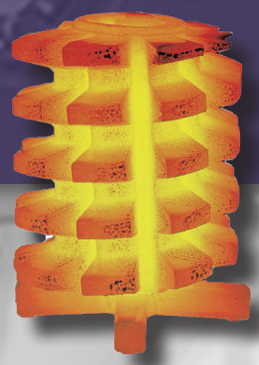
ERASTEEL

高速钢的热处理



www.erasteel.com

eramet

高速钢材料用途广泛，其性能可通过热处理进行调整。
本手册旨在介绍如何选择和优化高速钢的热处理参数，以实现最佳的材料性能组合，特别是在材料的硬度和韧性方面。

为方便起见，本手册分为两部分。
第1部分—《基础》：介绍一些有关材料冶金学的知识，这对于在产品数据表和本手册第2部分中给出的推荐的理解是必要的。
第2部分—《实用建议》：提供适合于所选热处理技术的实用建议，以确保实现最优化的高速钢和ASP®粉末高速钢的热处理。

目录

基础

热处理工艺 4

奥氏体化 5- 6

淬火 7 - 8

回火 9 -10

变形 11

实用建议

真空热处理 12 - 13

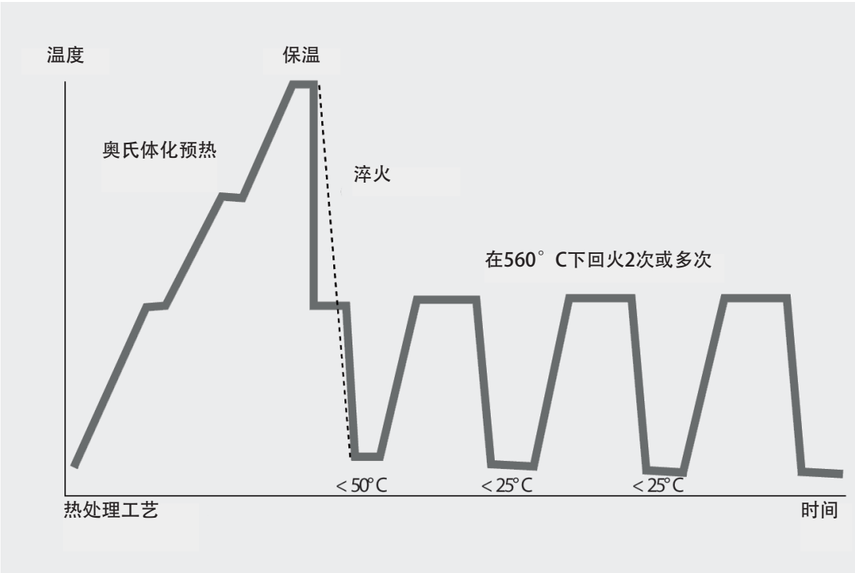
盐浴热处理 14 - 15

热处理工艺

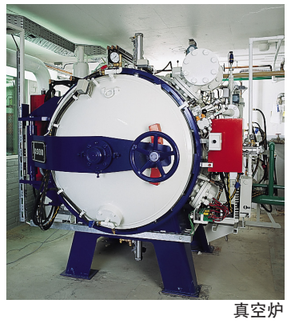
埃赫曼公司的高速钢材料大多经过软退火处理后交货。该处理通过特定热处理参数实现，目的在于软化材料，使其适于车削和铣削等软态加工。此状态下的材料因太软而无法用作工具或部件，因此，软态机加工后应进行淬硬处理使其具有理想的最终机械性能。由于合金含量高，高速钢需要特定的淬硬工艺，包括如下三个阶段：

- 奥氏体化（奥氏体化之前需要分2步或3步预热处理）
- 淬火
- 回火（至少两次）

本节后续部分将详细介绍这三个阶段。在此需强调，不同的热处理参数会对材料性能产生不同的影响，例如对微观组织、机械性能（主要是硬度和韧性）等有不同的影响。



为了控制热处理工艺中的材料温度一般要使用“样块”，其壁厚要与最大的热处理工件的壁厚相近



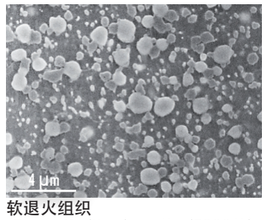
真空炉

ASP® 是埃赫曼高速钢公司的注册商标

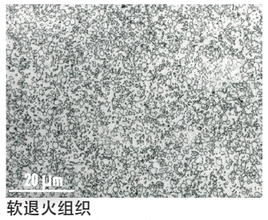
奥氏体化

软退火条件

高速钢一般是在软退火状态供货的，其显微组织由含有一次碳化物的铁素体基体和在软退火过程中产生的较小碳化物构成。



软退火组织
扫描电镜（SEM）照片（5000倍）



软退火组织
LOM照片（1000倍）

碳化物的溶解

将高速钢升温至奥氏体温度时，将发生以下相变：

- 铁素体基体转变为奥氏体。
- 碳化物溶于奥氏体。

碳化物向奥氏体基体的溶入提高了奥氏体的含碳量及合金元素含量，这使二次硬化变为可能。

奥氏体化温度

奥氏体基体内溶解的碳化物的量将影响材料最终能达到的硬度。淬火温度越高，碳化物溶解入奥氏体就越多，从而能达到更高的最终硬度。但是有一个奥氏体化温度的上限。如图1和下列数据表所示，如果温度高于对该钢种规定的上限时，淬火后硬度将继续提高，但钢的韧性会由于过热（在晶界处出现共晶融化现象）而急剧下降。

