

专题讨论——桥梁焊接

焊接钢桥几个值得研究问题的探讨

王元良,陈明鸣,孙 鸿,李兴中

(西南交通大学,四川 成都 610031)

摘要:根据钢桥研究中一些试验结果(大多未公开发表),总结分析焊接钢桥几个值得研究的理论问题,包括高速列车运行条件下桥梁焊接接头的力学行为、焊接接头韧性及其在断裂控制中的作用、焊接接头材质性能不均质性的分析和控制、结构的应力集中和材料的应力集中敏感性、焊接残余应力及其控制,以供今后钢桥焊接技术的发展作一参考。

关键词:焊接接头韧性;焊接接头材质性能不均质性;材料的应力集中敏感性;焊接残余应力

中图分类号: TU391;TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2009)10-0001-11

Discussion of the question about welding of steel bridge construction

WANG Yuan-liang, CHEN Ming-ming, SUN Hong, LI Xing-zhong

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: According to test results of steel bridge construction, this paper analyzes some theoretic questions researched worthily, including dynamic actions of welding joints, toughness of welding joint and its actions in fracture control, analysis and control of inhomogeneity of joints's material, stress concentration of structure and sensitivity of stress concentration of material, residual stress and its control on bridge construction under the high speed rail operation condition. The results researched can be provided for reference to the welding technologies for steel bridge construction.

Key words: joint toughness; inhomogeneity of joint's material; sensitivity of stress concentration; residual stress of welding

1 高速列车运行条件下桥梁焊接接头的力学行为

1.1 高速列车运行的要求

我国大力发展高速铁路,客运时速达 350 km/h 及以上,将使桥梁结构特别是焊接接头的脆断倾向和疲劳断裂倾向加大。焊接接头是组织性能不均质区、拉伸焊接残余应力峰值区和几何应力集中区相互重叠的部位,受力情况复杂,力学行为特殊,是桥梁结构安全可靠性和使用寿命控制的关键。过去铁路钢桥较为重视疲劳和脆断问题,原因是铁路钢桥的载荷比[活载/(活载+静载)]比公路桥大得多,因此

在采用新结构、新材料和新工艺时要比公路钢桥慎重得多。铁路钢桥已发展了几十年,而公路桥的发展是近十年才发展起来的,虽然公路钢桥会吸收铁路钢桥的先进经验,但从高强钢的应用、新型焊接结构的采用和焊接新技术的发展方面来看,铁路钢桥比公路钢桥要缓慢一些。有一种观点甚至认为由于钢桥单位长度静载小、刚度小,在高速铁路不适用使用钢桥,这还值得探讨。

1.2 高速列车在高速线路运行特点

高速列车已由原动力集中式改为动力分散式,由集中载荷变为分散载荷;加之无缝钢轨和整体道床也改善了线路的承载情况,钢桥的刚度完全可以通过合理设计来改进,因此必须将列车—线路—钢桥高速列车运行条件下桥梁焊接接头的力学行为作为一个总体系统来研究其力学行为的变化,如用总系统的载荷谱来确定其力学行为,由此来确定钢

收稿日期:2009-09-22

作者简介:王元良(1929—),男,重庆人,教授,中国桥梁钢结构协会理事,四川省及成都市焊接专业委员会副主任委员,主要从事焊接工程方面的软科学研究以及焊接材料、自动化系统工程的研究和教学工作。

桥的结构形式,选择合理的结构材料和焊接工艺,预期高速铁路钢桥仍有其应有的地位。

1.3 焊接结构形式的特点

从焊接结构形式讲,箱型结构较桁架结构有利,原因有三:一是整体刚度特别是抗扭刚度大;二是减少所用钢板厚度,以减少脆性倾向(钢板越厚,其脆性转变温度越高)和焊接难度;三是焊接过程易于自动化。问题是桥梁运输安装焊接难度大。另外钢—混凝土结构也有其独特的优点,可充分利用钢—混凝土各自的力学特性,如钢管—混凝土结构和钢

构—混凝土结构。箱形结构和钢—混凝土结构在公路桥上使用较多,板厚很少超过 25 mm;铁路桥用栓焊桁架结构较多,板厚可达 56 mm,个别达 80 mm。板厚对韧脆转变温度的影响如图 1 所示。由图 1 可看出,日本 62CF 钢的 50 mm 厚钢板的中值转变温度为 -40 ℃,比 25 mm 厚钢板的 -62 ℃ 要高 22 ℃,与断口中值接近。相同板厚的国产(C)比日产(J)的转变温度要高一些,用于九江桥的 13MnVNq 钢 56 mm 厚板转变温度更高。虽然目前微合金化钢材对此有所改善,但此规律依然存在。

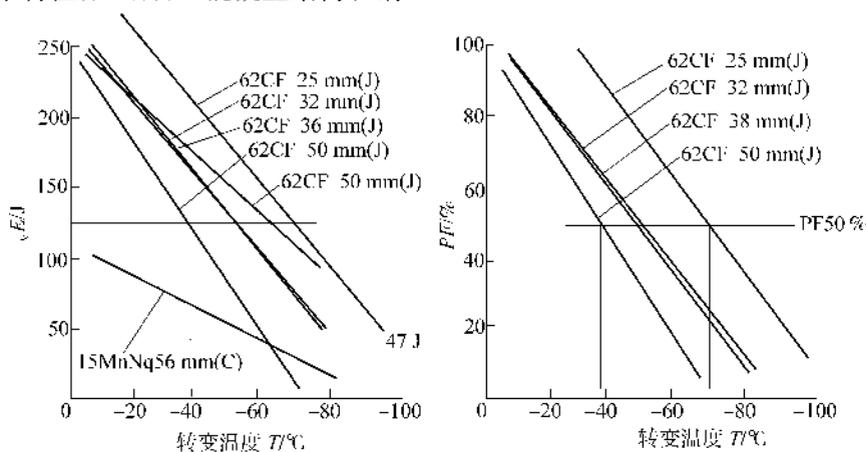


图 1 板厚对韧脆转变温度的影响^[1]

2 焊接接头韧性及其在断裂控制中的作用

焊接接头强韧匹配控制着结构在焊接过程中或运行过程中局部区域启裂、扩展、止裂、再扩展直至延时断裂或脆断。这个过程除外载特性外,与焊接接头强韧匹配内在因素有很大的关系。过去是采用强度和韧性标准来控制,但理论基础研究较少,在高速重载运行中强韧匹配的控制作用究竟如何,标准如何才算合适都有待研究。焊接接头的韧性在防止焊接结构使用时的启裂、扩展和断裂中起关键作用,而在焊接接头中韧性受焊接工艺影响最大,因而焊接接头的韧性控制特别重要。

2.1 焊接接头的韧性标准^[1]

