淬火冷却过程中蒸汽膜现象的解读

■ 余瀚森，夏佰成，左永平

摘要：主要介绍了工件在淬火过程中的热量转化过程，并从能量传递的角度解释了淬火过程中蒸汽膜形成和破裂的原因。并通过测试和观察金属工件在淬火冷却介质中升温和降温过程中三阶段的转变过程，对该理论进行了验证，并基于理论探讨和试验验证结果，提出了设计和开发蒸汽膜时间更短、冷速更快的新型淬火冷却介质的方法。

关键词：冷却特性曲线；临界热流密度；蒸汽膜；促冷剂

判断淬火冷却介质冷却能力的方法有很多，如淬火烈度法、热丝法、硬度U曲线法及磁性试验法等，其中冷却曲线法被公认为是最佳的实验室测定方法，因此应用也最为广泛。但是由于实际淬火过程中工件的冷却曲线与测试所得的冷却特性曲线往往并不相同，这是由于淬火过程中热量从工件传到介质的过程不仅与工件材质相关，还与工件的大小、形状等密切相关。例如，利用标准探头对一般快速淬火油进行测试得到的冷却曲线通常能观测到蒸汽膜阶段，而当其用作小型紧固件的淬火冷却介质时则有可能观察不到蒸汽膜阶段。但是，利用标准方法去测试淬火冷却介质的冷却特性曲线，对于不同介质的冷却性能的对比和选择以及监控在使用过程中介质性能的变化仍然非常有用。

1. 冷却特性曲线与淬火三阶段

冷却特性曲线目前已被广泛用于评价淬火冷却介质冷却特性、判断介质老化程度、指导热处理工艺等。目前最为广泛运用的测试方法为：将一定大小一定材质的探头加热到800℃以上，

温度、加热时长和淬火温度。另外，为了压缩渗碳时长、提高生产效率，可采用催渗工艺，既可提高产能，又能减小热处理变形。

（6）淬火冷却介质的影响对于热处理时易变形的工件建议采用等温淬火油，这样可将热处理变形控制在一定范围内；对于不易变形的工件、大型零件，可以采用快速淬火油。

5. 结语

热处理的各种缺陷受相关因素影响太多，有的缺陷可能同时受多个因素的综合影响，所以只能做些方向性的论述，实际生产中，必须借助“三现”原则具体分析，采取相应措施，提升热处理的质量，减少缺陷数量或降低关键缺陷的严重度，为降低质量成本而不懈努力。

参考文献：

[1]崔忠圻，覃耀春.金属学与热处理[M].2版.北京：机械工业出版社，2011.

[2]中国机械工程学会热处理分会.热处理手册[M]. 北京：机械工业出版社，2008.

作者简介：孟江涛，洛阳华冠齿轮股份有限公司。

MW 20190321

然后整体浸入到一定温度的淬火冷却介质中，利用探头心部的热电偶，直接记录探头心部温度随时间变化的曲线，对该曲线求导后得到不同温度下的冷却速度。根据测得的冷却特性曲线，整个冷却过程通常被分为三个阶段（见图1）：蒸汽膜阶段（工件刚没入介质中，工件温度高，工件周围介质被快速汽化形成稳定蒸汽膜包裹在工件表面，由于蒸汽膜导热较差，此时冷却速度较慢）；沸腾阶段（随着工件温度降低，蒸汽膜再难以稳定存在，而是以小气泡的方式迅速脱离工件表面同时带走热量，此阶段冷却速度最快）；对流阶段（工件表面温度进一步降低，到低于介质沸点时，沸腾停止，此时进入对流阶段，依靠对流传热）。

