

激光毛化轧辊技术的特色与进展

陈光南¹⁾

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 轧辊激光毛化技术的用途是什么? 什么样的轧辊需要毛化处理? 激光毛化轧辊技术的优势是什么? 还存在什么不足? 激光毛化处理为什么能够延长轧辊的寿命? 激光毛化轧辊改善了所轧钢板的哪些性能? 其机制是什么? 针对轧辊激光毛化技术的这几个基本问题进行了讨论和释疑, 并指出了下一步的改进方向。

关键词 激光毛化, 轧辊, 薄钢板

自 1992 年 8 月在秦皇岛龙腾精密带钢公司首次成功应用以来, 我国自行研发的 YAG 激光毛化轧辊技术与装备^[1-3], 已在多家冷轧钢板和钢带生产企业应用, 在提升这些企业的产品质量水平方面发挥了重要作用。随着对冲压尤其是深冲压用冷轧钢板和钢带表面质量意识的逐渐深入^[4], 一些已经和打算引进激光毛化轧辊技术的企业及相关人士, 希望了解更多关于轧辊激光毛化技术的原理和作用机制、与其他方法相比的优势与局限、以及其工艺设计原则等方面的信息和资料。虽然, 不同方面人士关注的重点不尽相同, 但所关注的基本问题是共性的和基础的。为方便更多相关人员正确理解和合理应用轧辊激光毛化技术, 也为了纠正相关资料中关于激光毛化技术的一些模糊、误解、甚至错误的说法, 本文就针对轧辊激光毛化技术的几个基本问题进行讨论和释疑。

1 轧辊激光毛化技术的用途

在轧钢行业, 冲压用冷轧薄钢板和钢带(以下统称冷轧钢板)产品的表面, 需要具备一定的粗糙度和形貌。这是因为, 这种粗糙形貌不仅可以减小薄板冲压成形时的摩擦力, 改善润滑条件, 有利于材料的流动和塑性变形能力的充分发挥, 还可以提高涂层钢板的“挂浆”能力、改善板面对涂层的附着力以及涂层表面的映像清晰度(亦称漆膜亮度)。这种粗糙形貌是这类钢板, 在冷轧生产的平整轧制工序, 从毛面轧辊表面复制获得的。

所谓平整轧制, 就是令轧机以较小的压下量(延伸率约为 1%)轧制退火板卷的工艺过程。平整也是冲压用冷轧钢板作为成品前的最后一道轧制工序。赋予冷轧钢板指定粗糙形貌, 是平整轧制工序的 3 个主要任务之一。其另外两个任务是: 消除材料的“屈服平台”(存在“屈服平台”会严重影响冲压成形零件的成品率及表面质量水平)和改善板型(如变卷板为平板等)。

在 20 世纪 70 年代以前, 制备毛面轧辊大多采用喷丸方

法。但随着人们对轿车轻型化和高档化要求的不断提升, 喷丸毛化方法(shot blast texturing, SBT)的局限性日益突出。为提高毛化轧辊的能力和精度, 20 世纪 80 年代前后诞生了电火花毛化技术(electrical discharge texturing, EDT)^[5]和激光毛化技术(laser texturing, LT)^[6], 90 年代诞生了电子束毛化技术(electron beam texturing, EBT)^[7], 本世纪初诞生了 TOPOCROM(电镀铬离散结瘤)毛化技术^[8]。

除提升所轧钢板表面质量和性能水平的功能外, 轧辊毛化还兼有改变轧制摩擦条件和改善轧辊使用性能的作用。激光毛化在改变轧辊表面形貌的同时, 还有快速熔凝改性效果, 因而带来了一些新的用途, 譬如: 用来延长平整机工作轧辊^[9]和冷轧机工作轧辊的寿命^[10]、提高轧机的轧制速度和平稳度^[11]、在普通轧机上实现异步轧制^[12]、改善冷轧钢板的表面质量^[13]以及生产特种薄钢板^[14]等其他多种场合。不过, 轧辊材质和所在工序以及所轧钢板的用途不同, 其采用的激光毛化工艺参数也应不同, 其设计方案需要依据具体情况做相应调整。

2 激光毛化轧辊技术的优势

前面已经提到, 到目前为止, 可以工业应用的轧辊毛化方法有 5 种。为揭示激光毛化轧辊方法的优势所在, 有必要对比分析这些方法的原理和加工特点:

所谓 SBT, 就是利用有一定粒度配比的高硬度弹丸(多为铸钢球), 高速(约 80 m/s)撞击以一定速度旋转的轧辊表面, 使其因挤压塑性变形而粗糙化, 其原理如图 1 所示^[15]。

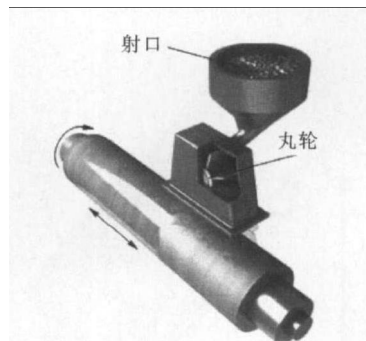


图 1 轧辊喷丸毛化示意^[15]