很多国家都有焊接结构用钢的韧性标准。如国际焊接学会 IIW 按使用要求分级为:低应力结构用钢——不作韧性要求;不考虑脆断的一般结构用钢——不作韧性要求;考虑脆断的结构用钢—— $\sqrt{E} \geq 27 \text{ J}(0 \text{ } ^\circ\text{C})$;首先考虑脆断的结构用钢—— $\sqrt{E} \geq 27 \text{ J}(-20 \text{ } ^\circ\text{C})$ 。

这个标准是一个粗略的通用标准,所以在其他标准中还考虑了其他诸多因素。

(1)JISB-8250:低碳钢大于等于 27 J;SM490 钢大于等于 40 J;SM590 钢大于等于 47 J(考虑钢材强度级别)。

(2)BS5500:490 钢板厚 20 mm 以下大于等于 27 J;板厚 20~30 mm,大于等于 47 J;板厚 30~40 mm,大于等于 60 J(考虑板厚)。同级焊接 20 mm 以下板厚的大于等于 27 J;板厚 20~30mm,大于等于 38 J;板厚 30~40 mm,大于等于 47 J(考虑焊接)。

(3)BS3480-82:1 级 $\sqrt{E} = \sigma_s \cdot \delta / 710$;2 级 $\sqrt{E} = \sigma_s \cdot \delta / 420$ (单位:J)(考虑钢材承载级别)。

有应力集中 $\sqrt{E} = \sigma [0.3 \delta (1+0.7)/355]$ (单位:J)(考虑板厚 δ 和应力集中系数 K_t)

(4)BS1515 附录 C:(考虑板厚 δ 和残余应力)按宽板试验所确定的温度来作设计温度,根据板厚和是否后热处理来确定大于等于 27 J(材料 $\sigma_b < 450 \text{ MPa}$)或大于等于 40 J(材料 $\sigma_b > 450 \text{ MPa}$)的选材材料参考温度,如图 2 所示。

由此看出,韧性要求除了必须考虑设计最低温度外,还要考虑材料屈服极限 σ_s 、板厚 δ 、成分锰碳比以及是否去应力。另外焊接接头的韧性要求一

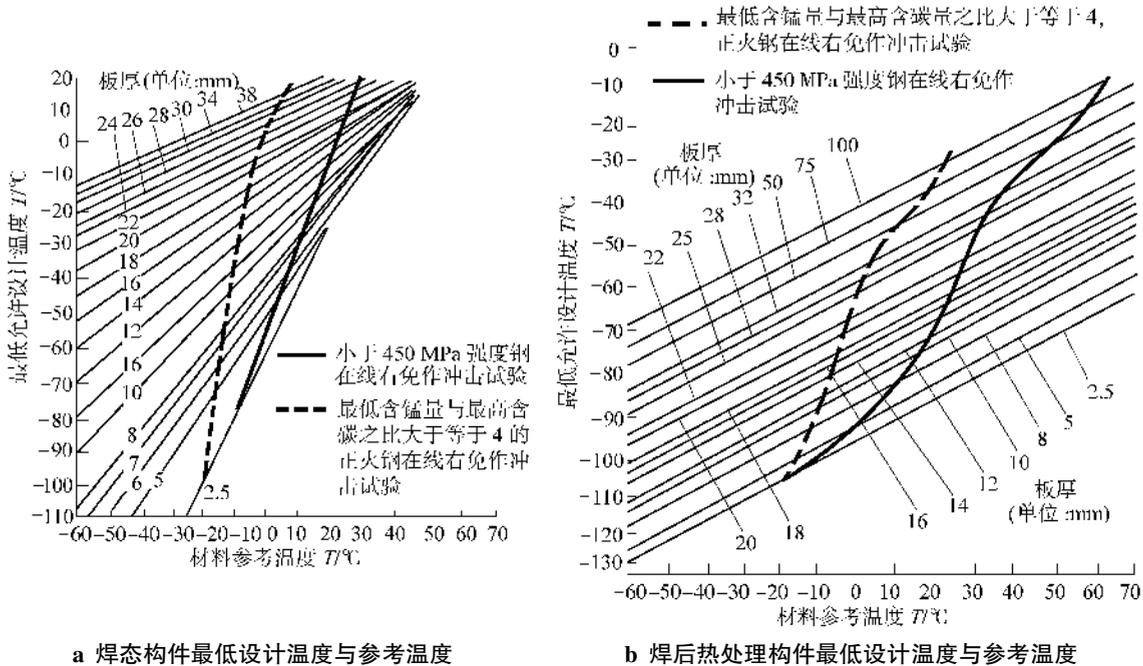


图 2 宽板试验所确定的设计温度与选材参考温度的关系^[1]

般应低于母材。同时材料的试验温度不能等同于设计使用温度。试验温度应由材料强度级别、板厚、容许使用温度和是否热处理去应力等综合因素而定。

2.2 典型工程的韧性要求及实际水平

日本在 20 世纪 80 年代修建新干线高速铁路时的港大桥以及 20 世纪 90 年代中晚期建成的中国孙口黄河大桥和芜湖长江大桥的钢材韧性情况如表 1 所示。由表 1 可知,港大桥母材标准除要求一定温度的 \sqrt{E} 外,还要求韧脆中值转变温度 $\sqrt{T_E}$ 。由各种焊接方法焊缝韧性实际水平看,以埋弧焊缝韧性水平最低,但也接近母材水平,富氩气保护焊和焊条电弧焊高于埋弧焊,富氩气保护焊还略高于焊条电弧焊但其值波动较大。另外韧脆中值转变温度 $\sqrt{T_E}$ 与韧脆断口转变温度 $\sqrt{T_S}$ 接近。孙口黄河大桥也采用了近口韩国和日本的 SM490C 钢,提出了远高于日本港大桥的韧性要求,而且实际供货水平远高于标准要求,为提高焊接接头韧性奠定了基础。芜湖长江大桥应用了我国生产的 14MnNbq 钢,成分与 SM490C 极其相近,母材的成分和性能标准要求高于孙口桥,但韧性仍有很大的富裕量。几种接头各区韧性好,在几种接头中以对接最好;在各区比较中以熔合区较低,但在厚板对接、T 接和角接时与焊缝接近。由两个工厂对两组对接的焊接接头各区的系列温度试验结果综合估计表明,两种对接焊接接头各区的中值转变温度均小于等于 -30°C 。焊接接头各

区韧性与母材相比均有较大差距,而焊接接头各区的韧性又是防止早期启裂和裂纹扩展影响结构安全的关键,因此如何提高焊接接头韧性还有很多工作要做,其中焊接方法、焊接规范、焊接材料的选择就尤为重要。

