



技术支持 #16 Hardox 和 Strenx 系列钢材的热切割

Hardox 和 Strenx 系列钢材的切割

Hardox® 耐磨钢板和 Strenx™ 高强度钢为超洁净钢，高洁净度与低合金含量使其极易切割。Hardox 和 Strenx 系列钢材可以通过所有热切割方法进行切割，包括氧气切割、等离子切割和激光切割。当然，也可以采用冷切割工艺。

“技术支持 #16”中的建议主要涉及热切割工艺，分为氧气切割、等离子切割和激光切割三个章节。

在冷切割方法中，剪切和冲裁仅适用于硬度较低的 Hardox 钢材等级（400 和 450）以及各种中厚度的 Strenx 钢材等级，而磨料水射流 (AWJ) 切割则不受厚度影响，适用于各种等级的 Hardox 和 Strenx 钢材。

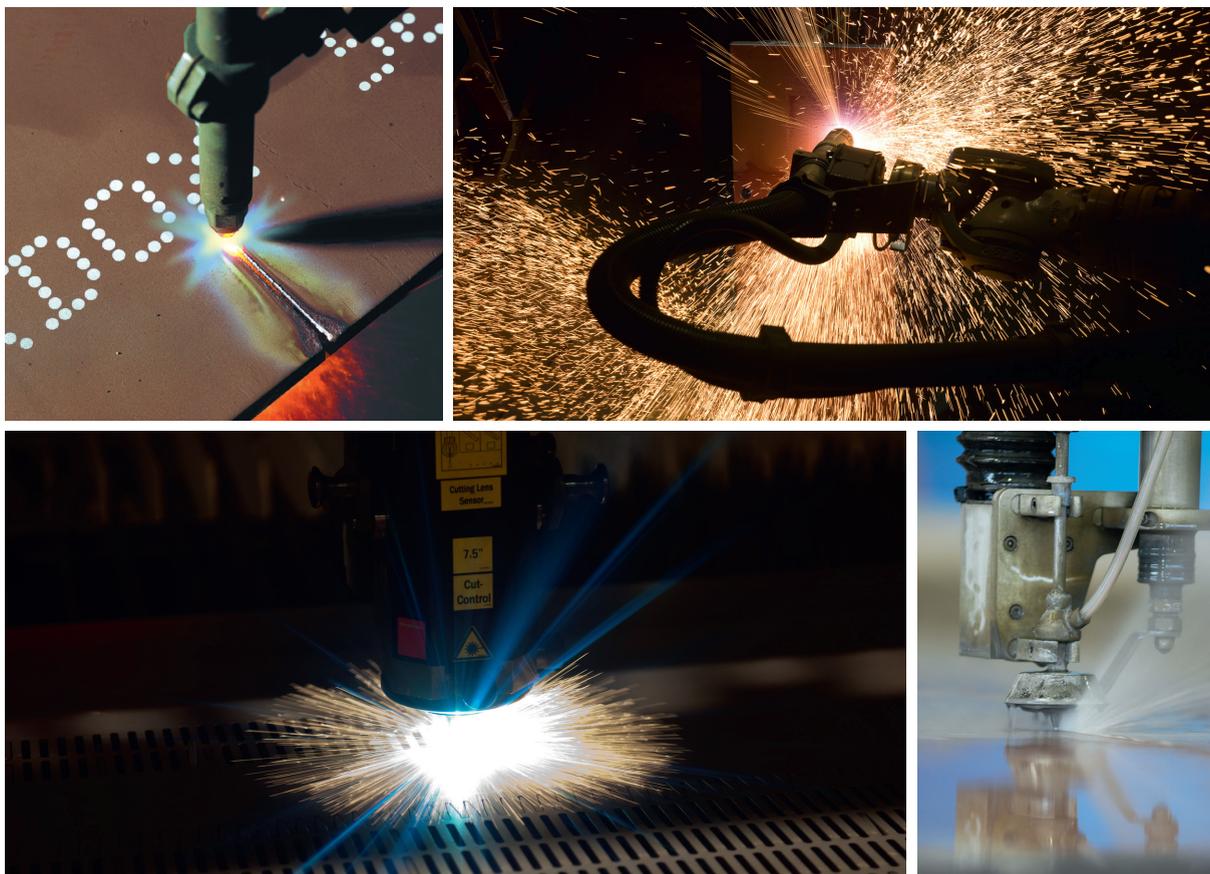
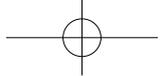