SBT 轧辊的形貌特征和粗糙程度, 取决于轧辊的硬度和转速以及弹丸的硬度、脆性、大小、速度、流量等多种因素的综合作用效果。喷丸方法毛化轧辊的主要局限性在于:

(1) 毛化效果受辊面硬度制约。平整轧制对轧辊的表面硬度要求很高, 因此平整工作轧辊多采用 9Cr2Mo, GCr15,

2011-07-29 收到第 1 稿, 2011-08-25 收到修改稿。

1) 陈光南, 博士, 研究员, 主要研究方向为先进制造与材料工艺力学。E-mail: gnchen@imech.ac.cn

甚至高速钢等高强度合金制造。轧辊的表层硬度越高, SBT 就必须采用硬度更高但脆性也更大的钢球。这样不仅增大毛化成本, 也使得辊面粗糙度的精确控制更加困难。

(2) 易在所轧钢板表面出现波纹, 即粗糙度中线出现波长在 1~10 mm 之间的表面起伏。这是 SBT 时, 钢球的粒度和脆性以及作用点、作用方向和作用力难以精确控制导致的必然结果。波纹度的存在会严重影响钢板的映像清晰度和成型件的外观。因为, 粗糙度可以被涂层或镀层掩盖, 而波纹度不能 (见图 2^[16])。

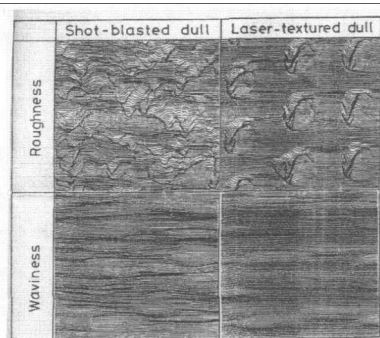


图 2 喷丸板与激光板波纹度对比^[16]

(3) SBT 形貌的耐磨损能力较差。这是因为由钢球撞击作用易导致轧辊表面挤压损伤, 挤出的尖峰易于在轧制过程中折断或磨损。

(4) 噪音和粉尘污染严重。 SBT 过程中, 钢球与轧辊高速撞击, 噪声和粉尘难以避免。

EDT 的工作原理如图 3 所示: 对浸入绝缘工作液中的轧辊和 (按一定阵列分布的) 电极施加一定幅值和频率的脉冲电压, 通过调整轧辊表面与电极之间的间隙, 使极间介质电离、击穿、形成放电通道, 在电场和放电电流产生的高温作用下, 轧辊表层材料被瞬间熔化、汽化并进入工作液, 形成烧蚀坑, 轧辊因此获得粗糙形貌。

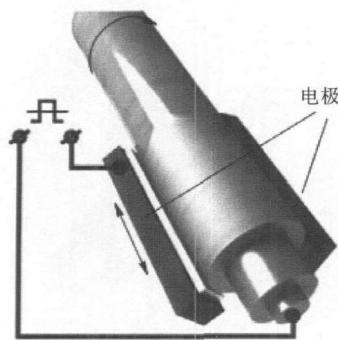


图 3 轧辊电火花毛化示意^[15]

显然, EDT 不像 SBT 那样强烈地受制于辊面硬度, 其表面形貌和粗糙度大小主要取决于电压、电流、脉冲频率、工作介质的介电性能、极间间距及其伺服精度, 以及轧辊的旋转速度。因为克服了 SBT 方法的不足, EDT 毛化方法已在不少大型冷轧薄板厂替代 SBT, 成了毛化轧辊的主体方法。

EDT 方法在辊面形成的粗糙形貌主要为放电烧蚀坑, 熔融物的保留量不如 EBT 和 LT, 故其形貌的耐久性高于 SBT, 但低于 EBT 和 LT。用这种轧辊轧制薄钢板, 其复制效率相对较低, 所生产钢板的毛面形貌以凸包为主。从摩擦学角度看, 钢板表面有这种形貌, 有利于减小冲压时钢板与模具的摩擦力, 有利于材料的流动, 但其映像清晰度逊于以凹坑为主的毛面钢板。

EBT 的工作原理如图 4 所示: 利用具有一定能量密度的电子束, 以一定角度逐点辐照以一定转速旋转的轧辊表面, 通过电子束与辊面材料相互作用, 产生的热能形成熔池, 产生的动能将熔融物迁移至熔池边缘, 使辊面获得指定形貌和粗糙度。

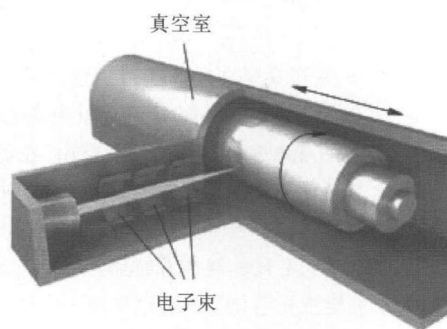


图 4 轧辊电子束毛化示意^[15]

电子束毛化轧辊方法的优势是: 轧辊材料对于电子束能量的吸收能力高于激光, 提高电子束的能量水平比提高激光束的能量水平容易且成本较低。

电子束毛化轧辊方法少有工业应用的主要障碍是: 电子束加工必须在真空条件下进行, 而如此大的真空设备及其运行成本一般冶金企业难以承受。

首套 TOPOCROM 毛化轧辊工业装备 2006 年 12 月在韩国浦项钢厂正式启用^[17]。该方法利用电镀铬过程中的“结瘤”特点, 在轧辊 (阴极) 表面诱导生长离散分布的球形凸包, 其工作原理如图 5 所示。与激光毛化和电子束毛化方法不同, 该方法只有“塑”没有“雕”, 而且“塑”到轧辊表面