然而，由于冷却曲线通常测试的是探头心部温度随时间的变化，并不能真实反映探头表面的温度变化。基于此，张克俭博士提出了“四阶段”理论，认为在蒸汽膜阶段与沸腾阶段之间应存在一个“中间阶段”，用以描述工件表面出现“超前扩展点”之后在工件表面沸腾和蒸汽膜现象共存这一过程（见图2）。该理论很好地说明了工件在淬火冷却介质中的冷却过程是一个非常复杂的现象，不能仅凭借探头心部的热电偶所测得的冷却曲线进行全面的描述。然而仅仅知道蒸汽膜破膜过程的复杂性，并不足以帮助我们理解蒸汽膜形成和破裂的本质原因，也不能为热处理从业者提供更多参考。Kobasko提出了利用来自于沸腾传热过程中的临界热流密度概念来评估淬火冷却介质的冷却性能，这对于介质开发可以提供更多的帮助。

2. 临界热流密度与淬火三阶段

图3显示了在持续加热过程中，随着金属表面温度升高，壁面过热度（表面温度减去介质沸点）越高之后，其表面热流密度的变化以及相继出现的三个阶段，以及在这过程中介质导热系数α的变化。然而，淬火冷却为降温过程，对应的热流密度及导热系数的变化应从图3的右上方到左侧，同时存在一个时间非常短的瞬时沸腾过程（见图4）。

French于1926-1930年设计了大量试验对瞬时沸腾过程进行了相应研究，发现对于不管什么形状和大小的工件，淬火过程初期的这一瞬时沸腾过程持续时间都小于1s。其中q_{cr1}为经过一个短暂的瞬时沸腾过程之后出现蒸汽膜时的临界热流密度，q_{cr2}为蒸汽膜沸腾转变为核沸腾时的临界热流密度。S.S.Kutateladze根据流体力学理论提出的q_{cr}的理论计算模型，q_{cr1}（单位为W/m^2）可根据式（1）进行计算：

$$q_{cr1}=kr^*\sqrt{\rho''^4}\sqrt{g\sigma(\rho'-\rho'')} \quad (1)$$

式中 $k\approx0.14$；

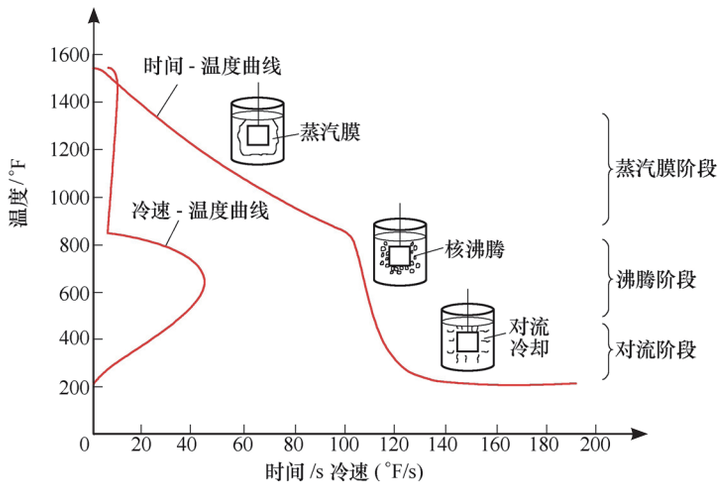
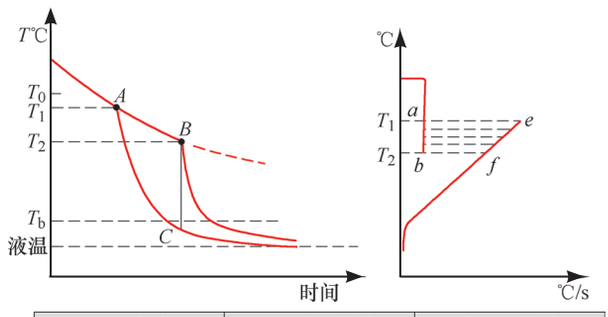


图1 冷却特性曲线及淬火三阶段



阶段名称	理论的划分	实际的划分
蒸汽膜阶段	T_0 以上	T_1 以上
中间阶段	T_0～T*	T_1～T_2
沸腾阶段	T*～T_b	T_2～T_b
对流阶段	T_b～液温	T_b～液温