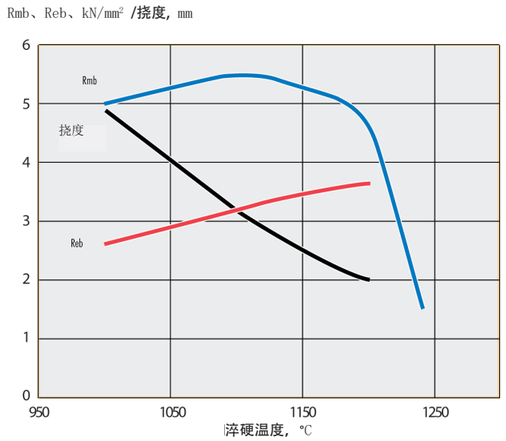


图1 不同淬硬温度下的抗弯实验（ASP®2023）

ASP & HSS	奥氏体化温度，°C								回火3次 x 560°C								
HRC	50	52	54	56	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
ASP® 2004							1050		1100		1150		1180	1220			
ASP® 2005					1000		1050		1100	1150	1180						
ASP® 2009	1050	1100	1150	1200													
ASP® 2011		950	1000	1050			1120		1180								
ASP® 2012		1000	1050	1080	1110		1120										
ASP® 2015									1100		1150	1180	1220	1260			
ASP® 2017						1000		1050		1100	1150	1180					
ASP® 2023					1000		1050		1100			1150	1180				
ASP® 2030							1000		1050		1100		1150	1180			
ASP® 2042														1100	1150	1180	1210
ASP® 2048										1000		1050	1100		1180	1200	
ASP® 2052							1000			1100	1150		1200	1240			
ASP® 2053						1020		1070	1100		1150	1180					
ASP® 2055									1000		1050		1100	1150	1180		
ASP® 2060									950		1000		1050	1100	1150	1180	
ASP® 2078														1100	1150	1180	1210
ASP® APZ10					1060*	1080*	1095*										
BlueTap® Co							1050		1100		1150	1180	1220				
E T1								1150	1180	1220	1240	1270					
E M1								1100		1150		1180					
E M50										1080	1120						
E M52										1150	1180	1200					
E M2				1000	1030	1050	1075	1100	1125	1150	1180	1220					
ABC III								1100		1150	1180						
E M7									1100	1130	1150	1180	1200				
E M3:1										1150		1180					
E M3:2									1120	1150		1180	1220				
Grindamax V3									1120		1150	1180	1220				
E M4								1100		1150		1220					
E 945								1070			1120		1170				
E M35							1050		1100		1150	1180	1220				
C8										1050	1100		1150	1180	1200		
E MAT II									1050	1080	1100						
E M42										1050		1100		1150	1190		
WKE 42											1100		1180	1200	1230		
WKE 45												1100	1150	1180	1220		

淬火

平衡和保温时间

在奥氏体化温度下碳化物的溶解并不是无限继续的。在一定时间后，碳化物和基体之间将会达到平衡状态。ASP®2023钢在不同奥氏体化温度下处于平衡状态的基体成分如图2所示。

在某一指定的奥氏体化温度，需要一定的时间来达到平衡状态。

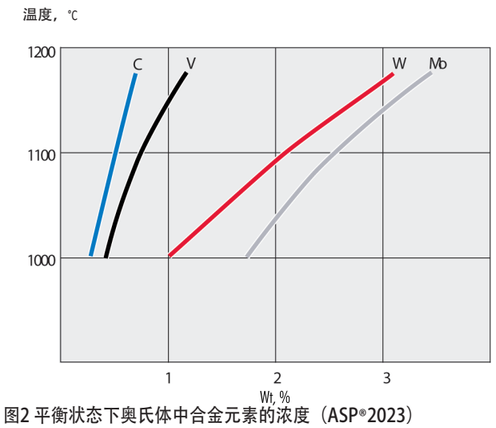


图2 平衡状态下奥氏体中合金元素的浓度（ASP®2023）

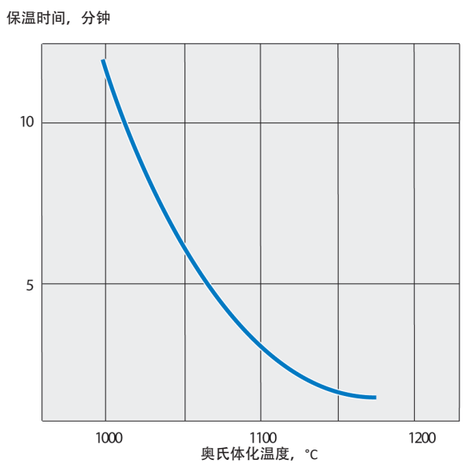


图3 推荐的高速钢保温时间

达到平衡状态所需的时间为保温时间。

奥氏体化温度对保温时间的影响如图3所示。碳化物通过扩散实现溶解，温度越高，扩散速率就越快;因此奥氏体化温度越高，实现平衡所需要的保温时间就越短，即使有更多的碳化物被溶解。

增加保温时间的影响

如图3所示，一旦达到平衡状态，碳化物将不再继续溶解。材料最终硬度由奥氏体化温度和达到平衡状态所需的足够保温时间确定，故基本上没有额外增加保温时间的必要。

时间过长

一个常见问题是：加热时间过长是否会导致晶粒变大和韧性降低。图4显示保温时间对ASP®2023抗弯性能的影响，可以看到保温时间在30分钟以内时，钢的抗弯强度和韧性是不受影响的。正常情况下保温时间范围为2-5分钟，因此30分钟明显时间过长。如果保温时间超过30分钟，钢的抗弯强度/韧性会有所下降。