图 1. 从左上角开始依次为氧气切割、等离子切割、激光切割、磨料水射流切割。

在出现不一致情况时，以本文件的英式英语版本为准。通过 www.ssab.com 下载最新版本。
本手册中提供的信息仅可以作为一般信息。SSAB AB 不对任何特定应用场合下的适用性承担任何责任。在特定应用场合下须作出任何调整和/或修改的，用户将自行承担所有责任。

SSAB



Hardox 和 Strenx 系列钢材的热切割和常规低碳钢一样简单，而且由于钢洁净度更高，其实际切割工艺往往比低碳钢更简单。不过，由于存在切边裂纹风险，在切割 Hardox 厚板时要特别注意。Strenx 和 Hardox 系列属于调质钢，在热切割时的反应也与低碳钢等其他钢材有所不同。调质钢在热切割时容易出现软化，部分调质钢容易发生切边裂纹。只要遵循以下建议和指南，Hardox 和 Strenx 系列钢材均可通过常规设备进行热切割。更多详细信息可参阅 SSAB 的《焊接手册》。

切边裂纹

切边裂纹是一种与焊缝氢致开裂密切相关的现象，出现在热切割时。如果发生切边裂纹，会在切割后 48 小时至数周内显现出来。因此，切边裂纹可被视为延迟裂纹。钢板的硬度越高、厚度越大，发生切边裂纹的风险就越高。降低切边裂纹风险的方法如下所述。

切边裂纹与钢板的含氢量和残余应力密切相关。因此，降低氢含量和残余应力是关键，可以通过下列途径达到这一目的：

1. 钢板预热
2. 后加热
3. 低速切割
4. 预热、后加热、低速切割与延缓热影响区 (HAZ) 冷却过程相结合

预热

预热材料并趁热切割是避免氢致开裂的一种有效方法。预热比较适合用于氧气切割和等离子切割前，利用氧气或等离子气体进行预热：

不建议用于各类激光切割和使用氮气的等离子切割，因为会对切边质量产生负面影响。

根据不同情况，可对钢板进行部分或整体加热，可采用：

- 加热炉
- 燃烧枪
- 电子加热垫

加热炉是最好的预热方法，可以让整张钢板达到均匀的温度。燃烧枪也可用于 Hardox 和 Strenx 系列钢材的预热（见图 3）。燃烧枪要不断移动，以避免钢板超过最高预热温度，这一点很重要。此外，要在加热位置的反面测量预热温度。

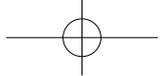
电子加热垫是一种慢速预热方法，要加热到 150-200 °C，最好提前一晚预热，第二天早上开始切割。

后加热

后加热是避免切边裂纹的一种可靠方法，可通过加热炉或火焰进行。最简单的方法是使用火焰，因为它在业内使用广泛随处可见，而加热炉则没有这么普及。部件切割后要尽快进行后加热，这一点很重要。从切割开始到后加热开始的最大间隔时间为 30 分钟。其关键是不要过度加热。

使用加热炉时，温度不应超过表 2 中所列的最大允许温度，并且在达到该温度前钢板不能离开加热炉。加热时间随钢板厚度的不同而改变，不过根据一般经验，每毫米钢板厚度的后加热时间不能少于 5 分钟（例如厚 10 mm 的钢板加热时间为 50 分钟）。

使用火焰时（图 4），关键是不要过度加热。切边温度不得超过 700 °C。使用火焰进行后加热一般需要人工操作，在这种情况下，知道如何掌控温度尤为重要。观察火焰后方与之紧邻的切边颜色，加热到刚刚开始发光即可（深暗红色）。



如果颜色呈亮樱红色或深橙黄色，则表示温度过高，后加热将失败，必须重来一次。在强光下（在室外阳光照射下）温度较难确定，因此应尽可能在室内进行后加热。

低速切割

降低切割速度时，材料的切口前侧周围升温，热影响区会变大。这会减小残余应力，从而降低切边裂纹风险。要记住，低速切割并不像预热或者后加热一样可靠，只能在车间没有合适的预热/后加热设备情况下作为替代方法。

如果采用低速切割的方法，要注意切割速度不能超过本文中所列的数值，否则根本无法起到降低切边裂纹风险的作用。

缓慢冷却

无论是否对切割部件进行了预热，缓慢冷却都可以降低切边裂纹风险。将切割完的部件趁热堆放在一起，用隔热毯包裹覆盖，可以达到缓慢冷却的目的。让部件慢慢地冷却至室温。

应力集中源

尖锐切角会产生应力集中作用，而且氢致裂纹与残余应力密切相关，因此尖锐切角会增加切边裂纹风险。所有切割方法，无论热切割还是冷切割（如 AWJ 切割），都是如此。以下措施可以降低裂纹风险：