2.3 焊接接头的韧性控制

微合金化对焊接结构用钢韧性有影响:如 16Mnq 与日 SM490C、韩 SM490C 和中 14MnNbq 比较,后三种与 16Mnq 不同的是 C、S、P 含量略低,主要是加入了微量 Nb,从而强度提高,特别是低温韧性有很大提高。日本在发展 SM490C(HT50)、SM570C(HT60)、SM690C(HT70)、SM780C(HT80)时,提高了合金量,使 C_{eq} 从 0.44 逐次提高到 0.76。因而焊接性能较差。后发展了 CF 钢,号称无裂纹钢,应该是低裂纹钢,近一步降低 C、S、P 含量和加入多种微量元素,强度级别比 16Mnq 和 14MnNbq 高,而 C_{eq} 与之相近,因而焊接性能好。例如比较 CF80 钢与 14MnNbq,其 SHCCT 曲线基本相似,仅临界冷却时间有一定差异,由于 WCF-80 tm 长,易产生马氏体,但马氏体含 C 很低,为低 C 板条马氏体,故硬度低,韧性好,冷裂倾向也小。

(1)焊接材料的匹配对低温韧性的影响。

焊接材料的选择及其与母材的匹配是提高焊接接头韧性的关键。如图 3a 所示,各种不同匹配其 -40°C 的韧性值及由 47 J 韧性值的温度有很大不

专题讨论
——
桥梁焊接

表 1 日港大桥和中国孙口黄河桥、芜湖桥工程的钢材及焊接接头的韧性情况^[1]

工程名称	用钢牌号	母材强度级别		\sqrt{E}/J	$\sqrt{T_E}/^{\circ}C$	焊接方法	焊缝韧性实际水平/ $^{\circ}C$			
		σ_y/MPa	σ_s/MPa				$\sqrt{E}(47 J)$	$\sqrt{T_E}$	$\sqrt{T_s}$	
日港大桥	SM490C	490~608	≥ 294	47(0 $^{\circ}C$)	-10	焊条电弧焊	-50~-90	-37~-67	-53~81	
	SM570	572~715	≥ 431	47(-5 $^{\circ}C$)	-20	埋弧	3~-47	-6~-94	-6~-84	
	SM690	686~833	≥ 617	47(-10 $^{\circ}C$)	-35	富氩	-40~-100	-17~-91	-33~-85	
	SM780	784~921	≥ 686	47(-15 $^{\circ}C$)	-35	—	—	—	—	
中孙口桥	SM490C	516~562	476~502	47(-40 $^{\circ}C$)	埋弧焊接接头韧性 \sqrt{E}/J					
		实际 502~573	实际 382~502		对接-45 $^{\circ}C$ 接头韧性	W37~117, F28~86, H154~261				
					T接-35 $^{\circ}C$ 接头韧性	W50~81, —, H125~254				
中芜湖桥	14MnNbq	成分标准/实物平均		性能标准/实物平均			几种接头各区韧性 $\sqrt{E}/J(-30^{\circ}C)$			
				板厚 δ/mm	σ_y/MPa	σ_s/MPa	$\sqrt{E} \geq ^{\circ}C/J$	对接	T接	角接
		$w(C)=0.11\% \sim 0.17\% / 0.145\%$	6~18	530~685/551	$\geq 370/415$	$\geq 40/192$	—	—	—	
		$w(Si) \leq 0.50\% / 0.259\%$	17~25	510~665/528	$\geq 355/386$	$\geq 40/214$	W107 \pm 29	W92 \pm 31	W85 \pm 24	
		$w(Mn)=1.2\% \sim 1.6\% / 1.45\%$	26~36	500~545/539	$\geq 350/404$	$\geq 40/219$	F105 \pm 30	F68 \pm 24	F97 \pm 25	
		$w(S) \leq 0.010\% / 0.0068\%$	37~60	490~625/535	$\geq 340/382$	$\geq 40/192$	H126 \pm 44	H66 \pm 20	H105 \pm 40	
		$w(P) \leq 0.020\% / 0.0154\%$	24 mm+24 mm	对接 \sqrt{E}/J : -60 $^{\circ}C$ 时 W51, F27, H44; -40 $^{\circ}C$ 时 W58, F48, H84; $\sqrt{T_E} \leq -30^{\circ}C$						
$w(Nb)=0.015\% \sim 0.035\% / 0.0261\%$	44 mm+50 mm	对接 \sqrt{E}/J : -60 $^{\circ}C$ 时 W41, F41, H64; -40 $^{\circ}C$ 时 W57, F86, H98; $\sqrt{T_E} \leq -30^{\circ}C$								

同。以日本 SM490C+H08C(含微量 B、Ti)+SJ101(碱性烧结焊剂)为最好,以国产 16MnCu+H08MnA(含 Mn)+HJ431(酸性熔炼焊剂)为最差。

(2)焊接接头各区的低温韧性比较。采用孙口桥焊接材料匹配和焊接参数焊成的焊接接头各区韧脆转变曲线如图 3b 所示。焊接接头各区的低温韧性明显低于母材。

(3)焊接方法的影响。焊接方法对低温韧性的影响如图 3c 所示。日产 62CF 钢低线能量焊条电弧焊

明显高于高线能量的埋弧焊,焊条电弧焊的焊缝与熔合区韧性接近,埋弧焊差异较大;国产 15MnVNq 钢接头比 62CF 钢线能量低的焊接接头韧性仍较低,特别是焊缝低温韧性更低。

