成淬火缺陷的观点上来看，馬氏体点 M_n 以上的冷却速度起有不同的作用。提高冷却速度会使翹曲加剧并增加热应力值。但是，热应力增加的同时常常会使总淬火应力降低，因此，淬火裂紋形成的可能性便减小了。

在馬氏体区内急速冷却是极不适宜的，因为这样会使应力剧烈增加。拉应力是特別危險的，因在轉变期間鋼强度的暂时降低和在热水的不利的物理化学作用^[13]的情况下，拉应力可能会引起形成淬火裂紋。

可見，从保証需要的淬火組織和防止淬火缺陷两方面对冷却规范提出的要求常常是矛盾的，但应求得一致。

在多数情况下，最理想的是在高溫时中速冷却，在 A_1 和 M_n 点之間快速冷却，在馬氏体轉变区緩慢冷却。被处理工件的形状和尺寸的多样性，以及鋼的临界淬火速度值的巨大差別都要求淬火介质的冷却能力在尽可能比較寬的范围內平緩地改变。

根据鋼的性能、所要求的組織的特点以及工件的形状和尺寸，

淬火时工件的冷却可以使用物理性质彼此相差极大的淬火剂：空气、金属板、熔融的金属、熔盐和熔碱、水、各种物质的水溶液、油等。

上列淬火介质之间的区别，不仅限于它们使工件冷却得快些或慢些。而淬火时所用介质的极重要的特性是一些介质在冷却过程开始之初便很快地吸收热，另一些介质是在冷却过程中期吸热，再一些介质则是在冷却过程末期才吸收热。对淬火介质的冷却性质影响最大的是介质的物态在冷却期内改变与否。

淬火时用的熔盐和熔金属，其沸腾温度一般都大大超过被冷却工件的温度。这类介质在冷却过程中不会沸腾，因而不会改变其物态，所以冷却曲线上没有表明冷却过程大大加速或减缓的急剧转折。水、各种物质的水溶液、油等这些介质，在比被冷却工件的温度低很多的温度下便沸腾。因此，在接触到赤热的工件时，这类液体就沸腾而改变其物态。

鉴于在这两类介质中的冷却过程各不相同，所以在下面将对它们分别加以研究。

1 不改变介质物态的冷却

空气、固态的金属、熔化的金属、熔盐等，这类介质的特征就是在冷却时不发生物态变化。

20毫米的银质试样在静止空气中的冷却速度与其心部温度的关系曲线如图1所示。在全部冷却期内，热交换是以辐射、对流和传导的形式进行的。在高温时，辐射传热是散热的主要形式；而在低温时，对流和传导为主要形式。在750°C和100°C之间，散热系数从63千卡/米²·小时·°C平缓地降低到18千卡/米²·小时·°C。使空气流通，特别是采用压缩空气时，可使冷却速度增大若干倍。如果空气流动速度在冷却过程中一直保持不变，那么，冷却速度与试样温度的关系曲线将位于较高的位置，但曲线的性质仍不改变。

4毫米的镍铬合金圆球在铁板和钢板上的冷却曲线如图1所

示。此时，在全部冷却期内，热传导是传热的主要形式。和在前一情况下一样，导热速度在全部冷却过程中是平缓降低的，没有任何的反常现象。虽然铜板的导热系数几乎比铁板大 9 倍，但在铜板上的冷却速度却只比铁板上的冷却速度大 1 倍。这种情况是由于被冷却试样和金属板之间的间隙具有较高的热阻以及接触面上的氧化层具有较低的导热性所致。如欲提高工件在板上的冷却速度，可用加大工件在板上的压力，增加板的体积以及板内通水冷却的方法来达到。