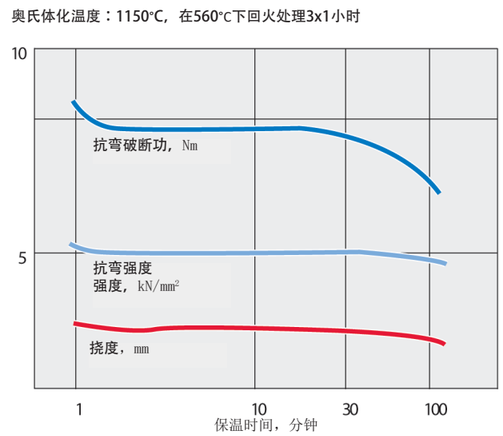


图4 在1150°C不同保温时间的抗弯实验值（ASP®2023）

冷却速度

在高速钢的热处理过程中，冷却速率是一个非常重要的因素。理想情况下，冷却速率应该足够“快”到可以把高速钢在奥氏体化温度时达到的平衡状态“冻结”下来直到钢从冷却介质中被取出进行回火。这种状态下的钢进行适当的回火后将具有最佳的韧性和硬度。但实际的冷却速率与“冻结”住平衡状态所需的冷却速率肯定存在差异—因理想的冷却速率意味着冷却时间为零。冷却效果将随着淬火工件尺寸的增大而降低；另外它还和冷却介质的效率有关。

先共析碳化物 (PEC)

从图2可以看到，随着温度的升高碳化物溶入奥氏体基体中的量也将增加，反之亦然，在淬火过程中，随着温度的下降，溶于奥氏体中的碳化物存在重新析出的倾向，碳化物析出的驱动力将随着温度下降而增大，但随着温度的降低同时也会使碳化物析出的扩散过程减慢。其结果是高速钢在约950°C附近达到最大析出速率的峰值，也就是说，临界冷速在1000°C和800°C之间。

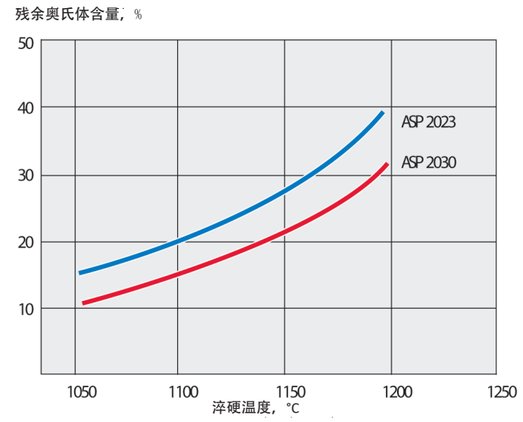


图5 奥氏体化温度对残余奥氏体含量（回火前）的影响
（ASP®2023和ASP®2030）

将样品加热至1180°C后迅速冷却至1050-800°C之间并按不同时间保温，然后将样品淬火、回火并测量硬度，多次测得图6所示曲线。

可以看到，在该温度区间内，硬度随着保温时间的增加而明显下降。

先共析碳化物的析出有两个不良影响：

- 消耗了基体中的碳和合金元素，从而降低了钢在回火过程中产生二次硬化的能力。
- 降低了钢在淬火和回火后的韧性。

因此，高速钢在1000-800°C这个温度区间内需要快速冷却以避免在回火后硬度和韧性的损失。

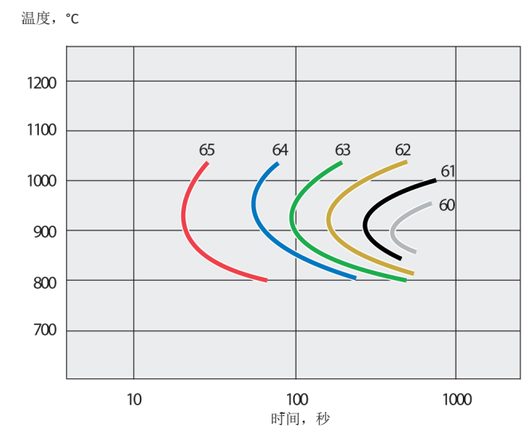


图6 硬度与分级温度和保温时间的关系
奥氏体化温度：1180°C
回火：560°C ，3次x1小时

先共析碳化物（PEC）对最终硬度的影响

先共析碳化物的析出对最终硬度的影响如图7所示，此图显示了在1000-800°C之间不同冷却速率对最终硬度的影响。曲线清晰地表明在此温度区间至少需要7°C/秒的冷却速率才能避免硬度损失。

先共析碳化物（PEC）对韧性的影响

先共析碳化物的析出对淬硬和回火钢的韧性影响如图8所示，此处抗弯断裂功（ASP®2023）为韧性指标。红色基准线是选取在1000-800°C之间以至少50°C/秒的速率冷却，因此冷却速率足够高，从而确保了非常少的PEC析出，故此基准线可看作给定硬度下可实现的最大韧性曲线。在1000-800°C范围内降低冷却速率将导致硬度和韧性都降低，见图8中冷却速率为2°C/s对应的直线所示。