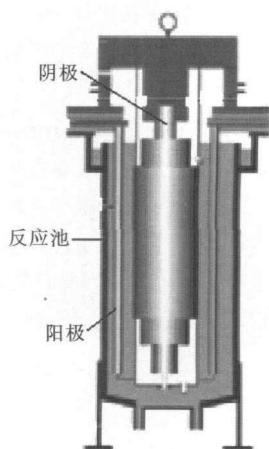


图 5 轧辊 TOPOCROM 毛化示意^[17]

的金属铬, 比轧辊材料更硬、更耐磨。

TOPOCROM 方法有两大卖点: (1) 显著提高轧辊的使用寿命, TOPOCROM 毛化轧辊的寿命不仅大大高于喷丸辊, 也明显高于 EDT 轧辊和 EDT 后再镀铬的轧辊; (2) 所轧钢板表面形貌为大小和分布都随机的球形凹坑构成 (见图 6), 其映像清晰度明显优于 SBT 钢板。

TOPOCROM 毛化方法的局限性在于: 它只能在辊面

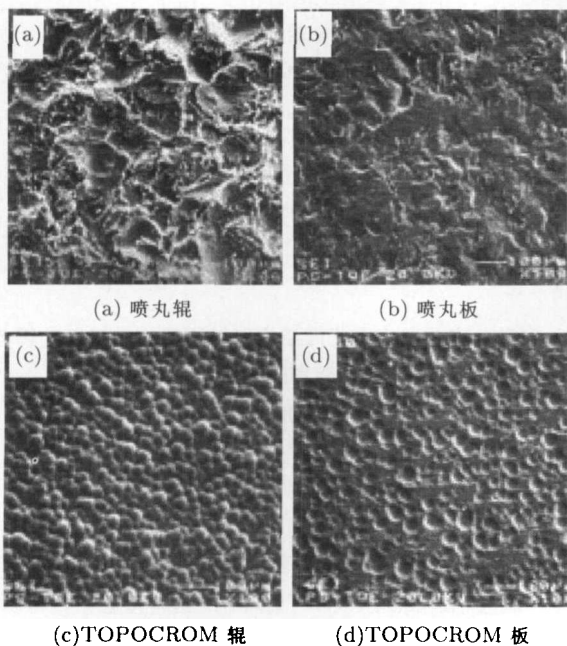


图 6 喷丸与 TOPOCROM 毛化形貌对比^[17]

制造凸包 (即只能在板面制造凹坑)。但是, 就提高冲压成形能力而言, 钢板表面只有凹坑是不够的。因为, 表面均匀分布球形微凸包和凹坑 (即应该在平整工作轧辊的表面制造均匀分布的球形微坑和凸包), 更利于降低钢板的摩擦系数和改善其冲压流动性, 因而也更符合摩擦学原理。其次, 高昂的电镀铬设备系统运行以及污染处理等费用也是一般企业难以承受的。不过, 浦项钢厂提供的信息^[17]认为, 用 TOPOCROM 装备毛化轧辊, 其成本比 EDT 还要低 30%~40%。

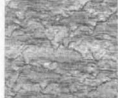
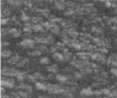
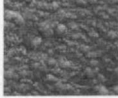

LT 方法的工作原理是: 采用高能量密度和高重复频率的脉冲 (CO_2 或 YAG) 激光束, 按照一定的分布, 逐点使轧辊表层材料熔化并形成微小熔池, 与此同时, 用辅助气流 (一般为 N_2 气) 对熔融物进行“雕”、“塑”, 轧辊因而获得既有凹坑亦有凸包的微尺度毛面结构。激光毛化轧辊的效果主要取决于激光脉冲的功率、频率和波形, 辅助气体的种类、流速、方向和流量, 轧辊表层材料的材质以及轧辊的转速及其控制精度 (参见文献 [21])。

激光毛化轧辊方法的主要优势是: 可在精确制造粗糙形貌的同时使辊面得到改性强化。

激光毛化轧辊方法的主要局限在于: 毛化形貌和分布过于规则, 容易在所轧钢板表面出现宏观可见的布纹花样。

根据上述分析和表 1 所列 5 种方法的基本特点, 不难确定: LT 和 TOPOCROM 方法虽然都具有毛化能力强和毛化寿命长久的优势, 但因能制造多种形貌, 满足更广泛的需求, 且没有电镀铬污染问题、成本相对低廉, 如果能设法改进其规则性局限, LT 方法将会在工程上有更大的发展和应用空间。