1. 尽可能避免尖锐的“内向”切角
2. 尽可能采用平滑的几何结构
3. 如果实在无法避免尖锐切角，则在“外向”切角周围加一个保护圆环。
4. 如果要中断切割过程（如夜间停工），则需先切割一个整齐切口，以消除应力集中源

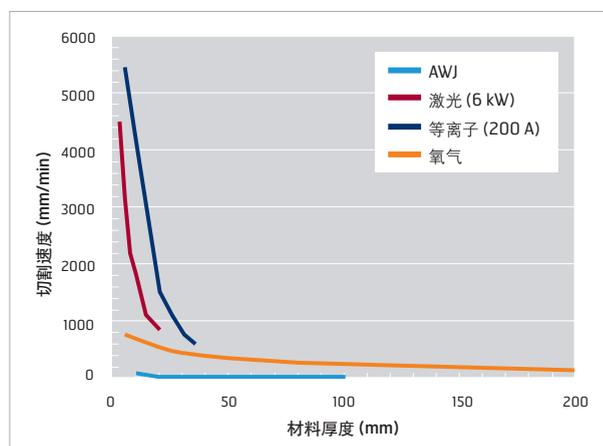


图 2. 不同切割工艺中切割速度与材料厚度的函数关系

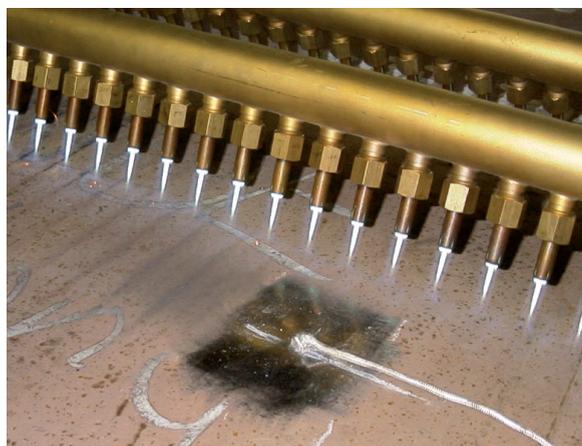


图 3. 预热喷枪。



图 4. 人工后加热。

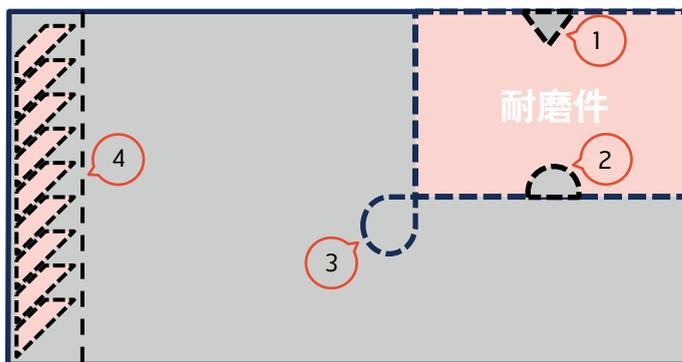


图 5. 避免尖锐的“内向”切角。



氧气切割

Hardox 和 Strenx 系列钢材可以通过氧气切割工艺轻松切割。氧气切割在材料厚度方面几乎没有限制，最大切割厚度可达 1000 mm。该工艺虽然也能切割较薄的材料，但主要用于切割厚度大于 20 mm 的材料。氧气切割的一般特性可参阅表 1。一个常见的误区是切割硬钢需要更高的切割氧压力。氧气切割是一种热切割工艺，因此钢的硬度对切割性能并无影响。Hardox 和 Strenx 系列钢材的合金含量低，洁净度高，因此容易切割。

Hardox

预热

氧气切割的预热建议参阅表 2。

后加热

如切边裂纹章节中所述，最好对切边进行后加热，以最大限度降低切边裂纹风险。使用加热炉进行后加热处理时，参考表 2 中给出的温度（最大值）。将钢板/部件在炉中加热，直至达到正确的核心温度（表 2）。