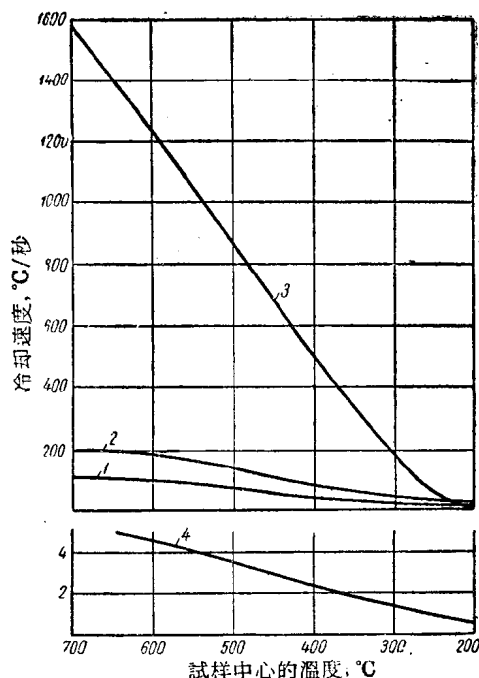


图 1 球形试样的冷却速度：

1—4 毫米的镍铬合金试样，在铁板上；2—相同试样，在铜板上；3—相同试样，在 180° 的熔融物（70% Cd 和30% Sn ）内；4—20毫米的银质试样，在静止空气中。试样 1、2、3 的冷却速度是引用[31]的资料。

由图 1 看出，在熔融的高沸点金属中的冷却也具有类似的性质。在这种熔融金属中，虽然导热系数值比较低，但由于接触良好，以及对流传热的缘故，冷却速度几乎比在固体金属上大 9 倍。在低温时，在熔融金属中的冷却速度比较低，这是由于温度差降低而引起的。

以后将会看到，这样的冷却性质在熔盐和熔碱中也会出现。

由此可见，固态和液态金属，熔化的盐和碱，以及其他的，在淬火过程中不改变其物态的淬火剂，虽然在它们中的热交换的形式不同，但在冷却的性质上却彼此相似。

冷却过程可用平缓降低的曲线表示，也可以按在实际中具有较高精确度的牛顿公式计算：

$$Q = \alpha F(t_f - t_w),$$

式中 $t_f - t_w$ ——被冷却表面温度和淬火介质温度的温度差，(度)；

F ——表面积 (米²)；

α ——散热系数 (千卡/米²·小时·度)。

在进行热计算时，这些介质的散热系数可以取冷却区间温度的平均数。

2 改变介质物态的冷却

水、盐、碱和酸的水溶液，具有与上述介质根本不同的冷却性质，它们的沸点温度低于在其中冷却的工件的温度，因而会沸腾。

在这类介质中，工件的冷却是不均匀的，在冷却初期、中期或末期具有很明显的冷却速度最大值。由于在这类淬火介质中冷却过程本身的复杂性，散热系数取为全部冷却期的平均值以及使用牛顿的计算公式势必会产生很大的误差；因此，在这种情况下，不是取全部冷却过程中散热系数的平均值，而只是取导热条件比较相同的各个时期的平均值。

1919年，皮林格 (Пиллинг)、林奇 (Линч)^[41] 根据试样心

部的冷却曲线把在这类介质中的冷却过程划分为三个阶段(图2): I——蒸汽膜内冷却阶段; II——剧烈沸腾时的冷却阶段; III——对流冷却阶段。在这三个阶段之间的 α 和 β 间隔内出现过渡状态。

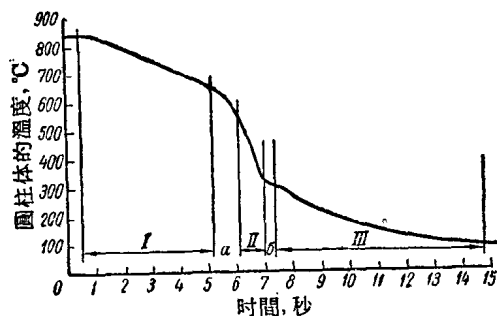


图2 柱形试样($\phi 6.4$ 毫米, $l=50$ 毫米, 95%Ni+5%Si)在 58°C 水中的三个冷却阶段。

各冷却阶段内的导热速度是不相同的。在阶段I内, 由于工件表面上附有一层蒸汽膜, 冷却以比较低的速度进行。阶段II的特点是冷却最快, 在该阶段内, 液体与工件表面发生接触并剧烈沸腾。在阶段III内, 冷却速度又变得比较平缓。

庫达节拉捷(С. С. Кутателадзе)^[11], 包里申斯基(В. М. Боришанский)^[6], 列宾捷尔(П. А. Ребиндер)和普列捷涅娃(Н. А. Плетенева)^[19], 卡扎科娃(Е. А. Казакова)^[6], 馬克-阿达姆斯(Мак-Адамс)^[28], 对改变物态的冷却过程作了详细的研究。由于他们研究的结果, 已明确了各冷却期内的传热机理, 并创立了在物质的物态改变时传热的数学理论。