表 1 5 种轧辊毛化方法的基本特点比较

参数	SBT ^[18]	EDT ^[19]	EBT ^[15]	TOPOCROM ^[19]	LT ^[2]
所轧钢板表面毛化形貌特征			与 LT 类似 (尚无工业应用)		
形貌特点	随机	随机	规则	随机	规则
毛化能力 $R_a/\mu\text{m}$	1.5~6.0	0.5~10.0	0.5~25.0	0.2~20.0	0.5~10.0
峰谷频度 Pc/cm^{-1}	< 70	50~150	50~150	50~200	50~150
与辊材的相关性	强烈	轻微	轻微	轻微	轻微
加工耗时	1	1~4	1.5~3	3	1.5~7.5
粗糙度分散性	高	低	低	低	低
粗糙度耐久性	很低	高	高	很高	很高

毛化方法不仅决定了轧辊表面形貌, 还可以通过平整轧制工艺影响所轧钢板的表面形貌和性能。文献 [20] 研究了不同毛化轧辊方法对所轧钢板映像清晰度的影响规律: 在粗糙度相同 (比如 $R_a = 10\mu\text{m}$) 的情况下, 激光蒸发型毛面 (YAG 激光毛化) 钢板的 DOI 最高, 与光面板 (映像清晰度高但漆膜附着力差) 相当, 其次是激光熔融型 (CO_2 激光毛化) 毛面板, 再次是电火花毛面板, 最差的是喷丸毛面

钢板。该图的实验时间是 20 世纪 90 年代前后, 因此没有 TOPOCROM 毛面板的数据。

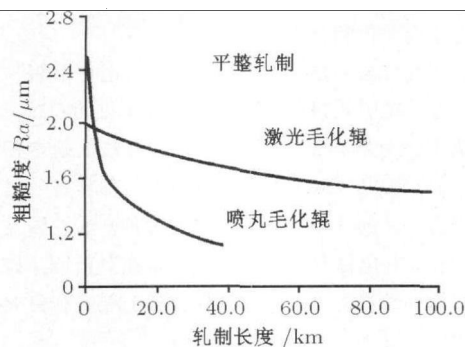
文献 [20] 还研究了喷丸毛面板和激光毛面板摩擦系数与冲压拉伸的速度关系, 其结果表明: 不同毛化轧辊对所轧钢板的摩擦系数也有明显影响, 即不论有、无润滑, 激光毛面板的摩擦系数均明显低于喷丸毛面板, 且激光毛面板摩擦系数随拉伸速度提高而下降的程度也明显大于喷

丸毛面钢板。这一结果显然与两种钢板的表面毛化形貌不同相关。

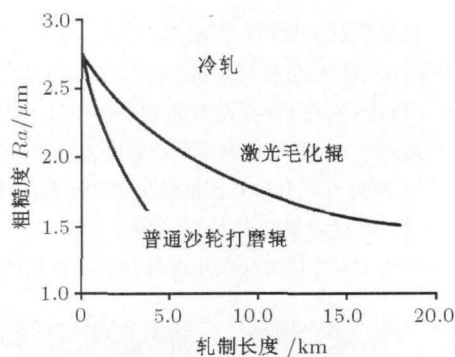
3 激光毛化为延长轧辊寿命的原因

合适的激光毛化工艺可以提高冷轧工作轧辊寿命,这是工程实践得出的结论。这里仅举其中一例予以说明^[2,21]。

用同材质(9Cr2Mo)普通砂轮打磨辊(General Roll)、喷丸毛化辊(SBT Roll)和激光毛化辊(LT Roll),在400mm宽森吉米尔二十辊冷轧机上进行了轧制寿命(用所轧合格带钢的长度表征)对比试验。其结果(见图7)表明:在平整轧制(压下量1%)条件下轧制0.36mm退火薄钢带,用喷丸毛化轧辊只轧制了40km,其粗糙度 R_a 便由 $2.5\mu\text{m}$ 下降到不足 $1.2\mu\text{m}$,即粗糙度减小了50%以上;但采用激光毛化轧辊轧制了100km,其粗糙度 R_a 仅从 $2.0\mu\text{m}$ 下降到 $1.6\mu\text{m}$,即粗糙度仅减小了20%。在冷轧(压下量50%)条件下轧制1.0mm厚带钢,采用普通辊轧制5km,其粗糙度 R_a 便由



(a) 平整时



(b) 冷轧时

图7 不同方法毛化轧辊的寿命比较

$2.7\mu\text{m}$ 下降到不足 $1.4\mu\text{m}$ ；而初始粗糙度相同的激光毛化辊轧制18km后，其残余粗糙度仍大于 $1.5\mu\text{m}$ 。

关于激光毛化方法延长轧辊寿命的机制，从以下3方面予以讨论^[21-22]：

3.1 离散分布的激光毛化微结构可以更有效地改善轧辊与轧材的接触条件(形貌增强机制)

由激光“雕”、“塑”形成的辊面形貌及其微结构如图8所示。其凸出原辊面的部分，即由熔融物“堆塑”成的球冠，在轧制过程中可以有效“咬”住所轧薄板，二者之间不易因发生相互滑动而导致划伤和磨损。其凹陷部分，即由熔融物被“雕除”形成的封闭型凹坑，在轧制过程中可以有效储存轧制液并形成高压液膜(见图9)。这种接触条件可以有效避免轧辊与所轧薄板发生粘连。粘连现象会严重影响冷轧生产，一旦出现，轧辊必须下线修磨，所轧钢板也可能因为表面质量受损而报废。