如果使用火焰进行后加热，要确保温度不超过 700 °C。在实际操作中，这意味着火焰后方与之紧邻的切边刚刚开始发光，并呈深暗红色（血红或深暗樱红）图 6。

部件切割后要尽快进行后加热，这一点很重要。从切割开始到后加热开始的最大间隔时间为 30 分钟。

低速切割

降低切割速度时，材料的切口前侧周围升温，热影响区会变大。这会减小残余应力，从而降低切边裂纹风险。要记住，低速切割并不像预热或者

后加热一样可靠，只能在车间没有合适的预热/后加热设备等情况下作为替代方法。

如果低速切割是唯一可以应对切边裂纹的方法，则切割速度不应超过表 3 中所列的最大切割速度。请勿使用过大的喷嘴（例如切割 50 mm 厚板时，要使用 25-50 mm 喷嘴，而不是 50-100 mm 喷嘴）。

要获得良好的切边质量，需要降低切割氧压力，降低的程度取决于喷嘴的类型和大小。调节切割氧压力后必须进行切割测试，以达到良好的切割质量为准。

切割前，尽可能使钢板保持温热状态。在冬季，要提前把钢板在车间内放置一段时间方可进行切割。

Strenx

大部分中厚度的 Strenx 等级都具有足够高的抗氢裂性，因此无需采取预热等额外措施来避免切边裂纹。不过，Strenx 700-960（厚度大于 80 mm）和 Strenx 1100（厚度大于 30 mm）在切割时的切边裂纹风险相对较高，可采取钢板预热、后加热或低速切割的方法来降低此风险。

Strenx 700-960 的正确预热温度为 150 °C，Strenx 1100 的预热温度须低于 150 °C。

如果采用预热方法，则预热温度不应超过表 4 中所列数值。

关于 Strenx 的后加热处理可参阅上文中 Hardox 的后加热处理。

采用低速切割时，Strenx 700-960 与 Hardox HiTuf 的参数相同，Strenx 1100 与 Hardox 450 的参数相同。



切割方法	切口宽度	热影响区	尺寸公差
氧气切割	2-5 mm	4-10 mm	± 2.0 mm

表 1. 氧气切割的一般特性。

材料	最高预热温度 (°C)
Strenx 700	300
Strenx 900	300
Strenx 960	300
Strenx 1100	150
Strenx 1300	150

表 4. 最高预热温度建议值。



图 6. 后加热火焰后方的切边颜色。

表 3 显示了氧气切割（未预热）的最大切割速度 (mm/min)。单独采用低速切割并不能解决 Hardox Extreme 的切边裂纹问题。如果只能采用氧气切割法，则须使用火焰进行预热和后加热。

最大钢板厚度	Hardox HiTemp	Hardox HiTuf	Hardox 400	Hardox 450	Hardox 500	Hardox 550	Hardox 600	Hardox Extreme
12 mm	无限制	无限制	无限制	无限制	无限制	无限制	无限制	**
15 mm	无限制	无限制	无限制	无限制	无限制	无限制	300	**
20 mm	无限制	无限制	无限制	无限制	无限制	无限制	200	**
25 mm	无限制	无限制	无限制	无限制	300	270	180	
30 mm	无限制	无限制	无限制	无限制	250	230	150	
35 mm	无限制	无限制	无限制	无限制	230	190	140	
40 mm	无限制	无限制	无限制	230	200	160	130	
45 mm	无限制	230	230	200	170	140	120	
50 mm	无限制	210	210	180	150	130	110	
60 mm		200	200	170	140	*	*	
70 mm		190	190	160	135	*	*	
80 mm		180	180	150	130			
>80 mm		*	*	*	*			

*仅可采用预加热。**SSAB 建议采用水射流切割。

等级	板材厚度	最低预热温度 (°C)	最高预热温度 (°C)
Hardox HiTemp	5 – 51 mm	无需预热	500
Hardox HiTuf	< 90 mm ≥ 90 mm	无需预热 100	300
Hardox 400	< 45 mm 45 – 59.9 mm 60 – 80 mm > 80 mm	无需预热 100 150 175	225
Hardox 450	< 40 mm 40 – 49.9 mm 50 – 69.9 mm ≥ 70 mm	无需预热 100 150 175	225
Hardox 500	< 25 mm 25 – 49.9 mm 50 – 59.9 mm ≥ 60 mm	无需预热 100 150 175	225
Hardox 550	< 20 mm 20 – 51 mm > 51 mm	无需预热 150 170	200
Hardox 600	< 12 mm 12 – 65 mm	无需预热 175	180
Hardox Extreme*	8 – 19 mm	100	100