淬火温度

随着温度下降至低于约300°C时（具体温度会因材料牌号和奥氏体化条件不同而变化），奥氏体组织开始转变为马氏体，该转变随温度下降而持续进行。在开始回火工艺前，淬火应持续进行至工件温度低于50°C。如果在工件温度较高时就中止淬火或开始回火，马氏体化转变未达预期，会使微观组织中残余更多奥氏体，从而导致回火结果异常。

淬火态组织

淬火态组织由未回火马氏体、残余奥氏体以及未溶解的碳化物构成。原奥氏体晶界中总是或多或少存在先共析碳化物（PEC），PEC使淬火后的晶界清晰可见，如图8所示。当冷却速率较低时，PEC增多而使晶界更清晰。在极慢的冷速下，PEC甚至开始在晶界上大量沉淀。

由于合金含量高，当淬火至室温时，高温奥氏体不会完全转变为马氏体，淬火后的组织中最高可发现40%的残余奥氏体，如图5所示（第7页），因此需要回火。

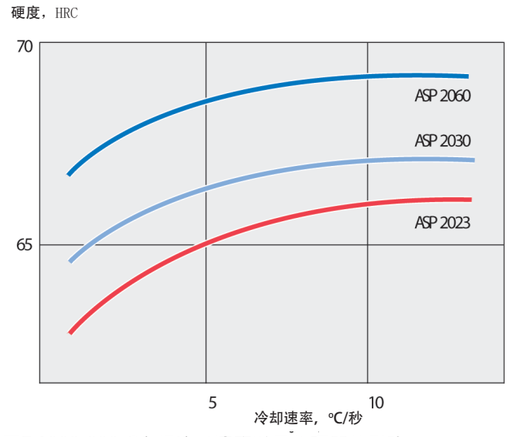


图7 1000-800°C之间冷却速率对最终硬度的影响
奥氏体化温度：1180°C
回火：560°C，3x1小时

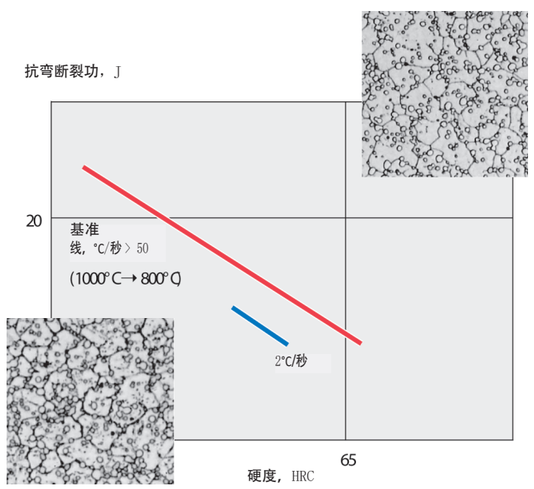


图8 先共析碳化物对韧性的影响
ASP®2023 在560°C回火3 x 1小时。（淬火后、回火前的组织）

回火

回火的目的是为了获得更好的机械性能，这一过程通过从马氏体中析出极小的（纳米级尺寸）碳化物形成二次硬化、同时在冷却时将残余奥氏体转变为马氏体来实现。

回火后形成的新马氏体应再次进行回火以降低脆性，这就是高速钢必须至少回火两次的原因。回火可通过多种不同方式进行，但是建议采用560°C温度回火，最短保温1个小时，并根据钢材牌号的不同，进行2次或多次回火。

回火温度和时间

在相同的奥氏体化温度下，可通过改变回火温度和时间的多种组合方式达到相同的硬度。如果采用较低的回火温度，则须增加回火时间，反之亦然，但是，在560°C回火1小时可实现最佳性能。同样，也可通过改变奥氏体化温度和回火温度的组合方式达到相同硬度。这两种不同方法改变硬度的结果如图9所示。很明显，当改变奥氏体化温度而回火温度保持560°C不变时可以实现最佳的性能。另外，图10（第10页）显示，当回火温度低于560°C时，会使性能变差；若回火温度超过560°C，则必须使用较短的回火时间，但是这需要严格控制整个工艺和整个装料的温度和时间，因为过回火（使硬度下降和机械性能变差）在560°C以上时会加速。对于工件批量回火时，推荐560°C回火，否则会有过回火和欠回火两种风险，这是因为一炉料中靠外部的工件在回火温度下保持的时间比内部长，而内部的工件则可能未达到温度而产生欠回火。回火温度低于560°C时，需要延长回火时间以获得所期望的性能。

回火次数

在首次回火过程中未回火马氏体被回火，在回火冷却时残余奥氏体也被催化转变为马氏体。残余奥氏体的催化速率取决于回火温度，如图11所示（第10页），该图显示ASP®2023钢每次使用不同温度回火后的残余奥氏体含量。两次回火之间的温度应该降至室温（25°C）以使相变更彻底。回火后产生新的未回火马氏体也应进行回火，这通过第二次和第三次回火来实现，因此高速钢至少应回火两次。多数牌号需要2次以上的回火以使所有残余奥氏体和未回火马氏体转变为回火马氏体，通常建议在560°C进行3次回火处理。各次回火工艺对显微组织的影响见图12（第10页）。各牌号钢材的相应推荐请参见埃赫曼公司的产品手册。