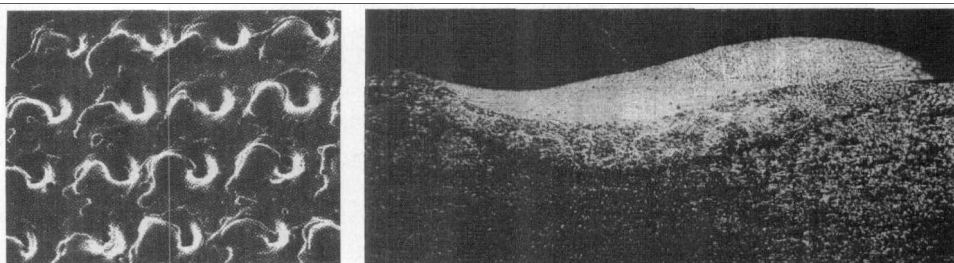


图8 YAG激光毛化轧辊的表面形貌与剖面结构(单脉冲)

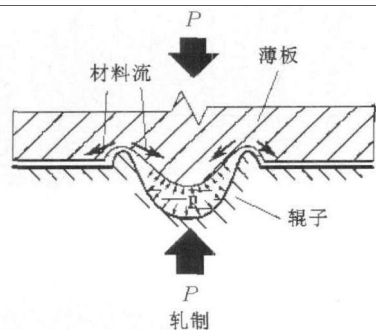
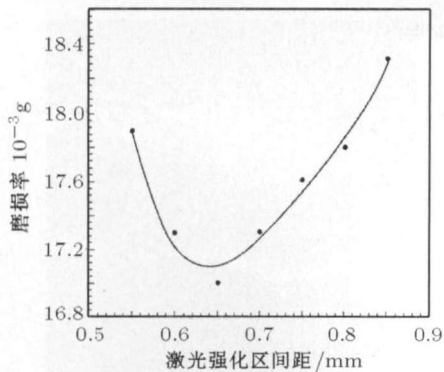


图9 激光毛化辊轧制时板辊接触情况示意

3.2 离散分布的高硬度激光快速凝固组织及固态相变组织可以显著提高轧辊的耐磨损能力(改性强化机制)

激光毛化点的剖面结构(图8右),由表及里大致可以分为3层:即快速凝固层(即白亮带,为纳米晶甚至非晶组织,其硬度 $\geq 900\text{HV}$)、固态相变层(为针状或板条马氏体组织,其硬度 $\approx 800\text{HV}$)和基体(一般为马氏体和贝氏体组织,其硬度 $\approx 700\text{HV}$)。离散分布且硬度明显高于基体的硬化点,当然有利于提高轧辊的耐磨损能力。

进一步的研究结果^[23]表明:激光毛化轧辊的耐磨损能力还与硬化点的间距大小密切相关。由图10不难看出,在激光毛化点直径为 0.65mm 的情况下,两毛化点中心间距与

图 10 激光强化区间距与磨损率的关系^[23]

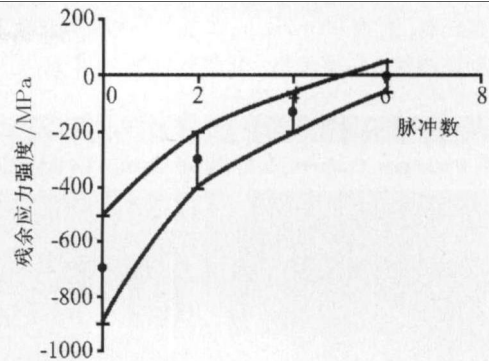
毛化点直径相同时样件的磨损量最小，即两毛化点相切时样件的耐磨损能力最强；两毛化点间距小于（即毛化点相互搭接）和大于毛化点的直径，样件的耐磨损能力都呈下降趋势。

3.3 快速熔凝形成的拉应力可以有效缓解轧辊表层的残余压应力强度（应力增韧机制）

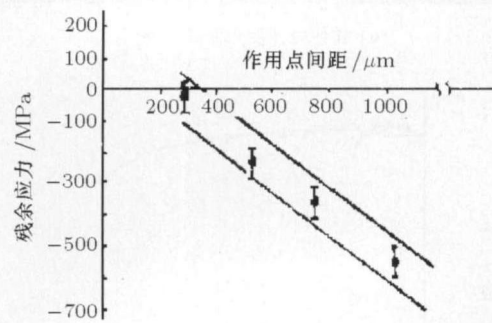
因轧制变形抗力很大，冷轧工作轧辊多采用高强度合金钢甚至高速钢制造，其表层还要进行淬火处理以进一步提高辊面硬度。淬火提高辊面硬度的机制有两个：即马氏体相变和因马氏体相变体积膨胀效应产生的残余压应力。强韧相克是一般淬火处理的一对难以协调的矛盾：即马氏体相变愈充分，残余压应力愈大，轧辊表层的硬度愈高，其耐磨损能力和使用寿命也愈高；但马氏体相变愈充分，残余压应力愈大，轧辊表层材料的脆性也愈大，愈容易出现崩裂现象，严重的甚至可能导致整个轧辊报废。因此，辊面硬度愈高，制造难度愈大，成本愈高。