表 2. 各等级 Hardox 钢板的氧气切割预热温度。

*SSAB 建议采用水射流切割。如果只能采用氧气切割，请遵循表 2 中的建议。

等离子切割

Hardox 和 Strenx 系列钢材可以通过等离子切割工艺轻松切割。等离子切割受限于材料厚度，主要用于切割厚度小于 50 mm 的材料（取决于等离子切割机）。等离子切割的一般特性可参阅表 5。

图 7 显示了切割速度与材料厚度以及可用等离子切割功率的函数关系。

Hardox 和 Strenx

Hardox 和 Strenx 系列钢材的等离子切割与常规低碳钢无异，即采用相同的工艺参数。在等离子切割时，大部分的 Hardox 和 Strenx 钢材等级都无需通过预热或后加热来增强氢原子从热影响区的迁移。只有 Hardox 600 和 Hardox Extreme 须通过此类处理来避免切边裂纹，参阅氧气切割建议。

切割方法	切口宽度	热影响区	尺寸公差
等离子切割	2-6.5 mm	2-5 mm	± 1.0 mm

表 5. 等离子切割的一般特性。

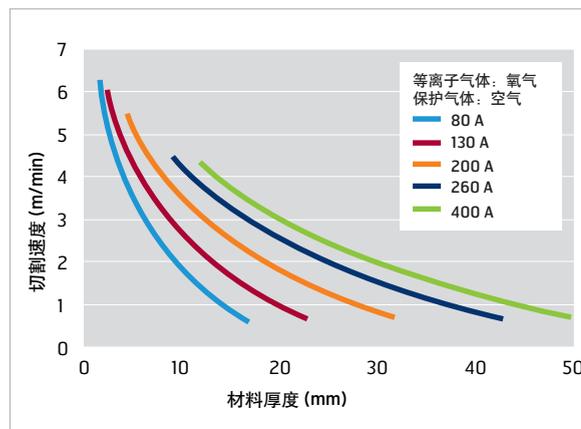


图 7. 显示了不同等离子体功率源的一般切割速度。

激光切割

Hardox 和 Strenx 系列钢材可以采用给定材料厚度的正常加工参数进行激光切割。最大厚度约为 25 mm，取决于所使用的激光切割设备。最常见的切割厚度为小于 15 mm。激光切割的一般特性可参阅表 6。

激光切割的速度高于氧气切割，切边质量优于等离子切割。图 8 显示了切割速度与材料厚度以及激光功率的函数关系。

由于厚度和热冲击相对较小，Hardox 和 Strenx 系列钢材在进行激光切割时无需预热来增强氢原子从热影响区的迁移。预热反而会影响切边质量。

Hardox 和 Strenx

Hardox 和 Strenx 系列钢材的激光切割与常规低碳钢无异，即采用相同的工艺参数。底漆会降低切割速度，但可以通过预先蒸发底漆来解决这一问题，随后便可以全速切割轮廓了。

切割方法	切口宽度	热影响区	尺寸公差
激光切割	< 1 mm	0.2-2 mm	± 0.2 mm

表 6. 激光切割的一般特性。

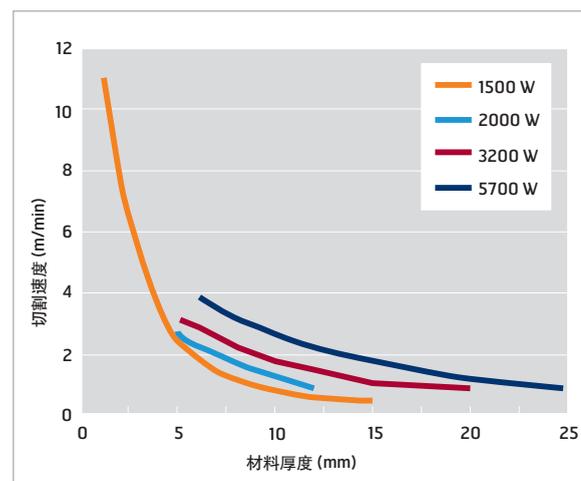


图 8. 激光切割速度。



热影响区的硬度特性

热影响区的硬度特性取决于以下因素：

- 钢材在冶炼过程中是否进行过调质处理，以及采用何种调质方法
- 钢的化学成分
- 切割过程的热冲击性

切割工艺的热冲击性越高，热影响区越大。举例来说，在功率一定的前提下，降低切割速度会导致热影响区变大。不同的热切割工艺具有不同的热冲击性，因此热影响区的大小也各不相同。氧气切割的热冲击性最高，其次为等离子切割和激光切割。图 9 显示了 Strenx 1100 – Strenx 1300