按照现代的术语, 在物态发生改变的介质中冷却的各阶段定名如下:

- I——膜状沸腾阶段;
- II——泡状沸腾阶段;
- III——对流传热阶段。

研究冷却的各阶段，应在研究工件表面冷却过程的基础上进行。遗憾的是，令人满意的精确测量和记录工件在低沸点液体内冷却过程中工件表面温度的方法还未研究出来。包括弗連奇在内的許多研究者以及作者，测量金属試样的冷却表面的温度，都是用絕緣的細的热电偶电极，将其单独地焊在工件的表面上进行的。但是，这些记录的结果，不可避免的与温度场的真实情况相差很远，因为即使試样表面本身冷却的比較緩慢，而焊在試样表面上的电极却总是很快地为液体所冷却。由于这样记录下来的曲线不够精确，所以根据它們分析冷却过程，根据是不充足的。因此，进行这种分析时，应该依据間接的方法研究在冷却的各阶段内的过程，同时记录下紧接金属表面的区域的冷却曲线。最常见的分析多系根据由高导热性的金属制成的細小試样的心部的冷却曲线进行的。虽然后一种方法不能得出关于表面本身上所发生的过程的詳尽概念，但它能以現在所能做到的最大的近似程度反映表面上的过程。

膜状沸騰阶段

如将低沸点的液体倒在很热的金属表面上时，它完全不能把表面沾湿，而呈圓球形，像玻璃上的小水銀珠一样在表面上很灵活的滚动。

远在1746年，艾列尔 (Л. Эйлер)^[30] 就已注意到了这一称为球形状态的現象，1756年，列坚弗洛斯特 (Лейденфрост)^[36] 曾对它作了描述。

工件淬火时球形状态造成了与赤热的金属表面接触的液体在大范围内的膜状沸騰。工件与液体一接触时，部分液体即轉变为蒸汽，但蒸汽又很快地为較冷的液体冷凝。因为液体受热很快，所以以后冷凝便趋緩慢；而不断生成的新蒸汽来不及冷凝便形成了被已加热的液体的薄膜所包圍的蒸汽膜。膜内的蒸汽和液体都处于不断的运动中。这层蒸汽-液体膜把赤热的表面与大量的液体隔开(图3)。液膜内表面上的温度較沸点为高，液体剧烈蒸发；

接触大量液体的外表面上，温度未达到沸点，因而发生蒸汽冷凝。

早在1920年，莫斯齐茨基和布洛捷尔^[39]就已确定，当被冷却的表面过热至液体的沸点温度以上某一对每种液体完全一定的临界值时，一种沸腾状况便转变为另一种沸腾状况。各种液体如乙醚、醋酸乙酯、水、二甲苯等——它们的沸点温度在 $34.5 \sim 139^{\circ}\text{C}$ 范围内——的临界过热温度等于 $20 \sim 49^{\circ}\text{C}$ 。

特别是当细的铂丝在水中冷却时，膜状沸腾从被冷却表面上高的温度到 131°C 都是稳定的，也就是临界过热度在这种情况下为 31°C 。这些研究者还确定：与液体沸点温度相比较的冷却表面的临界过热度与被冷却试样的材料也有关，虽然如从他们所得的数据中所看到的这种关系是微弱的。譬如，在水中冷却时得到了如下的临界过热度：

对于铂·····	31°C
对于铁·····	33°C
对于银·····	39°C
对于镍·····	45°C
对于铜·····	47.5°C
对于铅·····	57°C

包里申斯基^[6]研究了水珠蒸发的时间与金属表面温度的关系，如图4上的曲线所示。在高温下经过较长时间的蒸发后（仍有珠状液滴存在），在表面温度降至 230°C 时出现了最缓慢的蒸发。 230°C 是球状沸腾尚呈现稳定的最低温度。在 $230 \sim 160^{\circ}\text{C}$ 的区间内，水滴蒸发的时间急剧地缩短，这表明从球状沸腾转变为泡状