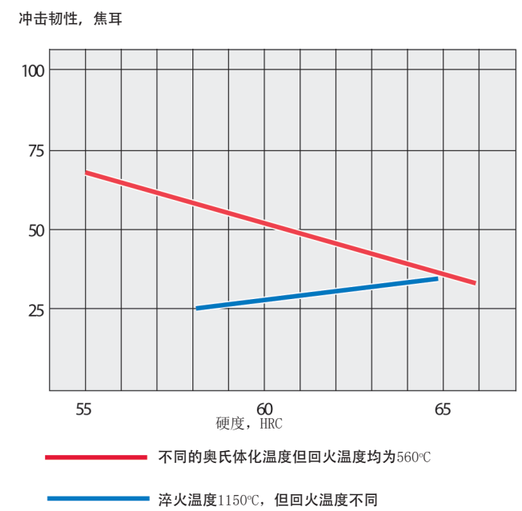
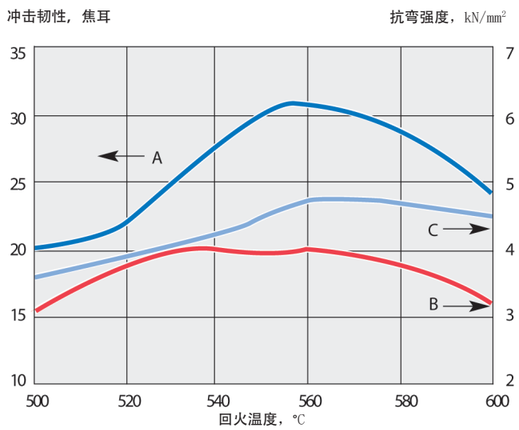


图9 ASP®2023钢的无缺口冲击韧性



AA－冲击 B－屈服强度 C－抗弯强度

图10 ASP®2030钢的冲击韧性和抗弯强度

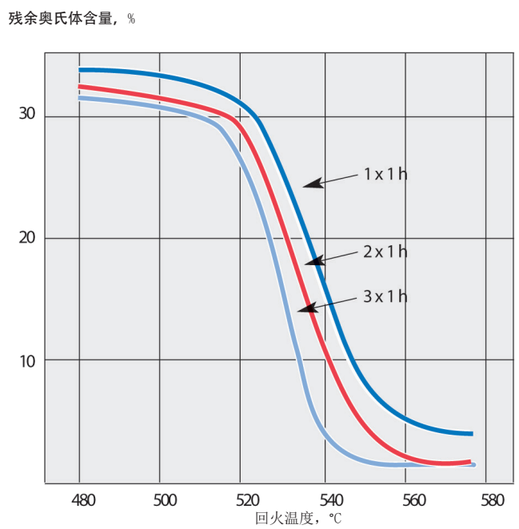
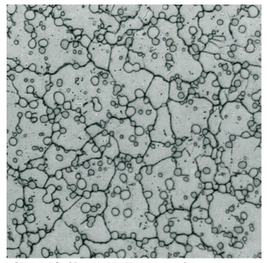
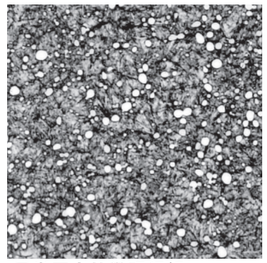


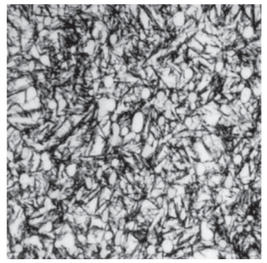
图11 残余奥氏体含量与回火温度和回火次数的关系
ASP®2023，奥氏体化温度1180°C



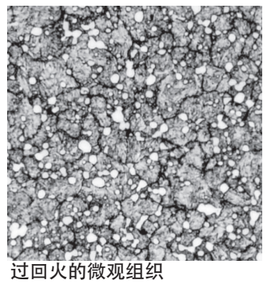
奥氏体化后的微观组织



正常回火的微观组织



欠回火的微观组织



过回火的微观组织

图12 回火对微观组织的影响

深冷处理

如果回火处理良好，也就是在两次回火之间工件冷却至25°C以下，并在正确温度560°C每次至少回火1小时，则一般不需要进行深冷处理，否则只会增加成本。

如果因故（例如气候原因等）无法将两次回火间的温度降低至25°C，则深冷处理可能是一种解决方案。为避免硬度损失和产生开裂风险，深冷处理应在首次和第二次回火之间进行。

变形

相变和体积变化

在加热过程中，当铁素体转变为奥氏体时，因为奥氏体晶格比铁素体晶格更致密，因此材料体积会减小。而在冷却时奥氏体在200°C以下转变为马氏体，体积会再次增加，大于原来的铁素体。回火时体积会再次减小，但不会完全恢复原来铁素体的体积。因此，与原状态相比，最终阶段的体积会增加（如图13）。

如果温度不均匀，会导致工件不同部位发生相变的时间不同，从而会产生变形。例如，如果工件一个面的冷却速率比另一面快，则马氏体转变将比另一面更早开始，体积将增加，而另一面的奥氏体较软，从而导致工件变弯曲。当另一面转变为马氏体后，因为先转变的一面已经淬硬而无法将工件弯曲还原。因为未回火马氏体呈脆性，结果会造成工件弯曲甚至开裂。

温度梯度总是无法避免的，同时工件表面和芯部之间的温度也总是存在差异。一般的原则是尽可能的使温度梯度保持对称。

对于特大的工件，可以建议采取分级淬火（将首次淬火温度降至600°C-500°C之间后保温一定时间），从而使内部温度均匀；该方法可限制产生热梯度，降低开裂风险。对于大型工件，温度降至50°C时停止急冷并避免工件在首次回火前继续降至更低温度可以避免开裂风险。在盐浴中淬火时，因为实现了极高的冷却速率，大温差导致的开裂风险增加。

