

文章编号: 1005—8893 (2002) 01—0027—04

# 45 钢制零件在生产过程中的开裂与断裂分析<sup>\*</sup>

谢 飞, 胡 静, 刘青林, 潘建伟

(江苏石油化工学院 材料表面工程研究室, 江苏 常州 213016)

摘要: 从 45 钢的冶金质量、钢的成分对淬火加热温度的影响、零件截面尺寸、零件设计缺陷与机加工损伤等方面的单独影响及综合作用分析了 45 钢制零件在生产过程中的开裂与断裂原因, 并给出了解决措施。

关键词: 开裂; 断裂; 45 钢; 失效分析

中图分类号: TG 162.71

文献标识码: A

在机械产品中, 45 钢因其较低的价格和较好的性能而得到广泛的应用。但 45 钢制零件在生产过程中仍经常出现开裂或断裂。在热处理时发生开裂, 使得零件报废; 在车削、磨削加工时零件断裂还会危及操作人员的安全。因此正确分析 45 钢制零件在生产过程中的开裂与断裂原因, 对于降低生产成本、保障安全生产具有重要意义。

45 钢制零件在生产过程中的开裂与断裂一般由以下几方面原因造成。

## 1 钢中夹杂物

机械生产厂家对钢材的检验一般是抽检, 有时会对夹杂物超标的钢材漏检。钢中夹杂物一般强度很低。零件中存在的夹杂物割裂基体, 当对零件进行机械加工而使零件受载, 或对零件进行热处理而使零件承受热应力和组织应力时, 在夹杂物处会形成应力集中, 当该处应力为拉应力且大于材料断裂强度时即会开裂, 严重时零件会断裂。钢中夹杂物越多、越粗大, 这种危害越大。例如, 在一段时期, 某厂生产的 45 钢制拖拉机轴类零件在精车、精磨时发生多起断裂现象, 对断裂件的金相组织分析发现, 在正常的回火索氏体组织上分布着大量粗大的长条状硫化物夹杂物, 并且有的夹杂物上已有裂纹存在 (图 1); 夹杂物级别在 4 级以上。为避

免由夹杂物引发的开裂、断裂, 应加强原材料的检验, 严格控制 45 钢中夹杂物含量与形态, 夹杂物级别一般宜控制在 2 级以下<sup>[1]</sup>。

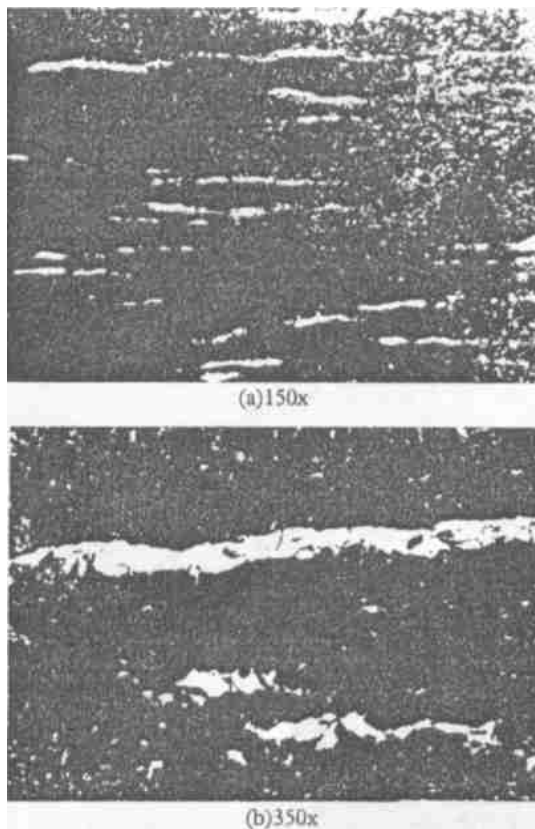


图 1 轴向分布的夹杂物 (a) 及夹杂物中的裂纹 (b)

\* 收稿日期: 2001—10—25

作者简介: 谢飞 (1964—), 男, 上海人, 博士, 副教授, 主要从事新材料及表面工程方面的研究。

## 2 钢的实际成分与淬火加热温度

制定淬火加热规范的主要依据是材料的  $A_{c3}$  点温度。通常的热处理手册上提供的  $A_{c3}$  点温度往往为某一成分试样的测试数据。若仅据此确定淬火加热温度, 可能会造成过热, 而导致淬火开裂。