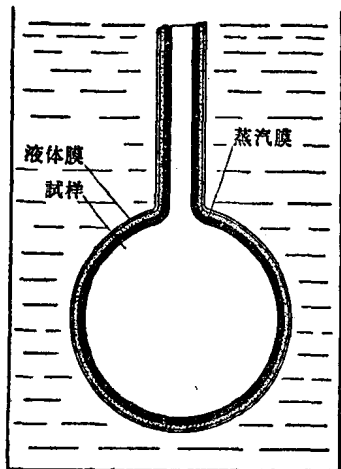


图3 在水中冷却时，赤热试样上蒸汽膜形成的示意图。

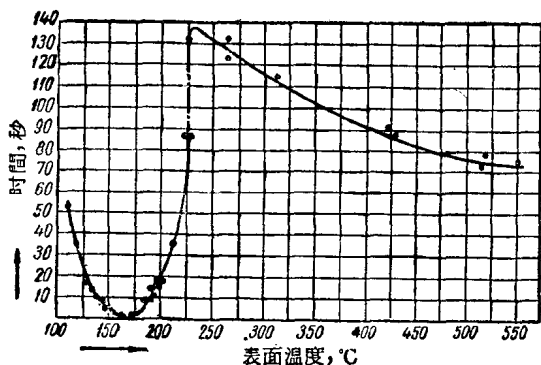


图4 黃銅表面上水滴蒸发的全部時間与表面溫度的关系。

沸騰。表面溫度繼續降低时，由于溫差的减小，水滴蒸发的持續時間又略微增加。由此可以得出結論：金屬表面上水的蒸发狀況的改变发生在230~160°C區間內。

包里申斯基同时还确定了上面指出的表面溫度值与水的溫度的关系。由此关系中可以看出，水預热会使銅表面的临界溫度从冷水时的250~150°C降低到热水时的230~140°C。从这些数据中还可得出結論：从膜狀沸騰过渡到泡狀沸騰的溫度范围，对黃銅和銅表面具有不同的寬度。临界溫度值随被冷却表面的金屬种类而异（虽然并不很大）。普列捷涅娃和列賓捷尔^[19]在完全另一种不同的情况下研究了这些現象，并测定出相当于从膜狀沸騰过渡到泡狀沸騰时的表面溫度等于250°C。这与包里申斯基的数据完全一致。液体沸騰狀況的性质与热的表面的溫度的关系，通常是跟表面的导热速度和散热系数值与该溫度的关系相符合的。

从上面引証的数据中可以看出，金屬表面的加热溫度乃是引起与该表面接触的液体沸騰狀況发生改变的主要原因。

在被冷却表面具有高的溫度时，膜狀沸騰是稳定的。当表面溫度达到某一对每种液体为完全一定的临界值时，膜狀沸騰即变为不稳定，而被泡狀沸騰所代替。在膜狀沸騰时，散热是困难的。散热强度視蒸汽膜的厚度而有所不同。膜內的蒸汽压力 P_n 等于

大气压力 P_a 、液柱压力 P_* 和水膜的表面张力所造成的压力 $P_{n.n}$ 之和，即

$$P_n = P_a + P_* + P_{n.n}.$$

膜内高的压力是膜内蒸汽过热至液体沸点温度以上的条件。提高内压力能减小水蒸汽膜的厚度而使导热加速。工件在液体中冷却时，它的下部承受的压力较大，因而这一部分在膜状沸腾阶段的冷却比工件的上部较快。当长的工件在深槽内淬火时，或是在高压条件下淬火时，这一情况表现得更为明显。

应指出的是，提高压力并不是工件下部较强烈冷却的唯一原因。工件下部接触的经常都是比较冷的液体，而上部接触的则是从下面各层上来的已加热了的液体。当冷却的工件与液体相互搅动时，水蒸汽膜便破裂，因此同样能发生强裂的冷却。在其他条件相同时，膜的厚度仅取决于蒸汽形成速度和凝结速度的比值。提高蒸汽的形成速度并同时降低其凝结速度，会使膜的厚度及其稳定性增加，譬如在赤热的金属表面与热水接触时就是这样的情况。但此时导热速度减小。当工件在冷的液体中冷却时，膜的厚度及其稳定性均降低，膜出现周期地破裂，最后完全变得不稳定而趋消失。此时，液体与加热了的表面发生直接接触，于是便开始了泡状沸腾。