热应力

即使没有相变发生，如果温度不均匀也可能产生应力，其后果和建议与上述相同。

机加工应力

加工应力是由于在机加工（车加工、铣加工等）过程中使表面发生变形而产生的，此时若加热工件，可能会因应力释放而产生变形。

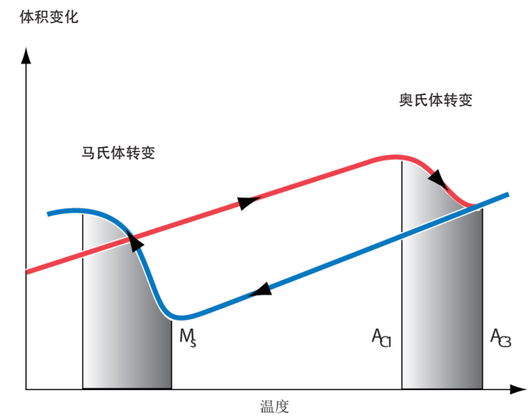


图13 淬火过程中的体积变化

真空热处理

气淬真空热处理目前已经在高速钢淬火中占主导地位，它与传统的盐浴炉热处理相比具有更多优点：对环境无害、操作成本较低、更易于过程控制等。真空炉有不同的设计，现代单室真空炉的典型特征是依靠炉内气体（通常为氮气）对流加热至约800°C，然后用真空热辐射加热至奥氏体化温度。淬火时通过高压下快流速气体（通常为氮气）进行冷却。炉内温度循环可以采用程序控制，由炉膛热电偶（控制热量供应）和工件热电偶追踪实际温度。

根据您自己对炉子的实践经验来制定操作工艺当然是最好的。但是也有一些通用的指导性意见扼要叙述如下：

典型的热处理工艺如图14所示。

实用建议

为了避免工件淬火变形，工件装炉的主要原则是要在装炉后使气体能均匀地流经工件。

另外，炉内气体的流速、压力和方向也很重要。例如，长工件要避免因自身重量而变形，最好将其直立放置，同时还需位置固定，避免当淬火时因气体流速而导致其在加热炉内任意晃动。

另一个要点是装料必须清洁、无切削液和其它污垢。例如，油污等会导致工件渗碳，污垢本身对加热炉也是有害的，它会进入油、阀门中和损坏热交换器；工件表面的氧化物会产生脱碳作用；如果工件被较大压力压在一起，则工件之间发生焊接粘合在一起的风险就很大。

预热

利用炉内气体对流预热至约800°C。当确定加热速率时，必须考虑到工件形状。当装料内部温度比设定温度低40-60°C时，可以开始最后加热。

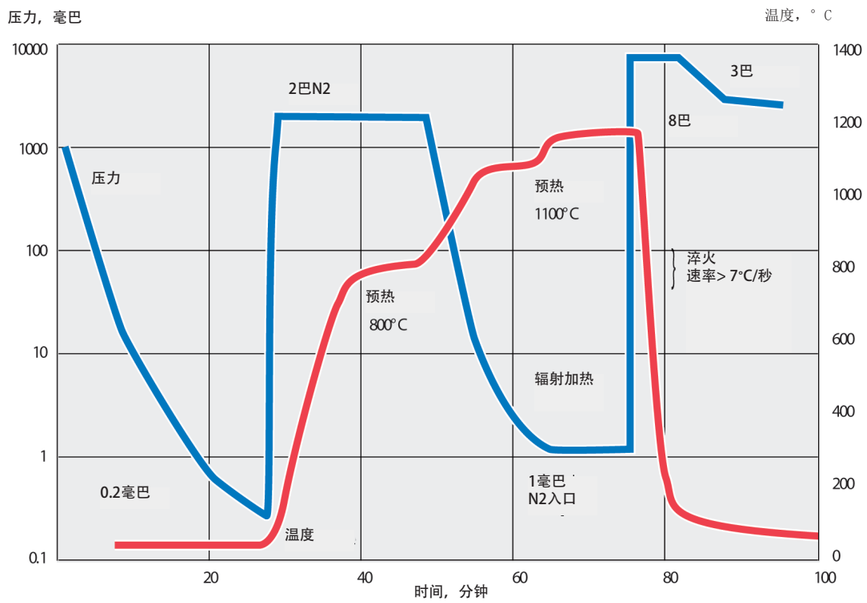


图14 典型的热处理工艺

奥氏体化

在最后阶段前，将氮气用压力泵打出至约1毫巴，这个小压力可有效地将渗铬风险降至最低。如果压力过低，会有渗铬和焊合风险。保温时间见图3（第6页）所示。

淬火

必须特别注意冷却速率，尽可能减少《基础》一节中提到的先共析碳化物（PEC）的析出。影响真空热处理炉冷却速率的因素除了工件壁厚/直径外，还有：

- 气体压力
- 气流方向
- 气体流速
- 气体温度

上述因素由加热炉的设计决定。

其它影响因素有气体种类（因成本原因通常为氮气）、装料尺寸和装料如何摆放等。冷却速率可能会因加热炉中的不同位置而有差异。

回火

虽然可以在真空炉内回火，但一般来说成本太高，而且只有当大量处理时才比较经济。回火最好在其它更简单的加热炉中进行才比较经济。如果要在真空炉中回火，则须注意要将两次回火之间的温度降至约室温（25°C）。在两次回火之间，最好将工件取出在炉外冷却。