$A_{c3}$  点温度与材料的实际化学成分有关<sup>[2,3]</sup>。任何一个钢种其化学成分均有规定范围, 由于生产批次的不同, 实际成分波动于规定的上下限之间。对于碳钢, 若忽略其它微量元素的影响, 按平衡相图推测,  $A_{c3}$  的变化随钢中含碳量的升高均匀下降。但将不同含碳量的中碳钢的  $A_{c3}$  点联成曲线<sup>[4,5]</sup>, 发现  $A_{c3}$  在含碳量为 (0.45 ~ 0.55)% 范围内出现一个陡降的低谷 (图 2)。文献 [6] 的研究进一步确定  $A_{c3}$  的最低点成分在 0.48% C 处, 其  $A_{c3}$  约为 (750 ~ 760) °C。把  $A_{c3}$  陡降与 45 钢的开裂联系起来看, 若所用 45 钢的成分正处于  $A_{c3}$  的低谷内, 按 45 钢名义成分确定的淬火温度加热淬火, 必然使工件过热, 容易发生开裂。国产 45 钢的含碳量范围在 0.42% ~ 0.50%, 允许波动的范围较大。若所用钢的含碳量处于下限, 因其  $A_{c3}$  较高 (例如 0.42% C 钢的  $A_{c3}$  为 780 °C), 用现行的 (820 ~ 840) °C 加热淬火, 不大可能出现过热问题。但是若所用 45 钢的含碳量偏上限, 即钢的成分落入了  $A_{c3}$  陡降的区域 ( $A_{c3}$  约为 750 °C ~ 760 °C), 仍按 (820 ~ 840) °C 加热淬火, 则会发生过热现象, 淬火开裂的可能性大大增加。因此, 淬火加热温度的确定应该根据每批材料的实际成分确定。对于含碳量处于上限区域的 45 钢, 其淬火加热温度必须根据  $A_{c3}$  的真实值确定, 较名义 45 钢的低, 以避免过热后淬火开裂, 同时还有利于节能。特别应注意含碳量为 0.48% 的 45 钢, 其  $A_{c3}$  最低, 为 750 °C。如含碳量在 0.47% ~ 0.49% 范围, 加热温度必须降至 (780 ~ 790) °C。

除了含碳量的影响之外, 45 钢中的 Mn 含量及微量合金元素、残余元素对淬火开裂的影响也不容忽视。当 45 钢中含有 0.001% ~ 0.002% 的 B 时, 钢的淬透性大大增加。这是由于硼偏聚在奥氏体晶界, 阻碍铁素体形核所致<sup>[7]</sup>。有些钢厂冶炼的钢中含 W 量达 0.02% ~ 0.03%, Mn 含量达 0.75% 以上。W 不仅增加钢的淬透性, 还使马氏体的相变膨胀速度和相变量变大, 导致相变应力增大, 从而易引起淬火裂纹。45 钢中含较多的 Mn

和 W 会降低钢的  $M_s$  点, 使片状马氏体的量相对增加, 脆性增大, 更易淬裂。有的钢厂在冶炼碳钢时加入含 Mo 的返回料或加入 Mo, 使其淬透性增加, 同时也增加了淬裂倾向。若这些微量元素都存在于 45 钢中, 含量达到上述范围, 则工件采用常规工艺方法的淬裂比例可高达 30% 以上<sup>[8]</sup>。对于这种情况, 仅采用降低淬火加热温度, 有时效果不显著。这时采用较低温度加热并控制零件在水中停留时间的淬火方法, 具有较好的效果<sup>[8]</sup>。

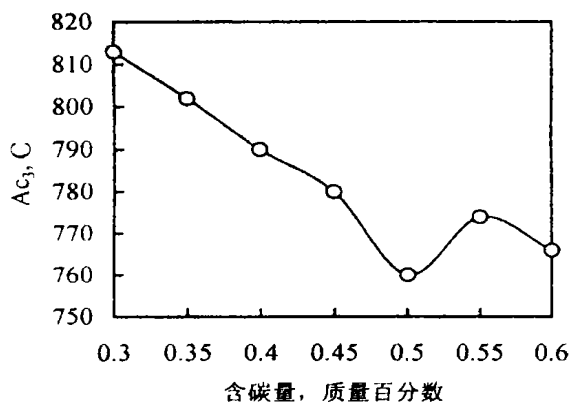


图 2 中碳钢  $A_{c3}$  与含碳量关系曲线

45 钢中含的各种元素对其  $A_{c3}$  都有影响。为较准确地估计 45 钢的临界点  $A_{c3}$ , 必要时除分析 C、Si、Mn、S、P 含量外, 还应分析 W、Cr、B 等元素的含量, 可采用文献 [2] 介绍的公式来进行计算。