3 焊接接头材质性能不均质性的分析和控制

3.1 焊接接头材质性能不均质性

焊接接头由焊缝 W、熔合区 F、热影响区 H 和

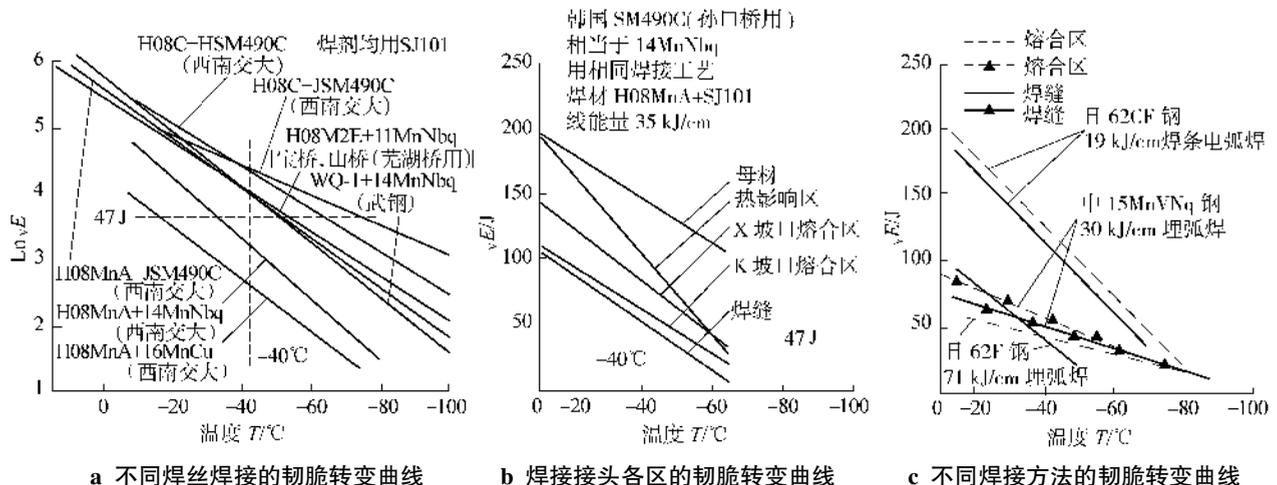


图 3 焊接材料匹配和焊接方法对韧性的影响^[1]

专题讨论——桥梁焊接

母材 B 组成,各区的组织性能有不均质性,在未来发展调质高强钢的应用中将更为突出,必然会出现焊缝和热影响区的硬化区和软化区,过去只能用韦氏硬度测出微区硬度分布,只能由硬度分布粗略看出强度分布.对用于孙口黄河桥的韩国产 SM490C (相当于 14MnNbq),H10Mn2 焊丝和 H08C 焊丝(含微合金)配 SJ101 焊剂、X 坡口、常用焊接参数进行

埋弧焊,作出等匹配和高匹配几种焊接接头室温和-45℃微区性能分布,如图 4 所示.微型剪切试验法是用一个加工成 1 mm×1 mm 小型跨 WFHB 多区试件逐点剪切,从而求出代表强度的剪切强度 τ_b 、剪切屈服强度 τ_s ,代表塑性的剪切压入率 α 和代表韧性的剪切功 W 沿焊接接头各区分布.由图 4 可看出:

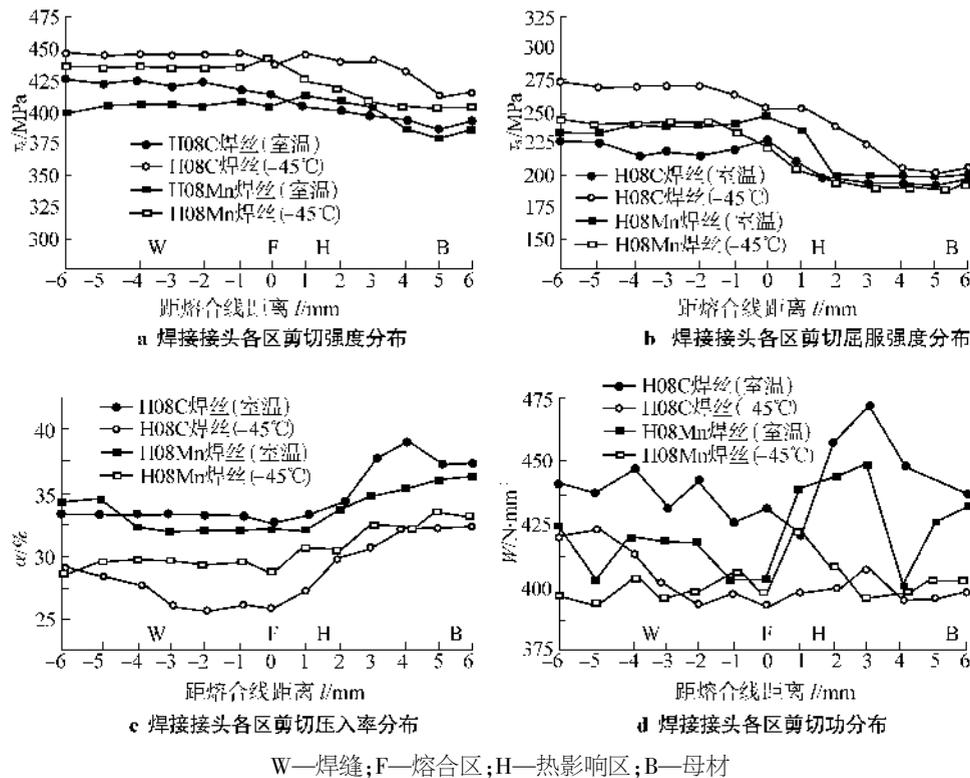


图 4 孙口桥用韩国 SM490C 钢焊接接头的微剪性能分布^①

(1)焊接接头性能的不均质性,特别是塑性和韧性的不均质性较为突出.从匹配看,H10Mn2 焊丝焊接接近等匹配,H08C 焊丝焊接为高匹配.

(2)焊接接头塑性、韧性以熔合区附近最低,热影响区的正火区附近最高,其中韧性波动较大;而强度变化较为平缓,无突变.

(3)各区性能都是低温提高强度,但屈服强度提高较少.各区性能都是低温降低塑性和韧性.高匹配接头比等匹配接头要明显一些.

(4)几种指标中以韧性指标值波动较大,其实焊接接头的冲击试验值波动也较大,还要说明的是微型剪切韧性是静力韧性,与冲击韧性的加载方式有很大不同.

3.2 母材和焊接接头各区的韧脆转变曲线

如在某区取试件作系列温度微型剪切试验,试件取样与前有所不同,是在相应焊接接头各区的同区取多个试样,在不同温度作微型剪切,就可作出各指标的韧脆转变曲线.对孙口桥所用几种母材和韩国产 SM490C 用微合金化焊丝 H08C 以及工厂生产所用的焊丝 H10Mn2 配烧碱性焊剂焊接的焊接接头韧脆转变曲线如图 5 所示.

(1)孙口桥用几种母材性能比较见图 5a.由图看出,各种钢随温度下降都呈现强度升高和塑性、韧性下降,日本产 SM490C 强度最高,同时高温区塑性、韧性高,但随温度下降较快,说明对温度敏感性大.

(2)韩国产 SM490C 采用 H08C 和 H10Mn2 焊接,H08C 焊接接头粗晶区和焊缝的强度最高,低温区韧性也最高,同时也高于母材.H10Mn2 焊接焊缝及

^①西南交通大学,为《焊接接头强度匹配》《桥梁钢宽板试验研究》等项目鉴定提出的研究报告摘编.