“混合”装料工序

如果一炉工件中包含有要求不同最终硬度的材料，则不建议使用高淬火温度后再通过高温回火（超过560°C的回火温度）将硬度调至所需硬度的方式。

从图9（第9页）已经看到，此方式会导致材料的抗弯断裂功和韧性降低。处理混合装料的最好方法是将这些工件分成不同的硬度组分别进行热处理。

例如，可将最终硬度范围为60-62HRC的物料一起淬火至61HRC，将最终硬度范围为62-64HRC的物料一起淬火至63HRC，等等。然后分别将各组工件在同一温度下淬火并在560°C回火三次。

综上所述，如果最终硬度不是以最佳回火温度、而是以错误的方法实现的，则该最终硬度毫无意义。最好的办法是选择奥氏体化温度并保证最佳的冷却速率，然后应该在550-570°C下对工件进行回火，并在所得到的硬度下使用。

盐浴热处理

实用建议

为了尽可能减少工件变形，最重要的是正确悬挂工件。要避免长工件因自身重量而变形，不要将其放在篮子中，而是直接用线捆绑和悬挂在盐浴中。如果使用夹具，夹具必须保持良好状态以使工件准确直立地悬挂在盐浴中。在盐浴中移动长工件必须非常小心，避免因粗心操作而使工件弯曲。

对直度要求高的工件，在淬火过程中从奥氏体转变为马氏体时（200°C以下）要给予工件良好保护，例如，将工件放入管子里面以避免发生直度方向的变形。

典型的盐浴炉热处理工艺如图15。

预热

预热应分2步或3步进行，以450°C、850°C（和1050°C）分步完成以尽量减少变形。

奥氏体化

达到最终硬度所需的奥氏体化温度可按照第5页所示的表格选取，总的浸浴时间取决于壁厚和所使用的奥氏体化温度。例如，壁厚应该为实芯体长工件的直径，或者板材的厚度。不同壁厚的工件其在奥氏体化盐浴中总的浸浴时间见图16曲线。注意：此曲线仅用于指导，实际还需根据工件几何形状和盐浴特性来调整。

淬火

将欲淬硬的工件淬入约550°C的盐浴中，这样可以确保快速冷却通过1000-800°C的温度区间并且在马氏体相变前使工件温度达到均一（当工件从此盐浴炉中取出后，在空气中冷却）。不同直径的ASP®2023圆棒试样在550°C盐浴中可达到的在1000-800°C温度段的冷却速率见图17。

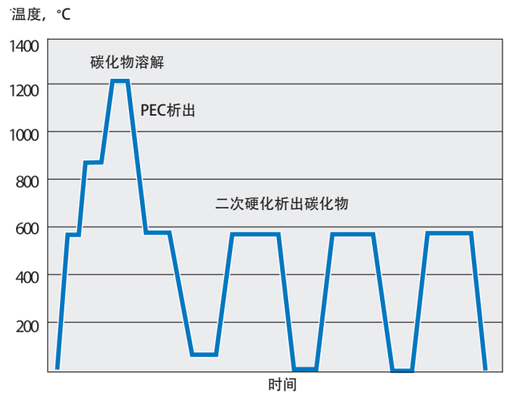


图15 ASP®钢的盐浴热处理工艺

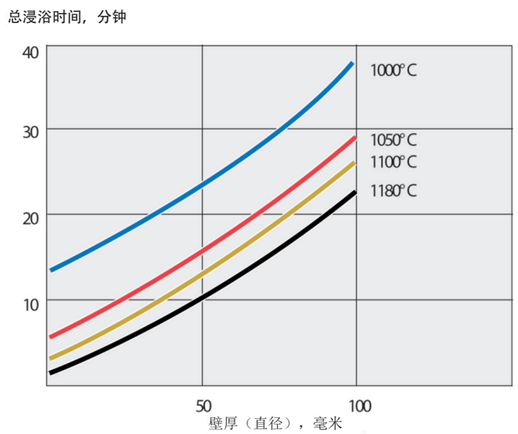


图16 在450°C和850°C两个阶段预热后，总的浸浴时间.

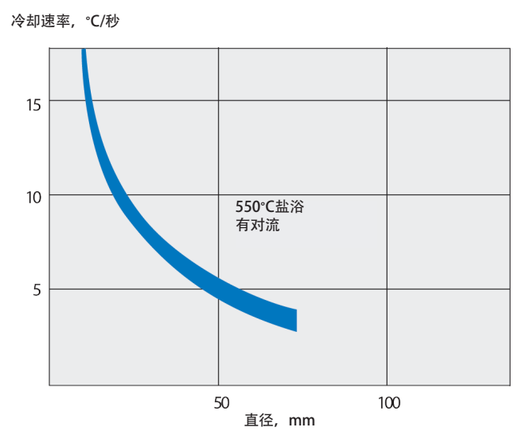


图17 圆棒试样中心在1000-800°C区间的冷却速率

如图18所示，冷却速率和最终硬度会随着直径增加而降低。当直径大于40mm时试样中心的硬度下降，此时对应于约7°C/秒的冷却速率（试样中心），亦即避免硬度损失的最小冷速（见第8页图7）。淬火冷却过程应使温度降至40-50°C，若冷却中断较早则会导致较多残余奥氏体存在，若继续冷却至更低温度则会造成工件开裂风险。

