齿轮发生随机断裂的原因和预防措施

朱孝录

北京科技大学　北京　100083

摘要：目前国家标准GB/T 3481—1997《齿轮轮齿磨损和损伤术语》中没有包含齿轮随机断裂这一词条，但在齿轮使用中经常出现轮齿随机断裂现象。描述了轮齿随机断裂的形貌；论述了产生随机断裂的原因；给出了随机断裂的分类和多个实例；并提出了预防轮齿随机断裂的具体措施。建议在修订国家标准时增加齿轮随机断裂词条。

关键词：齿轮；随机断裂；预防

1　序言

轮齿折断（断裂）是一种危险性很大的最终失效形式。在GB/T 3481—1997《齿轮轮齿磨损和损伤术语》（ISO 10825：1995）中，将轮齿的断裂（折断）细分为以下几种：过载折断、疲劳折断、剪断和抹断。标准中没有包含轮齿经常出现的随机断裂。

轮齿的随机断裂是指不与齿根圆角截面有关的轮齿断裂。断裂部位随轮齿缺陷、损伤或过高的有害残余应力的位置而定，如图1所示。从图1可以看出，正常的弯曲疲劳断裂的断裂线都起源于30°切线点附近；而如果轮齿腰部出现严重损伤，例如深层剥落，就会产生很大的应力集中而引发随机断裂。齿顶的随机断裂多数是由于热处理缺陷和齿轮偏载造成的。

在1980年的AGMA 110.4标准中，首先提出了随机断裂（Random fracture）这一词条。我国GB 3481—1983中也收录了这一词条。1979年的DIN 3979中只定义了轮齿的过载折断和疲劳折断，而没有随机断裂词条。在我国等同采用ISO标准的GB/T 3481—1997《齿轮轮齿磨损和损伤》术语中，也没有随机断裂这一词条。由此可见，随机断裂这一重要的失效现象并没有引起人们广泛的注意。

随机断裂在减速机的齿轮中经常出现，特别是硬齿面齿轮更是如此，笔者曾经多次呼吁恢复随机断裂这一词条，见文献[1-3]。

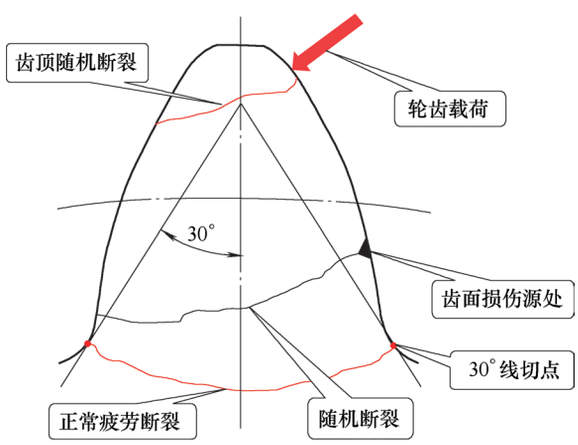


图1　轮齿的正常疲劳断裂和随机断裂

2　轮齿发生随机断裂的原因

齿轮轮齿发生随机断裂的原因很多，主要有：

1）随机断裂通常是由于轮齿缺陷、点蚀、剥落或其他应力集中源在该处形成过高局部应力集中引起的。

2）夹杂物、细微磨削裂纹等轮齿缺陷在交变应力作用下，裂纹不断扩展导致轮齿随机断裂。

3）不当热处理造成的过高残余应力也能引起轮齿的局部断裂。

4）载荷过大，或轮齿修形不到位，引起啮入冲击载荷过大，都会造成随机断裂。

5）轮齿偏载造成的齿面损伤会引起轮齿腰部或轮齿根部的随机断裂。

6）较大的异物进入啮合处也会使局部轮齿断裂。

3　轮齿随机断裂的分类和实例

轮齿的随机断裂根据断裂部位不同可以分为3类：齿顶随机断裂、齿腰随机断裂和齿根随机断裂。下面是轮齿随机断裂的一些实例。

（1）齿顶随机断裂　由于轮齿偏载，齿面出现深层剥落造成轮齿齿顶断裂，如图2所示。硬齿面齿轮由于热处理缺陷，齿顶硬度过高也会造成齿顶随机断裂。

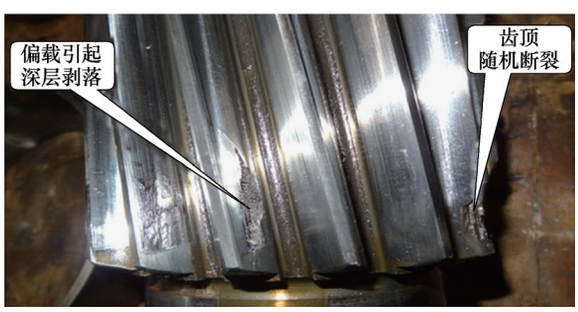


图2 齿面深层剥落造成轮齿齿顶随机断裂

（2）齿腰随机断裂　轮齿腰部如果有缺陷、损伤，就有可能发生齿腰随机断裂。图3就是40Cr钢渗氮齿轮齿面压裂后产生的随机断裂。随机断裂的断口形貌与一般疲劳断齿相似。