## 3 零件截面尺寸

45 钢零件淬火开裂不仅与材料成分、淬火工艺规范有关, 还与零件截面尺寸有关。对于这一点, 在生产中往往没有得到足够的重视。虽然不同研究的数据有所差异, 但研究表明<sup>[9,10]</sup>, 45 钢按常规工艺淬火, 淬裂的危险直径大致为  $\Phi(4 \sim 8)$  mm, 裂纹发生率在  $\Phi(5 \sim 7)$  mm 时最高。造成这种情况的原因如下:

我们知道, 淬火工件的冷却总是由表及里渐进的。当工件达到临界冷却速度时, 表面首先发生奥氏体向马氏体转变。表层体积增大, 但受心部制约, 使得表面受压应力, 心部受拉应力。随着冷却温度降低, 马氏体量迅速增长, 此时热应力和组织应力也达到最大值。当心部形成马氏体时, 心部体积增大, 但受到表面淬硬层的抑制, 从而使得心部受压应力、表面受拉应力。当表面拉应力超过材料的断裂强度时, 裂纹从表面萌生。截面尺寸为  $\Phi$

(4~8) mm 的 45 钢零件的裂纹正是这种原因所致。直径小于 4 mm 时, 由于截面较小, 内外温差小, 淬火产生的拉应力未超过材料的断裂强度, 故不易产生裂纹。直径大于 8 mm 时拉应力峰值离开表面, 表面拉应力小于材料断裂强度。直径进一步增加, 零件不易淬透, 而在未淬透情况下, 零件表面为压应力状态<sup>[1]</sup>, 不易产生裂纹。

对于尺寸因素导致的淬火开裂, 在材料和冷却介质不变条件下, 采用亚温淬火, 可防止出现裂纹, 且淬火硬度和常规淬火的差别不大。也可提高奥氏体化温度, 在油中淬火, 来防止具有危险截面尺寸 ( $\Phi 4\text{ mm} \sim 7\text{ mm}$ ) 零件开裂。由于 45 钢在油中淬火能淬透的直径为 7.25 mm, 因此  $\Phi (4 \sim 7)\text{ mm}$  的零件还是可以淬透的, 且硬度可达 HRC48~54.7。另外, 在盐浴炉中加热时, 将加热系数从常规工艺的 0.4 min/mm 降为 (0.2~0.3) min/mm, 既能保证工件的奥氏体化, 同时对防止开裂也可获得满意效果。

## 4 机加工损伤与设计缺陷

零件热处理前的机加工工艺若不当, 有可能使零件在热处理时开裂。零件在热处理前的机加工一般是粗加工, 进刀量大, 刀痕粗大。这使得零件表层产生较大的塑性变形, 存在较大的残余应力; 此外, 粗大刀痕处还会形成应力集中。热处理时热应力、组织应力与机械残余应力叠加于粗大刀痕处, 若各种应力都是拉应力, 就可能在刀痕处造成开裂, 甚至断裂。某厂生产的一些 45 钢制轴类零件, 所发生的开裂均是从顶尖孔内部应力集中处开始的, 这与机加工损伤有很大关系。所以机加工时的进刀量不宜过大, 应勤磨刀, 尽量避免磨钝的刀具对工件表面的损伤。

在零件各过渡截面处如设计不当, 未留圆角, 或圆角过小, 以及某些孔、槽的分布与尺寸设计不合理, 也会使得这些部位在热处理时产生很大的应力集中, 从而导致开裂。因此, 对于需经调质处理的 45 钢零件, 应该力求形状简单、结构对称、截面均匀, 减少截面突变。对于螺纹、油孔、键槽或退刀槽等截面变化处, 应避免尖锐的棱角、沟槽等, 台阶处要有足够大的园角半径。

## 5 综合因素作用

以上从单方面因素对 45 钢制零件在生产过程

中的开裂与断裂进行了分析。但是对具体零件, 有时上述单一因素虽存在, 如并不十分严重, 则不至于引发开裂或断裂。若几种因素都存在, 或存在几种, 虽单一因素并不严重, 但这种综合作用则可能导致开裂甚至断裂。