回火

回火应该在560°C进行2次或多次，回火温度的保温时间应为1个小时。在两次回火之间工件必须冷却至室温（<25°C）以确保残余奥氏体的完全转变。

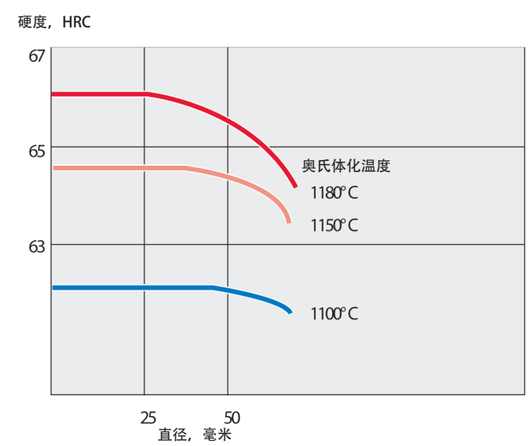
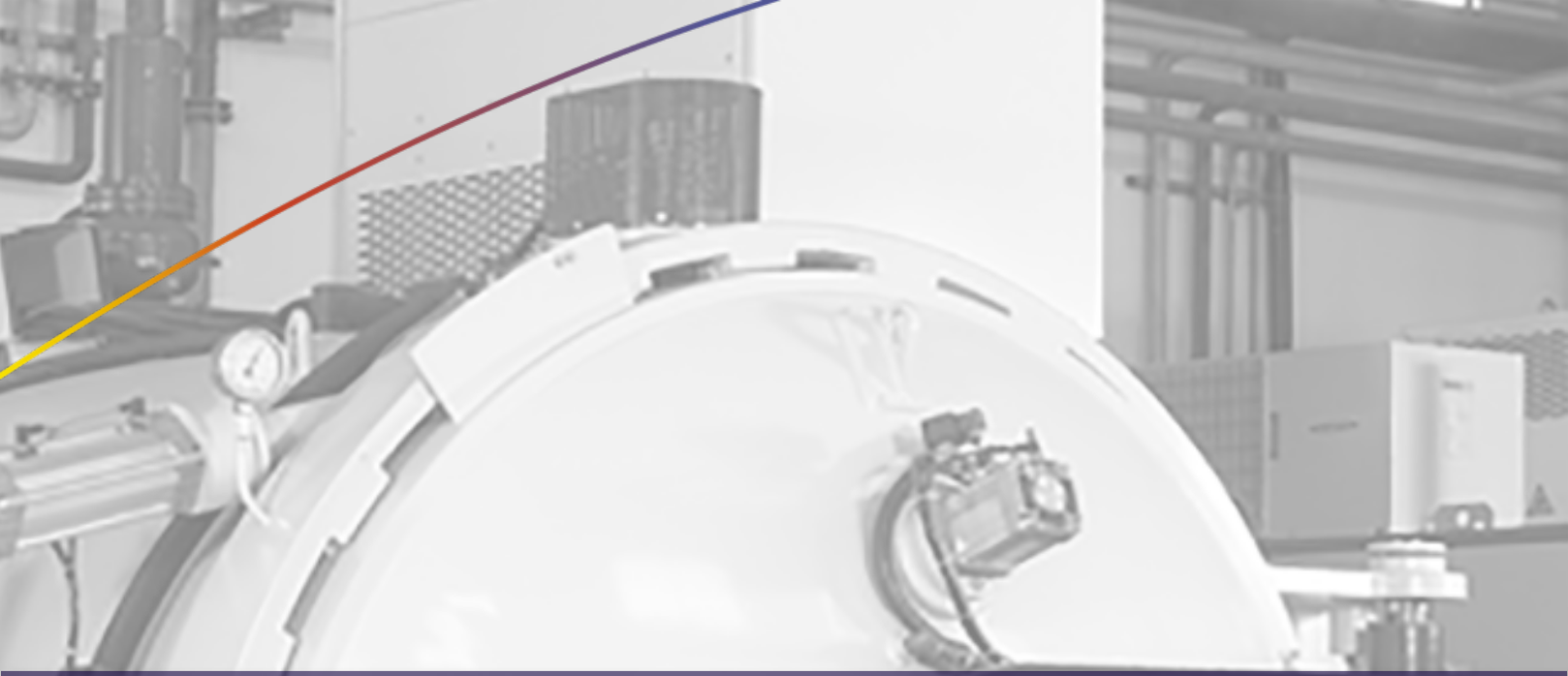


图18 圆棒试样中心的硬度与直径的关系
（560°C回火3x1小时）

°C与°F的转化表

°C	°F	°C	°F
5	41	1000	1832
7	45	1020	1868
15	59	1030	1886
40	104	1040	1904
50	122	1050	1022
200	392	1060	1940
400	752	1070	1958
450	842	1080	1976
480	896	1090	1994
500	932	1100	2012
520	968	1110	2030
540	1004	1120	2048
560	1040	1130	2066
580	1076	1140	2084
600	1112	1150	2102
700	1292	1160	2120
800	1472	1170	2138
850	1562	1180	2156
900	1652	1190	2174
920	1688	1200	2192
940	1724	1210	2210
950	1742		
960	1760		
975	1787		



PURE POWDER - PURE POWER

ASP®

ERASTEEL

www.erasteel.com

erasteel.info@eramet.com

TB_Heat treatment_EN_V1_2020 - 本文件仅供参考，不构成任何合同义务约束。

eramet