泡状（核状）沸腾阶段

泡状沸腾发生在蒸汽膜完全破裂的情况下，而膜的完全破裂则是出现在表面冷却到临界温度时。在这种沸腾状况下，液体沾湿金属表面并直接与之接触，因此散热最快。在沸腾过程中，有很多蒸汽泡生成，汽化热便是消耗在这上面的。现已发现，大量的热是由汽泡带去的，而原来汽泡占据的位置则为新体积的水所补充。在这种沸腾状况下，散热速度在极大程度上取决于冷却液汽化热的大小、以及蒸汽泡生成的数量、蒸汽泡“裂口”尺寸的大小、上升速度和与液体热交换的性质。表面张力的大小、液体的比重、蒸汽的比重、外界压力的大小、被冷却表面的温度和性

质，所有这些因素都影响汽泡生成和逸出的速度。

在淬火时，当加热的工件在大量的冷液体中冷却时，有许多易裂口的小蒸汽泡生成，汽泡上浮并与上升的液流共同形成乳浊液，于是便凝結而将自己的热量傳給乳浊液。只有少量的汽泡与液体一起浮出到液面。

在工件淬火时，剧烈攪动冷却液能加剧它对工件加热表面的冲洗，因此，散热就不单是靠蒸汽，而且还靠与表面直接接触的部分过热液体来进行的。这时冷却速度达到最大值，而工件表面的溫度急速降低。当溫度降低到沸点时，沸騰即告停止，而开始了冷却比較平緩的对流热交换阶段。

对流热交换阶段

对流热交换的基本条件是被冷却表面的溫度必須降低到液体的沸点溫度以下。在此阶段內导热速度比較低，主要决定于液体的比热、粘度和导热率，以及表面和液体間溫差的大小。液体的循环速度对此时的导热速度有很大的影响。

对在粘度不大的液体中冷却时所进行的直接观察，証实存在有許多渦流，其流向是从被冷却表面趋向液体的深处。当与表面接触的热液体流走时，代替它的是流来較冷的液体。如粘度值較高时，靠近表面的热液体会形成渦流层，在此层內的液体往上升。如粘度值更高时，靠近被冷却表面有往上升的細管形层流形成，层流內往上升的热液体漫布于全部表面。在后一情况下，导热以最小的速度进行。

3 在低沸点介质中工件表面和中心的冷却特点

前已指出，記錄工件表面的冷却溫度曲綫的精确方法是沒有。因此，研究表面的冷却可以根据距表面极近的金屬体积的冷却曲綫进行。但是，从用前述的近似方法●所得的表面本身的冷却

- 由于表面溫度測量方法的缺点，以下提到的数据只可以从本质方面来研究。表面冷却的持續時間，实际上比由图 5 所得者为大，而由于蒸汽膜形成溫度初期降低的确定界限，根据我們的意見是极低的（很少例外）。

曲綫中也可以获得某些有用的数据。如图 5 所示的水的这种冷却曲綫，系利用絕緣并单独地焊在表面上的細热电偶电极得到的。在曲綫 1—2 綫段上，因热量消耗在蒸汽膜的形成上，所以在很短（以零点几秒計）的时间內便发生迅速冷却。溫度初期降低的数值，如試驗所証明，取决于液体的性质，特别是取决于汽化热大小，溫度和粘度，以及被冷却工件的特性，如溫度、比面积大小、形状，还取决于金屬的热特性。

金屬試样溫度在各种介质中初期降低的数值列于表 1 中。

2—3 綫段相当于膜状沸騰阶段，在該阶段內，蒸汽膜具有最大的厚度和高的稳定性。曲綫上 3—4 綫段相当于泡状沸騰阶段，而 4—5 綫段相当于对流热交换阶段。

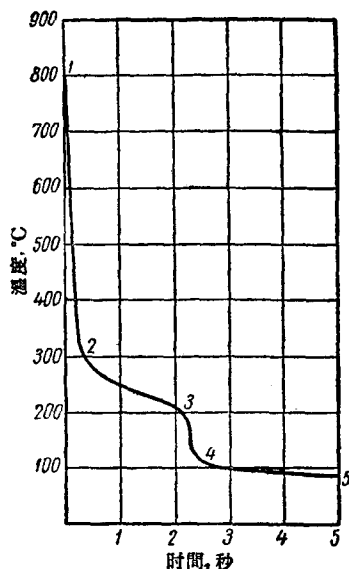


图 5 20 毫米的球形鉄試样在 20° 水中的冷却曲綫。水的循环速度 25 厘米/秒。

表 1 金屬試样表面溫度在低沸点介质中初期降低的限度

試样的材料和尺寸(毫米)	点 2 的溫度(图 5), °C			
	5%的NaOH 水溶液	20°C的水	80°C的水	50°C的工业用油
鉄試样 $\phi 25$	300	330	550	500
鉄試样 $\phi 190$	350	400	—	550
銀試样 $\phi 20$	—	420	600	570