在单个毛化点直径为 $200\mu\text{m}$ 、熔凝层厚度约为 $10\mu\text{m}$ 、毛化点间距与毛化点直径相同的情况下，我们以 9Cr2Mo 冷轧辊为对象，用 X 光应力仪测定了轧辊表层残余应力强度，分析了其与毛化点作用激光脉冲数的关系，其结果如图 11 所示^[2,21-22]。在图 11(a) 中可以看到：激光毛化前轧辊表层为压应力状态，其强度约为 $-900 \sim -500\text{ MPa}$ ；当每个毛化点作用 2 个激光脉冲时，轧辊表层的压应力强度下降到 $-400 \sim -200\text{ MPa}$ 范围；当每个毛化点作用 4 个激光脉冲时，轧辊表层的压应力强度下降到 $-250 \sim -70\text{ MPa}$ 范围；当作用于每个毛化点的激光脉冲数增加到 6 个时，辊面开始显示拉应力状态。这一情况表明：在本试验条件下，激光毛化处理可以有效缓解轧辊表层的残余压应力状态，即有效改善辊面的韧性；但作用于每个毛化点的激光脉冲数不宜超过 6 个，否则，轧辊表层的残余应力状态将会由压应力转变为拉应力，轧辊的使用性能和寿命将因此受损。

图 11(b) 表明：在每个毛化点作用两个激光脉冲的情况下，轧辊表层残余压应力强度随毛化点间距的增大（毛化点密度减小）而减小。如果希望利用 LT 方法调整辊面残余应力状态、改善其韧性，应该将毛化点的间距限制在毛化点直径（ $200\mu\text{m}$ ）的 1 倍至 5 倍（ $1000\mu\text{m}$ ）之间，小于此范围（即毛化点相交），辊面将呈现拉应力，其性能将恶化；大于此范



(a)



(b)

图 11 激光毛化脉冲数 (a) 和毛化点间距 (b) 与辊面残余应力强度的关系

围，则 LT 的处理效果不足以影响辊面残余压应力场，其增韧作用不能充分发挥。

4 激光毛化能改善钢板的塑性变形能力的原因^[24]

既然没有激光的直接作用，那激光毛化为什么能影响钢板的塑性变形能力呢？以下分 3 个部分来讨论这一问题：

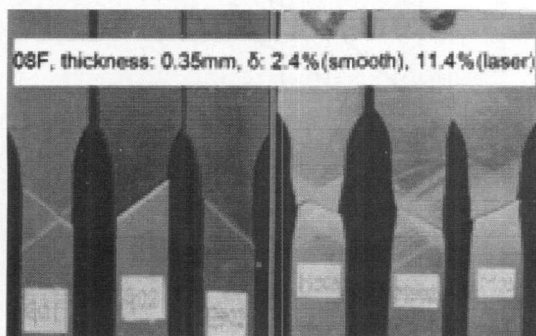
4.1 激光毛化与钢板或钢带的关联

前面已经提到，激光毛化轧辊时，轧辊表面既有形貌改变，亦有组织和性能的改变，还可能产生残余拉应力。但是，用 LT 轧辊平整轧制钢板或钢带时，除表面形貌外，轧辊不可能将激光的其它作用效果传递给钢板或钢带。板与辊之间的形貌传递关系（参见图 9）是：辊面的凸包对应钢板表面的凹坑（其传递效率可达 80%），辊面的凹坑对应钢板表面的凸包（其传递效率一般在 20% 左右）。需要特别指出的是，平整轧制时，激光毛化轧辊的作用，除了约 1% 的整体压延变形外，便是通过形成上述凸包和凹坑，在被轧钢板或钢带表面上的对应部位，形成离散分布的附加塑性变形硬化效应和残余压应力。这应该就是 LT 轧辊轧制的毛面钢板与砂轮磨光辊轧制的光面钢板塑性变形能力存在显著差异（见图 12）的原因所在。

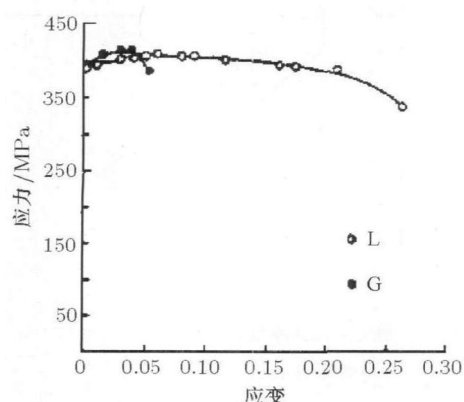
4.2 毛化形貌对钢板或钢带的塑性变形能力的改善

通过中途停机更换轧辊的办法，分别采用砂轮磨光轧辊和激光毛化轧辊，对同一卷 0.35 mm 厚 08F 冷轧退火钢带

进行平整轧制, 轧速 90 m/min, 在获得的光面板和激光毛面板上分别取样进行拉伸试验, 其结果如图 12 所示。



(a) 样件拉伸变形断裂形态



(b) 应力应变曲线

图 12 08F 钢光面板与激光毛面板拉伸性能对比

从图 12(b) 可以清晰地看出, 光面板样件 (G 板, 表面光泽发暗者) 变形区域很小, 其残余塑性变形 (延伸率) 只有 2.4%。而激光毛面板样件 (L 板, 表面呈银灰色者) 的变形区非常宽阔, 其残余塑性变形高达 11.4%, 接近光面板的 5 倍; 板面上的丰富滑移带表明, 其塑性变形在广泛区域内得到充分发展, 其变形集中和最终断裂是若干个塑性变形区域竞争的结果。从 G 板和 L 板的拉伸变形曲线上 (图 12(b)), 我们可以更清晰地看出两者的变形差异。