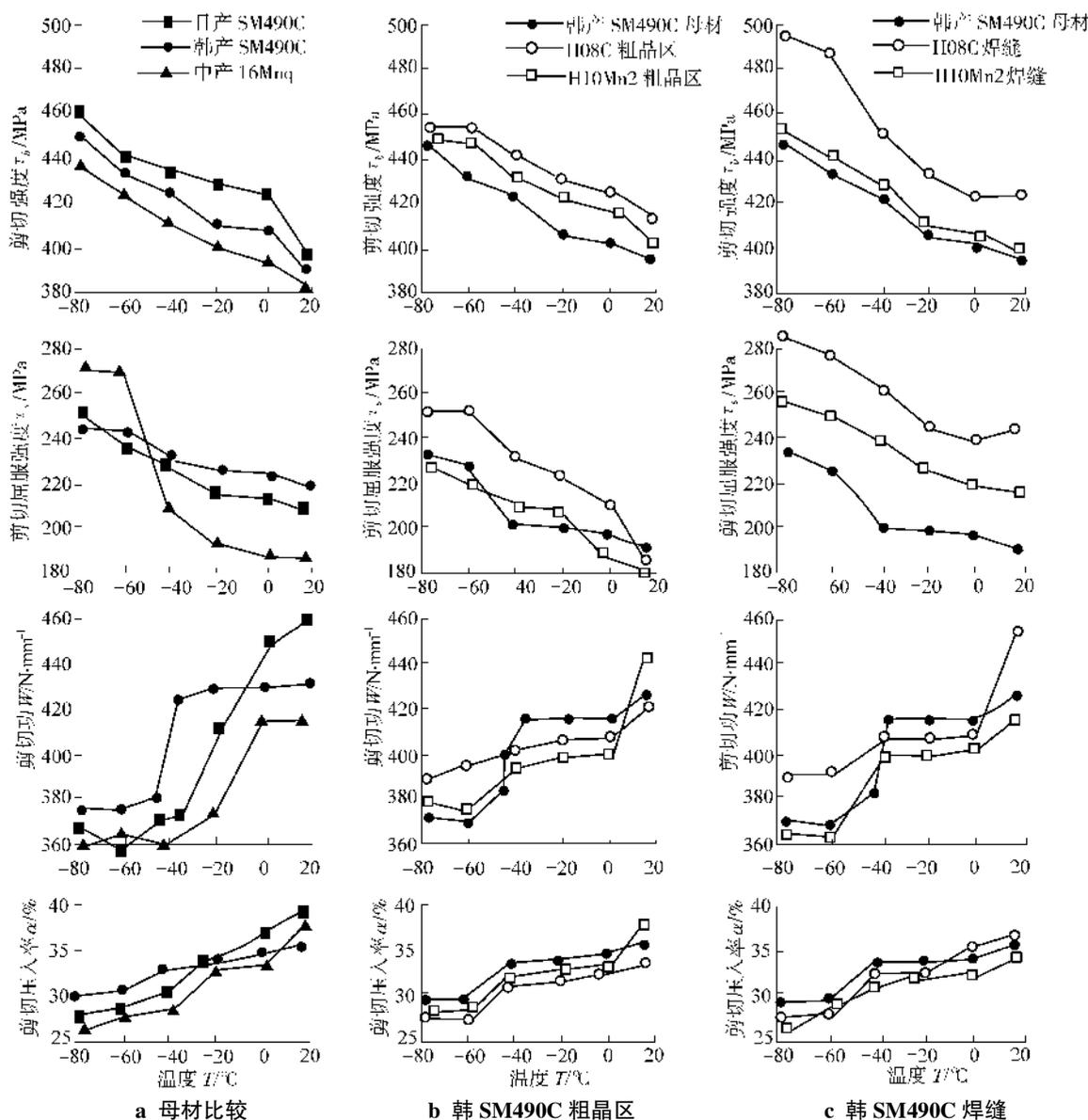


图 5 由微型剪切试验作出的韧脆转变曲线^①

粗晶区低温区强韧性接近母材,这说明了焊丝微合金化在提高粗晶区和焊缝的强度和韧性方面的作用。

3.3 焊接工艺对微区性能的影响

韩国产 SM490C 采用 H08C 焊接接头作室温微型剪切试验以研究焊接工艺对微区性能的影响,以 6 组试件比较 3 种工艺微区性能的影响,其试验结果如图 6 所示。

(1)由图 6a 可看出,先后焊面的影响。由于后焊面对先焊的再次加热,使先焊面韧性和屈服强度有所降低,这是由于含 Ni(或 Cr、V)的钢有再热脆化倾向。

(2)由图 6b 可看出,X 坡口强度高而韧性低,这是由于两者熔合比不同使成分不同所致。(3)由图 6c 可看出,中规范韧性高于大规范,这是由于两者热循环不同使组织不同所致。

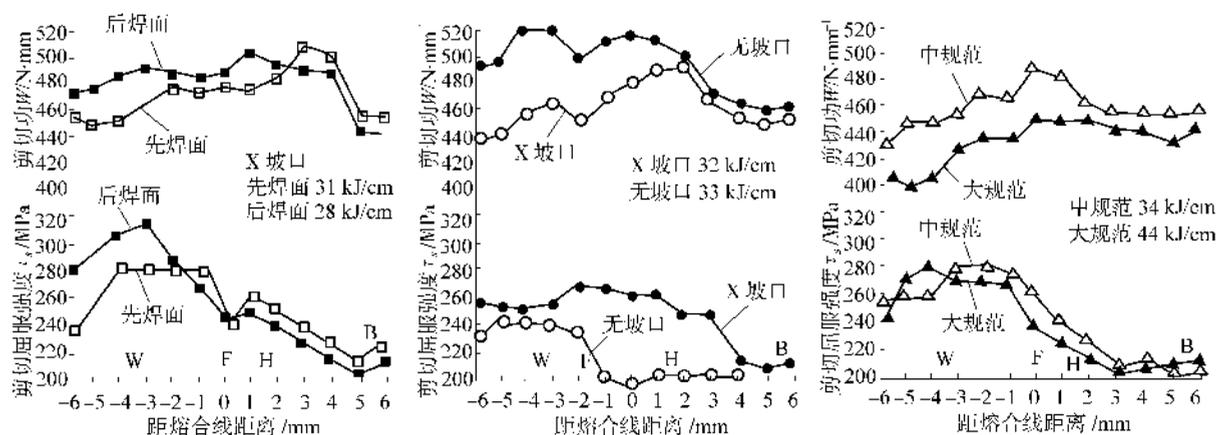
微型剪切试验可以很好地作出焊接接头微区性能分布,能够用此分析各种因素对微区性能的影响及其变化规律。

4 结构的应力集中和材料的应力集中敏感性

4.1 结构的应力集中与断裂过程

结构的应力集中就是在受力时有在缺欠或结

^①西南交通大学,为《焊接接头强度匹配》《桥梁钢宽板试验研究》等项目鉴定提出的研究报告摘编。



W—焊缝区;F—熔合区;H—热影响区;B—母材
 a 不同焊接层面的微区性能分布 b 不同坡口接头的微区性能分布 c 不同规范焊接的微区性能分布
 图 6 焊接工艺对微区性能的影响^①