表面金屬在水中的比較精确的冷却曲綫的最大特征，是冷却速度的最大值分布在低温区内。厚工件内部的最快冷却与其表面

不同，是出現在高溫時。冷却部分距工件表面愈远，則溫度將愈高。

从图 6 可看出：在冷却开始时，工件表面上溫度以大的速度降低，而在中部則冷却尚未开始。只有表面上的溫度大大降低后，心部的溫度才开始降低。当表面上的冷却以最大速度进行时，工件中心的冷却速度并不大。在表面的溫度和冷却速度已降低后，溫度尚高的工件中心开始以最大的速度冷却。

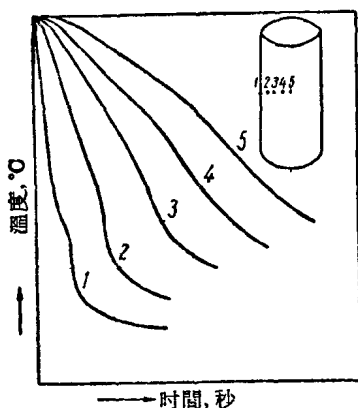


图 6 鋼圓柱体的表面和內部在水中的冷却曲綫(示意图)。

由此可見，表面冷却的开始時間和冷却过程本身远远超前于工件內部冷却的开始時間和冷却过程，而且里面的部分距冷却表面愈远(图 6)，或工件厚度愈大时，超前時間也就愈大。在冷水中，大部分工件在表面溫度降到 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 时，中心冷却得最剧烈，而在油中，当表面溫度为 $250\sim 450^{\circ}\text{C}$ 时中心冷却得最剧烈。

考虑到工件在水和油中冷却时，表面达到上述溫度是在不超过 $2\sim 3$ 秒的時間內完成的，因此可以作出結論：淬火时大截面工件中热的大量散发是发生在工件表面溫度低于 $400\sim 450^{\circ}\text{C}$ 时(图 7)。因此，在中等尺寸和大尺寸工件淬火时，液体在 450°C 以下的下部溫度區間內的冷却能力具有极其重大的意义。如工件細小

时，在表面和中心区之間不会造成大的温度差，所以液体的冷却能力从700到200°C的比較寬的区間內影响淬火結果，而以在該区間上部的冷却能力影响特別强烈。

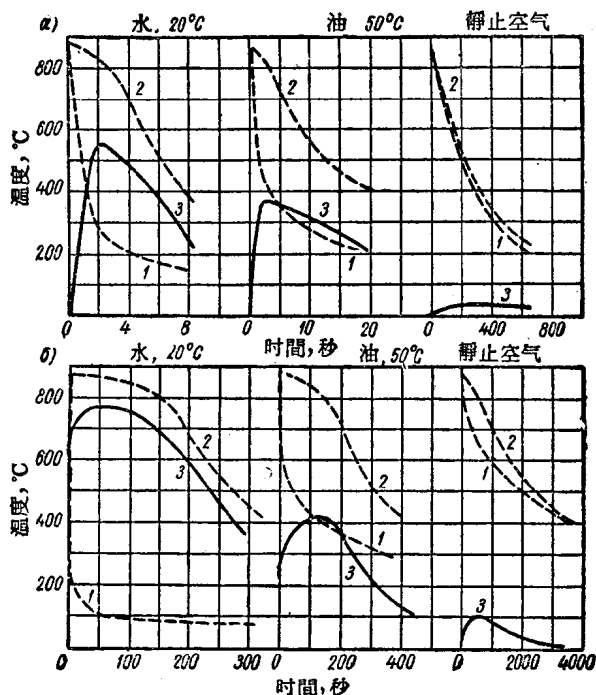


图7 在水、油和空气中冷却时，直径为25.4毫米 (a) 和 189.7 毫米 (b) 球形鋼試样的表面温度 (1)，中心温度 (2) 和温度差 [32]。