例如, 某厂生产的手扶拖拉机转向轴、主轴、副变速轴、中间轴等 4 种轴在精车、磨削时在有中心孔的端部有时出现断裂。这种断裂不仅给生产造成一定损失, 更重要的是在高速切削或磨削时出现, 断裂轴的飞出给安全生产带来了严重的隐患。宏观断口观察发现, 断裂轴断口心部基本位于中心孔底部的圆锥面与圆柱面的交界处或其附近, 断面沿交界处角平分线反方向 (图 3)。断口表面的断裂条纹表明, 裂纹起裂于中心孔内部。

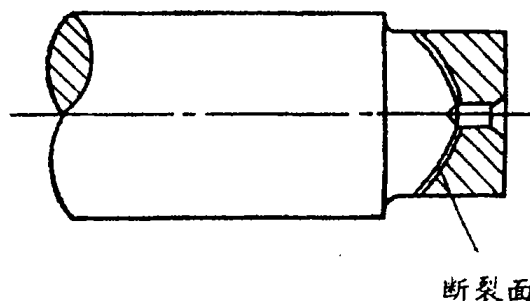


图3 轴的断裂位置与形态示意图

这几种轴都是大批量生产, 同批次每根轴的生产加工条件基本一致。若是前述 4 方面的某一因素造成断裂, 则应该有大量的轴出现断裂。而实际情况是在一批次数千根轴中, 一般只有几根至几十根轴发生断裂。因此断裂应是多因素综合作用所致。我们通过实验分析发现<sup>[1]</sup>, 断裂虽然是在精加工时发生, 但实际在热处理时内部已开裂, 在精车、精磨时由于轴截面减小、裂纹继续扩展而发生断裂。而热处理时的开裂又是由原材料、中心孔加工和热处理三方面存在的问题所至: 原材料 45 钢含碳量处于上限, 存在较多粗大夹杂物; 磨钝的中心孔钻头导致中心孔内壁损伤和很高的残余内应力; 按含碳量下限制定的淬火加热规范导致含碳量处于上限的 45 钢发生淬火加热过热。根据这些分析, 我们提出了相应的改进措施, 从而解决了该厂这一存在多年的问题。

## 6 结 论

45 钢制零件在生产加工过程中发生的开裂与断裂一般是由钢材冶金质量较差、钢材成分波动及

残余与微量元素超标导致淬火加热温度选取不当、前道机加工工序对零件产生的损伤、某些设计缺陷等因素单独或复合作用造成。对具体情况进行分析,在上述几方面采取相应措施,可以避免这种开裂与断裂。

#### 参考文献:

- [1] 胡静, 谢飞, 刘青林, 等. 拖拉机轴类零件在精加工时的断裂失效分析 [J]. 金属热处理, 2000 (11): 33—35.
- [2] 陈汉清, 译. 确定钢临界点的计算模型 [J]. 国外金属热处理, 1985 (3): 12—15.
- [3] 赵振东. 钢的化学成分对临界温度的影响 [J]. 机械工程材料, 1999, 23 (1): 39—40.
- [4] 《简明热处理手册》编写组. 简明热处理手册 [M]. 北京:

北京出版社, 1985. 28.

- [5] 《热处理手册》编委会. 热处理手册—第四卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. 487.
- [6] 常明, 朱穗东, 刘智勇, 等. 45 钢  $A_{c3}$  点的突变与开裂 [J]. 金属热处理, 1986 (3): 16—19.
- [7] Morral J E, Cameron T B. Boron in Steel [A]. Banerji S K, Morral J E. Proc Int Symp on Boron Steel [C]. Warrendale: TMS—AIME, 1979. 19.
- [8] 崔国明, 金福裕, 李自华, 等. 45 钢汽车后桥半轴套管淬火工艺的改进 [J]. 金属热处理, 1988 (9): 41—43.
- [9] 曾健康. 45 钢淬裂临界尺寸的探讨及防止淬裂的措施 [J]. 金属热处理, 1988 (7): 48—50.
- [10] 蔡玮皓. 45 与 55 钢发裂的分析 [J]. 金属热处理, 1987 (10): 43.
- [11] 安运铮. 热处理工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 253.

## Analysis of the Cracking and Fracture of 45 Steel—made Parts during Processing

XIE Fei, HU Jing, LIU Qing—lin, PAN Jian—wei

(Laboratory of Surface Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** Analysis is given on the cracking and fracture of machine parts made of 45 steel during the processing from the points of metallurgical quality, the influence of the steel's chemical composition on its quenching temperature, the cross—section size of the machine parts, the imperfection in the design of the parts, and the surface injuring during machining cutting. Ways for avoiding the cracking and fracture are proposed.

**Key words:** cracking; fracture; 45 steel; failure analysis