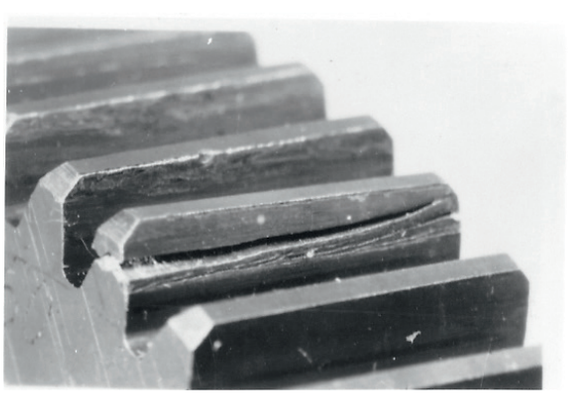


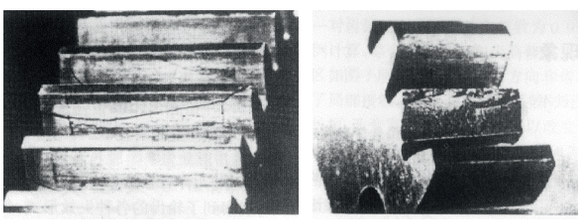
图3 渗氮齿轮齿面压裂后产生的随机断裂

图4是球墨铸铁齿轮齿面压碎后产生的齿腰随机断裂。图5是轮齿腰部裂纹和齿腰随机断裂的实例。

（3）轮齿根部随机断裂　轮齿根部随机断裂是指有效工作齿面的根部发生断裂，它与30°切线点断裂无关。图6是螺旋角β=30°的斜齿轮（渗碳淬火齿轮），在正常情况下不可能出现整齿断裂，但由于啮入冲击使齿根部位出现深层剥落，剥落坑的应力集中造成了轮齿的随机断裂。



图4 球墨铸铁齿轮齿面压碎后产生的随机断裂



a）轮齿腰部裂纹　　b）轮齿腰部断裂

图5 轮齿腰部裂纹和随机断裂

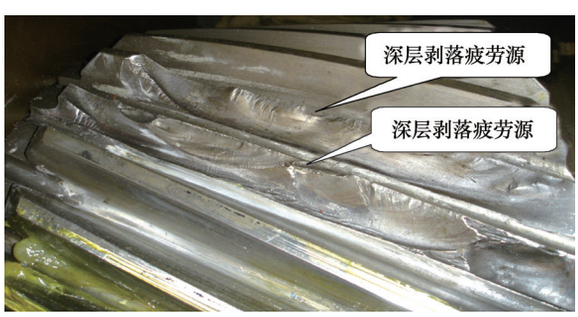


图6 深层剥落造成齿根部位的随机断裂

再举一个齿根随机断裂的实例：某风电机行星增速器的齿圈，有数个齿都在输入端发生断裂或出现裂纹，如图7所示。由图7可见：裂纹出现在实际工作齿面的齿根，而不是出现在弯曲应力和应力集中最大的齿根部位。由于数个断齿和开裂未断的齿都发生在内齿圈的输入端，并且位置及裂纹长度形貌基本一致，由此可以认为，该齿圈传动有较大的偏载，该处出现了很大的接触应力，使齿面遭受到了严重的损伤——可能是表层压碎。

轮齿的断口如图8所示。由于偏载，接触应力过大造成表层压碎，因此断口会有压碎层（通常是表面硬化层）。表层压碎的裂纹产生很大的应力集中，促成疲劳裂纹的扩展，形成疲劳裂纹扩展区。