图2 淬火“四阶段”理论

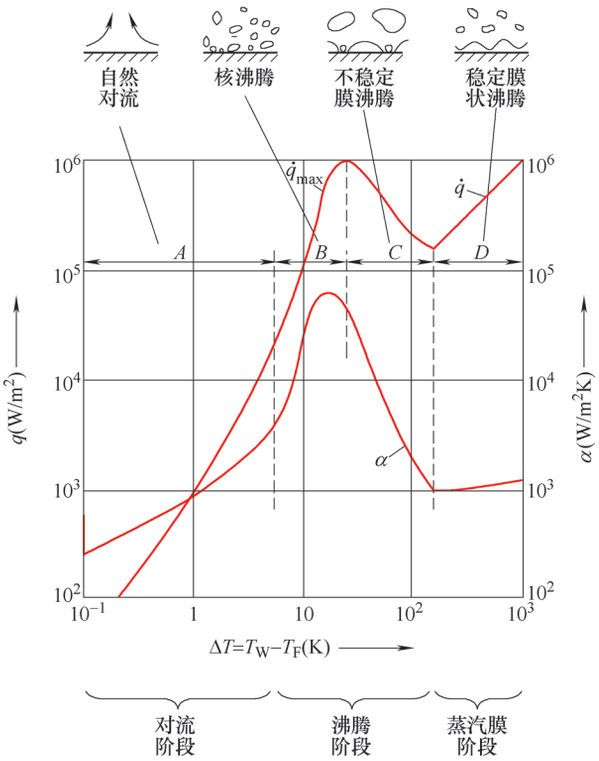


图3　加热过程中的沸腾现象及热流密度和导热系数变化

r^*——蒸汽形成热量，J/kg；

ρ'——液体密度，kg/m^3；

ρ''——蒸汽密度，kg/m^3；

g——重力加速度，m/s^2；

σ——介质表面张力，N/m。

同时，q_{cr1}与q_{cr2}满足关系：

$$\frac{q_{cr2}}{q_{cr1}}\approx 0.2 \qquad (2)$$

值得指出的是，此处的q_{cr1}与q_{cr2}均代表了冷却介质本身的性质，与淬火工件无关。q_{cr2}可通过测量大长径比的圆柱体（避免“超前扩展点”带来的测试误差—球体超前扩展点具有很大的随机性，而短圆柱体下缘棱角部分则总是更容易破膜充当超前扩展点），银材质（导热系数随温度变化较小，同时导热率高，心部温度与表面温度更为一致）探头浸入冷却介质之后蒸汽膜破裂时的冷速换算得到，因为某一时刻瞬时的温度变化与热流密度满足如下关系：

$$c\rho V\mathrm{d}\overline{T}=\lambda\frac{\partial T}{\partial r}S\mathrm{d}\tau \qquad (3)$$

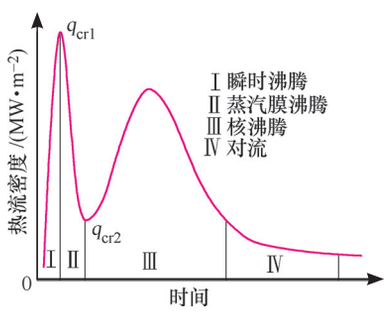


图4 淬火过程初期的瞬时沸腾现象

式中 c——介质热容；

$\mathrm{d}\overline{T}$——$d\tau$时间内的平均温度变化；

V——体积；

S——表面积；

$\frac{\partial T}{\partial r}$——表面的温度梯度。

由此，热流密度q：

$$q=\lambda\frac{\partial T}{\partial r}=c\rho\frac{V}{S}\frac{\mathrm{d}\overline{T}}{\mathrm{d}\tau}=c\rho\frac{V}{S}\overline{v} \qquad (4)$$