构形状突变处由传力方向突变而产生的应力集中,其应力峰值与平均应力之比为应力集中系数 K_t , 缺欠的长轴垂直于受力方向,尖端越尖锐, K_t 越大。当应力峰值达到该区材料屈服强度时材料塑性变形,达到塑性极限时即启裂、扩展,可能由于应力松弛而止裂,也可能扩展到一临界尺寸而断裂。焊接结构发生断裂,从宏观上讲,大多起源于焊接缺陷或结构不连续处;即使没有焊接宏观缺陷。从微观上讲,由于微观缺陷处的应力集中产生局部滑移也会萌生裂纹而形成裂源,而微观缺陷在材料中是难以避免的。微观裂纹的萌生和扩展阻力的大小就构成了材料的应力集中敏感性。

4.2 焊接接头的静载应力集中敏感性

在桥梁研究中,除进行了母材和焊缝的标准拉伸试验外,还进行了切口拉伸试验。

(1)试件制作:试验采用 H08MnA 焊丝、含微量元素强化的 H08C 焊丝配 SJ101 烧结焊剂埋弧焊 14MnNbq 钢(武钢生产),50 mm 厚板 X 坡口对接,加工成 440 mm×22 mm×45 mm 的试件,在厚度方向开双边 $r=0.5$ mm 的线切割切口于焊缝、熔合区和母材,受力净截面 28 mm×22 mm;无切口试件保持为 144 mm 长,受力净截面 28 mm×22 mm 的均匀截面的矩形光滑拉伸试件;另外还加工了两种焊缝和母材的常规标准试件以作比较。

(2)试验方法:在 1 000 kN 试验机上进行试验,记录应力应变图,用 100 mm 和 8.5 mm 标距的钳式引伸计和 1 mm×1 mm 的应变片来测量各种变形参

^①西南交通大学,为《焊接接头强度匹配》《桥梁钢宽板试验研究》等项目鉴定提出的研究报告摘编。

量,用声发射来监测启裂点。由测试结果得出各种试件的强度、塑性和韧性如表 2 所示。

(3)试验结果分析。

a. 两种接头的无切口试件的接头强度、塑性和韧性十分接近,都断于母材,实际上是代表了母材性能,也说明 H08MnA 这样的低匹配也能达到等强要求。

b. 比较两种接头的切口试件的接头强度、塑性和韧性,除熔合区(实际上为跨三区) e_b 略低外,H08C 的焊缝各项性能全面高于 H08MnA 的焊缝,说明微合金化的焊缝,虽是高匹配,但全面提高了焊接接头质量。

c. 同样静截面开切口焊接接头(断裂在母材可视为母材性能)与无切口光滑试件相比,强度指标 $\sigma_{0.2}$ 和 σ_b 提高,但实际断裂强度则低得多;而塑性、韧性指标 $\delta \psi$ 和 α 大为降低,这代表应力集中对材料性能的影响,即材料的应力集中敏感性,说明有应力集中的试件断裂形式的变化,验证了由于局部应力和塑性应变的集中形成了塑性变形很小和扩展及断裂功很少的断裂,使真实断裂强度大大降低。

d. 比较切口开在焊接接头不同位置的试件和母材,各项性能指标差异不大,证明焊缝及接头与母材的应力集中敏感性相近。

e. 由小标距和大标距测试结果表明, $\sigma_{0.2}$ 较为接近,但 δ 差异很大,因为小标距测试结果接近局部区域的变形,说明由应力集中引起的屈服区应变集中是启裂—扩展和断裂的根源。

f. 大试件与标准小试件相比,强度高于小试件,



表 2 武钢 14MnNbq 钢两种匹配焊接接头的试验结果^①

试件类型 匹配类别	切口在焊缝		切口在熔合区		无切口试件		切口 在母材	标准无切口试件		
	高	低	高	低	高	低		高	低	母材
焊丝牌号	H08C	08MnA	H08C	H08MnA	H08C	H08MnA	—	H08C	H08MnA	母材
匹配比	1.16	0.86	1.16	0.86	1.16	0.86	1.00	1.16	0.86	1.00
$\sigma_{0.2}$ 100 mm 标距强度/MPa	530.00	515.00	505.00	495.00	330.00	325.00	445.00	525.00	390.00	400.00
$\sigma_{0.2}$ 8.5 mm 标距强度/MPa	520.00	500.00	480.00	440.00	415.00	415.00	400.00	—	—	—
σ_c 启裂强度/MPa	560.00	505.00	525.00	485.00	505.00	435.00	435.00	—	—	—
σ_b 断裂强度/MPa	705.00	640.00	670.00	655.00	515.00	520.00	615.00	625.00	465.00	540.00
S_b 真实断裂强度/MPa	710.00	680.00	700.00	605.00	1 200.00	1 170.00	690.00	—	—	—
e_b 真实均匀塑性/%(塑性)	6.00	5.00	4.60	4.80	13.00	10.00	4.40	—	—	—
δ 100 mm 标距/%(塑性)	9.50	7.00	9.00	8.50	26.00	28.00	7.50	26.00	29.00	29.00
δ 8.5 标距/%(塑性)	90.00	86.00	100.00	89.00	—	—	93.00	—	—	—
φ /%(塑性)	30.00	24.50	47.00	41.00	72.00	72.00	40.00	69.00	70.00	—
δ 张开位移/mm(韧性)	0.26	0.20	0.23	0.21	—	—	0.19	—	—	—
$\sigma_{0.2}/\sigma_b$ (韧性)	0.75	0.81	0.75	0.76	0.64	0.62	0.72	0.84	0.84	0.74
α /MJ·m ⁻² (韧性)	55.50	41.00	51.90	50.60	177.00	186.00	43.00	—	—	—