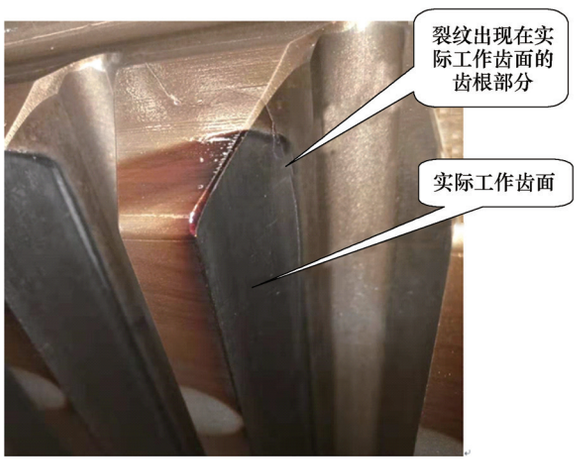


图7 齿圈齿上的裂纹

疲劳裂纹扩展区逐渐扩大，裂纹扩展的速度加快，出现裂纹快速扩展区。最后轮齿承受不了载荷而断裂（齿根部随机断裂），形成瞬断区。

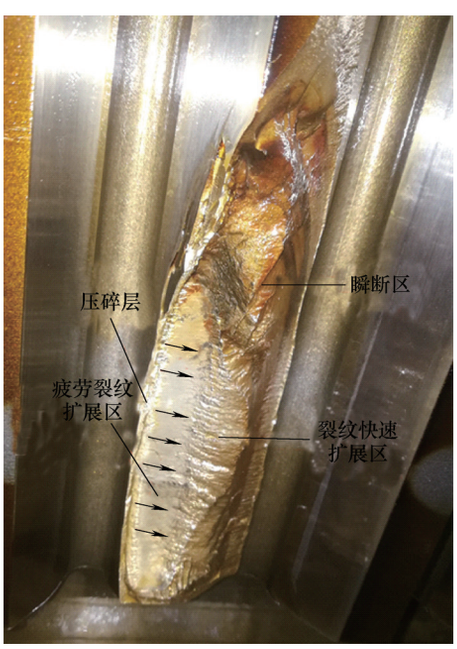


图8 轮齿的断口

弧齿锥齿轮如果有效工作齿面的根部出现深层剥落，也会引发轮齿的随机断裂，图9就是一个实例。图中疲劳源区就是深层剥落的部位。

4 预防轮齿随机断裂的措施

可以从以下几方面来预防轮齿的随机断裂：

1）在齿轮的设计环节，要精细计算齿轮的强度，避免因齿面接触应力过大造成齿面的严重损伤，例如深层剥落、齿面压碎等。这些严重损伤会

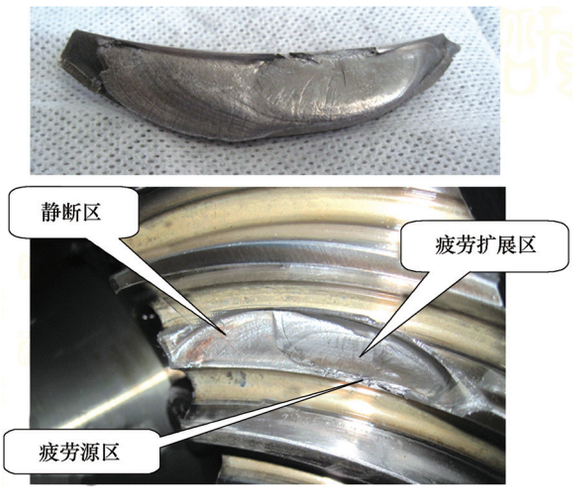


图9 弧齿锥齿轮因深层剥落引发的随机断裂

产生很大的应力集中，从而引发轮齿随机断裂。

2）提高齿轮的制造精度和安装精度，避免出现齿轮偏载，因为齿轮的偏载对齿面的损伤很大，特别是硬齿面齿轮更是如此。

3）对于高速、重载齿轮要经过合理的轮齿修形，避免过大的啮合冲击载荷，因为齿根部位的随机断裂，大部分是由于啮合冲击引起的。

4）采用夹杂物少的钢材，齿轮的坯料应该经过锻造，锻造比不能小于3，避免齿轮内部缺陷引发的随机断裂。

5）优化热处理工艺，避免齿轮出现过大、不利的残余应力；齿顶部位的硬度不能太高。

由于齿轮随机断裂事故在使用中经常出现，因此很有必要对这一失效现象做出规范化文字表述；为此，建议在修订GB/T 3481—1997《齿轮轮齿磨损和损伤术语》时，增加“齿轮随机断裂”词条。

参考文献：

[1]朱孝录，史铁军.齿轮轮齿的随机断裂现象[J].机械传动，1999，23（1）：29-31.

[2]边新孝，甘小青，朱孝录.齿轮随机断裂试验研究[J].机械传动，2003，27（4）：23-25.

[3] Xinxiao Bian，Xiaole Li，Xiaolu Zhu. Study on Random Fracture and Crack Growth of Gear Tooth Waist[J]. Journal of failure and prevention，2018（18）：121-129.

MW 20191219