其中$\overline{v}$为平均冷速。测量整个降温过程中冷速的变化，然后据此计算出的最低热流密度q，即为破膜时的最低临界热流密度q_{cr2}，进而计算得到q_{cr1}。结合高温工件浸入介质之后从工件表面向外界传热的初始（最大）热流密度q_{in}，便可推测，实际淬火冷却过程中可能出现两种不同的冷却过程。$q_{in}<q_{cr1}$时，工件传热的热流密度无法达到冷却介质蒸汽膜形成所需的临界热流密度q_{cr1}，则稳定蒸汽膜无法形成，此时无法观测到蒸汽膜阶段，工件浸入介质后将直接进入沸腾阶段，然后过渡到对流阶段；$q_{in}\geqslant q_{cr1}$时，工件浸入介质后，表面可以形成蒸汽膜，从而观察到完整的蒸汽膜阶段—沸腾阶段—对流阶段的三阶段冷却过程。

该理论还可以对工程应用实践中出现的不同蒸汽膜现象做出解释，例如：增大工件表面粗糙度，减小工件尺寸，实际等同于增大工件比表面积，降低工件热流密度q_{in}，从而消除（$q_{in}<q_{cr1}$）或缩短蒸汽膜时间（可以更快降低到q_{cr2}促使蒸汽膜破裂）；水中加入一定量的无机盐，可以增大水溶液表面张力σ，同时增大介质与蒸汽间的密度差$\rho'-\rho''$，从而增大q_{cr1}，同时在盐溶液中，工件表面形成的双电层会降低工件热流密度q_{in}，双重作用下使得蒸汽膜更难以形成或加速破裂。同时，该理论也有助于我们去探究很多“三阶段理论”所难以解释的诸多淬火冷却问题，例如中低淬透性的高碳铬钢容易出现逆淬

火现象，渗碳钢渗层表面易出现非马氏体组织（忽略合金元素贫化）。

3. 促冷剂对不同淬火油冷却过程中蒸汽膜的影响

基于以上理论，我们设计了试验对基础油中促冷剂的添加对淬火冷却过程中蒸汽膜的影响进行了探讨。众所周知，添加促冷剂到基础油中可以显著缩短其蒸汽膜持续时间，从而提高基础油的冷却能力，提高工件淬火过程的均匀性。本文中，我们分别将相同浓度的促冷剂溶于低粘度和高粘度基础油中，以模拟快速淬火油和等温淬火油的冷却性能，同时通过试验观察其在加热和冷却过程中的蒸汽膜情况。试验采用8mm直径的镍铬合金探头，在其几何中心放置热电偶温度探头，采用恒定加热功率为2.7kW的感应线圈加热，线圈内径12.5mm，利用温度记录仪记录其升温和降温过程的时间-温度曲线，试验装置如图5所示。

（1）升温过程中蒸汽膜的产生　图6显示了升温过程中低粘度基础油、快速油和等温油的时间-温度曲线，对该曲线求微分即可得到升温速率-温度曲线。

从图中可以看出，除快速油外，探头在基础油和等温油的升温曲线均出现了两个明显的拐点。探头温度的升高，反应了感应加热对探头施加的热量减去淬火油从探头表面带走的热量之后净热量的增加。其中，由于探头的材质、大小、与线圈的距离均保持不变，加热线圈的功率也保持不变，可以认为感应加热带来的热量增加速率也保持不变。在低温区的第一阶段，介质通过对流换热，冷却能力较差，因而探头升温速率较快；之后介质开始剧烈沸腾，此阶段介质冷却能力大大增强，探头升温速率显著减慢；随着温度继续升高，出现蒸汽膜，此时介质的冷却能力重新变差，因而探头升温速率再次变快。同时对比快速油和基础油，对流阶段持续时间以及过渡到沸腾阶段的温度都基本相当，可见促冷剂的引入并不会显著改变介质在对流阶段的冷却能力，也不会显著改变基础油的沸点。然而快速油在2.7kW的加热功率下，探头表面不再能够产生稳定的蒸汽膜，这是由于促冷剂的加入使得介质的临界热流密度q_{cr2}增大，蒸汽膜更容易破裂；同时促冷剂在探头表面形成的高分子膜，降低了工件表面的导热系数，从而降低了工件热流密度q_{in}，使得$q_{in}<q_{cr1}$，导致蒸汽膜无法形成。