4.3 激光毛化改善钢板塑性变形能力机制的讨论

我们已经知道, 在激光毛面钢板的表面有大量均匀分布、以凹坑和凸包为特征的硬化点。扫描电镜下的动态拉伸试验表明: 由于硬化程度较高, 激光板的塑性变形首先发生在硬化点之外的其它区域, 因此出现滑移线在毛化点周边富集的现象 (见图 13), 在这些区域的变形程度达到其预变形程度时, 硬化点才会参与样件整体的变形。这就是说, 激光板拉伸变形时, 离散分布的硬化点客观上发挥了均化变形、稳定变形和延缓变形集中的作用。硬化点的这种作用应该是激光板的延伸率明显高于同材质光面板的主要原因。

需要指出的是: 这里阐述的带硬化效应的表面形貌 (粗糙度) 对材料塑性变形能力的影响, 主要针对薄钢板和薄钢

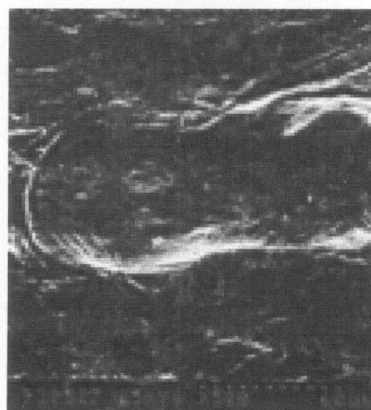


图 13 滑移线在激光板面硬化点周边塞集的形态 (SEM)

带而言, 且材料愈薄其表面形貌的影响愈突出。从塑性变形损伤力学角度看, 表面起伏会减小材料的有效承载厚度, 因而表面粗糙度也是一种损伤, 即表面损伤。材料愈薄, 表面起伏在材料厚度中所占的比重越大, 表面损伤对材料塑性变形能力的影响也愈严重。

此前的研究结果^[2,25]表明: 对于低碳冷轧钢板, 其拉伸变形允许的表面损伤极限尺度不超过板厚的 1%。若薄板的厚度为 1 mm, 其表面损伤的极限尺度应小于 10 μm。对于一般汽车钢板, 满足其成形要求的粗糙度 R_a 值一般在 2.0 μm 左右, 此时表面粗糙度的最大起伏值 R_{tm} (粗糙度曲线上相邻的最高峰值和最低谷值之和) 不超过 10 μm。因此, 这一尺度范围内的粗糙度不会影响钢板的拉伸塑性变形性能。但是, 对于厚度更小的薄板, 譬如厚度 < 0.1 mm 的极薄板, 就不能简单地依据上述结论推演, 将其表面损伤的极限值定在 < 1 μm 的范围。因为, 对于这类极薄板, 表面形貌和粗糙度对其性能的影响较一般钢板更为显著。

此外, 在一些关于激光毛化技术效果的宣传资料中, 有关于钢板的抗拉强度因采用了激光毛化技术而提高说法。前面已经阐明, 激光毛化轧辊和喷丸或砂轮打磨轧辊平整轧制的冷轧钢板, 除表面形貌外并无其他不同, 而与这种表面形貌差异对应的不过是板面局部 (凸包和凹坑处) 塑性变形程度的差异。换句话说, 在常规的轧钢机上, 不论采用何种方法制备的轧辊轧制钢板, 也不论其压下率是多少, 除了变形程度差异外, 轧制过程不可能改变钢板的材质。这种变形程度差异, 特别是表层局部的变形程度差异, 只可能影响钢板的剩余塑性变形能力和屈服强度 (钢板愈薄其影响愈显著), 不可能改变钢板的抗拉强度。

5 关于 LT 技术改进和发展方向的思考

到目前为止, 轧辊激光毛化所采用的不外 CO_2 和 YAG 两种光源。要改善 LT 形貌的规则性问题, 对于 CO_2 激光装备, 可以通过调整其断光盘的占空比和反光系统来改善; 对于 YAG 激光装备, 则可以通过采用随机程序控制光开关的办法来改善; 也可以采用多个激光头 (设置不同的光束和气流入射角度), 在提高毛化效率的同时改善形貌的规则性。

近些年得到长足发展的半导体泵浦 YAG 激光器, 特别

是半导体激光器和光纤激光器,其使用寿命和维护成本均大大优于目前采用的 CO₂ 激光器和 YAG 激光器。新一代激光毛化轧辊装备应设法采用这些新型光源,以提高其工作的稳定性和可靠性,但需要解决激光束波长与脉宽的选择及调控,以确保激光对于钢的熔化效率等问题。

根据激光毛化轧辊原理,采取微区熔凝或熔覆合金化的方法提高其凸包制造能力,使之达到甚至超过 TOPOCROM 方法。已有工作证明了这一想法的可行性^[26]。眼下需要开展的工作是,选择合适的合金粉末体系和优化激光工艺条件。