以及 Hardox 400 – Hardox Extreme 的热影响区示意图。

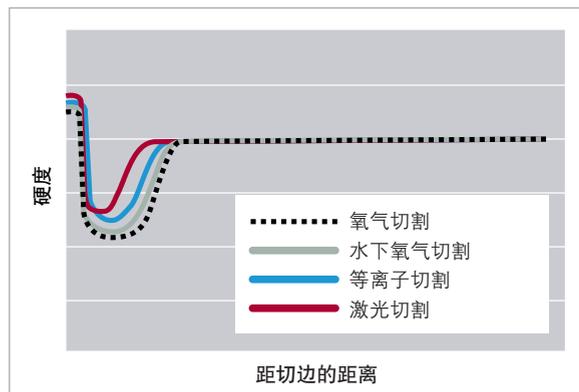


图 9. Hardox 和 Strenx 钢材采用不同方法进行热切割后，热影响区的硬度分布曲线。

钢板的存放

Hardox 550、Hardox 600 和 Hardox Extreme 钢板在存放时一定要避免发生三点弯曲。堆放钢板时，一旦各层钢板中间的垫块位置不正确，就会发生三点弯曲。因此务必要确保各层垫块上下对齐。

带有尖锐切角的钢板不得送回仓库，否则这些切角会成为应力集中源，导致钢板产生延迟裂纹。在将钢板送回仓库前，必须彻底清除该类切角。所有切割方法，无论热切割还是冷切割（如 AWJ 切割），都是如此。Hardox 550、Hardox 600 和 Hardox Extreme 尤其容易受其影响。



图 11. 钢板的正确堆叠方式。



降低软化风险

钢的抗软化特性取决于其化学成份、微观结构以及加工方式。热切割的部件越小，整个部件的软化风险越大。如果钢的温度过高，其硬度就会降低，如图 11 所示。请参照表 3 和表 4 中的最大允许温度。

切割方法

在切割小型部件时，切割火焰和预热所释放的热量会聚集在工件中。切割部件的尺寸越小，软化的风险就越大。当使用氧气切割 30 mm 或 30 mm 以上的钢板时，根据一般经验，如果两个切割位置的距离小于 200 mm，整个部件就会有软化的风险。消除软化风险的最好方法是采用冷切割，例如水射流切割。如果必须进行热切割，则优先采用激光或等离子切割。这是因为氧气切割会释放更多热量，工件温度会因此而升高。

水下切割

限制并降减轻钢板软化的一种有效方法是在切割过程中用水来冷却钢板及切割表面。既可以在切割过程中将钢板浸入水中（图 12），也可以在切割后向工件喷水。水下切割可用于等离子切割和氧气切割过程。

水下切割具有以下优势：

- 防止整个部件硬度降低
- 减少切割部件变形
- 切割后马上进行部件冷却
- 无烟尘
- 降低噪音

由于预热不适用于水下切割，因此只能通过后加热和低速切割来降低氢裂风险。使用 Hardox 厚板切割小型部件时，同时存在软化和切边裂纹风险。低速水下切割或者对切割部件进行后加热处理可以很好地避免此类风险。后处理可使用火焰或加热炉。

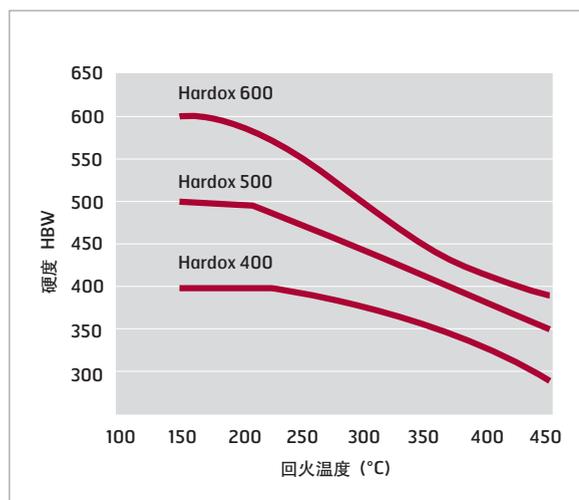


图 11. 表面硬度与回火温度的关系。



图 12. 水下切割。