（2）降温过程中蒸汽膜的消失　通过感应加热，将探头温度升温到1000℃后停止加热，记录探头随时间的降温过程，即可得到我们所熟知的冷却时间-温度曲线，求微分后即可得到淬火时的冷速-温度曲线，如图7所示。

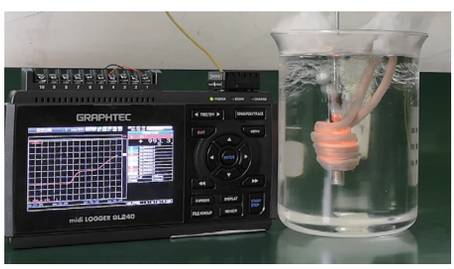


图5　感应加热及温度记录装置

将其与升温过程的升温速率-温度曲线相叠加，可以看到淬火过程的三阶段与升温过程的三阶段所在的温度区间有较好的相关性。只是相比于升温过程，冷却过程中阶段与阶段之间的转变温度略高于升温过程。原因是：对于升温过程，感应加热为表面加热后传到探头心部，因此测得的心部温度相比于表面温度有一定的滞后，测试温度应低于表面实际温度；对于降温过程，心部温度的降低同样滞后于表面温度，测试温度应高于表面实际温度。同时，根据式（4），降温过程的热流密度正比于平均冷却速度：

$$q \propto \bar{v} \qquad (5)$$

由于等温油破膜时的冷速要小于低粘度基础油，因此可以推算其临界热流密度q_{cr2}同样大于低粘度基础油，因此可以在更高的温度下破膜，这与实际工程应用中观测到的现象也基本一致。

4. 结语

至此，通过分析淬火过程中的热量传递过程，可以看出淬火过程中蒸汽膜阶段以及从蒸汽膜转变到核沸腾的过渡阶段远比我们通常的认识要复杂得多。同时引入了沸腾传热过程中热交换理论所提出的临界热交换密度概念，用于解释淬火过程中的蒸汽膜现象。利用感应加热手段，记录和观察升温和降温过程中沸腾