毛面金属薄板在汽车、高铁、航空航天、家用电器以及食品包装等行业都有广泛用途。一般讲,薄板的材质和用途不同,其对表面形貌的要求也不尽相同,但归纳起来,有以冲压或深冲压性能为主、以映像清晰度为主、以及二者兼顾三大类。

对于以冲压性能为主要诉求的薄板,从摩擦学角度设计,其表面形貌应该为均匀分布的球形凸包和凹坑结构。这类薄板显然只能采用激光而不是 TOPOCROM 毛化轧辊轧制,激光毛化轧辊方法的发展方向是如何进一步提高其熔化效率和熔融物的精确“雕”“塑”水平。

如果以映像清晰度为主要诉求,则表面只有凹坑的薄板明显优于表面只有凸包的薄板。这种薄板必须采用只有凸包的毛化轧辊轧制, TOPOCROM 目前就是以此作为其关键卖点之一。其实,如果解决了激光微区熔覆合金化工艺,激光毛化将比 TOPOCROM 更具优势,因为它不存在环境污染问题。

工程上还有一些情况,是既需要薄板具备优良的冲压性能,又要求其成形产品具有高的映像清晰度,比如汽车覆盖件钢板、镀镍电池壳带钢、罐头用镀锡薄板等。对于这类产品的生产,激光毛化轧辊技术比 TOPOCROM 技术更具优势,因为它的造型功能更多样化。

参 考 文 献

- 1 杨明江,陈光南,吴坚等.高重频调制多脉冲 YAG 激光刻花系统及加工方法.中国专利,专利号: 92113223.9.
- 2 陈光南.轧辊激光毛化技术及其应用.中国科学院力学研究所博士后(1991-1993)出站报告,1993.9
- 3 国家科委文件(93)国科发成字第 500 号.关于下达《国家科技成果重点推广计划》1994 年增补项目指南的通知,项目名称: YAG 激光毛化轧辊技术及装备,项目编号: 工 4-1-4-22.
- 4 刘建功.钢材产品质量亟待解决的问题浅析.轧钢,1999,16(6): 5-6
- 5 Apparatus for electrical discharge machining of cylindrical work. United States Patent, No.4242557,1980
- 6 Crahay J. Method and apparatus for forming microcavities on the surface of a rolling mill roll. *United States Patent*, No.4322600, 1979
- 7 Dolves J. Electron beam texturing of rolls. *Iron and Steel Engineer*, 1991, 68(8): 33-38
- 8 Mull K, McLean G, Bolch T, et al. TOPOCROM®-A superior method to texture work rolls. *Materials Science and Technology*, 2004, 1: 553-568
- 9 陈光南,杨明江,孙传香等.用于改善冷轧薄钢板使用性能的平整工作轧辊.中国专利,专利号: 93221264.6
- 10 陈光南,杨明江,吴坚等.用于解决薄钢板热处理退火粘结问题的冷轧工作轧辊.中国专利,专利号: 93221266.2
- 11 钱昆庆,陈光南等.用强激光点状加工方法优化材料性能的机理及应用研究.金属材料研究,1999,28(3): 1-20
- 12 高宏,陈光南等.利用激光毛化技术在普通冷带轧机上实现异步轧制.钢铁,1998,33(3): 63-66
- 13 陈光南,沈还,朱怀清.激光毛面钢板的使用性能.钢铁,1996,5: 13-16
- 14 朱怀清,陈光南,聂德钧等.一种表面带有特殊形貌与图案的冷轧薄钢板.中国专利,专利号 93221265.4
- 15 Gorbunov AV, Belov VK, Begletsov DO. Texturing of rollers for the production of auto-industry sheet. *Steel in Translation*, 2009, 39(8): 696-699
- 16 Nishimura K, et al. Development of high image clarity steel sheet by laser texturing. *Iron and Steel Engineer*, 1991, 8: 46-56
- 17 网络资料, www.topocrom.com, 2011.7
- 18 Bragrad A, Crahay J, Desmul W.(CRM--Sidmar). Texturing the Roughness of Work Roll by Means of Laser Pulses: The Process Tomorrow? Congress: Advanced in Cold Rolling Technology, London,1985
- 19 孙大乐,姚利松,范群等.不同毛化冷轧带钢表面形貌评价.百度文库,2010.12.5
- 20 Nishimura K, et al. Development of high image clarity steel sheet by laser texturing. *Iron and Steel Engineer*, 1991, 8: 46-56
- 21 陈光南.毛化轧辊新方法及其应用.应用激光,1997,16(4): 155-158
- 22 陈光南.材料力学性能的激光调控.中国激光,2011,38(6): 0601006-1-11
- 23 罗耕星.脉冲激光离散重熔热物理及组织性能研究.[博士论文].中国科学院力学研究所,1999
- 24 Shen H, Chen GN, Li GC. The plastic instability behavior of laser textured steel sheet. *Materials Science and Engineering A*, 1996, A219/1-2: 156-161
- 25 陈光南.板料拉伸变形的损伤、失稳与成形极限研究.[博士论文].北京:北京航空航天大学,1991.7
- 26 何云峰,都东,岁波等.轧辊表面球冠状微凸形貌的激光加工.应用激光,2002,22(3): 327-330