延伸率和屈强比相近。

g. 值得提出的是带切口试件中,两种匹配的焊缝的静力韧性 α 和启裂韧性 δ (裂纹张开位移)都高于母材,其中 H08C 焊缝高于 H08MnA 焊缝。

h. 此结果可类比分析一些表面裂纹类缺欠,如焊接表面裂纹、咬边和根部未焊透等。

(4)中日韩 14MnNbq 同匹配焊接接头的试验结果对比。

国产 14MnNbq 钢(用于芜湖桥)与日本、韩国产 SM490C 钢实际上都是 14MnNb 钢,但性能有所不同。对其进行缺口拉伸试验,现取同匹配焊接接头(H08MnA+SJ101 同规范焊接)的试验结果比较如表 3 所示。由表 3 可知:

a. 母材无切口试件强度日韩产钢相同,中产钢较低;中产钢屈强比较低,断面收缩率较高,其他与日韩差异不大。

b. 切口在母材试件强度日韩产钢相近,中产钢较低;其他与日韩差异不大。

c. 切口在母材试件与无切口试件相比,强度和屈强比增加不太大,但塑性、韧性降低较多。

d. 切口在焊缝和熔合区与切口在母材相比,其他性能差异不大,但断裂韧性指标 δ ,要高于母材。

e. 几种材料相比,日产材料总体较好,中韩相近。

^①西南交通大学,为《焊接接头强度匹配》《桥梁钢宽板试验研究》等项目鉴定提出的研究报告摘编。

4.3 焊接接头的疲劳应力集中敏感性

在桥梁研究中,同时作了不同匹配焊接接头切口平板纯弯曲疲劳试验,光滑试件尺寸 39 mm(厚)×22 mm(宽),在厚度方向中部 135 mm 处两面对称加工圆弧过渡到 25 mm×22 mm 为受试截面;切口试件尺寸相同,受试截面仍为 25 mm×22 mm,以 25 mm 两端为边界各钻一直径 φ 2 mm 小孔并开切口到板边,切口分别开在焊缝、熔合区和母材。试验方法采用 Locati 法逐级加载直至断裂,采用累积损伤原理求出 σ_{-1} ,对切口试件取三个试件的平均值为 σ_{-1} ,其试验结果如表 4 所示。由表可知:

a. 比较光滑母材试件 σ_{-1} ,以韩国产为高,中国产次之,日本产最低。

b. 比较切口母材试件 σ_{-1} ,均低于光滑母材试件。

c. 切口焊接接头试件普遍高于母材,说明焊接接头的疲劳切口敏感性低于母材。

d. 比较中 14MnNbq 两种匹配,H08C 较 H08MnA 的 σ_{-1} 高,与母材 σ_{-1} 比值也高。

4.4 应力集中对强度的影响

把各区切口试件与光滑试件试验结果的比值汇总如表 5 所示,由此来比较其应力集中敏感性。 $W_{切}/B_{光}$ 、 $B_{切}/B_{光}$ 在静载时差异不大,但在疲劳时有较大差异,应力集中敏感性普遍高于静载,尤以日本产最高。 $H_{切}/B_{光}$ 在静载时波动大。



表 3 中日韩 14MnNbq(SM490C)钢与匹配焊接接头的试验结果对比^①

试件类型	切口在焊缝			切口在熔合区			切口在母材			无切口试件		
	中	日	韩	中	日	韩	中	日	韩	中	日	韩
$\sigma_{0.2}$ 100 mm 标距强度/MPa	515.00	560.00	550.00	495.00	555.00	515.00	445.00	495.00	490.00	325.00	385.00	385.00
$\sigma_{0.2}$ 8.5 mm 标距强度/MPa	500.00	390.00	420.00	440.00	376.00	—	400.00	355.00	360.00	415.00	413.00	420.00
σ_c 启裂强度/MPa	505.00	475.00	455.00	485.00	482.00	435.00	435.00	430.00	420.00	435.00	435.00	455.00
σ_b 断裂强度/MPa	640.00	650.00	655.00	655.00	650.00	660.00	615.00	615.00	650.00	520.00	525.00	560.00
S_b 真实断裂强度/MPa	680.00	745.00	730.00	605.00	890.00	780.00	690.00	760.00	775.00	1 170.00	1 255.00	1 240.00
δ 100 mm 标距/(%) (塑性)	7.00	11.00	8.00	8.50	9.50	8.00	7.50	10.00	9.00	26.00	29.00	27.00
δ 8.5 标距/(%) (塑性)	86.00	102.00	78.00	89.00	95.00	63.00	93.00	92.00	85.00	—	9.00	5.00
φ /(%) (塑性)	24.50	26.00	25.00	41.00	31.00	22.00	40.00	32.00	34.00	72.00	69.00	64.00
δ_1 张开位移/mm (韧性)	0.20	0.21	0.12	0.21	0.19	—	0.13	0.14	0.13	—	—	—
$\sigma_{0.2}/\sigma_b$ (韧性)	0.75	0.86	0.84	0.76	0.85	0.80	0.75	0.80	0.75	0.62	0.73	0.69
α /MJ·m ⁻² (韧性)	55.50	68.00	49.00	50.60	65.70	49.90	62.50	62.50	54.30	186.00	209.00	194.00

说明:焊丝+焊剂均为 H08MnA+SJ101。

表 4 几种焊接接头的平面弯曲疲劳试验结果比较^①

匹配组合	中 14MnNbq+H08C			中 14MnNbq+H08MnA			日 SH490C+H08MnA				韩 SH490C+H08MnA			
切口位置	W	B	光	W	B	光	W	H	B	光	W	H	B	光
断裂位置	W	B	B	W	B	B	W	H	B	B	W	H	B	B
σ_{-1} 启/MPa	—	—	—	—	—	—	81	小	小	217	118	114	106	292
σ_{-1} /MPa	131	112	275	118	114	265	127	103	67	217	160	145	121	292

表 5 各区切口试件与光滑试件试验结果的比值汇总比较^①

匹配组合	中 14MnNbq+H08MnA+SJ101			日 SH490C+H08MnA+SJ101			韩 SH490C+H08MnA+SJ101			中 14MnNbq+H08C+SJ101			日 SH490C+H10Mn2+SJ101			韩 SH490C+H10Mn2+SJ101		
	W	B	光	W	B	光	W	B	光	W	H	B	光	W	H	B	光	
静载	0.58	0.64	0.62	0.59	0.71	0.61	0.59	0.65	0.63	0.59	0.58	0.61	0.61	0.66	0.59	0.61	0.52	0.61
疲劳	0.46	—	0.43	0.59	0.47	0.31	0.55	0.50	0.41	0.48	—	0.41	0.54	0.35	0.29	0.54	—	0.41

5 焊接残余应力及其控制

5.1 焊接残余应力的分布特征

以西南交通大学在一桥梁厂的工形杆件为例进行分析。结构示意图如图 7a 所示,由经过火焰精密切割的两块盖板和一块腹板组焊而成,组焊前后实测的纵向精密切割和焊接残余应力的分布如图 7b、图 7c 所示。由图可知,两者残余应力分布规律相同,都是在拉应力集中的焊缝和热影响区,应力达到屈服极限 σ_s ,盖板的峰值区在中部。组焊后的实测应力实际上是叠加后的最后残余应力。与此同时还会产生横向残余应力,也是有拉有压,但分布比较分散而且峰值较低,其对强度的影响远小于纵向残余应力。残余应力的分布特征及数值与焊接方法