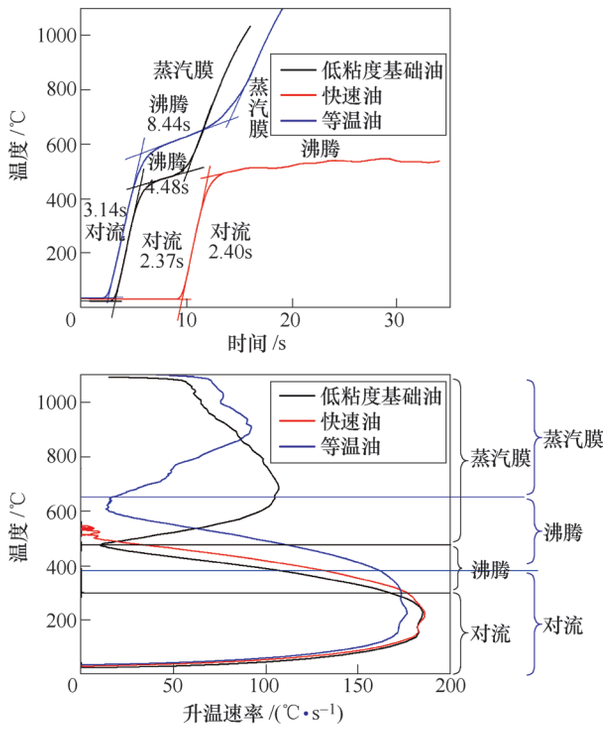


图6　升温过程的时间-温度曲线及升温速率-温度曲线

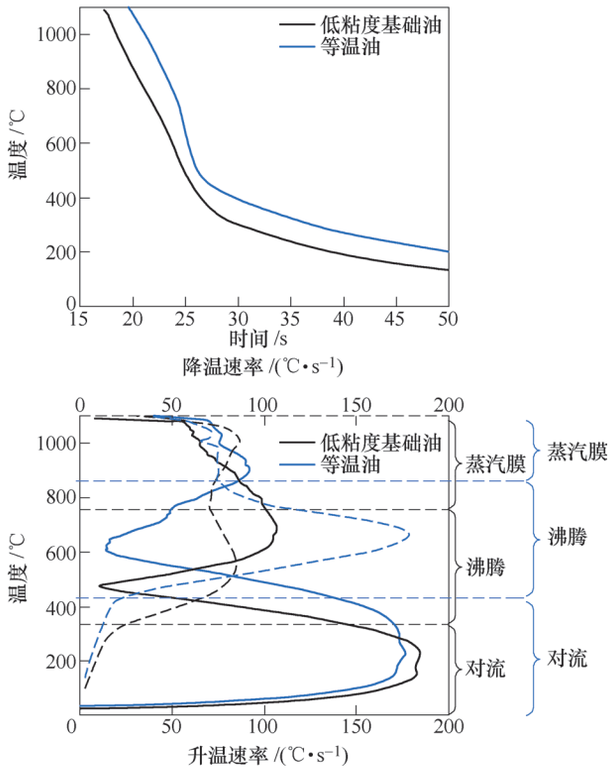


图7　降温过程中的时间-温度曲线和冷速-温度曲线（实线为升温过程，虚线为降温过程）

和蒸汽膜现象，并将两个过程结合起来，试图对淬火过程中普遍存在的蒸汽膜现象有更深层次的认识，可以为设计和开发蒸汽膜时间更短，冷速更快的新型淬火冷却介质提供更多帮助。基于理论探讨和试验验证，为减少淬火过程中的蒸汽膜，从而改善工件淬火均匀性，我们认为可以从以下三方面着手：

（1）提高介质本身蒸汽膜形成和破裂的临界热流密度q_{cr1}和q_{cr2}，如提高介质表面张力和气液相密度差，使得蒸汽膜更难以形成和更容易破裂。

（2）引入可在工件表面成膜的添加剂，附着在工件表面形成厚度适中的隔热层，以降低工件表面传热系数，进而减小工件表面热流密度q_{in}，从而减少甚至消除蒸汽膜。

（3）引入电解质，在增大介质临界热流密度q_{cr}的同时，在工件表面形成双电层降低工件表面热流密度q_{in}，以减少甚至消除蒸汽膜。

参考文献：

[1] ASTM D6710-17, Standard Guide for Evaluation of Hydrocarbon-Based Quench Oil. 2017, doi: 10.1520/d6710-17.

[2] 张克俭，王水，郝学志. 液态介质中淬火冷却的四阶段理论[J]. 热处理技术与装备，2006，27（6）：14-25.

[3] Dhir V.Boiling heat transfer[J]. Annual review of fluid mechanics, 1998, 30（1）：365-401.

[4] French HJ.The Quenching of Steels[M]. Cleveland: American Society for Steel Treating, OH, 1930.

[5] Fundamentals of Heat Transfer[M]. New York: Academic Press, 1963.

[6] Kutateladze S.Hydrodynamic model of heat transfer crisis in free-convection boiling[J]. J. Tech. Phys, 1950, 20（11）：1389-1392.

[7] Kobasko N In A Method for Evaluation of Critical Heat Flux Densities, Proceedings of the 5th IASME/WSEAS Int. Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, 2007：25-27.

作者简介：余瀚森、夏佰成、左永平，南京科润工业介质股份有限公司。 MW 20190701