及规范、组装焊接次序、结构形式和尺寸等有关。对复杂多焊缝交叉结构的分析较难。

5.2 焊接残余应力对强度的影响

焊接残余应力峰值与工作应力同向相加如在某区达到 σ_s 就会产生局部塑性变形,如果该区塑性、韧性足够,卸载后会使其残余应力重新分布而降低峰值,过载或震动去除残余应力就基于此原理;但如果该区塑性、韧性不足,可能会在此区启裂和扩展,若遇到裂纹扩展阻力大的组织或应力松弛就可能止裂,以后继续扩展—止裂—再扩展直至疲劳断裂;如果遇到低温或冲击和材料的塑性韧性很差时,则可能启裂后高速扩展而形成瞬间脆断。因此焊接残余应力对强度的影响与峰值大小和峰值区材料的组织性能有很大关系。焊接接头既是组织性能的不均质区,有时甚至可能成为恶化区,又是残余拉应

①西南交通大学,为《焊接接头强度匹配》《桥梁钢宽板试验研究》等项目鉴定提出的研究报告摘编。



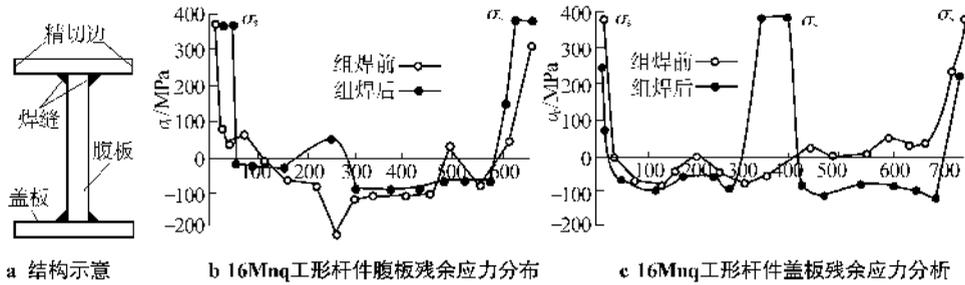


图 7 焊接工形杆件的纵向切割和焊接残余应力分布^①

力的峰值区,还可能是接头形式或焊接缺欠引起的应力集中区,所以焊接接头的组织性能、应力集中和残余应力是决定焊接结构安全的关键,因此必须从选材、结构及接头设计、制造及焊接工艺上予以解决。

5.3 焊接残余应力对断裂韧性的影响

对 16Mnq 钢(32 mm 厚板)和 15MnVNq 钢(56 mm 厚板)进行焊接残余应力测试,其规律与图 7 相同,16Mnq 钢焊缝区的峰值拉应力达到 σ_s ,15MnVNq 钢焊缝区的峰值拉应力较低,只有 $0.8\sigma_s$,但两者横向残余应力值都较高。由于设备的限制,只进行了

160 mm 宽的小宽板的常温和 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 低温试验,得出不同焊接残余应力分布的 Φ (即 $\delta/2\pi a\epsilon_s$)- ϵ_n/ϵ_s 曲线,试验结果表明:对 16Mnq 钢来说,室温时焊接残余应力对断裂韧性影响不大,但在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 时有较大影响;对 15MnVNq 钢来说,高焊接残余应力对断裂韧性也有较大影响。

5.4 焊接接头的后处理

焊接接头的后处理能提高疲劳强度,各种方法的效果如图 8 所示。

由图可知,各种焊后处理都能显著提高疲劳强度,其方法是加工或打磨以减少应力集中,过载减

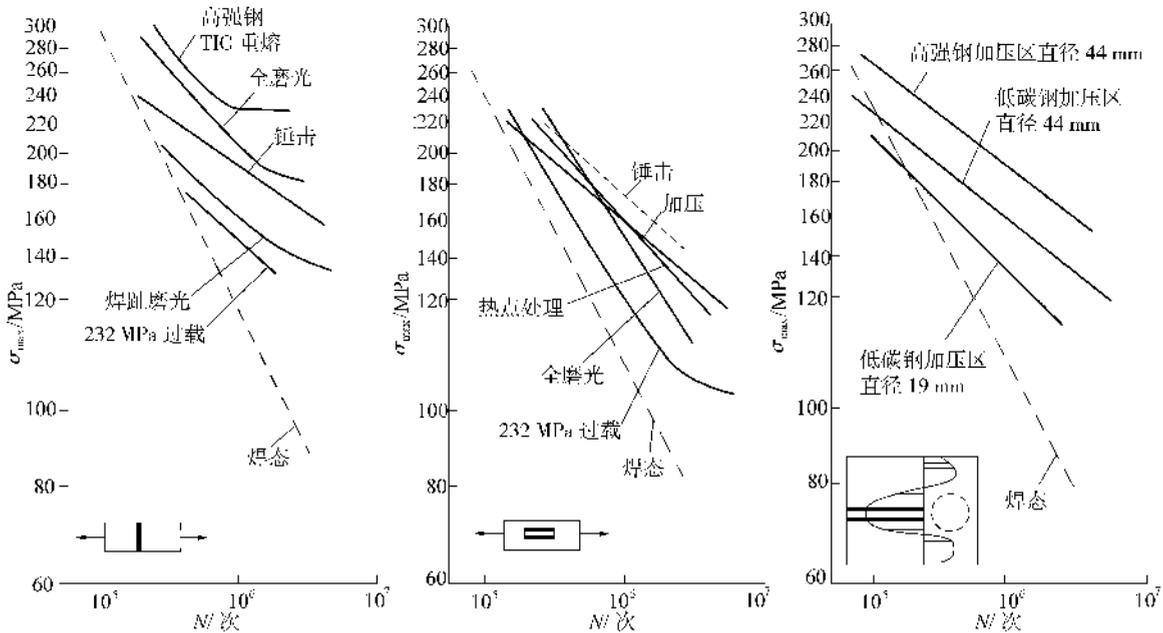


图 8 焊接接头的后处理提高疲劳强度比较^[1]

少应力峰值,喷丸加压或锤击造成表层压应力,根据各种构造,效果有所不同,对接以全磨光加强高和 TIG 重熔为最优,纵向加筋焊缝则以锤击和加压为最优。高强度钢焊接的焊后处理效果优于低碳钢。最

早去应力的方法是热处理(又叫热处理时效),这种方法耗能耗时,投资大,不能在大型结构上应用;后发展了震动时效,效果与热时效不相上下,但节能省时,投资小,能在大型结构上应用。近期又发展了豪克能时效,其局部处理的效果更优于震动时效,震动时效是对结构整体处理以削减焊接

①西南交通大学,为《焊接接头强度匹配》《桥梁钢宽板试验研究》等项目鉴定提出的研究报告摘编。